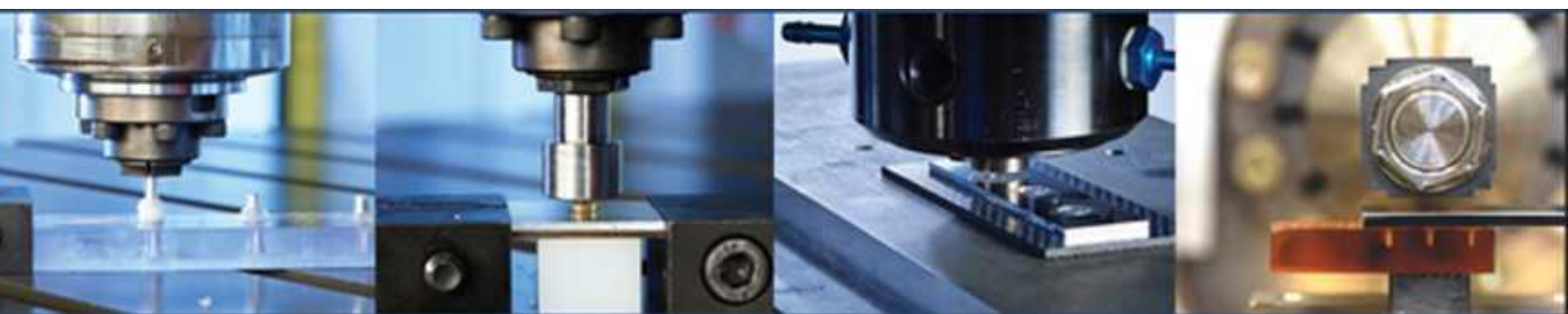


Под редакцией  
Сержио Т. Аманцио  
Фильхо Лучиан-Аттила Блага

**Присоединение из полимера**  
**Металлические гибридные структуры:**  
**Принципы и сферы применения**



WILEY

Впервые опубликовано в 2018

© 2018 John Wiley & Sons, Inc.

Все права защищены. Настоящая публикация не может воспроизводиться, храниться в поисковой системе, либо передаваться частично или полностью в форме электронного, механического воспроизведения, фотокопирования, выполнения записей, сканирования и другими способами воспроизведения, за исключением тех случаев, предусмотренных законом. Рекомендации к получению разрешения для повторного использования материала на основании этого права приведены по ссылке: <http://www.wiley.com/go/permissions>.

Права Sergio T. Amancio-Filho и Lucian-Attila Blaga подлежащие реализации при определении указанных лиц в качестве редакторов этой работы, заявлены в соответствии с законом

Зарегистрированный офис

JohnWiley & Sons, Inc., 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA

Редакция издательства

111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA

Подробную информацию о редакциях, осуществляющих деятельность в разных странах мира, услугах в сфере обслуживания клиентов, а также дополнительную информацию о продуктах издательства «Wiley», вы можете найти на вебсайте: [www.wiley.com](http://www.wiley.com).

Издательство «Wiley» также публикует книги в различных электронных и печатных форматах на заказ. Некоторые материалы, содержащиеся в стандартной печатной версии книги, могут быть не включены в другие форматы.

Предел ответственности и отказ от гарантии: в связи с непрерывно продолжающимися исследованиями, модификациями оборудования, изменениями, вносимыми в государственные нормы и регламенты, а также на фоне постоянного потока информации о применении экспериментальных реагентов, оборудования и устройств, читателю настоятельно рекомендуется принимать к своему сведению информацию, представленную на вкладыше в упаковке или в инструкциях по применению химических веществ, единиц оборудования, реагентов, также другие приведенные сведения, и оценивать содержащуюся в инструкциях информацию или показаниях к применению на предмет изменений, наличия дополненных предупреждений или мер предосторожности. Приложив свои максимальные усилия для составления этой книги, издательство и автор не предоставляют каких-либо заявлений или гарантий в отношении точности или полноты содержания данной книги и, в частности, отказываются от всех гарантий, включая, среди прочего, все подразумеваемые гарантии пригодности для определенной цели. Письменные материалы продаж, торговые представители или рекламные заявления в отношении данной работы не создают или не продлевают какие-либо гарантии. Факт того, что какое-либо учреждение или веб-сайт, или продукт упоминаются в этой книге, предоставляя цитату и(или) возможный источник получения дополнительной информации, не означает, что издательство или автор рекламируют информацию или услуги организации, вебсайт или продукт, которую может предоставить учреждение или веб-сайт, либо рекомендации, которые могут быть предоставлены ими. Продажа этой книги осуществляется с явным представлением того, что издательство не вовлечено в процесс оказания профессиональных услуг. Рекомендации и стратегии, содержащиеся в этой книге, могут не подходить к вашей ситуации. При необходимости вам следует обратиться к специалисту. Кроме этого, читателю следует знать, что интернет-сайты, перечисленные в данной книге, могли измениться, либо прекратить свою активность в промежуток написания и до момента прочтения книги. Издательство и автор не несут ответственности за упущенную прибыль или другие коммерческие убытки, включая, среди прочего, особые, случайные, последующие и другие убытки

Использована библиографическая запись Библиотеки Конгресса США:

ISBN: 9781118177631

Дизайн обложки Wiley

Иллюстрация обложки: При участии Кристиан Шмид & Eduardo Etzberger Feistauer

Шрифт WarnockPro, размер кегля 10/12ptWarnockPro by SPi Global, Chennai, India (Индия, Ченнаи) Напечатано в Соединенных Штатах Америки

1 0 9 8 7 6 5 4 3 2 1

# Оглавление

## Список авторов хiii

## Предисловие хvii

|                                                                                   |                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Оглавление .....                                                                  | 3                                |
| Список авторов .....                                                              | 9                                |
| Предисловие .....                                                                 | 12                               |
| Часть I Процессы соединения, основанные на силе адгезионного взаимодействия ..... | 16                               |
| 1 Принципы выполнения адгезионного связывания .....                               | 177                              |
| Введение .....                                                                    | 177                              |
| Основные положения .....                                                          | 188                              |
| 1.3 Преимущества и недостатки адгезионного связывания .....                       | 199                              |
| 1.4 Влияние подготовки поверхности и факторов воздействия среды .....             | 20                               |
| 1.5 Адгезионные свойства .....                                                    | 222                              |
| 1.6 Изготовление швов .....                                                       | 255                              |
| 1.6.1 Подготовка адгерентов .....                                                 | 255                              |
| 1.6.2 Нанесение клеящего состава .....                                            | 266                              |
| 1.6.3 Сборка соединения .....                                                     | 266                              |
| 1.6.4 Отверждение .....                                                           | 277                              |
| 1.7 Разработка соединения .....                                                   | 288                              |
| 1.7.1 Виды повреждений (отказа) .....                                             | 288                              |
| 1.7.2 Анализ адгезивно скленных соединений .....                                  | 288                              |
| 1.7.2.1 Аналитические методы .....                                                | Ошибка! Закладка не определена.8 |
| 1.7.2.2 Метод конечного элемента .....                                            | 30                               |
| 1.8 Последние разработки .....                                                    | 322                              |
| 1.9 Выводы .....                                                                  | 333                              |
| 2 Адгезионное связывание полимерных композитов с легкими металлами .....          | 366                              |
| 2.1 Введение .....                                                                | 366                              |
| 2.2 Характеристики и применения гибридного связывания .....                       | 377                              |
| 2.3 Экспериментальная оценка гибридных конструкций .....                          | 411                              |
| 2.3.1 Подготовка адгерентов .....                                                 | 411                              |
| 2.3.2 Применение адгезива .....                                                   | 422                              |
| 2.3.3 Тестирование образца .....                                                  | 422                              |
| 2.3.4 Экспериментальные работы .....                                              | 433                              |
| 2.4 Предсказательные методы для гибридных конструкций .....                       | 466                              |
| 2.4.1 Аналитический .....                                                         | 488                              |
| 2.4.2 Цифровой .....                                                              | 499                              |
| 2.4.2.1 Непрерывное моделирование .....                                           | 50                               |
| 2.4.2.2 Механика повреждения .....                                                | 48                               |
| 2.5 Выводы .....                                                                  | 57                               |
| 3 Фрикционные точечные соединения (FSpJ) .....                                    | 61                               |
| 3.1 Введение .....                                                                | 611                              |
| 3.2 Принципы выполнения FSpJ соединений .....                                     | 622                              |
| 3.2.1 Инструмент для выполнения FSpJ соединений .....                             | 622                              |
| 3.2.2 Оборудование для выполнения FSpJ соединений .....                           | 622                              |
| 3.2.3 Процесс выполнения FSpJ соединения .....                                    | 644                              |
| 3.2.4 Механизмы связывания .....                                                  | 688                              |
| 3.2.5 Технологические параметры .....                                             | 70                               |
| 3.3 Выработка тепла во время выполнения FSpJ соединений .....                     | 73                               |
| 3.4 Микроструктурные зоны FSpJ соединений .....                                   | 733                              |
| 3.5 Механические свойства FSpJ соединений .....                                   | 766                              |
| 3.5.1 Локальные механические свойства .....                                       | 766                              |

|                                                                                                                                |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 3.5.1.1 Металл (AA2024).....                                                                                                   | 766   |
| 3.5.1.2 Композит (полифениленсульфид наполненный коротким стекловолокном PPS).....                                             | 77    |
| 3.5.2 Квасистатические общие механические свойства .....                                                                       | 788   |
| 3.5.2.1 Влияние предварительной обработки поверхности.....                                                                     | 78    |
| 3.5.2.2 Влияние геометрических размеров соединения .....                                                                       | 79    |
| 3.5.3 Циклические общие механические свойства .....                                                                            | 82    |
| 3.6 Сравнение квазистатических механических характеристик FSp и склеенных соединений<br>современного технического уровня ..... | 84    |
| 3.7 Несовершенства FSpJ соединений.....                                                                                        | 84    |
| 3.8 Преимущества, ограничения, и потенциальные применения .....                                                                | 87    |
| 3.9 Заключительные примечания .....                                                                                            | 89    |
| Литераура .....                                                                                                                | 89    |
| 4. Индукционная сварка металлокомпозитных гибридных конструкций .....                                                          | 93    |
| 4.1 Введение .....                                                                                                             | 93    |
| 4.2 Описание принципов метода соединения .....                                                                                 | 943   |
| 4.2.1 Обзор процесса .....                                                                                                     | 943   |
| 4.2.2 Процесс нагревания.....                                                                                                  | 954   |
| 4.2.2.1 Геометрия индуктора и магнитное поле.....                                                                              | 976   |
| 4.2.2.2 Поверхностный эффект .....                                                                                             | 98    |
| 4.2.3 Теория адгезии и влияние поверхности .....                                                                               | 99    |
| 4.2.4 Термическая деструкция .....                                                                                             | 105   |
| 4.2.5 Деконсолидация и консолидация .....                                                                                      | 106   |
| 4.2.5.1 Деконсолидация.....                                                                                                    | 106   |
| 4.2.5.1 Консолидация.....                                                                                                      | 106   |
| 4.2.6 Охлаждение .....                                                                                                         | 107   |
| 4.2.7 Внутренние напряжения в зоне сварки .....                                                                                | 107   |
| 4.2.8 Изменение параметров процесса .....                                                                                      | 108   |
| 4.2.8.1 Трехфазный неоднородный процесс сварки.....                                                                            | 108   |
| 4.2.8.2 Точечная сварка.....                                                                                                   | 110   |
| 4.3 Механические характеристики индукционного сварного шва по сравнению с адгезивным<br>связыванием.....                       | 112   |
| 4.4 Преимущества и ограничения.....                                                                                            | 113   |
| 4.5 Применения .....                                                                                                           | 114   |
| 4.6 Доступное оборудование и инструменты.....                                                                                  | 114   |
| 4.7 Дополнительное чтение и дополнительная литература .....                                                                    | 114   |
| Литература.....                                                                                                                | 114   |
| 5 Соединение металла и пластика с помощью лазера без промежуточного слоя.....                                                  | 1165  |
| 5.1 Введение .....                                                                                                             | 1165  |
| 5.2 Ход выполнения соединения металла и пластика с помощью лазера без промежуточного слоя<br>(LAMP соединение) .....           | 1165  |
| 5.3 Особенности и механические свойства металлопластиковых лазерных соединений (LAMP<br>соединения).....                       | 119   |
| 5.4 Механизмы выполнения LAMP (лазерная обработка металла и пластика) соединения без<br>промежуточного слоя .....              | 1243  |
| 5.5 Испытания надежности системы .....                                                                                         | 12927 |
| 5.6 Развитие технологии выполнения LAMP соединения .....                                                                       | 1308  |
| 5.7 Выводы.....                                                                                                                | 1310  |
| Литература .....                                                                                                               | 131   |
| Часть II Процессы соединений на основе механической блокировки.....                                                            | 133   |
| 6 Принципы выполнения механической блокировки структурных компонентов .....                                                    | 134   |
| 6.1 Введение .....                                                                                                             | 134   |
| 6.2 Общее конструктивное исполнение соединения .....                                                                           | 135   |
| 6.3 Соединение наложением.....                                                                                                 | 136   |
| 6.3.1 Виды повреждений (отказа).....                                                                                           | 136   |

|                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.3.2 Модели для анализа и измерения соединения .....                                     | 139 |
| 6.3.3 Вторичный изгиб .....                                                               | 141 |
| 6.3.4 Многоочаговое усталостное повреждение в заклепочных соединениях.....                | 142 |
| 6.3.5 Влияние сжимающей силы в заклепочных соединениях .....                              | 143 |
| 6.3.6 Сварные и связанные нахлесточные соединения .....                                   | 144 |
| 6.4 Натяжные соединения .....                                                             | 145 |
| 6.4.1 Рычажный эффект .....                                                               | 147 |
| 6.4.2 Усталостная характеристика натяжного соединения.....                                | 148 |
| 6.4.3 Метод оценивания зоны контакта и жесткости элемента в натяжных соединениях .....    | 148 |
| 6.5 Допуски в разработке соединений.....                                                  | 149 |
| 6.6 Материалы .....                                                                       | 150 |
| 6.6.1 Свойства материалов .....                                                           | 151 |
| 6.6.2 Коррозия и защита .....                                                             | 154 |
| 6.6.3 Выбор материалов .....                                                              | 156 |
| 6.7 Крепежные детали .....                                                                | 159 |
| 6.7.1 Проектные критерии .....                                                            | 164 |
| 6.8 Краткие выводы и заключительные примечания .....                                      | 164 |
| Литература.....                                                                           | 165 |
| 7.Механическое крепление композитных и металлокомпозитных материалов.....                 | 167 |
| 7.1 Введение .....                                                                        | 167 |
| 7.2 Полуаналитический метод для проектирования композитных соединений .....               | 168 |
| 7.2.1 Прогнозирование разрыва при растяжении.....                                         | 169 |
| 7.3 Численный метод проектирования 00ных соединений .....                                 | 171 |
| 7.4 Выводы.....                                                                           | 176 |
| .....                                                                                     | 177 |
| 8 Фрикционное заклепывание металлополимерных мультикомполитных конструкций.....           | 179 |
| 8.1 Введение .....                                                                        | 179 |
| 8.2 Фрикционное заклепывание: принцип метода.....                                         | 180 |
| 8.2.1 Оборудование и ход выполнения соединения .....                                      | 182 |
| 8.3 Фрикционное заклепывание: технологические параметры и переменные величины процесса .. | 182 |
| 8.3.1 Технологические параметры.....                                                      | 183 |
| 8.3.2 Переменные величины процесса .....                                                  | 184 |
| 8.4 Фрикционное заклепывание: фазы процесса и выработка тепла .....                       | 184 |
| 8.5 Изменение температуры во времени .....                                                | 186 |
| 8.6 Микроструктура.....                                                                   | 188 |
| 8.6.1 МТМАЗ 1 (зона термо-механического воздействия металла) .....                        | 193 |
| 8.6.2 МТМАЗ 2 (зона термо-механического воздействия металла) .....                        | 194 |
| 8.7 Физико-химические изменения в полимерных материалах .....                             | 197 |
| 8.8.Механические характеристики .....                                                     | 199 |
| 8.8.1 Локальные механические характеристики соединения.....                               | 199 |
| 8.8.1 Общие механические характеристики соединения.....                                   | 201 |
| 8.8.2.1 Прочность при растяжении .....                                                    | 201 |
| 8.8.2.2 Прочность соединения наложением при сдвиге .....                                  | 204 |
| 8.9 Предусмотренные варианты применения.....                                              | 210 |
| 8.10 Выводы.....                                                                          | 210 |
| Награды за достижения в сфере публикаций о методе фрикционного заклепывания 215Литература |     |
| .....                                                                                     | 212 |
| 9.Стяжка металлополимерных гибридных конструкций .....                                    | 216 |
| 9.1 Введение .....                                                                        | 216 |
| 9.2 Виды стяжек .....                                                                     | 218 |
| 9.2.1 Холодна стяжка .....                                                                | 218 |
| 9.2.2 Горячая стяжка.....                                                                 | 219 |
| 9.2.2.1 Термостяжка .....                                                                 | 220 |
| 9.2.2.2 Холодная стяжка горячим потоком (НАС) .....                                       | 220 |

|                                                                                                          |      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 9.2.2.3 Инфракрасная и лазерная стяжка .....                                                             | 220  |
| 9.2.2.4 Ультразвуковая стяжка .....                                                                      | 221  |
| 9.2.3 Усовершенствованный процесс стяжки .....                                                           | 221  |
| 9.2.3.1 Нагнетательное соединение заклепыванием (ICJ) .....                                              | 221  |
| 9.2.3.2 Фрикционная стяжка.....                                                                          | 223  |
| 9.2.3.3 Ультразвуковой припуск.....                                                                      | 223  |
| 9.2.3.4 Термическая клепка.....                                                                          | 224  |
| 9.3 Характеристики стяжных соединений.....                                                               | 224  |
| 9.3.1 Формирование соединения .....                                                                      | 224  |
| 9.3.2 Микроструктура.....                                                                                | 225  |
| 9.3.3 Несовершенства соединений.....                                                                     | 227  |
| 9.3.4 Описание локальных свойств.....                                                                    | 228  |
| 9.3.4.1 Локальные механические характеристики .....                                                      | 228  |
| 9.3.4.2 Физикохимические и структурные свойства.....                                                     | 229  |
| 9.4 Проектные решения методом стяжки соединений заклепыванием .....                                      | 230  |
| 9.4.1 Сквозная конструкция.....                                                                          | 231  |
| 9.4.2 Проектирование стержня .....                                                                       | 231  |
| 9.4.3 Проектирование верхней части стяга для формовочного инструмента .....                              | 232  |
| 9.5 Механические свойства стяжки заклепыванием .....                                                     | 234  |
| 9.6 Заключительные замечания.....                                                                        | 236  |
| Литература .....                                                                                         | 236  |
| Часть III Процессы соединения на основе методов прямой сборки .....                                      | 239  |
| 10. Многослойное литье металлополимерных гибридных конструкций под давление .....                        | 2400 |
| 10.1 Основы металлополимерной гибридной технологии .....                                                 | 2400 |
| 10.2 Классификация РМН технологий .....                                                                  | 242  |
| 10.2.1 Многослойное литье РМН технологий под давлением .....                                             | 242  |
| 10.2.2 Металлоформование РМН технологий .....                                                            | 2433 |
| 10.2.3 Адгезионное связывание металлополимерных гибридных конструкций.....                               | 243  |
| 10.2.4 РМН технология прямым склеиванием .....                                                           | 244  |
| 10.3 Механизмы полимерных и металлических соединений.....                                                | 246  |
| 10.3.1 Многослойное литье под давлением РМН конструкции .....                                            | 246  |
| 10.3.2 Металлоформование РМН конструкции.....                                                            | 246  |
| 10.3.3 Адгезионно связанные РМН конструкции .....                                                        | 246  |
| 10.3.4 Прямое связывание РМН конструкции .....                                                           | 246  |
| 10.4 Вычислительный инженерный анализ РМН технологий.....                                                | 247  |
| 10.4.1 Вычислительный инженерный анализ РМН технологий.....                                              | 247  |
| 10.4.2 Моделирование и имитация процесса литья под давлением.....                                        | 248  |
| 10.4.2.1 Оптимальное размещение и количество точек нагнетания .....                                      | 249  |
| 10.4.2.2 Анализ заполнения формы .....                                                                   | 249  |
| 10.4.2.3 Анализ распределения направления волокон под влиянием потока .....                              | 251  |
| 10.4.2.4 Анализ заполнения-формования.....                                                               | 251  |
| 10.4.2.5 Анализ внутриформовочного напряжения.....                                                       | 252  |
| 10.4.2.6 Микромеханика-эффективные свойства материала на основе отклонении.....                          | 253  |
| 10.4.3 Анализ усадки и деформации выдавленного компонента .....                                          | 253  |
| 10.4.4 Структурный анализ РМН компонента.....                                                            | 254  |
| 10.5 Совместимость с цепочкой BIW автомобильного технологического процесса .....                         | 256  |
| 10.6 Заключительные замечания.....                                                                       | 258  |
| Литература .....                                                                                         | 258  |
| 11 Ультразвуковое соединение легких легированных/фиброармированных полимерных гибридных конструкций..... | 262  |
| 11.1 Введение .....                                                                                      | 262  |
| 11.2 Технологический маршрут MIMStruct (инжекционное формование из металлического порошка) .....         | 263  |
| 11.3 Ультразвуковое соединение: принципы процесса .....                                                  | 264  |

|          |                                                                                                                             |     |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11.3.1   | Параметры процесса.....                                                                                                     | 266 |
| 11.3.2   | Этапы процесса.....                                                                                                         | 267 |
| 11.3.3   | Переменные величины процесса .....                                                                                          | 268 |
| 11.3.4   | Возможные варианты применения .....                                                                                         | 269 |
| 11.4     | Ситуационное исследование Ti-6Al-4V/GF-PEI соединения .....                                                                 | 269 |
| 11.4.1   | Материалы.....                                                                                                              | 270 |
| 11.4.1.1 | Часть MIMStruct.....                                                                                                        | 270 |
| 11.4.1.2 | Композитная часть .....                                                                                                     | 272 |
| 11.4.1.3 | Ход выполнения соединения.....                                                                                              | 272 |
| 11.4.2   | Температура процесса .....                                                                                                  | 273 |
| 11.4.3   | Микроструктура ультразвуковых соединений .....                                                                              | 273 |
| 11.4.4   | Локальные механические свойства MIMStruct компонентов.....                                                                  | 275 |
| 11.4.5   | Общие механические свойства ультразвуковых соединений .....                                                                 | 276 |
| 11.4.6   | Анализ поверхности разрушения .....                                                                                         | 279 |
| 11.4.7   | Выводы.....                                                                                                                 | 281 |
| 11.4.8   | Преимущества и ограничения.....                                                                                             | 282 |
|          | Литература .....                                                                                                            | 282 |
|          | Часть IV Планирование экспериментов и статистический анализ технологии выполнения соединений .....                          | 285 |
| 12       | Факторный план экспериментов для мтеаллополимерного соединения.....                                                         | 286 |
| 12.1     | Введение .....                                                                                                              | 286 |
| 12.2     | Планирование экспериментов.....                                                                                             | 286 |
| 12.2.1   | Факторный план экспериментов .....                                                                                          | 288 |
| 12.2.1.1 | Общее описание.....                                                                                                         | 288 |
| 12.2.1.2 | Вариационный анализ .....                                                                                                   | 288 |
| 12.2.1.3 | Толкование результатов и проверка правильности проекта .....                                                                | 290 |
| 12.2.2   | Примеры факторного плана экспериментов в разработке процесса соединения для металлополимерных гибридных конструкций.....    | 290 |
| 12.2.2.1 | Ситуационное исследование 1 – Полный факторный план при фрикционном заклепывании .....                                      | 290 |
| 12.2.2.2 | Ситуационное исследование: 2 - факторный план экспериментов в соединении внахлестку точки фрикции .....                     | 297 |
| 12.3     | Заключительные примечания.....                                                                                              | 307 |
|          | Литература .....                                                                                                            | 307 |
| 13       | План Тагути и методология поверхности отклика металлополимерного соединения.....                                            | 309 |
| 13.1     | Введение .....                                                                                                              | 309 |
| 13.2     | План эксперимента Тагути .....                                                                                              | 309 |
| 13.2.1   | Общее описание.....                                                                                                         | 309 |
| 13.2.2   | Вариационный анализ .....                                                                                                   | 311 |
| 13.3     | Пример плана эксперимента Тагути при соединении металла к композитным конструкциям ..                                       | 311 |
| 13.3.1   | Ситуационное исследование 1 - Тагути L9 (34) DoE Соединение с двойной нахлесткой точки трения.....                          | 311 |
| 13.3.1.1 | Оптимизация процессов.....                                                                                                  | 312 |
| 13.3.1.2 | Влияние технологического параметра FSpJ на механические характеристики соединения с помощью плана эксперимента Тагути ..... | 313 |
| 13.3.1.3 | Выводы ситуационных исследований.....                                                                                       | 318 |
| 13.4     | Методология поверхности отклика .....                                                                                       | 319 |
| 13.4.1   | Введение .....                                                                                                              | 319 |
| 13.4.2   | Центральный композиционный план .....                                                                                       | 321 |
| 13.4.2.1 | Общее описание.....                                                                                                         | 321 |
| 13.4.3   | Факторный план Бокса-Бенкена .....                                                                                          | 322 |
| 13.4.3.1 | Общее описание.....                                                                                                         | 323 |

|                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 13.4.4 Ситуационное исследование 2 - центральный композитный план фрикционного заклепывания ..... | 323 |
| 13.4.4.1 Выводы ситуационного исследования.....                                                   | 327 |
| 13.5 Другие планы поверхности .....                                                               | 328 |
| 13.6 Заключительные примечания.....                                                               | 328 |
| Литература.....                                                                                   | 328 |
| Алфавитный указатель.....                                                                         | 330 |
| Лицензионное соглашение издательства Wiley и заказчика.....                                       | 335 |



# Список авторов

## **André B. Abibe**

Институт материаловедения  
Механика материалов  
Твердотельные процессы соединения  
Гельмгольц-Центр Гестахт  
Центр Материалов и  
Прибрежных  
Исследование  
Гестахт  
Германия

## **Sergio T. Amancio-Filho**

Институт материаловедения  
Механика материалов  
Твердотельные процессы соединения  
Гельмгольц-Центр Гестахт  
Центр Материалов и  
Прибрежных  
Исследование  
Гестахт  
Германия

## **Текущий филиал:**

Институт материаловедения  
Соединение и Образование  
Грацкий технологический университет  
Грац  
Австрия

## **Mariana D. Banea**

Departamento de Engenharia Mecânica  
Faculdade de Engenharia da Universidade  
do Porto Porto Portugal

## **Lucian-Attila Blaga**

Институт материаловедения  
Механика материалов  
Твердотельные процессы соединения  
Гельмгольц-Центр Гестахт  
Центр Материалов и  
Прибрежных  
Исследование  
Гестахт  
Германия

## **Pedro P. Camanho**

Departamento de Engenharia Mecânica  
Faculdade de Engenharia Universidade do  
Porto Porto Portugal  
Raul D. S. G. Campilho  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Instituto Superior de Engenharia  
do Porto  
Porto  
Portugal

**Raul D. S. G. Campilho**

Departamento de Engenharia Mecânica  
 Instituto Superior de Engenharia  
 do Porto  
 Porto  
 Portugal

**Giuseppe Catalanotti**

Departamento de Engenharia Mecânica  
 Faculdade de Engenharia  
 Universidade do  
 Porto Porto  
 Portugal

**Carlos E. Chaves**

Embraer S.A.  
 São José dos Campos  
 São Paulo  
 Brazil

**Gonçalo P. Cipriano**

Институт материаловедения  
 Механика материалов  
 Твердотельные процессы соединения  
 Гельмгольц-Центр Гестахт  
 Центр Материалов и  
 Прибрежных  
 Исследование  
 Гестахт  
 Германия

**Lucas F. M. da Silva**

Departamento de Engenharia  
 Mecânica  
 Faculdade de Engenharia da Universidade  
 do Porto  
 Porto  
 Portugal

**Mirja Didi**

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH  
 University of Kaiserslautern  
 Kaiserslautern  
 Germany

**Eduardo E. Feistauer**

Институт материаловедения  
 Механика материалов  
 Твердотельные процессы соединения  
 Гельмгольц-Центр Гестахт  
 Центр Материалов и  
 Прибрежных  
 Исследование  
 Гестахт  
 Германия

**Fernando F. Fernandez**

Embraer S.A.  
 São José dos Campos  
 São Paulo  
 Brazil

**Arnaldo R. Gonzalez**

Кафедра Механической  
 Инженерии DEMEC  
 Техническая школа  
 Федеральный университет Риу-Гранди-ду  
 Сул  
 Порто Алегре  
 Бразилия

**Seyed M. Goushegir**

Институт материаловедения  
 Механика материалов  
 Твердотельные процессы соединения  
 Гельмгольц-Центр Гестахт  
 Центр Материалов и  
 Прибрежных  
 Исследование  
 Гестахт  
 Германия

**Mica Grujicic**

Кафедра механической инженерии  
Клемсонский университет  
Клемсон  
США

**Diego J. Inforzato**

Embraer S.A.  
São José dos Campos  
São Paulo  
Brazil

**Seiji Katayama**

Osaka  
Japan

**Yousuke Kawahito**

Научно-исследовательский институт  
Соединения и сварки  
Университет Осака  
Осака  
Япония

**Peter Mitschang**

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH  
University of Kaiserslautern  
Kaiserslautern  
Германия

## Предисловие

Выбор и разработка легких гибридных конструкций являются важными подходами для снижения веса, расхода топлива и выбросов  $\text{CO}_2$  в современных самолетах и автомобилях. Вследствие этого, стало ощутимым дальнейшее увеличение прочностных и весовых характеристик инженерных сооружений. Из последних примеров сфер применения легких гибридных конструкций можно привести такие как транспорт (например, в самолетах и автомобилях), строительство (например, в современном строительстве мостов и фасадов) и медицина (например, имплантаты и протезы). Авиационная и автомобильная промышленность стали основной движущей силой внедрения инноваций в легкие гибридные конструкции за последние десять лет. Когда освоение альтернативной чистой энергии является важным способом решения проблем выбросов, выбор и разработка легких материалов и конструкций обеспечивают краткосрочную и среднесрочную альтернативу. Разработка новых легких сплавов, таких как Al, Mg, и Ti, а также современных композиционных материалов на полимерной основе, таких как термоуглепластик (CFRT) и термостеклопластик (GFRT), изменила нынешнюю парадигму в структурном проектировании легких конструкций. Параллельно разрабатываются и изучаются новые технологии соединения для новых комбинаций однородных и разнородных материалов.

Современные коммерческие самолеты состоят более чем из 50% композитов, армированных волокном, в сочетании с алюминиевыми и титановыми сплавами (например, Аэробус A350 и Боинг 787); их разработка исходит из высоких коэффициентов безопасности для обеспечения устойчивости к структурным разрушениям и компенсации ограниченной внутренней прочности композитов, армированных углеродным волокном. Как правило, это обуславливает утолщение и утяжеление соединяемых компонентов, и желаемая цель уменьшения веса за счет композиционного материала (примерно на 20% легче, чем у алюминия) может быть не достигнута. Концепции будущего для самолетов (например, Аэробус A30X, следующая замещающая модель самолета A320) будут все более склонны к выбору материалов на основе их положительных свойств, таких как ударная вязкость и высокое отношение прочности к весу (то есть, удельная прочность), возвращаясь к проектному подходу выбора более консервативного материала, основанному на комбинации легких металлов (например, алюминий в фюзеляжной панели) и полимерные конструкции, армированных волокном (например, в более тяжелых компонентах несущей конструкции, таких как крылья). В автомобильной промышленности новые экологически чистые источники энергии, такие как электрические и водородные двигатели, обычно требуют использования высокомоощных аккумуляторов и объемных баков, что увеличивает конечный вес автомобиля. Таким образом, для снижения веса без ущерба для безопасности пассажиров композитные детали, армированные углеродом и стекловолокном, постепенно отбираются в сочетании с легкими сплавами, например, алюминием и магнием. Ввиду этого, высокопроизводительные, экономически эффективные и экологически чистые технологии соединения необходимы, чтобы обеспечить устойчивое производство будущих металлоустойчивых и стойким к повреждениям металло-полимерных конструкций.

Соединение гибридных металлополимерных и полимерных композитных конструкций было недавно определено Международным Институтом Сварки (МИС) в качестве актуальной темы, которую предстоит решить в ближайшие два десятилетия. Соединение металлов с полимерами очень сложно, особенно из-за низкой взаимной растворимости и физико-химической несовместимости. Таким образом, металлополимерные гибридные соединения представляют резкую границу раздела механизмов связывания определяющими прочность границы раздела и влияющими на общие механические характеристики. Кроме того, металлополимерные гибридные соединения чувствительны к сильно отличающимся реакциям материалов в отношении концентрации напряжений и деформации. Снижение прочности, связанное с износом или выветриванием (например, из-за изменений температуры, поглощения влаги и воздействия жидкостей) соединяемых элементов также представляет вопрос, требующий решений. В дополнение к этому, обработка поверхности и химический состав могут сильно влиять на свойства поверхности раздела, непосредственно влияя на механические характеристики конструкции из-за образования

дефектов связывания. Современные технологии механического крепления, сварки и адгезивного связывания зачастую не подходят для выполнения соединений металлов с полимерами. Поэтому, современные инициативы инженеров и ученых сосредоточены на разработке эффективных и рентабельных новых методов, и методик соединения для преодоления этих ограничений.

Данная книга, которая первой рассматривает вопрос соединения металлополимерных гибридных конструкций, в большей мере основана на результатах последних исследований, выполненных в области усовершенствованных методов соединения металлов с полимерами и композитами посредством сил сцепления, механического зацепления и методов прямой сборки. Выбранные темы были опираются на опыте преподавания Доктора Аманцио в Гамбургском технологическом Университете (Германия) и его НИИ разработках- более чем за 15 лет работы в области технологии соединения в Департаменте процессов соединения твердых тел (Гельмгольц-Центр Гестахт, Германия), а также на опыте Доктора Blaga в сфере изучения механических методов скрепления материалов. Для создания книги использованы материалы других выдающихся международных исследовательских групп, что делает ее уникальным справочным пособием для будущих разработок в этой области.

Целью книги является описание концепций технологии соединения полимерных материалов и металлополимерных гибридных конструкций путем рассмотрения современных и новых методов соединения, сфокусированных на инженерно-техническом проектировании (функциональные характеристики, разработка и моделирование) и научно обоснованных свойствах (структурные, физические, химические и микроструктурные) материалов. Этот том был представлен в качестве вводного учебного пособия для инженеров и студентов технических специальностей, у которых есть желание углубить или улучшить свои знания в области технологий соединения.

Книга разделена на четыре части. В 1 части, рассматриваются процессы соединения, основанные на силах связывания. 1 глава кратко описывает фундаментальные концепции и теорий адгезивного связывания. В главе уделено большое внимание на общие методы подготовки поверхности, виды адгезивных средств, выполнения соединения (проектное изготовление соединения), и анализ стыковых соединений (экспериментальный и с помощью моделирования). Во 2-й главе обсуждаются последние разработки в области адгезионного связывания полимерных композитов с легкими сплавами. Подробный обзор литературы представлен по изготовлению соединений и свойствам склеенных соединений. Особое внимание также уделяется изготовлению клеевых гибридных соединений, подготовке адгерентов, правильному нанесению клеев, а также адекватным механическим испытаниям для оценки и аналитического / цифрового прогнозирования прочности соединений. В 3 Главе, представлена призовая технология Henry Granjon МИС Соединение Точки трения для металлических композитных соединений наложением. Технологические принципы, микроструктура и механические характеристики рассматриваются для этой альтернативной технологии адгезивного связывания. Основное внимание уделяется фундаментальному пониманию корреляции между микроструктурой процесса и свойствами для будущих структурных применений. В 4 Главе представлена новая технология сварки-связывания - Индукционная сварка - новое применение индукционного нагрева для соединения кольцевых соединений термопластичных композитов и металлических сплавов. Внимание уделяется описанию соединительного оборудования и принципов для двух различных вариантов процесса, в которых подробно описывается, как индуктивный нагрев влияет на механизмы связывания и изменяет механические характеристики соединения. В 5 Главе дано краткое представление о прямом склеивании металла и термопластика с помощью лазерного нагревания. Основные принципы этого нового процесса, а также его свойства соединения представлены вместе с описанием различий в механических свойствах соединения и микроструктуре, возникающих при нагревании металла или полимерного партнера.

2 Часть представляет категорию технологий соединения, основанных на механическом сцеплении. Эта часть начинается с 6 Главы, в которой дается полное описание основных теорий и особенностей процесса механического крепления. Авторы главы широко обсуждают основные крепежные элементы и методы, используемые в аналогичных и гибридных соединениях в конструкциях самолетов, один из основных игроков,

применяющих механические крепежные элементы. Рассматриваются основные типы крепежа и основные материалы, разработка соединения и характеристики механических свойств. 7 Глава рассматривает проблемы механически скрепленных полимерных композитных и металлополимерных композитных конструкций. В этой главе уделено большое внимание новым моделям анализа для болтовых соединений. Здесь обсуждается полуаналитический метод для разработки соединения (Метод конечной механики разрушения) и новые разработки в цифровых методах. 8 Глава представляет инновационную технологию выполнения заклепочных фрикционных соединений. Технология заклепочных фрикционных соединений, удостоенная награды являющаяся потенциальной заменой болтов и заклепок – относится к полимерным и полимерно композитным металлическим соединениям. Представлено подробное описание технологических параметров, выработки тепла, разработки микроструктуры и механических характеристик (квазистатического и циклического) соединения. Методы связывания металлополимерных гибридных компонентов впервые подробно обсуждаются в литературе в 9-й главе. Особое внимание уделяется процедурам изготовления и типам процесса закрепления, разработке соединения и механическим характеристикам. Новые усовершенствованные методы закрепления, такие как НСК на основе фрикции и Термическая клепка обсуждаются для отображения потенциала закрепления в будущих структурных частях.

Две новые технологии представлены в 3 Части для прямой сборки высокоэффективных полимерных и композитно-металлических гибридных частей. Многослойное литье металлополимерных конструкций под давлением, появившееся в автомобильной промышленности представлены в 10 Главе. Глава рассматривает основные этапы проектирования, моделирования и изготовления гибридных конструкций, чьи механизмы связывания зависят от комбинированной механической централизации и силы связывания. Примеры приведены для таких процессов как литье под давлением чистых и коротковолокнистых полимеров над перфорированными и металлическими субстратами с обработанной поверхностью. 11 Глава вносит новую методику Ультразвуковое соединение (Карданное соединение). Данная новая технология соединения использует ультразвуковую энергию для соединения литых металлических деталей под давлением, с 3D-усилением поверхности (например, штыри и колонны) с композитами наполненные волокном. Штыри и колонны выступают в качестве армирующих элементов на всю толщину в композитной части, увеличивая прочность гибридного соединения вне плоскости.

И последнее, в 4 части предоставлен предварительный обзор доступных планов эксперимента и статистических инструментов для оптимизации процесса соединения и оценки корреляции между технологическими-микроструктурными-механическими характеристиками в металлополимерных конструкциях. 12 Глава представляет основную теорию факторного плана, в то время как в главе 13 рассматриваются основы плана Taguchi и методология поверхности отклика. Изучения на примере обсуждаются для оптимизации и оценки процессов соединения на основе фрикции.

Редакция выражает благодарность всем, кто прямо или косвенно внес свой вклад в создание этой книги (в особенности коллегам и выпускникам из группы по металлополимерным соединениям ГЦГ) и авторам, которые принимали участие в составлении наибольшей части текста для этой книги:

L. F. M. da Silva, M. D. Banea, и R. D. S. G. Campilho (Португалия)  
 S. M. Goushegir (Германия)  
 M. Didi и P. Mitschang (Германия)  
 S. Katayama и Y. Kawahito (Япония)  
 C. E. Chaves, D. J. Inforzato и F. F. Fernandez (Бразилия)  
 P. P. Camanho и G. Catalanotti (Португалия)  
 A. B. Abibe (Германия)  
 M. Grujicic (США)  
 E. E. Feistauer (Германия)  
 G. P. Cipriano (Германия /Финляндия)  
 A. R. Gonzalez (Бразилия)

Это была действительно совместная работа, являющаяся результатом безграничной настойчивости, высокого уровня интеллектуальной работы и глубокого терпения участников проекта, которые сообщают о своих разработках и делятся своим опытом в течение последних нескольких лет.

Редакция также хотела бы отметить поддержку их Научно-исследовательской работы полученную от Ассоциации Гельмгольца, Германия (Группа молодых исследователей, "Усовершенствованные Металлополимерные Гибридные Конструкции" Номер передачи VH-NG-626), FAPESP- Исследовательский фонд Сан-Паулу (Бразилия) и CNPq - Национальный совет по научно-техническому развитию (Бразилия) и CAPES - Координация по совершенствованию персонала высшего уровня (Бразилия).

Мы рады объявить о завершении этого проекта после 5 лет усердной работы!

15.10. 2017  
Гестахт (Германия)

Редакторы: Sergio T. Amancio-Filho  
и Lucian-Attila Blaga

## **Часть I**

**Процессы соединения, основанные на силе адгезионного взаимодействия**



# 1 Принципы выполнения адгезионного связывания

Mariana D. Banea<sup>1</sup>, Lucas F. M. da Silva<sup>1</sup>, и Raul D. S. G. Campilho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Instituto Politécnico do Porto, Porto, Portugal

## 1.1 Введение

Изготовление современных изделий предусматривает сочетание специальных новых материалов, которые требуют выполнения соединений в соответствии своим конкретным характеристикам. Адгезивы возможно использовать для соединения металлов, полимеров, керамики, коры, резины и комбинаций любых из этих материалов. Адгезивное связывание нашло применение в различных областях, от высокотехнологичных отраслей, таких как авионавтика, авиакосмическая промышленность, электроника и автомобилестроение, до традиционных отраслей, таких как строительство, спорт и консервная промышленность.

Адгезивно склеенные соединения являются растущей альтернативой механическим соединениям в технических сооружениях и дают много преимуществ по сравнению с обычными механическими креплениями. Среди этих преимуществ имеются: меньший вес конструкции, меньшие затраты на изготовление и повышенная устойчивость к повреждениям. Однако, все еще существуют важные проблемы, которые необходимо решить, прежде чем этой технологии можно полностью доверять и широко использовать в промышленности. Наиболее важными являются прочность соединения в неблагоприятных условиях и долговечность. С другой стороны, отсутствие подходящих моделей материалов и критериев разрушения привело к тенденции «проектирование с большим запасом прочности» конструкции. Требования обеспечения часто требуют, чтобы адгезивно склеенные конструкции, в особенности те, которые используются в приложениях, несущих основную нагрузку, включали механические крепежные элементы (например, болты) в качестве дополнительной меры предосторожности. Эти методы приводят к более тяжелым и более дорогим компонентам. Можно ожидать, что разработка надежных методов проектирования и прогнозирования приведет к более эффективному использованию материалов и адгезивов. Основы и практика адгезивного связывания описаны в большом количестве руководств или учебников, такие как Adams et al. [1] и Petrie [2] и совсем недавно da Silva et al. [3].

Для того чтобы проектировать конструкционные соединения в инженерных сооружениях, необходимо уметь их анализировать. Это означает определить напряжения и деформации при данной нагрузке и предсказать возможные точки отказа. Существует два основных математических подхода к анализу адгезивно склеенных соединений: анализ в замкнутой форме (аналитические методы) и цифровые методы (то есть, анализ методом конечных элементов) [4].

Чтобы сравнить и оценить различные параметры адгезии необходимо провести скрининговые тесты до того, как адгезив будет указан для применения. Свойства адгезивов могут сильно различаться, и для правильной конструкции соединения необходим соответствующий выбор [5]. Существует широкий ряд методов испытаний и связанных с ними образцов для испытаний, которые используются для оценки эффективности адгезивов и адгезивных соединений [6, 7]. Подходы, используемые для определения свойств адгезивов, представляют собой показатель свойств объемных адгезивных образцов и использование специально разработанных геометрий соединений с тонкой линией связывания (часто называется испытание “на месте”). Измеренные параметры — это нагрузка и натяжение, необходимые для возникновения отказа. Тестовая геометрия должна обеспечивать состояние напряжения, равномерно распределенное по контактной поверхности и через линию связывания, без концентраций напряжений, и обработка поверхности должна быть достаточной для обеспечения когезионного разрушения в адгезивном слое. В настоящее время есть много стандартов ASTM и ISO, которые были

написаны для анализа и экспериментальной проверки адгезионных свойств. Эти стандарты обеспечивают основу для тестирования.

В этой главе дается понимание принципам клеевого соединения. Кратко поясняются преимущества и недостатки использования клеевого соединения по сравнению с другими способами соединения. Также кратко описаны влияние подготовки поверхности и факторов среды на поведение соединения. Представлены адгезионные свойства, а также основные методы испытаний и соответствующие образцы для испытаний, которые используются для оценки эффективности адгезивов и адгезивных соединений. Рассмотрены также некоторые основные принципы изготовления адгезивного соединения. Обсуждаются режимы отказов и основные аналитические и цифровые методы анализа напряжений, необходимые для прогнозирования отказов. В итоге, это заканчивается недавними событиями и выводами.

## 1.2 Основные положения

Адгезивное связывание представляет собой процесс соединения материала, при котором адгезив, помещенный между поверхностями прилипания, затвердевает, образуя адгезионное связывание. Как правило, адгезивно-склеенное соединение состоит из адгерентов, адгезива, грунтовок (при необходимости) и межфазных областей (смотрите Рис. 1.1). Субстрат - это материал для связывания, который после связывания часто называют адгезивом. Участок между адгезивом и адгерентом называется межфазным участком, которая является слабым участком вблизи точки контакта адгезив-адгерента.

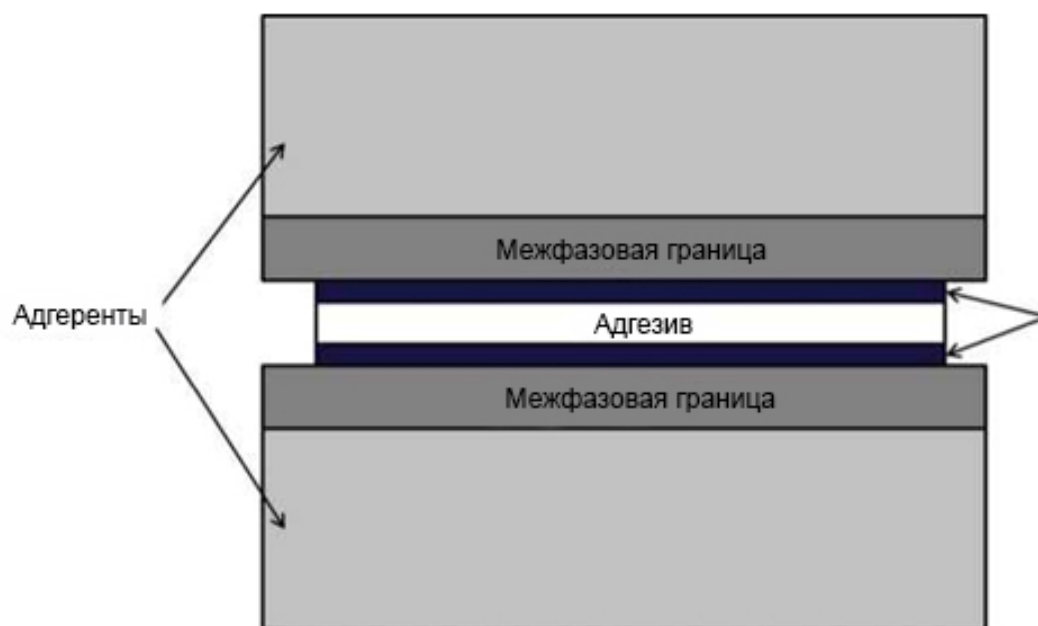


Рис. 1.1 Компоненты адгезивно соединенного шва

Межфазная область имеет другие химические и физические характеристики, чем объемный адгезив или адгерент. Свойства и качество приклеенного соединения зависят от характера межфазной области.

Линия раздела находится в пределах межфазной границы и представляет собой плоскость контакта между поверхностями разных материалов. Иногда грунтовку наносят на поверхность перед нанесением адгезива, чтобы улучшить характеристики клеевого соединения или защитить поверхность до тех пор, пока адгезив не может быть нанесен.

Структурный адгезив представляет собой адгезив с высокой прочностью при растяжении (обычно более 5 МПа) и хорошей устойчивостью к внешнему воздействию. Примерами структурных адгезивов являются эпоксидные, акриловые и уретановые системы. Неструктурные адгезивы — это адгезивы с гораздо меньшей прочностью и долговечностью. Они обычно используются для временного крепления или для связывания слабых субстратов. Примерами неструктурных адгезивов являются самоклеющиеся пленки, эластомеры и герметики. Различные спецификации и методы тестирования

применяются к структурным и неструктурным адгезивам, и чаще всего они предназначены для выполнения различных функций. В этой главе рассматриваются только конструкционные адгезивы.

### **1.3 Преимущества и недостатки адгезионного связывания**

Адгезионное связывание предлагает множество преимуществ, по сравнению с другими методами выполнения соединений. Однако решение о том, использовать ли адгезивы, механические крепежи, какой-либо тип сварки или комбинацию этих методов при проектировании и производстве современных конструкций зависит от различных факторов. Тем не менее, некоторые процессы будут иметь явные преимущества и недостатки для тех или иных сфер применения. Например, материалы хрупкие или подверженные повреждениям трудно сверлить, чтобы использовать механические крепления. Кроме того, для композитов, армированных волокном, традиционные крепежные элементы, как правило, требуют разрезания волокон, что в свою очередь приводит к концентрации напряжений и снижает структурную целостность. Напротив, склеенные соединения являются более непрерывными и имеют потенциальные преимущества в отношении прочности к весу, гибкости конструкции и простоты изготовления.

Адгезионное связывание особенно хорошо подходит для соединения больших поверхностей из различных материалов, например, при строительстве металлокомпозитных многослойных конструкций.

Другим важным преимуществом адгезионного связывания является тот факт, что наряду с механическим соединением (то есть, закрепление), это единственный метод соединения, который не меняет микроструктуру соединяемых материалов. Добавим, что он обычно вызывает незначительное химическое изменение материалов, к которым присоединяется, или вообще не вызывает их. Это делает возможным объединение разнородных (а также похожих) материалов практически в любой комбинации. Комбинация материалов, таких как металлы с полимерами, металлы с керамикой, керамика с полимерами и керамика или полимеры с армированными металлами и так далее, может быть объединена. Тем не менее, между соединениями однородных и разнородных материалов с использованием адгезивов есть четкие различия, о которых нужно знать, чтобы увеличить шансы на успех. Например, различия в гибкости или тепловом расширении между адгезивами, которые могут создавать внутренние напряжения в линии связывания. В некоторой степени, напряжение может быть сведено к минимуму на этапе проектирования соединения, но функциональные характеристики связывания остаются зависимыми от них.

Часто имеются существенные преимущества в использовании методов плавления (например, сварка) в несущей конструкции, где крепления являются аналогичными или совместимыми, но использование адгезионного связывания обеспечивает другие преимущества. Помимо того, что исключается перегрев материала и сопряженные искажения (особенно для тонкостенных деталей), имеется возможность интеграции соединений для новых или сложных конструкций.

Поскольку адгезионное связывание изолирует одно сцепление от другого через промежуточный адгезив, как правило, в более высокой степени исключается гальваническая коррозия между разнородными сцеплениями, нежели чем предлагается процессами механического соединения. Тем не менее, выбранный адгезив должен быть совместим с каждым адгерентом. Вязкоупругие полимерные адгезивы также могут обеспечивать демпфирование.

С другой стороны, одним важным недостатком адгезивного связывания является относительно низкая термостойкость по сравнению с неорганическими материалами, такими как металл или стекло. Кроме того, наиболее вероятно, что влажность, особенно в напряженном состоянии отрицательно влияет на все адгезивы. Поскольку долгосрочное поведение адгезивов еще не полностью известно, не было возможности разработать надежные математические модели для долговечности адгезивных соединений. Тем не менее, эмпирические значения, полученные с помощью клеевых соединений, тем

временем позволили создать безопасные и достаточно надежные связанные структуры. Основные преимущества и недостатки процесса адгезионного связывания приведены в

**Таблице 1.1.** Основные преимущества и недостатки процесса адгезионного связывания.

| <b>Преимущества</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>Недостатки</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Более равномерное распределение напряжения и снижение концентрации напряжения</p> <p>Пригодность к очень тонким и толстым слоям</p> <p>Высокая несущая способность возможна благодаря большой (поверхности) площади связывания</p> <p>Свойства адгезивов сохраняются</p> <p>Пригодность для соединения одинаковых или разнородных материалов (то есть металлов, керамики, стекла, пластмасс, дерева и т. д.)</p> <p>Уплотнения несмотря на многие среды</p> <p>Изолирует от электричества или тепла</p> <p>Минимизирует или предотвращает гальваническую коррозию между разнородными материалами. Демпфирует вибрации и ударные нагрузки</p> <p>Лучшее сопротивление усталости и устойчивость к повреждениям</p> <p>Выгодное отношение предела прочности к весу</p> <p>Могут быть изготовлены соединения с гладкой, большой поверхностью</p> <p>Может быть быстрее и дешевле, чем механическое крепление или сварка</p> | <p>Чувствительность к отслоению или расщеплению чистого напряжения или растяжения</p> <p>Требует специальной обработки (предварительная обработка поверхности, выдержка, контроль процесса). Иногда очень ограниченное рабочее время</p> <p>Время выдержки может быть длительным. Неразрушающие испытания качества возможны только частично</p> <p>Тепловая нагрузочная способность клеев ограничена по сравнению с другими материалами (например, металлами)</p> <p>Чувствительность к окружающей среде</p> <p>Чувствительность к воздействию некоторых растворителей</p> <p>Различный выбор адгезива в зависимости от применения (разнообразный ряд адгезива, различные возможности нанесения)</p> <p>Требуются специальные зажимные устройства для фиксации соединения во время вулканизации</p> <p>Трудно демонтировать соединение неразрушающим способом</p> |

## 1.4 Влияние подготовки поверхности и факторов воздействия среды

Поверхности играют важную роль в процессе связывания, и подготовка поверхности, пожалуй, самый важный этап процесса, определяющий качество клеевого соединения [8]. Правильная подготовка поверхности имеет важное значение для хорошей прочности соединений и поддержания долговременной структурной целостности склеенных соединений. Широко признано, что идеальная поверхность для связывания должна быть: чистой, сухой, без пыли, гладкой, смачиваемой (с высокой поверхностной энергией) и полярной.

Большинство структурных адгезивов работают в результате образования химических связей (в основном ковалентных, но также могут присутствовать некоторые ионные и статические влияния притяжения) между атомами поверхности сцепления и соединениями, составляющими адгезив [9]. Эти химические связи являются механизмом передачи нагрузки между креплениями. Большинство дефектов клеевого соединения можно объяснить плохими процессами во время изготовления, а недостаток качественной подготовки поверхности является наиболее существенным недостатком [10].

Подготовка поверхности должна быть адаптирована к адгезиву и, возможно, будет отличаться для разных типов материалов. Например, подготовка поверхности металлов перед связыванием важна из-за нарастания окисления, которое происходит с металлами. Это особенно важно для металлов, таких как алюминий и титан. С другой стороны,

обработка поверхности также очень важна, поскольку пластиковые поверхности очень гладкие, плохо смачиваются и имеют низкую поверхностную энергию.

Традиционные методы обработки поверхности для металлов, такие как пескоструйная обработка, механическое истирание и кислотное травление, были успешно использованы. Напротив, для пластиковых материалов иногда достижение адгезии является довольно сложной задачей из-за низкой поверхностной энергии. Тем не менее, существует несколько методов увеличения поверхностной энергии и полярности пластмасс, в том числе: влажная химическая обработка (которая часто является жесткой и наносит ущерб окружающей среде), высокотемпературная обработка газовой горелкой, обработка коронным разрядом и, наконец, активация поверхности плазмы.

Коротко говоря, обработка поверхности перед нанесением адгезивов рекомендована для достижения максимальной механической прочности. Можно сформировать более тесную связь, которая позволит усилить прочность и долговечность усилив поверхностное натяжение, увеличивая шероховатость поверхности и изменяя химию поверхности.

Адгезивно склеенные соединения могут подвергаться воздействию различных условий окружающей среды в течение срока их службы. Как было показано, производительность адгезивных систем может значительно ухудшиться при воздействии агрессивной среды. Факторы окружающей среды должны рассматриваться как критический фактор при определении долговечности адгезивно склеенных соединений и должны быть тщательно определены и связаны с типом обслуживания, которому будет подвергаться материал.

Основными факторами воздействия окружающей среды являются температура и влажность. Длительное или даже кратковременное воздействие повышенных температур часто приводит к необратимым химическим и физическим изменениям в адгезивах. По мере повышения температуры прочность связи уменьшается [11, 12]. Один пример приведен на рис. 1.2, где показана средняя прочность на срез внахлест при растяжении эпоксидного клея в зависимости от температуры. Кроме того, влага, абсорбированная в полимерном материале, может привести к широкому спектру эффектов, как обратимых, так и необратимых, включая пластификацию, набухание и деградацию. При температуре ниже температуры стеклования  $T_g$ , снижение свойств полимера обратимо при дегидратации, тогда как свойства выше  $T_g$ , постоянно изменяются.

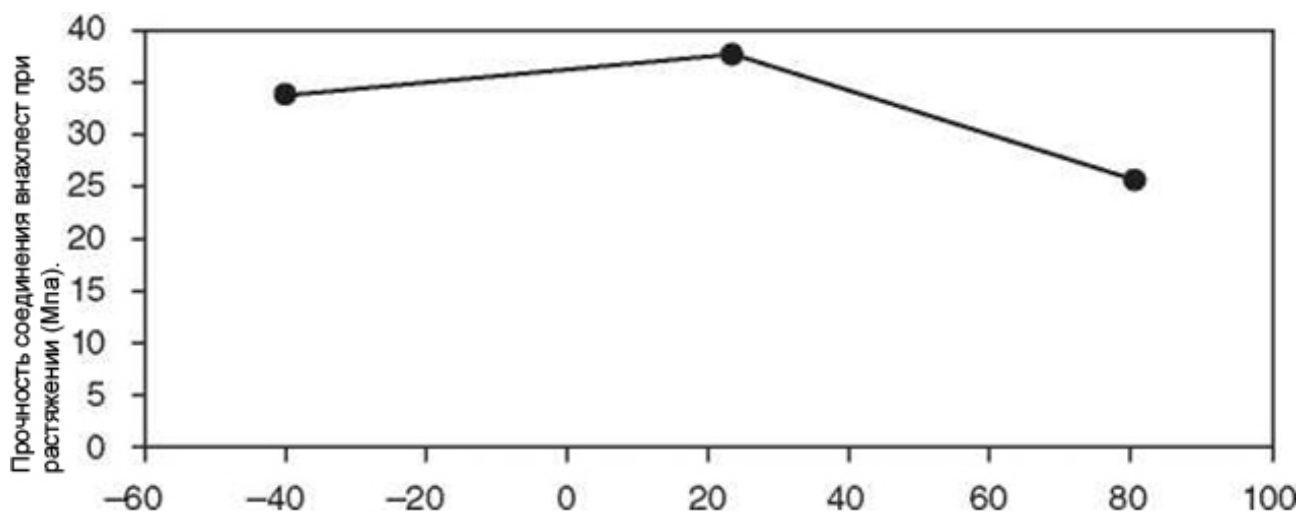


**Рис. 1.2** Средняя прочность соединения эпоксидного адгезива внахлест при растяжении AV118 как функция температуры.

Содержание влаги в клеевых соединениях может ослабить не только физические и химические свойства самого клея, но и раздел между адгезивом и субстратом. В настоящее время хорошо установлено, что потеря прочности соединения может быть сведена к минимуму путем выбора подходящей предварительной обработки, в случае клеевых соединений, включающих металлы. Однако в случае композитных соединений, подверженных воздействию влажных сред, механизмы разложения весьма различны по

сравнению с клеевыми металлическими соединениями. В отличие от металлов, работа адгезии для композитных и эпоксидных соединений остается положительной в присутствии воды [13] и, таким образом, уменьшается вероятность межфазной недостаточности при износе. Кроме того, композитный адгезив будет поглощать воду, что может влиять на кинетику впитывания воды в адгезив. Температура и влажность также могут влиять на механические свойства композиционного матричного материала, а линия раздела между волокнами и матрицей может быть ослаблена в присутствии влаги [14].

Дегградация адгезивов из-за факторов окружающей среды может быть оценена с помощью структурных испытаний и испытаний на разрушение. Структурные испытания адгезивов показывают значительное снижение адгезионной прочности и жесткости, часто сопровождаемое повышением пластичности при увеличении содержания влаги [15].

Были проведены несколько исследований влияния различных сред на некоторые адгезионные свойства, но все еще необходимо учитывать характеристики конкретных комбинаций адгерент-адгезив и комбинировать исследования влияния окружающей среды, усталости и разрушения связанных систем. Например, известно, что поглощение влаги приводит к различной степени пластификации, потере прочности и повышенной пластичности некоторых эпоксидных клеев. Однако влияние влаги на усталость и разрушающие свойства склеенных соединений, использующих эти адгезивы, до сих пор полностью не изучено. Кроме того, рабочие характеристики каждого из этих компонентов могут сильно влиять на характеристики швов, поскольку клеевые соединения представляют собой системы, состоящие из адгерентов, адгезивов и межфазных областей. Таким образом, общие знания о поведении адгезивных средств, подвергающихся воздействию различных сред, должны дополняться знаниями о поведении конкретных склеенных систем. Поэтому, необходимо проводить эксперименты на соединениях, которые подвергаются различным механическим нагрузкам и влажной среде, чтобы исследовать механизмы разрушения и далее разрабатывать численные модели для точного прогнозирования наблюдаемого в эксперименте поведения разрушения. Одним из подходов, который широко использовался для прогнозирования долговечности клеевых соединений в условиях повышенной влажности, является модель когезионной зоны (МКЗ) моделирования [16-18]. Кроме того, влияние экологических аспектов имеет особое значение для мультиматериальных (гибридных) структур, где компоненты, имеющие разные реакции на одни и те же условия окружающей среды, могут значительно изменить поведение конструкции в целом.

## 1.5 Адгезионные свойства

Адгезивы, используемые в конструкционных применениях, включают: эпоксидные смолы (имеющие высокую прочность и термостойкость), цианоакрилаты (способность к быстрому склеиванию с пластиком и резиной, но плохая устойчивость к влаге и температуре), анаэробные вещества (пригодные для связывания цилиндрических форм), акрилы (универсальные клеи с возможностями быстрого отверждения и устойчивости к более грязным и менее подготовленным поверхностям), полиуретанам (хорошая гибкость при низких температурах и устойчивость к усталости) и высокотемпературным адгезивам (фенольные, полиимиды и бисмалеимиды). В таблице 1.2 представлены несколько типовых свойств различных типов адгезивов.

Как известно, для достижения хорошего сцепления сначала необходимо начать с хорошего клея. Процесс выбора клея является сложным, поскольку не существует универсального клея, который бы подходил для любого применения, а выбор подходящего клея часто осложняется широким разнообразием доступных вариантов. Тем не менее, выбор клея включает в себя множество факторов, таких как: тип и характер склеиваемых поверхностей, метод отверждения и нанесения клея, а также ожидаемые условия и нагрузки, с которыми будет сталкиваться соединение при эксплуатации. Кроме того, стоимость клея иногда может быть важным фактором выбора клея в конкретной производственной ситуации.

Прежде чем адгезивное соединение будет одобрено для применения, необходимо провести скрининговые тесты, чтобы сравнить и оценить различные параметры адгезии. Свойства адгезивов могут сильно различаться, и для правильной конструкции шва необходим соответствующий выбор. Некоторые типовые механические свойства различных адгезивных соединений представлены в таблице 1.3.

Существует широкий диапазон методов испытаний и выборок образцов для испытаний, которые используются для оценки эффективности адгезивов и клеевых соединений. Подходы, используемые для определения свойств адгезивов, являются измерением свойств объемных адгезивных образцов и использование специально разработанных геометрий соединений с тонкой линией связывания (часто называемых испытаниями «на месте»). Измеренные параметры — это нагрузка и деформация, необходимые для возникновения отказа. Геометрия испытания должна обеспечивать чистое состояние напряжения, равномерно распределенное по поверхности контакта и через линию связывания, без концентраций напряжений, и обработка поверхности должна быть достаточной для обеспечения когезионного разрушения в адгезивном слое. В настоящее время, есть много стандартов ASTM и ISO, которые были написаны для анализа и экспериментальной проверки адгезионных свойств. Эти стандарты обеспечивают основу для тестирования.

Обычно используемые методы испытаний, которые были разработаны и использованы для получения свойств адгезивов, включают: испытания на растяжение, испытания на сжатие, отслаивание, испытания на долговечность и динамические испытания.

Например, если для разработки типа клеевого соединения используется метод механики сплошных сред, то наличие кривой напряжения-деформации клея является достаточным (испытание на растяжение в условиях насыщения или испытание на растяжение в толстом слое адгерента, испытание TAST), в то время как для проектирования на основе механики разрушения необходим прочностной режим I и режима II (используются испытания двухконсольной балки DCB и изгиба с концевым надрезом ENF). Однако законы повреждения адгезивов необходимы для более реалистичных и сложных методов, таких как прогрессивные методы нанесения ущерба. Параметры, которые определяют закон повреждения, — это вязкость разрушения и максимальное напряжение для каждого режима разрушения. Наиболее серьезным недостатком клеевого соединения является невозможность точно определить долговечность клеевого соединения в реальных эксплуатационных условиях. Повреждения соединения наложением (SLJ) редко контролируются пределом прочности адгезива на растяжение, но в основном является результатом прогибов и поворотов соединения и вызванных напряжений отслаивания. Из-за вращения в области наложения данные натяжения испытываемого образца с однослойным наложением не могут быть использованы для получения расчетных данных растяжения адгезива, но зачастую используются для скрининговых испытаний при сравнении нескольких систем адгезива и влияния среды на свойства адгезива в процессе выбора адгезива. Таблица 1.4 обобщает некоторые типовые методы испытаний, используемые для оценки эффективности адгезива и адгезивных соединений.

Таблица 1.2 Типовые свойства адгезивов.

|                | Примечания                                                                                                                                                      | Рабочая температура (°C)           | Вулканизация                                                                                                                   |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Эпоксидный     | Высокая прочность и термостойкость, относительно низкие температуры отверждения, простота в использовании, низкая стоимость                                     | от -40 до 100 (180 <sup>а)</sup> ) | Однокомпонентные эпоксидные смолы отверждаются при температуре<br>Двухкомпонентные эпоксидные смолы отверждаются при комнатной |
| Цианоакриловый | Быстрая способность к склеиванию с пластиком и резиной, но плохая устойчивость к влаге и температуре                                                            | -30-80                             | Быстрое отверждение (секунда или минуты) при воздействии влаги при комнатной температуре                                       |
| Анаэробный     | Для крепления и герметизации, где герметичное уплотнение должно быть сформировано без света, тепла или кислорода, подходящих для связывания цилиндрических форм | от -55 до 150                      | Отверждение без воздуха или кислорода при комнатной температуре .                                                              |
| Акриловый      | Универсальные адгезивы со способностью быстрой вулканизации и выдерживать более грязные и менее                                                                 | от -40 до 120                      | Отверждение через механизм свободных радикалов                                                                                 |
| Полиуретановый | Хорошая гибкость при низких температурах и устойчивость к усталости, ударопрочности и долговечности                                                             | от -200 до 80                      | Комнатная температура                                                                                                          |
| Фенольная      | Хорошее сохранение прочности в течение коротких периодов времени, ограниченная стойкость к тепловым ударам                                                      | от -40 до 175 (260 <sup>б)</sup> ) | Отверждение при температуре и высоком давлении                                                                                 |
| Полиимиды      | Термическая стабильность, в зависимости от ряда факторов, сложная технологичность                                                                               | от -40 до 250 (300 <sup>б)</sup> ) | Отверждение при температуре и высоком давлении                                                                                 |
| Бисмалеимид    | Очень жесткие, мало отслаивающиеся свойства                                                                                                                     | от -50 до 200 (230 <sup>б)</sup> ) | Отверждение при температуре и высоком давлении                                                                                 |

а) С различными наполнителями.

б) Прерывистый.





для улучшения межфазного сцепления. Влияние подготовки поверхности на характеристики клеевого шва более подробно обсуждалось в разделе 1.4.

### 1.6.2 Нанесение клеящего состава

Правильное смешивание и нанесение адгезива важны для получения надежных адгезивных соединений. Применение адгезива зависит от его формы. Адгезивы могут поставляться в виде жидкостей с низкой вязкостью или высоковязких паст. Для жидких адгезивов следует использовать тонкие линии связывания, чтобы избежать растекания адгезива. В случае пленочных адгезивов нанесение адгезива также не вызывает затруднений, хотя зазоры между пленкой и подложками могут привести к образованию пустот в адгезиве.

В зависимости от того, как адгезивы смешаны и хранятся, они могут содержать воздух и другие газы. Однокомпонентные адгезивы можно перемешивать в вакууме, и это может удалить большую часть захваченного воздуха. Однако этот процесс не простой и не дешевый. Двухкомпонентные адгезивы также содержат захваченный воздух, и отдельные компоненты также можно перемешивать в вакууме, чтобы выпустить весь или большую часть воздуха. Но двухкомпонентные адгезивы необходимо смешивать непосредственно перед использованием, и следует соблюдать особую осторожность, чтобы избежать попадания воздуха и, следовательно, пустот в отвержденный адгезив. Современные сложные машины, в которых смешивание производится на высокой скорости в вакууме, могут обеспечить относительно свободный от пустот адгезив.

Большинство адгезивов поставляются в жестяной банке, картридже или трубке и часто хранятся в морозильных камерах, поэтому важно обеспечить, чтобы перед нанесением адгезив достиг комнатной температуры. Кроме того, некоторые пастообразные клеи с высокой вязкостью, возможно, потребуется нагреть выше температуры окружающей среды перед применением. Кроме того, пленочные адгезивы обычно поставляются с определенной толщиной и частично отверждаются, и важно, чтобы они содержались в запечатанном пакете до тех пор, пока не достигли температуры окружающей среды.

### 1.6.3 Сборка соединения

Во время процесса связывания следует обеспечить хорошее выравнивание образцов. Небольшое смещение может повлиять на прочность и усталостные характеристики соединения. Рекомендуется оснастка для сварки (фиксатор) чтобы обеспечить правильную длину соединения, точное выравнивание и равномерную толщину линии связывания. Есть различные устройства для фиксации образцов на месте, такие как пружины, зажимы, грузики, прессы, вакуумные пакеты, автоклавы, пресс-формы и другие. Перед нанесением адгезива необходимо использовать антиадгезив, чтобы гарантировать легкое отделение скрепленных компонентов от зажимного приспособления. Антиадгезивный агент должен быть хорошо отвержден перед нанесением клея, чтобы избежать взаимодействия антиадгезивного агента с адгезивом. Тефлоновые формы не требуют антиадгезивного агента, но не могут использоваться при высоких температурах.

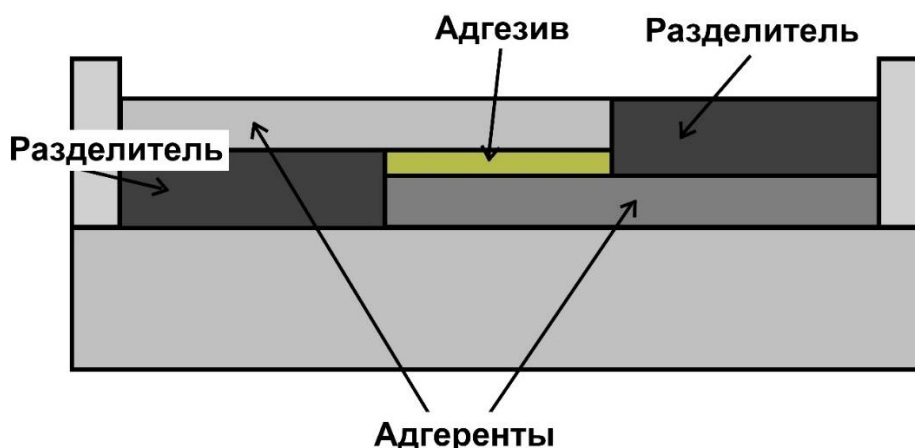


Рис. 1.3 Контроль толщины склеенной линии с разделителями.

Однако для высокотемпературного отверждения рекомендуется использовать формы, изготовленные из того же материала, что и субстраты для уменьшения остаточных термических напряжений. Чтобы получить постоянную и надежную прочность соединения толщина линии связывания должна точно контролироваться (то есть, равномерная толщина адгезивного слоя по всей площади связывания). Существуют различные методы контроля толщины линии связывания. Один пример можно увидеть на Рис. 1.3 где разделители расположены на каждом торце соединения наложением.

Другой способ контроля толщины линии связывания — это использование тонких проволочных прокладок (например, из нержавеющей стали), вставленных между креплениями. Проволочные прокладки должны быть расположены в пределах области связывания вдали от краев образца и областей с концентрациями высоких напряжений (то есть с концами соединений). Толщина линии связывания также может контролироваться путем добавления к клею стеклянных шариков известных размеров. Они не изменят адгезионные свойства будучи использованы в очень небольших количествах и равномерно распределенных по всей поверхности адгезива. Тем не менее, метод, используемый для контроля толщины линии связывания, не должен вводить пустоты или способствовать образованию пустот в адгезиве; в противном случае совместная работа будет нарушена.

Оптимальная толщина связывания зависит от типа используемого адгезива. Слишком тонкая линия связывания может привести к адгезионной нехватке и отслоению, в то время как толстая линия связывания может изменить свойства отверждения, создавая внутренние напряжения, тем самым снижая краткосрочные и долгосрочные характеристики.

Помимо контроля толщины линии связывания, связывание (называемое клеевым выпуском) является важной проблемой при сборке соединений. Разрыв — это результат выдавленного из области наложения адгезива в момент выполнения шва. Было показано, что значительного увеличения прочности на растяжение в стыковых соединениях по сравнению с линиями скрепления с квадратными концами можно достичь путем образования адгезивного изгиба на торцах перекрытия. Пиковое напряжение зависит от размера и формы адгезивного вещества. Кроме того, формирование выпуклости может обеспечить более плавный переход в геометрии соединения, значительно уменьшая концентрацию напряжения [22]. Тем не менее, эти дополнительные функции могут увеличить стоимость изготовления образца.

#### 1.6.4 Отверждение

Хорошо известно, что адгезивы поставляются во многих формах. Они состоят из одной части, которая будет отверждаться при нагревании до некоторой температуры, или они могут состоять из двух частей, которые должны быть смешаны в согласованных пропорциях и нанесены в течение определенного времени, с применением тепла или без него. Однокомпонентные адгезивы также могут поставляться в виде тонкой пленки, часто содержащей некоторое вспомогательное вещество, такое как тканое полотно. Эти пленки можно расплавить при повышенной температуре и налить, если нет поддерживающего полотна.

В случае, когда отверждение происходит при температурах, превышающих комнатную температуру, это следует контролировать с помощью термопары, размещенной как можно ближе к адгезивному слою, чтобы гарантировать, что температура внутри адгезива действительно достигает указанной температуры отверждения. Температуры в адгезиве должны контролироваться на протяжении всего цикла отверждения. В случае адгезивов, которые отверждаются в результате быстрой экзотермической реакции, следует позаботиться о том, чтобы температура материала не поднялась выше максимального значения, указанного поставщиком адгезива. Время отверждения должно определяться с момента достижения адгезивом температуры отверждения.

Остаточные термические напряжения могут возникать в результате неравномерного (быстрого) охлаждения, усадки и несоответствия коэффициента теплового расширения между адгезивом и адгерентом. Также, в случае гибридных адгезивных соединений отверждение при повышенных температурах приводит к остаточным тепловым напряжениям из-за несоответствия теплового расширения между адгезивами (то есть

полимерными композиционными материалами и металлами). Остаточные напряжения замораживаются в материале, поскольку соединение охлаждается от температуры отверждения. Следовательно, скорость охлаждения должна быть медленной, чтобы минимизировать остаточные напряжения. Кроме того, образцы должны достигать условий окружающей среды, прежде чем они будут удалены из склеивающего приспособления. Наконец, условия отверждения адгезивного слоя в адгезивном соединении должны быть такими же, как и у объемных адгезивных образцов, поскольку различные условия отверждения могут привести к значительным различиям в свойствах материала.

## **1.7 Разработка соединения**

Для проектирования структурных адгезионных соединений в инженерных сооружениях необходимо уметь их анализировать. Это означает определение напряжений и деформаций при заданной нагрузке и прогнозирование вероятных точек разрушения. В этом разделе описываются режимы отказов и основные подходы, используемые для анализа склеенных соединений.

### **1.7.1 Виды повреждений (отказа)**

Одним из важных элементов технологии адгезивного связывания является режим разрушения адгезивного соединения. Режимы отказов определяются качеством связи на каждой границе раздела, геометрией образца и нагрузкой. Существуют различные типы отказов: адгезионный отказ, когезивный отказ или смешанный отказ. Эти режимы показаны на Рис. 1.4.

Когезионный отказ — это отказ самого адгезива. Разрушение адгезива — это разрушение соединения на границе раздела адгезив-адгерент. Обычно это вызвано недостаточной подготовкой поверхности. Отказ смешанного режима происходит, если трещина распространяется в одних местах в связном, а в других - в адгезивном (межфазном) режиме. Смешанные поверхности разрушения могут характеризоваться определенным процентом адгезивных и связных областей.

К тому же, происходит отказ субстрата, то есть неисправность, которая возникает, когда происходит связывание адгерента вместо адгезива. В металлах это происходит, когда прилипает адгерент. В композитах слоистый материал обычно выходит из строя вследствие межслойного разрушения, то есть матрица выходит из строя между слоями. Разрушение подложки указывает на то, что адгезив прочнее, чем адгезив в испытанном соединении. Это желательная ситуация в практической разработке, но не при изучении определения адгезионного поведения.

Режимы разрушения должны быть описаны, чтобы получить полное представление о свойствах клея и исследуемого соединения.

### **1.7.2 Анализ адгезивно скленных соединений**

Существует два основных математических подхода к анализу адгезивно скленных соединений: анализ в закрытой форме (аналитические методы) и цифровые методы (то есть, анализ методом конечных элементов).

#### **1.7.2.1 Аналитические методы**

В последние годы интенсивно исследовались адгезивно скленные соединения, и были предложены многочисленные аналитические модели. Простая модель сдвигового запаздывания для адгезивно скленных соединений внахлест с предположением того, что адгезивы растянуты, а адгезив в сдвиге и оба напряжения постоянные по толщине, впервые была представлен Volkersen в 1938 году [23].

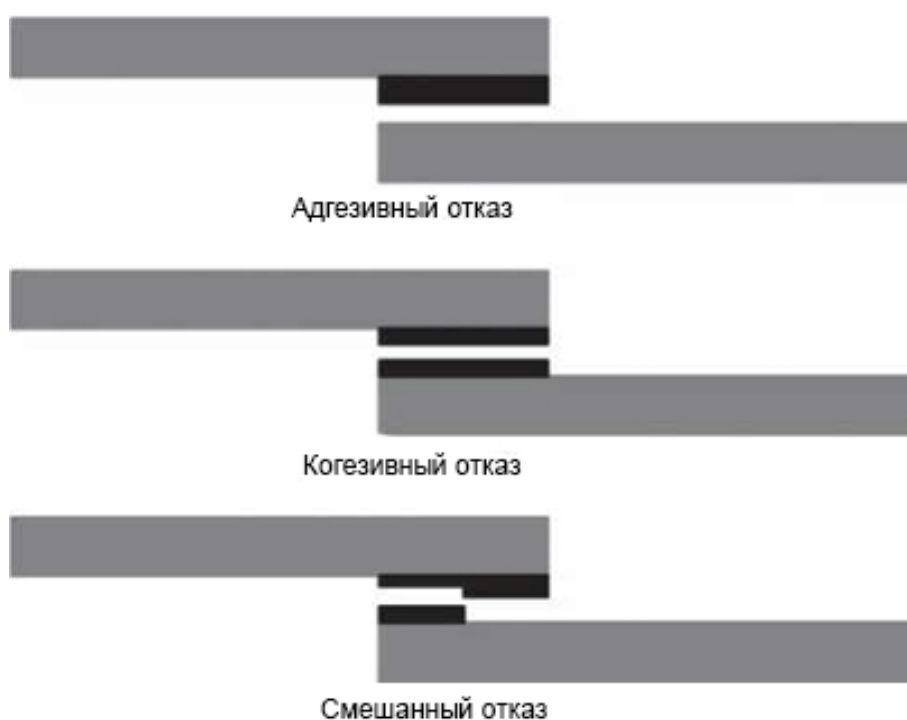


**Рис. 1.4** Режимы отказа.

Однако, решение Volkersen не отражает влияние связывания адгерента и деформации сдвига, которые потенциально важны для композитных адгезивов с низким сдвигом и поперечным модулем и прочностью. Goland и Reissner [24] расширили это исследование, учитывая эффекты адгезивного связывания, приводящие к напряжению отслаивания в адгезивном слое, в дополнение к напряжению сдвига. Hart-Smith [25] предложил простую аналитическую модель с учетом того, что адгезивный слой обладает отличными эластопластическими свойствами. Он смог показать, что максимальная нагрузка, которую может переносить адгезивно склеенное соединение зависит от энергии деформации сдвига адгезивного слоя, независимо от кривой напряжения-деформации. Такой подход позволяет лучше прогнозировать механическое поведение пластичных адгезивных слоев. Hart-Smith детально проанализировал соединение наложением, с двойным наложением, последовательным полу-наложением, для которого использованы изотропные или анизотропные эластичные адгеренты, и адгезив смоделирован как эластичный, эластично-пластичный или двоякоэластичный. Тепловые эффекты также были включены в анализ, и было показано, что снижение прочности соединения из-за термического несовпадения возрастает по мере увеличения толщины и/или увеличения жесткости. Обзор большинства его работ можно найти в Ссылке [26], и основные результаты обобщены там.

После ранних классических аналитических моделей некоторые авторы пытались получить более общие решения в замкнутой форме, такие как включение неидентичных адгезивов (толщина и свойства материала) или композитных адгезивов [27, 28]. Однако, основные уравнения становятся все более сложными и требуют решения для использования компьютера по мере того, как модель становится более общей.

Незадолго до этого, да Сильва и соавт. [29, 30] в своем исследовании рассматривали результаты аналитических моделей, доступные в литературе, и обсуждали условия применимости для каждой из них, чтобы облегчить их применение. Большинство аналитических моделей для адгезионно связанных соединений рассматривали, что адгезивы имеют линейное упругое свойство, в некоторых - пластическое свойство только

для адгезивного слоя, а некоторые включали изменения в распределении адгезионных напряжений по толщине адгезива. Тем не менее, на фоне нелинейности материалов из-за пластичности, сложно выполнить объединение, так как аналитика становится сверхсложной с математической точки зрения, и поведение нелинейных материалов внедряется только в модели конечных элементов (FEM). Таким образом, модели конечных элементов предпочтительны для материалов сложной геометрии и структур. Тем не менее, замкнутая форма решения является наиболее подходящей для получения быстрого и легкого ответа.

### 1.7.2.2 Метод конечных элементов

Метод конечных элементов имеет большое преимущество, в том, что можно определить напряжения в теле под нагрузкой почти любой геометрической формы. Линейные и нелинейные анализы методом конечных элементов были проведены для различных типов адгезивных соединений, и были оценены напряжения и деформации адгезива. Поскольку адгезивный слой является тонким по сравнению с толщиной адгезивов, в этих областях требуется тонкая сетка, поэтому число степеней свободы в соединении довольно велико. Полный анализ методом конечных элементов должен включать эффекты изгиба, сцепления при растяжении, конечных эффектов и нелинейного поведения адгезива и адгерентов.

Адгезионные связанные соединения содержат присущие им дефекты при изготовлении. Такими несовершенствами обусловлено начало образования трещин, что приводит к отказу сборки. Прочность адгезивных соединений на разрыв зависит от ряда факторов и их комбинаций, например, типа адгезива, цикла отверждения, типа адгерента, толщины линии связывания. Однако по-прежнему отсутствуют проверенные и установленные критерии разрушения, что ограничивает, таким образом, более широкое применение адгезивных соединений для их применения в конструкциях. Точный прогноз прочности адгезивных соединений необходим для уменьшения количества дорогостоящих испытаний на стадии проектирования.

Используемые в настоящее время подходы для прогнозирования прочности адгезивных соединений: подход механики сплошных сред (основанный на напряжении), подход механики разрушения и подход механики повреждения.

**Подход механики сплошных сред** Подход механики сплошных сред использовался многими учеными для прогнозирования силы соединения. Адгезивы и адгеренты смоделированы, используя непрерывные элементы, предполагая, что адгезив идеально приклеивается к адгерентам. Предположение о совершенном склеивании означает, что анализ методом конечных элементов не учитывает адгезионные свойства раздела.

Используемый критерий варьируется между максимальными значениями напряжения [25], натяжения [31], или пластической плотности энергии [32]. Однако трудно использовать критерии максимального напряжения или деформации из-за биматериальных особенностей, присущих склеенному соединению (смотрите Рис. 1.5). Биматериальный клин вызывает сингулярное распределение деформации как было показано Vogeу [33]. Поскольку на торцах схематических склеенных соединений всегда будет сингулярность, то максимальная деформация для такой модели будет совпадать со значением в сингулярности и, таким образом, будет сильно варьироваться при измельчении сетки.

Adams и Harris [32] и Zhao et al. [34, 35] показали, что при введении округления сингулярность была удалена, хотя уровень пикового напряжения (или плотность энергии пластической деформации для нелинейных анализов) стал зависим от степени закругления.

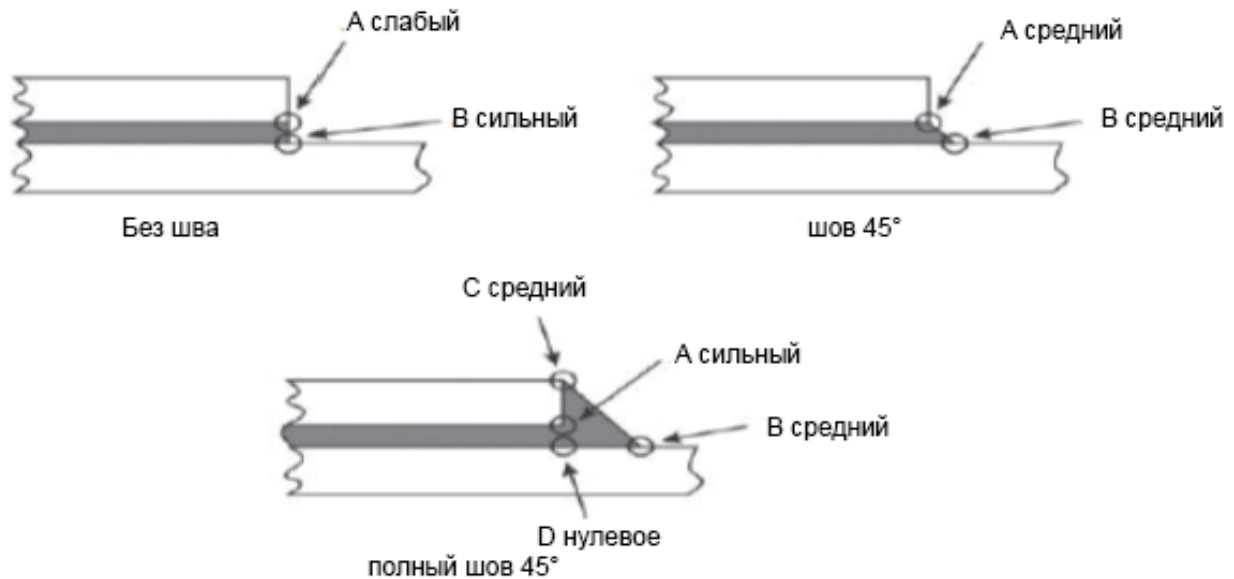


**Рис. 1.5** Прочность сингулярностей в соединениях наложением

Теперь проблема смещена в сторону решения, сколько округлений использовать, чтобы не влиять на прочность соединения. Знание точной конечной формы становится необходимым для точного прогнозирования прочности. Следовательно, подход механики сплошных сред часто используют те же операторы, что и упомянутые ранее, но на этот раз применяется на определенном расстоянии от сингулярности. Этот метод известен как напряжение или напряжение на расстоянии [36].

**Подход механики разрушения.** В подходе механики разрушения, энергетический параметр (ударная вязкость) используется в качестве критерия отказа. В принципе, можно определить значения ударной вязкости как функцию относительных величин нормальной и сдвиговой деформации, действующей на край трещины (в адгезиве, вдоль поверхности раздела или через адгерент), и использовать концепции смешанного режима механики разрушения (отказ происходит, если скорость выделения энергии в смешанном режиме превышает критическое значение) для прогнозирования подходящего пути трещины для расчета прочности соединения в различных условиях нагрузки [37, 38].

Это случай линейно-упругой механики разрушения, которая основывается на существовании трещины и линейной упругости. Тем не менее, хорошо изготовленные соединения могут не иметь макроскопических дефектов, достаточно больших, чтобы их можно было считать трещинами. Кроме того, легко вызвать крупномасштабную пластичность в адгезивах с ламинированными структурами. Эти факторы существенно ограничивают использование подхода линейно-упругой механики разрушения в практических приложениях, и необходимо искать альтернативные подходы.

Другой метод — это метод сингулярности напряжений (подход к механике разрушения без начальной трещины). Некоторые исследователи изучали использование обобщенного коэффициента интенсивности напряжений, аналогичного коэффициенту интенсивности напряжений в классической механике разрушения, для прогнозирования возникновения разрушения для связанных соединений [39, 40]. Groth [39] предложил критерий инициирования разрушения в углах раздела для связанной структуры. Предполагалось, что начало разрушения происходит, когда обобщенный коэффициент интенсивности напряжений достигает своего критического значения. Gleich et al. [40] провели аналогичное исследование и рассчитали прочность и интенсивность сингулярности для диапазона толщин адгезива. Они обнаружили, что интенсивность увеличивалась с увеличением толщины адгезива, и заметили, что это приведет к снижению прочности соединения с увеличением толщины адгезива, что подтверждено экспериментально.

**Механика повреждения** Подход прогрессивного моделирования повреждений позволяет моделировать полный отклик конструкций вплоть до конечной точки отказа в одном анализе без необходимости дополнительной постобработки результатов анализа методом конечных элементов. Это формирующаяся область, и методы моделирования

повреждения можно разделить на локальный или непрерывный подходы. В непрерывном подходе повреждение моделируется в конечной области. Локальный подход, при котором повреждение ограничивается линиями и поверхностями нулевого объема соответственно в двух и трех измерениях, часто называют подходом механики когезионной зоны.

Подход механики когезионной зоны, используется для моделирования прогрессирующего повреждения и разрушения, и необходимо определить заранее определенное направление развития трещины. Механика когезионной зоны симулирует макроскопическое повреждение вдоль этого пути при помощи спецификации отклика на тяговое разделение между первоначально совпадающими узлами по обе стороны от заранее определенного пути трещины. В большинстве своем, в механике когезионной зоны отношения разделения натяжения линий раздела таково, что при увеличении межфазного разделения натяжение через линию раздела достигает максимума (инициирование трещины), затем уменьшается (размягчается) и, наконец, трещина распространяется, что позволяет полностью устранить конфликты между линиями раздела. Таким образом, можно полностью отреагировать на реакцию отказа и распространение трещины.

Механика когезионной зоны моделирует процесс разрушения, расширяющий концепцию механики сплошных сред путем включения зоны разрыва, моделируемой связными зонами, таким образом используя параметры прочности и энергии для характеристики процесса разрушения связывания.

Главное отличие в механике когезионной зоны находится в форме кривых разделения тяги и параметров, которые описывают эту форму. В общем, параметры, которые описывают закон сцепления: площадь под кривой сцепления-растяжения (ударная вязкость) и характерная прочность (как правило, прочность сцепления) или характерное смещение, которое представляет деформацию разрушения в зоне сцепления [4].

Важная концепция подхода механики когезионной зоны заключается в том, что как параметры прочности, так и параметры энергии используются для характеристики процесса разрыхления вдоль траектории трещины, что позволяет подходу иметь гораздо более общую полезность по сравнению с обычной механикой разрушения. Однако когезионные модели имеют ограничение, так как необходимо заранее знать критические зоны, где может произойти повреждение, и разместить когезионные элементы в соответствии. Модели повреждений континуума представляют собой ценную альтернативу, когда развитие трещины априори неизвестен. Кроме того, модели непрерывного повреждения приобретают особую актуальность, когда необходимо учитывать толщину адгезива [41].

Таким образом, в литературе имеется большое количество подходов и исследований для прогнозирования прочности адгезивно склеенных соединений, и количество возможностей выбора критерия разрушения огромно. Трудно определить, какой из них лучший, и нет единого мнения о методе, который следует использовать для прогнозирования отказа, так как параметры прочности и виды отказа различаются в зависимости от методов и параметров связывания. Тем не менее, модели прогрессивного повреждения являются весьма многообещающими, поскольку с помощью этого подхода возможно моделировать аспекты, значимые для определения характеристик соединений.

## 1.8 Последние разработки

В настоящее время один аспект, который становится все более и более важным, это то, что материалы могут быть переработаны и отремонтированы. В обоих случаях необходимо разделить соединение между связанными компонентами. Что касается переработки, такое разделение необходимо, чтобы различные материалы можно было повторно использовать на качественно высоком уровне. Недавно были разработаны специальные методы разрушения связывания. Например, как показали Nishiyama и Sato [42,43], адгезивы, модифицированные с терморасширенными частицами (TEPs) могут быть демонтированы за несколько секунд.

С другой стороны, ремонт является дорогостоящим и, во многих случаях, невозможным из-за ограниченного доступа или риска дальнейшей ухудшения конструкции. Таким образом, полимер со встроенным механизмом для ремонта трещин путем восстановления разрушенных связей представляет большой интерес для многочисленных применений,



чтобы продлить срок службы и повысить безопасность конструкционных материалов. В настоящее время материалы для самовосстановления, основанные на биологических системах, в которых повреждение вызывает реакцию устранения, находятся в процессе интенсивных исследований [44-49]. Первой работой, которая продемонстрировала самоустранение в инженерной материальной системе, была работой Уайт и соавт. [44] с самовосстанавливающимися эпоксидными смолами и композитами. Подход был основан на введении микрокапсулированного устраняющего агента и катализатора в полимерную матрицу. Когда трещина распространяется через капсулы, находящийся в них мономер высвобождается вдоль трещины, где он вступает в контакт с дисперсным катализатором, инициируя полимеризацию и, таким образом, восстанавливая. Тем не менее, с тех пор был достигнут быстрый прогресс в этой области в соответствии с этим концептуальным подходом. Помимо микрокапсулированного устраняющего агента, в настоящее время существует несколько методов, используемых для самовосстановления, таких как полые стеклянные волокна, микрососудистые сети, супрамолекулярные сети и т. д. [46]. Все эти методы, которые были применены с многообещающими результатами в композит [45] и полимерные материалы [49] могут применяться к адгезивным соединениям. Следовательно, адгезивы с возможностью самоустранения для подавления повреждений, вызванных обслуживанием, и, в частности, растрескивания, обеспечивают многообещающий потенциал в продлении срока службы склеенных соединений. Самоустраняющиеся адгезивы позволят устранить давние проблемы в конструкциях, связанных с различными типами механизмов повреждения, такими как механическая / термическая усталость, микротрещины и отслоение.

## 1.9 Выводы

Адгезивное связывание является результативным методом соединения широкого спектра материалов. Должны быть выбраны подходящие обработки поверхности и адгезивы для данного применения. Выбор наиболее подходящего адгезива обычно определяется типом склеиваемого материала, областью применения, средой обслуживания и стоимостью. Также, поведение конкретных связанных систем, подверженных воздействию различных сред, должно учитываться при проектировании долговечности. Кроме того, воздействие факторов окружающей среды имеет особое значение для многокомпонентных (гибридных) конструкций, материал которых отличается реакцией на одни и те же условия окружающей среды - например, металлы и композиты с разным коэффициентом теплового расширения - могут в значительной степени изменить свойства конструкции, в целом. Более того, их необходимо разработать так, чтобы они были устойчивы к усталости, вызванной переменными механическими напряжениями.

Высокий процент отказов может быть связан с плохим совместным производством или отсутствием понимания факторов, которые влияют на совместную работу. Таким образом, помимо выбора правильного адгезива, правильного смешивания и нанесения адгезива, сборка шва и процесс отверждения также являются важными вопросами при производстве надежных адгезивных соединений.

Существует широкий диапазон методов испытаний и выборок образцов для испытаний, которые используются для оценки эффективности адгезивов и адгезивных соединений, но не все из них способны создавать данные для проектирования.

Для определенного типа нагрузки прочность типа соединения зависит от распределения напряжений по шву, на что влияет геометрия выполненного соединения и механические свойства адгезивов и адгерентов. В литературе имеется большое количество подходов и исследований для прогнозирования прочности адгезивно склеенных соединений, и число возможностей выбора критерия разрушения огромное. Сложно определить, какой из них является оптимальным и лучшим, и нет единого мнения о методе, который следует использовать для прогноза разрушений, поскольку прочность на разрушение и характер разрушения зависят от различных способов и параметров связывания, но модели прогрессирующего разрушения весьма перспективны, поскольку с помощью этого подхода возможно смоделировать значимые аспекты свойств выполняемого соединения. Однако по-прежнему существует отсутствие надежных критериев разрушения, что ограничивает более широкое применение адгезивных соединений в основных несущих конструкциях.

Необходим точный прогноз прочности адгезивных соединений для уменьшения количества дорогостоящих испытаний на стадии проектирования.

## Литература

1. Adams, R.D., Comyn, J., and Wake, W.C. (1997) *Structural Adhesive Joints in Engineering*, 2nd edn, Chapman & Hall, London.
2. Petrie, E.M. (2006) *Handbook of Adhesives and Sealants*, 2nd edn, McGraw-Hill, New York.
3. da Silva, L.F.M., Uchsnr, A., and Adams, R.D. (eds) (2011) *Handbook of Adhesion Technology*, Springer-Verlag, Heidelberg.
4. da Silva, L.F.M. and Campilho, R.D.S.G. (eds) (2012) *Advances in Numerical. Modelling of Adhesive Joints*, Springer-Verlag, Heidelberg.
5. Banea, M.D. and da Silva, L.F.M. (2009) Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater.-Des. Appl.*, 223 (1), 1–18.
6. Banea, M.D., da Silva, L.F.M., and Campilho, R.D.S.G. (2012) Moulds design for adhesive bulk and joint specimens manufacturing. *Assembly Automat.*, 32 (3), 284–292.
7. da Silva, L.F.M., Dillard, D., Blackman, B., and Adams, R.D. (eds) (2012). *Testing Adhesive Joints – Best Practices*, Wiley Verlag GmbH, Weinheim.
8. Baldan, A. (2004) Adhesively-bonded joints and repairs in monolithic alloys, polymers and composite materials: adhesives, adhesion theories and surface pretreatment. *J. Mater. Sci.*, 39 (1), 1–49.
9. Kinloch, A.J. (1987) *Adhesion and Adhesives*, Chapman and Hall, London.
10. Davis, M.J. and Bond, D. (1999) Principles and practise of adhesive bonded structural joints and repairs. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 19 (3), 91–105.
11. Banea, M.D. and da Silva, L.F.M. (2010) The effect of temperature on the mechanical properties of adhesives for the automotive industry. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater.-Des. Appl.*, 224 (2), 51–62.
12. Banea, M.D. and da Silva, L.F.M. (2010) Static and fatigue behaviour of room temperature vulcanizing silicone adhesives for high temperature aerospace applications. *Materialwiss. Werkstofftech.*, 41 (5), 325–335.
13. Wright, W.W. (1979) A review of the influence of absorbed moisture on the properties of composite materials based on epoxy resins, RAE Technical. Memorandum, Mat324.
14. Kinloch, A.J. (1983) *Durability of Structural Adhesives*, Applied Science. Publishers, London.
15. Ashcroft, I.A., Abdel Wahab, M.M., Crocombe, A.D. et al. (2001) The effect of environment on the fatigue of composite joints: Part 1, testing and fractography. *Composites Part A*, 32, 45–58.
16. Crocombe, A.D., Hua, Y.X., Loh, W.K. et al. (2006) Predicting the residual strength for environmentally degraded adhesive lap joints. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 26 (5), 325–336.
17. Liljedahl, C.D.M., Crocombe, A.D., Wahab, M.A., and Ashcroft, I.A. (2006) Modelling the environmental degradation of the interface in adhesively bonded joints using a cohesive zone approach. *J. Adhes.*, 82 (11), 1061–1089.
18. Katnam, K.B., Sargent, J.P., Crocombe, A.D. et al. (2010) Characterisation of moisture-dependent cohesive zone properties for adhesively bonded joints. *Eng. Fract. Mech.*, 77 (16), 3105–3119.
19. Banea, M.D., da Silva, L.F.M., and Campilho, R.D.S.G. (2012) Effect of temperature on the shear strength of aluminium single-lap bonded joints for high temperature applications. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 28 (14–15), 1367–1381. doi: 10.1080/01694243.2012.697388
20. da Silva, L.F.M. and Adams, R.D. (2007) Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 27 (5), 362–379.
21. da Silva, L.F.M., Silva, R.A.M.D., Chousal, J.A.G., and Pinto, A.M.G. (2008) Alternative methods to measure the adhesive shear displacement in the thick adherend shear test. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 22 (1), 15–29.
22. Lang, T. and Mallick, K. (1998) Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 18 (3), 167–177.
23. Volkersen, O. (1938) Die Niekraftverteilung in Zugbeanspruchten mit Konstanten Laschenquerschnitten. *Luftfahrtforschung*, 15, 41–68.
24. Goland, M. and Reissner, E. (1944) The stresses in cemented lap joints. *J. Appl. Mech.*, Trans. ASME, 66 (11), A17–A27.

25. Hart-Smith, L.J. (1973) Adhesive-Bonded Single-Lap Joints. NASA Langley Report CR 112236, Douglas Aircraft Co.
26. Hart-Smith, L.J. (1974) Analysis and Design of Advanced Composite Bonded Joints. NASA Langley Report CR-2218, Douglas Aircraft Co.
27. Renton, W.J. and Vinson, J.R. (1975) The efficient design of adhesive bonded joints. *J. Adhes.*, 7, 175–193.
28. Srinivas, S. (1975) Analysis of Bonded Joints. NASA TN D-7855.
29. da Silva, L.F.M., das Neves, P.J.C., Adams, R.D., and Spelt, J.K. (2009) Analytical models of adhesively bonded joints – Part I: Literature survey. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 29, 319–330.
30. da Silva, L.F.M., das Neves, P.J.C., Adams, R.D. et al. (2009) Analytical models of adhesively bonded joints – Part II: Comparative study. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 29, 331–341.
31. Adams, R.D., Atkins, R.W., Harris, J.A., and Kinloch, A.J. (1986) Stress analysis and failure properties of carbon-fibre reinforced plastic/steel double lap-joint. *J. Adhes.*, 20, 29–33.
32. Adams, R.D. and Harris, J.A. (1987) The influence of local geometry on the strength of adhesive joints. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 7 (2), 69–80.
33. Bogey, D.B. (1968) Edge bonded dissimilar orthogonal elastic wedges under normal and shear loading. *ASME J. Appl. Mech.*, 35, 460–466.
34. Zhao, X., Adams, R.D., and da Silva, L.F.M. (2011) Single lap joints with rounded adherend corners: stress and strain analysis. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 25, 819–836.
35. Zhao, X., Adams, R.D., and da Silva, L.F.M. (2011) Single lap joints with rounded adherend corners: experimental results and strength prediction. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 25, 837–856.
36. Towse, A., Potter, K.D., Wisnom, M.R., and Adams, R.D. (1999) The sensitivity of a Weibull failure criterion to singularity strength and local geometry variations. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 19, 71–82.
37. Hutchinson, J.W. and Suo, Z. (1992) Mixed-mode cracking in layered materials. *Adv. Appl. Mech.*, 29, 64–187.
38. Chen, Z., Adams, R.D., and da Silva, L.F.M. (2011) The use of the J-integral to analyse adhesive bonds with and without a crack. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 31, 48–55.
39. Groth, H.L. (1988) Stress singularities and fracture at interface corners in bonded joints. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 8 (2), 107–113.
40. Gleich, D.M., Van Tooren, M.J.L., and Beukers, A. (2001) Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 15 (9), 1091–1101.
41. de Moura, M.F.S.F., Gonзалves, J.P.M., Chousal, J.A.G., and Campilho, R.D.S.G. (2008) Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 28 (8), 419–426.
42. Nishiyama, Y. and Sato, C. (2005) Behavior of dismantlable adhesives including thermally expansive microcapsules, in *Adhesion – Current Research and Application* (ed W. Possart), Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
43. Nishiyama, Y., Uto, N., Sato, C., and Sakurai, H. (2003) Dismantlement behaviour and strength of dismantlable adhesive including thermally expansive particles. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 23, 377–382.
44. White, S.R., Sottos, N.R., Geubelle, P.H. et al. (2001) Autonomic healing of polymer composites. *Nature*, 409, 794–797.
45. Kessler, M.R., Sottos, N.R., and White, S.R. (2003) Self-healing structural composite materials. *Composites Part A*, 34, 743–753.
46. Mauldin, T.C. and Kessler, M.R. (2010) Self-healing polymers and composites. *Int. Mater. Rev.*, 55, 317–346.
47. Murphy, E.B. and Wudl, F. (2010) The world of smart healable materials. *Prog. Polym. Sci.*, 35 (1–2), 223–251.
48. Jin, H., Miller, G.M., Sottos, N.R., and White, S.R. (2011) Fracture and fatigue response of a self-healing epoxy adhesive. *Polymer*, 52, 1628–1634.
49. Brown, E.N., White, S.R., and Sottos, N.R. (2005) Retardation and repair of fatigue cracks in a microcapsule toughened epoxy composite – Part II: In situ self-healing. *Compos. Sci. Technol.*, 65, 2474–2480.

## 2 Адгезионное связывание полимерных композитов с легкими металлами

Raul D. S. G. Campilho<sup>1</sup>, Lucas F. M. da Silva<sup>2</sup>, u Mariana D. Banea<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal*

<sup>2</sup>*Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal*

### 2.1 Введение

Адгезивное соединение — это постоянный процесс соединения компонентов конструкции, в котором используется адгезив для соединения компонентов после его затвердевания/отверждения. Он используется для обеспечения возможности изготовления конструкций сложной формы, которые не могут быть изготовлены в виде единого элемента, для целей усиления/ремонта или общего соединения с целью создания структурного соединения, которое теоретически должно быть, по крайней мере, таким же стойким, как и исходные материалы. Адгезивные соединения могут заменять сварные или скрепленные/клепанные соединения в технических сооружениях из-за больших усилий по исследованию и оптимизации, проведенным в последние десятилетия, которые сделали этот процесс очень эффективным в сочетании с постоянным развитием характеристик адгезивов [1, 2]. В настоящее время они обеспечивают много преимуществ по сравнению с механическими методами, такими как меньший структурный вес, более низкая стоимость изготовления, простота изготовления, улучшенная устойчивость к повреждениям и гибкость конструкции. По сравнению с механическим креплением, которое, как ожидается, достигнет предела прочности на разрыв почти вдвое меньшего, чем у самого слабого сцепления в соединении, из-за концентраций напряжений вблизи крепежных отверстий, склеенные соединения могут достичь прочности самого слабого сцепления даже с конфигурацией соединения наложением. В результате, в настоящее время эта технология выбрана в тех областях начиная от высокотехнологичных отраслей промышленности, таких как авионавтика, авиакосмическая промышленность, электроника и автомобилестроение, до традиционных отраслей, таких как строительство, спорт и упаковка [3]. Несмотря на эти факты, склеенные соединения не могут быть разобраны без повреждений, они очень чувствительны к факторам окружающей среды, таким как влажность и температура, и имеют тенденцию резко разрушаться, что делает невозможным мониторинг повреждений. Тем не менее, наиболее серьезным недостатком клеевого соединения является неопределенность проектировщиков касательно долгосрочной структурной целостности.

Благодаря некоторым привлекательным характеристикам, одновременно с развитием процессов связывания, композиты армированные волокном становятся все более популярными во многих отраслях промышленности по сравнению с типичными строительными материалами [4]. Композитные материалы обычно используются в конструкциях, которые требуют высокой удельной прочности и жесткости (то есть нормализованных по весу значений), что позволяет уменьшить вес компонентов, в то же время, поддерживая необходимую прочность и жесткость, чтобы противостоять наложенным нагрузкам. Эта особенность является причиной увеличивающегося использования высокоэффективных композитных материалов из углеродного волокна в авиакосмической промышленности. Для композитов из стекловолокна можно сопоставить удельную прочность конструкционных легированных сталей при гораздо меньших затратах на сырье и изготовление, а в некоторых случаях устойчивость к экстремальным средам (контакт с химикатами и влагой) также играет важную роль в их пользу. Эти характеристики могут быть легко обеспечены последовательным выбором полимерной смолы, действующей в качестве матрицы, или даже использованием добавок или покрытий. В целом наблюдается постепенное увеличение количества металлических деталей, заменяемых композитами в военных и гражданских самолетах. В качестве примера, композитные материалы составляют 22% общей массы Аэробуса A380, включая

центральную коробку крыла, конус хвоста, герметическую перегородку, и вертикальные и горизонтальные хвосты [5], и эта тенденция, вероятно, увеличится в ближайшее время (это около 50% для Боинга 787). Что касается изготовления композитных конструкций, даже при том, что современные методы изготовления предлагают возможность уменьшить конструкционное соединение до минимума, с помощью интегральной конструкции и специальных технологий изготовления, соединения после изготовления все еще необходимы из-за некоторых проблем, таких как типичный размер компоненты и конструкция, технологические и логистические ограничения. Другие проблемы, связанные с требованиями к ремонту, техническому обслуживанию, проверке и обращению, также могут привести к необходимости подключения различных частей. Независимо от метода, соединение увеличивает сложность конструкции и локальные концентрации напряжений, но также может уменьшить преимущество легкого веса композитной конструкции. В результате необходимо разработать передовые технологии соединения, чтобы свести к минимуму соответствующие потери веса. Таким образом, из-за вышеупомянутых характеристик и преимуществ адгезионного связывания легко признать, что применение связывания в структурах, включающих армированные волокном композиты, значительно возросло в последние годы. Одной из основных причин является сохранение структурной целостности, которой не могут достичь болтовые или клепанные соединения из-за резки волокон и, следовательно, из-за введения концентраций напряжений.

В этой главе рассматриваются доступные методы клеевого соединения между композитными материалами и легкими металлами. Первоначальный акцент делается на описании различных видов связей между этими материалами, основных преимуществ и применений, уделяя особое внимание соединению гибридных связей между этими материалами в качестве различных компонентов и слоистых волоконных материалов (FML). Затем приводятся некоторые соображения касательно экспериментального изготовления этих структур и примеры применения, доступные в литературе. В последнем разделе рассматриваются методы прогнозирования для гибридных склеенных конструкций, начиная с аналитического метода до метода конечного элемента (МКЭ), дающие базовое описание принципов каждого метода и соответствующих работ, с акцентом на методы моделирования и полученные результаты.

## 2.2 Характеристики и применения гибридного связывания

В некоторых случаях для получения мультиматериальных структур полимерные композиты требуют соединения с легкими металлами, такими как алюминий или титан [4]. Фактически, как обсуждалось ранее, армированные волокном композиты превосходят металлы в отношении удельной прочности и жесткости; однако, металлы требуются в некоторых структурах или определенных частях собранной структуры из-за их высокой надежности [6]. Следовательно, во многих современных инженерных сооружениях между композитами и металлами можно ожидать гибридные соединения (Рис. 2.1;  $L_T$  – общая длина соединения,  $L_O$  – длина перекрытия,  $t_{P_i}$  – адгерент  $i$  толщина,  $t_A$  – толщина адгезива).

Фюзеляж сверхзвуковых самолетов, где часто встречаются алюминиевые или титановые композитные соединения [7], обычно испытывают температуру поверхности в диапазоне от -55 до более 200 °C, из-за кинетического нагрева на высоких скоростях из-за трения воздуха. Ремонт самолетов из склеенного композита - еще одно возможное применение гибридного связывания, широко изученное в литературе [8]. Они заключаются в нанесении композитного пластыря на низлежащую алюминиевую пластину либо посредством адгезивного связывания предварительно отвержденного пластыря, либо с укладкой препреговых слоев для последующего отверждения. Преимущества использования композитных заплат включают простоту создания ремонтных работ небольшой толщины, простоту сборки и соответствие изогнутой геометрии. Тем не менее, получающаяся гибридная структура имеет сильно несовпадающие адгезии, которые будут проявлять значительные термические напряжения после отверждения.

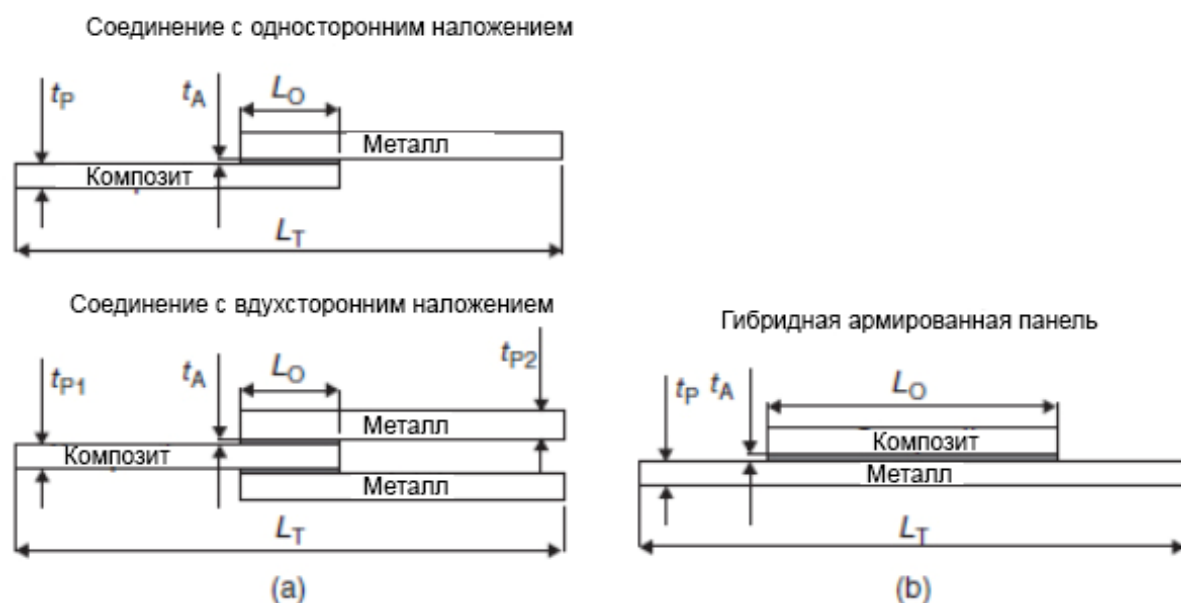


**Рис. 2.1** Гибридные соединения с односторонним и двухсторонним соединением внахлестку (а) и гибридная армированная панель (б).

Усиление композитных топливных баков в космических ракетах-носителях со связанными алюминиевыми вкладышами является еще одним инновационным применением гибридных конструкций [9]. Фактически, исследования по минимизации веса этих компонентов космического корабля проводились, что неизменно приводит к использованию углерод-эпоксидных композитов для резервуаров. Однако эти материалы имеют тенденцию к образованию микротрещин в матрице из-за разницы в коэффициентах теплового расширения (СТЕ) для армирующих волокон, что может привести к утечке топлива и поставить под угрозу безопасность резервуара. Это открывает возможность для алюминиевого усиления в виде скрепленных вкладышей, размещенных по окружности вокруг резервуара. Тем не менее, когда усиленные резервуары заполнены криогенным топливом под давлением, адгезивный слой, соединяющий вкладыши с резервуаром, подвергается экстремальным тепловым напряжениям, которые могут вызвать разрушение соединения и подчеркивает необходимость выбора и проектирования связанной системы с максимальным вниманием.

Необходимость усиления корпусов судов больших размеров, первоначально изготовленных из стекловолокнистых композитов, из-за больших вертикальных изгибающих моментов также привела к изучению этой техники [10], то есть, со склеенным алюминиевым усилением. Работа Saccese et al. [11] рассматривает конкретный сценарий, в котором соединение композитов с металлическими конструкциями может принести значительные эксплуатационные преимущества: склеенные соединения гибридного страта или судна для подводной эксплуатации. Страт был изготовлен из набора пултрузионных и намотанных нитями композитных слоев и соединен с кораблем с помощью адгезивно склеенного алюминиевого кожуха, действующим как линия раздела корабля.

Ввиду потенциального улучшения веса и жесткости гибридных связанных конструкций между композитами и легкими металлами, применения также были испытаны для автомобильных приводных валов, шпиндельных бабок шлифовальных машин и роботизированных конструкций [12]. Также возможно достичь улучшения поглощения энергии удара с помощью гибридных структур. Осевое разрушение и изгибное разрушение гибридных квадратных труб из алюминиевых и стеклянных композитов было изучено Shin et al. [13] с целью улучшения поглощения энергии в автомобильных продольных балках передней конструкции. Результаты показали эффективность гибридных трубок, позволяющих уменьшить вес транспортных средств для аналогичных характеристик поглощения.

С другой стороны, соединение между композитами и металлами в многослойных панелях также очень выгодно, обращая выбор в пользу FML (Рис. 2.2). Первоначально

концепция была разработана в Дельфтском Техническом Университете в 1980 г. [14], и наиболее распространенными комбинациями были алюминий с арамидом (Arall) и стекловолоконные композиты (Glare). Один из первых мотивов развития этих конструкций был связан с повышением усталостной прочности алюминиевых панелей, используемых в авиационных конструкциях.

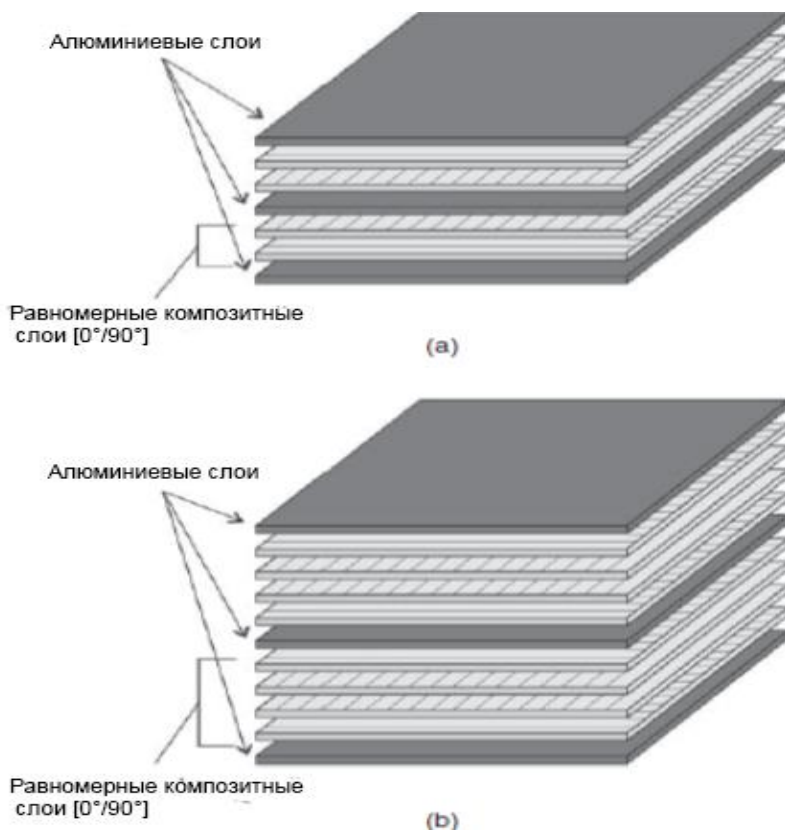


**Рис. 2.2** Образцы FML между равномерными композитными слоями и алюминиевыми слоями

Фактически, это очень актуальная проблема, поскольку алюминиевые конструкции подвержены усталостным разрушениям, а также потому, что во многих ситуациях гражданские и военные самолеты вынуждены эксплуатироваться при нагрузках, превышающих проектные значения, и в течение периодов времени, значительно превышающих их первоначальный расчетный срок службы. Усталостное растрескивание часто возникает в результате ударных повреждений, возникающих во время полета (например, столкновения с птицами), предполетного полета или операций руления, ударов инструмента или объекта во время технического обслуживания, разбросанных обломков или града.

В эти конструкции были добавлены композитные слои для дополнительного снижения веса, в то время как одним из первоначальных решений было использование склеенных слоистых слоев алюминия для перекрытия трещин и замедления их роста. Экономия веса около 30% были зарегистрированы по этой методике с использованием арамидных слоев [15]. Glare изначально использовались в фюзеляже Аэробуса A320, что приводит к снижению веса на 25%, с доказанной эффективностью в замедлении или остановке трещины, из-за перекрытия трещины, открывающейся неповрежденными волокнами в результате наступающего наконечника трещины. Другое исследование [16] сообщило об экономии веса 6% с конструкцией Glare поверх алюминиевого сплава, чтобы соответствовать жесткости на изгиб конструкции, и 17% на основе предела текучести. В этих материалах, растут трещины в алюминиевой фольге с постепенным расслоением между алюминиевым и композитным слоями. Металлические слои с трещинами соединяются с неповрежденными волокнами, и распространение трещин замедляется

(распространение усталостной трещины в алюминиевых слоях Glare может быть в 10-100 раз медленнее, чем в эквивалентном монолитном алюминии [16]).

С точки зрения ударной прочности, огнестойкости и коррозионной стойкости, устойчивости к повреждениям и упрощения процесса изготовления были найдены дополнительные преимущества [17]. В FML, наружные слои представляют собой металлические листы, для защиты основных слоев полимерных композитов. Как следствие, устойчивость к воздействию окружающей среды и посторонних объектов также повышается. Совсем недавно были представлены сочетания алюминия с углеродными композитами (Carall) [18] и, для высокотемпературных применений между титановыми и углеродными композитами (TiGr) [19]. В поисках структурного снижения веса, некоторые исследователи также исследовали использование магния [17]. Обобщенный успех FML и особенно Glare в том, что эти гибридные материалы идеально вписываются в принципы устойчивости к повреждениям, необходимые в современной конструкции самолета. На самом деле, эти ламинированные материалы обеспечивают второй путь нагрузки, делая его устойчивым к повреждениям материалом [20]. FML, которые были первоначально разработаны для основных конструкций самолетов, в настоящее время применяются в конструкциях обшивки фюзеляжа, в частности в верхней части, подверженной высоким усталостным нагрузкам, и в обшивках нижних крыльев. Кроме того, Слоистый конструкционный алюмостеклопластик Glare также используется для D-noses горизонтальной и вертикальной плоскостей хвоста из-за превосходной ударопрочности этого гибридного материала. Из-за этого были также проведены исследования на подверженных ударам областях самолета, например, кабине, в попытке оптимизировать конфигурацию Glare специально для ударных характеристик. Эти работы показали, что использование равномерных слоев стекловолокна S2 обеспечивает максимальную ударопрочность по сравнению со слоями, изготовленными из S2-стекла или E-стекла [21]. Углеродно-эпоксидные композиты лучше всего сочетаются с титановыми сплавами благодаря совместимости КТР и текучести, а также предельных удлинений [5]. Эти особенности делают этот FML подходящим для конструкционных материалов обшивки, локального армирования, исправлений или высокотемпературных применений (например, компонентов высокоскоростных самолетов).

В этой ситуации, для увеличения прочности болтовых соединений между композитными слоями, локальная гибридикация с металлической фольгой композитных слоев вблизи болтовых соединений является еще одним применением FML. Это уменьшает вес и увеличивает экономическую эффективность конструкций космических аппаратов, которые сталкиваются с растущими требованиями в этих направлениях. Фактически, в результате получается гибридный материал с высокой прочностью с нагрузкой на отверстие, к смещению, растяжению и сжатию в области соединения, которые необходимы для высокой эффективности болтовых соединений. Кроме того, более высокая прочность этого FML устраняет необходимость в локальных утолщениях и эксцентриситетах и позволяет уменьшить количество болтов, что приводит к механически и экономически эффективной конструкции. Это применение было рассмотрено Fink et al. [22] на болтовых соединениях адаптера полезной нагрузки углеродно-эпоксидного космического корабля, используя методы замещения слоев без какой-либо дополнительной клеевой пленки для создания гибридной композитно-титановой структуры вблизи отверстий под болты. Применение этой арматуры позволило значительно снизить вес конструкции.

Для обоих этих решений, то есть для связывания композитов с легкими металлами и изготовления панелей FML, используются пасты или пленочные адгезивы. Однако, учитывая конкретные характеристики материалов, подлежащих соединению, также доступно совместное отверждение, чтобы уменьшить время изготовления и стоимость гибридных структур [6]. Совместное отверждение использует избыток смолы композитной матрицы в качестве адгезива, который связывает композитные и металлические детали. Таким образом, композитное отверждение и соединение с металлической частью достигается одновременно. Хотя это упрощение является явным преимуществом, нельзя ожидать значительного увеличения прочности связывания по сравнению с обычными скрепленными соединениями. Несмотря на способ связывания, статическая и динамическая прочность соединения скрепленных конструкций сильно зависят от параметров конструкции, таких как укладка композитного адгезива, геометрические



параметры и шероховатость поверхности металлического адгезива (стыков в отвержденном состоянии) или обоих адгезивов (связывание) [23]. Например, композитная компоновка сильно влияет на жесткость конструкции и КТР. Соотношение толщины между композитными и металлическими адгезивами, с другой стороны, также влияет на жесткость и дифференциальную деформацию между обоими адгезивами. Все эти параметры влияют на распределение напряжений и, как естественное следствие, также на прочность сцепления.

Ввиду этого, в последние годы было сделано большое количество работ для широкого спектра применений и с использованием двух методов соединения и поскольку связь обычно является самой слабой частью среди компонентов собранных конструкций. Общая перспектива доступной информации о конструкции представлена в следующих разделах, разделенных на экспериментальные и прогнозные работы.

## 2.3 Экспериментальная оценка гибридных конструкций

Этот раздел описывает общие принципы правильного соединения композитов с металлами с акцентом на подготовку к приклеиванию, процедуру связывания (клеевое соединение и совместное отверждение) и методы разрушающего испытания. Несколько экспериментальных работ по гибридным связям описаны вместе с соответствующими результатами, показывающими потенциал гибридных связей.

### 2.3.1 Подготовка адгерентов

Способ приготовления адгерентов во многом зависит от материала. В случае металлических заготовок механическая обработка часто используется после резки крупногабаритных образцов из многослойных листов или массивных плит с использованием фрезерных инструментов, таких как быстрорежущая сталь, твердосплавные или, в конечном итоге, алмазные фрезы с покрытием для более прочных металлов. Кроме того, водоструйная резка также обеспечивает хорошую отделку. Шероховатость пескоструйной обработкой (используя  $\text{SiO}_2$  песок или аналогичный с размером зерна между 0.2 и 0.6 мм) рекомендуется обеспечить прочное сцепление или, в качестве альтернативы, ручное истирание при помощи грубой наждачной бумаги. Это позволяет удалить поверхностный оксидный слой и загрязнения. Очистка склеиваемых поверхностей может проводиться ацетоном. Травление или анодирование могут быть использованы для долговечности.

Конструкции/крепления для композитов обычно состоят из сложенных слоев и устанавливают их окончательные размеры путем механической обработки. Предлагаются шлифовальные камни на высокой скорости вращения ( $>2000$  об./мин) и небольшая линейная подача ( $<50$  мм/мин). Фрезерные инструменты не рекомендуются из-за их высокой скорости износа (фрезы с твердосплавным или твердосплавным покрытием) или высокой стоимости (мельницы с алмазным покрытием). Rudawska [4] использовал очиститель растворителя Loctite® (ссылка 7063) для очистки и обезжиривания композитных (арамидных/эпоксидных), титановых и алюминиевых деталей перед гибридным соединением эпоксидным клеем после ручной шероховатости. Этот метод оказался весьма эффективным в обеспечении прочной связи. Lawcock et al. [24] исследовали адгезию между алюминиевыми листами и препрегом из углеродного волокна для гибридных пластин Carall и показали заметное преимущество в энергии межфазного разрушения при растяжении, выполнив модифицированную процедуру FPL-Etch с последующим применением силанового связующего агента по сравнению со стандартным травлением.

### 2.3.2 Применение адгезива

Сильная связь в значительной степени зависит от правильной процедуры изготовления. Форма должна быть рассмотрена для правильного выравнивания и равномерного приложения давления. При рассмотрении пастообразных адгезивов заливку адгезива на склеиваемые поверхности проводят в атмосфере с низким содержанием влаги, чтобы избежать поглощения влаги и предпочтительно на обоих адгезивах. Это важно для адгезивов быстрого отверждения, чтобы предотвратить ослабление на верхней границе раздела адгезив/компонент из-за частичного отверждения адгезива перед сборкой верхнего компонента. Для точности расчетного значения толщины адгезива рекомендуется размещение калиброванных стальных распорок на внешней периферии длины связывания [25]. Альтернативно, калиброванные стеклянные шарики можно смешивать с адгезивом в количестве до 0,5% от общего веса [26]. Пленочные адгезивы также могут быть использованы для связывания слоев различных материалов. С помощью технологии совместного отверждения гибридное соединение может быть изготовлено путем сложения поочередно препрега и металлических слоев или ручной укладки, то есть путем ручного размещения армирующей сетки, тканого материала или равинга поверх металлического куска во время заливки смолы, чистить щеткой или распылять на композитные слои. Максимальное внимание должно быть уделено температуре отверждения, времени отверждения и требуемому давлению на склеиваемый комплект. Отверждение/совместное отверждение может происходить при комнатной или высокой температуре и под давлением или без него, в зависимости от характеристик клея. Прессование горячего листа (для плоских компонентов) [26] и автоклавирование [16, 27] являются наиболее простыми подходами, которыми может быть достигнут указанный цикл температуры и давления. Для работ под давлением формование методом вакуумного мешка является еще одной альтернативой, хотя конечное качество не такое хорошее по сравнению с автоклавным отверждением. В работе Sugiman et al. [25] оценен статический отклик стеклоалюминиевого композита FML. Испытуемые образцы изготовлены путем ручной укладки чередующихся слоев этих материалов с пленочным адгезивом Cytac FM® 73 M толщиной 0,22 мм, после подготовки связываемых поверхностей праймером BR 127 Cytac. Материалы выдерживали в автоклаве в условиях, указанных изготовителем, для получения оптимального связывания.

Bagnoli et al. [20] изучена замедляющая способность развития усталостной трещины слоев Glare, связываемых с алюминиевыми сплавом. Изготовление структуры Glare и связывание с алюминиевой пластиной выполнены модифицированной эпоксидной клеей пленкой FM® 94 Cytac. Для подготовки поверхности склеиваемые поверхности травили в ванне с серной кислотой / дихроматом натрия при 60 °C. Структура была отверждена в печи при 125 °C в течение 1 часа. По с-ультразвуковой фазированной решетке подтверждалось качество связи перед испытанием. Park et al. [23] изучал двойные стыковые соединения между углерод-эпоксидной смолой и алюминием. Средняя шероховатость поверхности (Ra) 2.0 мкм получена механическим истиранием для достижения максимальной усталостной прочности. Препреговые слои были уложены на алюминиевый клей и помещены в вакуумный пакет для связывания. Совместное отверждение осуществляли в автоклаве с давлением 0.6 МПа.

### 2.3.3 Тестирование образца

Гибридные конструкции могут быть испытаны на любой обычной электромеханической или гидравлической машине, которая регистрирует смещение нагрузки P-δ кривой. Однако для высокоточного измерения структурных смещений можно использовать измерительный трансформатор линейных перемещений (LVDT) для устранения деформации захватов [26], предпочтительно устанавливается на конструкцию машины. Бесконтактная видеоэкстензометрия является еще одной возможностью для измерения смещений [16], с преимуществом независимости от системы загрузки. Скорость испытания, выбранная в зависимости от скорости деформации, требуемой для испытаний, должна быть достаточно малой, чтобы учитывать квазистатические условия. В работе Sugiman et al. [25], скорость передвижения траверсы поддерживалась на уровне 0,1 мм/мин для точной характеристики

процесса повреждения. Для того, чтобы делать фотографии (предпочтительно автоматически) в течение определенных интервалов времени, поглощение повреждений в структурах может быть зарегистрировано камерой высокого разрешения. Корреляция событий повреждения с данными Р-8 возможна по истекшему времени от начала испытания, которое легко и точно связано с данными Р-8 по скорости испытания и интервалу времени съемки. Эта процедура была соблюдена Квеон и соавт. [28], который использовал цифровую видеокамеру микроскопа для регистрации распространения повреждений в гибридных композитно-алюминиевых соединениях при растягивающих нагрузках.

Matsuzaki et al. [6] Экспериментально изучены гибридные односторонние соединения с односторонним наложением из алюминия и стеклокомпозита и использованы измерения акустической эмиссии для исследования механизмов разрушения соединений во время испытаний. Датчик акустической эмиссии и тестер использовались для измерений, а события повреждения записывались на компьютер. В зависимости от применения могут потребоваться гибридные конструкции для работы при экстремальных температурах. Kang et al. [9] испытал композитно-алюминиевые соединения при криогенной температуре  $-150^{\circ}\text{C}$  используя запечатанную экологическую камеру. Предварительная загрузка образцов с растягивающей нагрузкой 4 кН и приклеивание язычков наждачной бумаги было необходимо, чтобы предотвратить скольжение при натяжении на  $-150^{\circ}\text{C}$ .

### 2.3.4 Экспериментальные работы

В последнее время опубликовано значительное количество экспериментальных работ по гибридным соединениям. В работе Kang et al. [9], Криогенные характеристики адгезивов в гибридных композитных и алюминиевых соединениях с двойным наложением оценены с учетом внутреннего прилипания алюминия (6061-T6) и внешних прилипаний сложного графит-эпоксидного композита. Три пленочных клея (Bondex606 от Hankuk, EA9696 от Loctite, и FM73® от Cytec) были испытаны при комнатной температуре и  $-150^{\circ}\text{C}$ , чтобы сравнить прочность сцепления каждого клея и характеристики разрушения. Экспериментальные испытания показали, что при  $-150^{\circ}\text{C}$ , прочность связывания соединений с двойным наложением увеличилась, и EA9696 продемонстрировал самое высокое улучшение по сравнению с испытаниями при комнатной температуре (89.8%). FM73® показали увеличение на 44,3%, а Bondex606 на 53.0%. Указанное улучшение было в основном связано с увеличением прочности клеев на растяжение в связи с обширными испытаниями сыпучих адгезивов.

да Сильва и Адамз [27] изучали процесс связывания обычных и гибридных соединений с двойным наложением, пытаясь улучшить прочность этих соединений с помощью метода двойного адгезива в широком диапазоне температур (от  $-55$  до  $200^{\circ}\text{C}$ ; то есть, диапазон температур в фюзеляже сверхзвукового самолета во время полета). Гибридные соединения состояли из композитного внутреннего адгезива и внешнего адгезива из титана и наоборот. Группа современных композитов НТМ552 использована для композитных адгерентов ( $0^{\circ}/90^{\circ}$ ) в виде тканевого слоя из высокопрочных углеродных волокон в саржевом переплетении 2x2, пропитанный бисмалеимидной смолой). Первоначально предложено двойное адгезионное связывание, чтобы повысить эффективность соединения с нестабильными адгезивами, с использованием пластичного клея по краям перекрытия. Авторы использовали соединение высокотемпературным адгезивом (НТА) по центру и низкотемпературным адгезивом (ЛТА) по краям. Экспериментальные испытания показали, что для идентичных адгезивов (титан/титан) смешанная техника имела небольшое преимущество. Фактически, при высоких температурах прочность соединения была ниже, чем для соединения с одним ВТА при низких температурах. И, наоборот, при низких температурах смешанная технология давала лучшие результаты по сравнению с обычным соединением с ВТА и могла эффективно увеличить прочность хрупких адгезивов при низких температурах. Соединения титан/композит продемонстрировали реальное улучшение по сравнению с обычным соединением благодаря использованию концепции смешанного модуля из-за большой разницы в КТР. Плотность композитного связывания меньше, чем жесткость

металлического связывания ( $E_{ic}t_c < E_{mt}t_m$ ), термические напряжения значительно снижают прочность обычных соединений с ВТА при низких температурах, а многокомпонентное клеевое соединение значительно улучшает прочность из-за высокой температуры без напряжений ВТА в середине перекрытия. При промежуточных и высоких температурах смешанные соединения также показали лучшие результаты по сравнению с соединением только с ВТА. Смешанные соединения подвергались термическому циклу для дальнейшего подтверждения возможности применения двойных адгезивных систем при низких или высоких температурах. Результаты не выявили признаков деградации ВТА после стадии при высокой температуре или ВТА после стадии при низкой температуре.

Квеон и соавт. [28] испытанные гибридные двухнакладные соединения между углеродно-эпоксидной смолой и алюминием (7075-T62) связываются тремя способами: адгезионно, на болтах и адгезивно-болтовым соединением. В отношении метода связывания и связывания-крепления выполнена оценка пленочного адгезива FM73® (Cytec) и пастообразного адгезива EA9394S (Henkel). Средняя адгезионная прочность на растяжение FM73® составила 31.9 МПа, для EA9394S - 4.74 МПа. Комбинация связывания с болтовым соединением показала улучшение прочности, когда механическое крепление является более прочным, чем связующий слой, то есть для пастообразного адгезива. Не было обнаружено никаких преимуществ в улучшении прочности гибридного соединения когда прочность болтового соединения была меньше, чем у адгезивного соединения, как это произошло с пленочным клеем.

Метод усиления был предложен Мацузаки и соавт. [6], для гибридных алюминиевых/стеклянных композитных соотвержденных односторонних соединений внахлестку. В этом методе два металлических отверстия были просверлены в металлическом адгезиве, и высокопрочное волокно с внутренним адгезивом (ВА), которое проникло в неотвержденное плетение препрега, и отверстия в металлическом адгезиве сцепились, оба адгезива вместе, и увеличили сопротивление распространению трещины. Эксперименты ясно продемонстрировали, что волокно ВА создает мост между алюминием и стеклом и эффективно задерживает распространение. Из-за этого смещение при разрушении и статическая прочность значительно увеличились при использовании волокна с ВА (среднее улучшение прочности составило приблизительно 15%), не снижая усталостную прочность. Неэффективность этой модификации для усталостных нагрузок была аккредитована для поглощения усталостных повреждений волокон с ВА.

Новый метод изготовления гибридных алюминиевых и углеродно-эпоксидных приводных валов для автомобильной промышленности был разработан в работе Ли и соавт. [29]. Мотивация для предлагаемого исследования была основана на снижении веса и устранении вихревой вибрации путем изменения собственной частоты изгиба из-за более высокой удельной жесткости композитов по сравнению с алюминием или сталью. Для снижения затрат композит комбинируется с алюминием, который несет большую часть передаваемого крутящего момента. Приводные валы были спроектированы таким образом, чтобы композитный слой был отвержден на внутренней поверхности алюминиевой трубки вместо более обычного метода намотки его на внешнюю поверхность, таким образом, предотвращая повреждение от внешнего удара и поглощение влаги. Предлагаемый приводной вал был способен передавать расчетные нагрузки с 75% - ным уменьшением массы и 160% - ным увеличением крутящего момента по сравнению со стальным аналогом. Также было достигнуто увеличение собственных частот по сравнению с проектной спецификацией на 9200 об/мин.

Абдуллах и Кантвел [30] экспериментально исследовали ударопрочность композит-алюминия FML. Для оптимальной адгезии между алюминиевыми и композитными листами, использовался адгезивный слой толщиной 60 мкм. Начальные испытания были основаны на слоеных образцах с 2024-О или 2024-Т3 алюминиевые обшивки и сердцевина из полипропиленового волокна и полипропиленовой матрицы (композиты PP-PP). FML изготовленный из более прочного сплава 2024-Т3, обладает более высокой прочностью при перфорации по сравнению с сплавами на основе 2024-О. Также были испытаны многослойные плиты с чередующимися композитными/алюминиевыми листами. Из двух вариантов FML для заданной толщины слоя, многослойные ламинаты показали более высокую прочность на перфорацию по сравнению с многослойными ламинатами. Удельную энергию перфорации также использовали для сравнения различных слоистых

систем, показывая, что FML на основе PP/PP-композита точно превосходил многослойный FML, поскольку демонстрировал показатели удельной энергии примерно в два раза выше. Были обнаружены различные механизмы разрушения: вязкое разрывание, расслоение и разрушение волокна в композитных слоях, пластическая деформация или утончение, а также деформационное разрушение в металлических слоях. На первом этапе были исследованы передняя и задняя поверхности затронутых купонов. Для меньших ударных энергий было обнаружено повреждение в виде локализованной вмятины и растрескивания самого заднего слоя алюминия. Расширение этих механизмов повреждения также увеличилось вокруг места попадания увеличивая энергию.

Панель была перфорирована с относительно чистым отверстием, похожим по размерам на снаряд при большем и удельном значении энергии удара. Повреждение состояло из локальной пластичности алюминиевого и композитного слоев и разрушения составляющих материалов. Рис. 2.3 представляет оптические микрофотографии с низким увеличением 4/3 FML (4 слоя алюминия с 3 слоями композитного материала между PP/PP) с энергией 178,2 Дж на ударной поверхности (а) и на задней поверхности (b). Багноли и соавт. [20] представил экспериментальную оценку удара с небольшой скоростью и усталостной характеристики высокопрочных алюминиевых пластин после столкновения, усиленных клеевыми ламинатами Glare, которые пытаются замедлить рост усталостных трещин. Испытания на ударную вязкость и усталость включали мониторинг с помощью ультразвукового С-сканирования с фазированной решеткой, а также металлографию и сканирующую электронную микроскопию (SEM). Для характеристики удара были рассмотрены энергии в диапазоне от 10 до 50 Дж. Максимальная нагрузка была измерена, что дает линейное соответствие энергии удара. Соединение Glare/алюминий не обнаружило признаков повреждения, в то время как повреждение Glare, связанного на противоположной стороне поврежденной подложки, произошло в результате растрескивания волокна и матрицы.

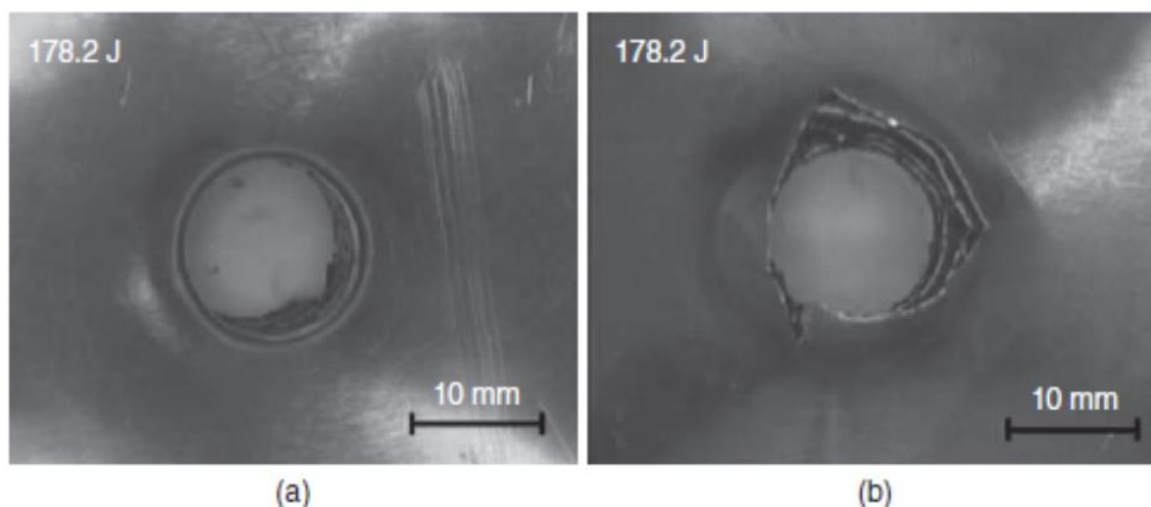
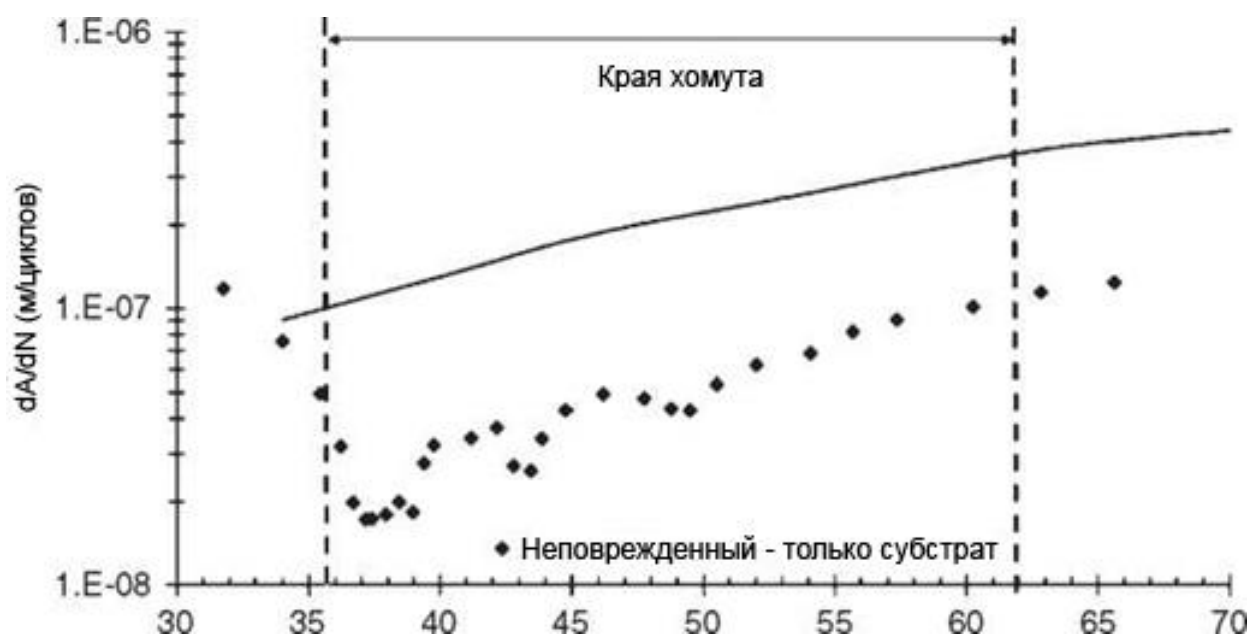


**Рис. 2.3** Оптическая микрофотография повреждений 4/3 FML (а) вид спереди и (b) вид сзади (b). (Источник: Абдуллах и Кантвел 2006 [30]. Воспроизведено с разрешения Elsevier.)

Испытания на рост усталостных трещин показали эффект замедления трещин, связав панель Glare с алюминиевой подложкой (рис. 2.4 (а); алмазные точки), с уменьшением скорости роста усталостных трещин алюминия до пяти раз, когда трещина достигает края хомута. Темпы роста были примерно в 2 раза ниже, чем в алюминии выходя из усиленной области. Рис. 2.4 (b) показывает зависимость длины трещины от циклов для неповрежденных и пораженных образцов (10 и 30 Дж). До достижения первого хомутообразного конца поведение остается аналогичным. Неповрежденный образец дает более длительную усталостную долговечность по сравнению с поврежденными, как только он достигнут. Во всем мире усиление после удара дало коэффициент торможения приблизительно 2.

## 2.4 Предсказательные методы для гибридных конструкций

Раньше, отсутствие точных моделей материалов и подходящих критериев разрушения приводило к «чрезмерному проектированию» адгезивных соединений, что неизменно приводило к более тяжелым и более дорогим конструкциям. Появились новые возможности для эффективного использования склеенных соединений с появлением надежного технического решения и методик прогнозирования. Проектирование часто связано с определением напряжений и деформаций для нагружения компонентов в процессе эксплуатации и прогнозированием прочности конструкции и вероятных точек разрушения. Можно использовать две альтернативы: анализ в закрытом виде (аналитические методы) и цифровые методы (т.е. анализ FE). Исследование клеевых соединений датируется 1930-ми годами, с закрытой моделью Volkersen [31] что считается полностью упругими материалами и адгезионной деформацией только при растяжении. Однако аналитическая формулировка адгезивных соединений становится более сложной, если адгезив пластически деформируется, если используются композитные адгезивы или используются различные адгезивные материалы (например, композиты с металлами). FE, несомненно, самая популярная техника для адгезивного



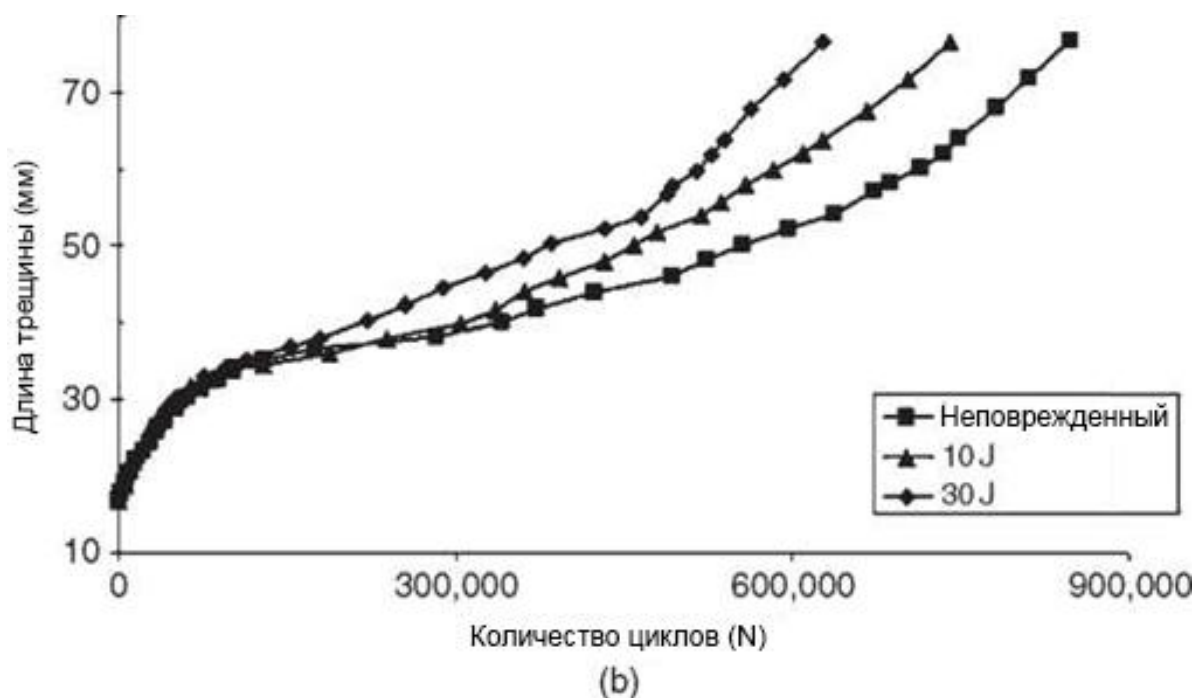


**Рис. 2.4** Скорость роста усталостной трещины по сравнению с длиной трещины для неармированных и армированных панелей без повреждения от удара; (а) длина усталостной трещины по сравнению с количеством циклов для армированных, бесконтактных и контактных панелей (b). (Источник: Абдуллах и Кантвел 2006 [30]. Воспроизведено с разрешения Elsevier.) соединения, и Адамз и соавт. были пионерами в этой методике [32]. Вращение соединения, адгеренты и адгезивная пластичность, а также влияние ленты выдавливания были изучены сначала Harris и Adams [33]. Для прогнозирования прочности изначально использовался метод механики сплошных сред, для которого требовалось распределение напряжений (полученное с помощью анализа FE или модели замкнутой формы) и подходящий критерий разрушения. По очевидным причинам, метод FE рекомендуется при наличии сложной геометрии и сложных моделей материалов.

Одна из простейших моделей разрушения основана на предельном состоянии напряжения или деформации, которое в зависимости от характеристик связанной системы может зависеть от допустимого эквивалентного напряжения или деформации по конкретным критериям или компонента напряжения/деформации, такого как сдвиг или отслаивание. Анализ FE также можно использовать вместе с критериями механики разрушения для прогнозирования прочности либо по коэффициенту интенсивности напряжений, либо по энергетическим подходам, таким как метод виртуального закрытия трещин (VCCT). Тем не менее, с этими методами, моделирование роста трещины становится громоздким из-за повторного смешивания, происходящего во время анализа, чтобы обновить эволюцию трещины во время распространения и соответствующих высоких вычислительных затрат, требуемых (называемых КЭ с адаптивным повторным смешиванием) [34]. Приложения этих методов к гибридным структурам не доступны из-за этой проблемы.

Из-за этих ограничений были сделаны основные разработки по взаимодействию методов распространения трещин с численными методами, такими как FE, и один из них объединяет FE с моделированием когезионной зоны (CZM). Этот метод объединяет традиционное моделирование FE для областей конструкции, которые не должны подвергаться повреждению, и подход к механике разрушения с помощью элементов CZM для моделирования зарождения и роста трещины. Бессеточные методы, такие как метод Галеркина без элементов или бессштрафный бессеточный метод, являются еще одной возможностью, хотя еще не применяются к моделированию гибридных соединений. Самая недавняя альтернатива модели распространения трещин в материалах — это расширенный метод конечных элементов (XFEM), который использует обогащенные функции формы для представления прерывистого поля смещения. Основным

преимуществом XFEM является то, что трещина может возникать в любой точке материала и распространяться в зависимости от условий нагрузки. Повторное смешивание не требуется, поскольку трещина может расти внутри элемента, и ей не нужно следовать границам элемента. В настоящее время очень мало и ограничено применение XFEM к гибридным структурам [34].

В общем, анализ гибридных структур для связывания различных материалов или ламинатов FEM с помощью компьютерного программного обеспечения обеспечивает значительное сокращение затрат на проведение масштабных экспериментов, что делает его весьма привлекательным для проектировщиков. Это особенно относится к сложному процессу повреждения, возможно, включающего в себя разрывы, особые области, нелинейные границы раздела, смешанные режимы повреждения, а также возникновение и распространение трещин. В этом разделе описаны наиболее подходящие подходы к анализу гибридных связей между композитами и легкими металлами (аналитические методы, механика сплошных сред, CZM и альтернативные методы механики повреждений) с практическими примерами применения, чтобы проиллюстрировать самые последние достижения в конкретной теме, рассматриваемой в этом разделе. Глава вместе с советами по моделированию для правильного анализа.

### 2.4.1 Аналитический

Работы Volkersen [31] и Goland и Reissner [35] были предшественниками ряда теоретических исследований, которые имели преимущество в простоте для достижения полей напряжений в связанных структурах из-за используемых упрощающих допущений с точки зрения геометрии конструкций, нагрузки и граничных условий, давая эффективные решения для упругости в замкнутой форме для локальных полей в адгезивной области [36]. Упрощения заключались в использовании линейных эластичных адгезивов и/или адгерентов. С помощью этих моделей можно легко рассчитать деформации и напряжения, а также распределение изгибающего момента в конструкции. Прочность, как правило, прогнозировалась с помощью критериев, основанных на напряжении или деформации (будет описано далее в этой работе). Эти исследования постепенно были заменены численным анализом, хотя теоретические исследования также были уточнены в течение многих лет с точки зрения возможностей моделирования, таких как нелинейность материала адгезивного слоя [37] или нелинейный геометрический анализ [38]. Аналитические модели связанных гибридных структур были также разработаны совсем недавно, с последующим описанием некоторых наиболее важных исследований.

Owens и Sullivan [39] представили простую аналитическую модель для прогнозирования жесткости композитно-алюминиевых однополотных соединений, рассматривая каждый компонент соединения в качестве отдельного пружинного элемента, каждый из которых выдерживает разные величины прогиба. Индивидуальные отклонения были получены с помощью базовой механики и применения уравнения напряжений Adams-Perpiatt. Модель также смогла предсказать уменьшение жесткости из-за распространения трещин в адгезиве, учитывая уменьшение длины перекрытия.

Romilly и Clark [8] предложили аналитическую методику, основанную на упругости материала, для анализа напряжений и соответствия гибридных ремонтов, то есть алюминиевых конструкций самолетов со связанными боро-эпоксидными композитными заплатами. Представленная формула была усовершенствованием предыдущей работы [40] путем включения таких эффектов, как ортотропные адгезивы, адгезия бокового отклонения, поперечная деформация связывания по всей толщине, вызванная адгезионными сдвиговыми напряжениями, поперечная деформация адгезивов, вызванная напряжениями отслаивания адгезии, адгезивные продольные напряжения и термические напряжения, возникающие в результате несоответствия КТР. Прочность и соответствие ремонта были рассчитаны. Результаты сравнивались с результатами FE, показывая эффективность предложенного набора расчетных уравнений.

Noo Fatt et al. [41] предложил аналитическое решение для прогнозирования баллистической прочности и поглощения энергии скрепленных ламинатов Glage при воздействии баллистических ударов, подтвержденное данными испытаний. Методология



получения баллистического предела следовала итеративному процессу, в котором начальная кинетическая энергия снаряда должна была равняться сумме диссипации энергии деформации, расслоения/отслоения и разрушения. Переходная деформация панели была получена из системы масса-пружина. Аналитические прогнозы для баллистической силы, полученные из полученного нелинейного дифференциального уравнения, представили отклонение до 13% экспериментальных результатов. Кроме того, можно было учесть факторы участия различных механизмов в поглощении энергии деформации, причем 84-92% связаны с изгибающими и мембранными эффектами, 2-9% поглощения энергии расслоением и около 7% за счет разрушения при растяжении стекла/эпоксидной смолы и алюминия.

## 2.4.2 Цифровой

В начале эпохи компьютеров, коды FE были быстро разработаны и применены для моделирования связанных структур [32]. В обычном FE, каждая часть адгезивной структуры является непрерывной, и геометрическое представление может быть либо трехмерным (3D), либо моделироваться как упрощенная двумерная (2D) модель. Часто встречаются большие смещения, а также термомеханическое взаимодействие и пластичность материалов. На протяжении многих лет были разработаны различные подходы для многоцелевых связанных конструкций для прогнозирования прочности. Континуальный подход дает оценки аналогично аналитическим методам, то есть сравнивает напряжения/деформации с допустимыми значениями материала. Методы разрушения предполагают начальное растрескивание и используют методы коэффициента интенсивности энергии или напряжения для прогнозирования роста трещины. Механика повреждения основана на поглощении повреждений в элементах FE в соответствии с различными законами (например, CZM или альтернативными подходами). XFEM позволяет крекингу развиваться в пределах непрерывных элементов FE, увеличивая степень свободы.

Спустя несколько десятилетий, когда гибридные структуры начали привлекать внимание из-за вышеупомянутых преимуществ, по сравнению с обычными связанными структурами, эти методы прогнозирования были затем применены к их анализу, хотя из-за возросшей сложности, только совсем недавно был предложен полный анализ. В следующих разделах описаны некоторые примеры наиболее подходящих методов. Механизм разрушения и XFEM не рассматриваются из-за их ограниченного отношения к гибриднему соединению.

### 2.4.2.1 Непрерывное моделирование

Максимальные значения напряжения, деформации или энергии деформации, прогнозируемые с помощью анализа FE в подходе механики сплошных сред, обычно используются в подходящем критерии отказа для оценки прочности сборок. Это достигается, когда прогнозируемые значения, полученные по критериям на основе напряжений или деформаций, достигают прочности составляющих структуры [1]. Преимущества этого метода включают анализ связанных структур с или без первоначального повреждения и под произвольной нагрузкой. Тем не менее, эти критерии имеют внутреннее ограничение, поскольку связанные структуры, независимо от геометрии, склонны иметь особенности напряжения в конце перекрывающихся областей из-за острых углов. В результате при анализе FE в связанной структуре напряжения в отдельной области возрастают с уточнением сетки, а сходимости не достигается, что дает предсказания, зависящие от сетки [36]. С годами в эту технику моделирования были внесены улучшения, такие как определение более сложных критериев разрушения на основе напряжений или деформаций для различных материалов и механизмов разрушения, или в сочетании с более реалистичными непрерывными моделями материалов, но все же зависимость от сетки не могла быть решена.

Jumbo et al. [42] представил FE изучение прогнозирования термического напряжения на соединениях с двойным наложением с внешними адгерентами 7075-T6 алюминиевого сплава и внутренним адгерентом IM7/8552 однонаправленного композита CFRP,

связываемого с FM73® адгезивом Cytec, состоящего из адгезивных швов на торцах соединения. Понижение температуры на 100 °С использовалось для представления охлаждения от температуры отверждения адгезива до рабочей температуры. Анализ FE состоит из 2D моделирования, с учетом плоской деформации (PE), плоскостного напряжения (PS), обобщенная плоскостная деформация (GPE) и также полный 3D анализ, что объясняет деформации изгиба вне плоскости, вызванные несоответствием СТЕ. Оценка распределений напряжений показала, что модель GPE дала наилучшее приближение к 3D-результатам на соединениях средней ширины. Анализы также выявили обычные области высоких концентраций напряжений вблизи свободных от адгезива краев, а PE моделирует непредсказуемые напряжения в поперечном осевом направлении из-за ограничений, наложенных моделью. Модель PS, с другой стороны, по своей природе не в состоянии предсказать напряжения в этом направлении. Графики термической деформации из анализа FE были подтверждены с использованием нейтронографических экспериментов, что дало результаты в пределах принятых экспериментальных ошибок. Прогноз прочности не проводился несмотря на имеющиеся данные из непрерывного анализа FE.

да Сильва и Адамз [7] исследовали двойные стыковые соединения FE-титан / титан и титан/композит для использования при низких и высоких температурах (например, фюзеляж летательных аппаратов) с использованием технологии двойного адгезива. Пластичный адгезив, пригодный для высоких температур, был помещен по краям перекрытия, а в середине перекрытия использовался хрупкий адгезив для низких температур. При такой конфигурации при высоких температурах хрупкий адгезив переносит всю нагрузку, а при низких температурах пластичный адгезив становится несущим адгезивом. Анализ FE был представлен в отношении распределения напряжений и исходной текучей нагрузки для оптимизации конструкции соединения. Предел текучести был найден как наименьшее из следующих значений: (1) предел текучести адгезива при смещении, (2) предел текучести при растяжении адгезивов и (3) поперечный разрыв композита при растяжении. Сосредоточив внимание на испытанных гибридных соединениях (рис. 2.5 (а)), было показано, что метод двойного адгезива дает лучшую производительность в рассматриваемом температурном диапазоне по сравнению с одним НТА.

Рис. 2.5(b) показывает пластичную нагрузку в зависимости от температуры испытания для жесткого и хрупкого клея Redux 326 от Hexcel Композитов, который представляет собой модифицированный бисмалеимид, подходящий для высоких температур, для низких температур, пластичный адгезив Supreme 10HT от Master Bond, которая является модифицированной эпоксидной смолой и для двойного адгезивного соединения MAJ1-1, MAJ1-2, и MAJ3 (Рис. 2.5(а)). Лучшая конструкция была достигнута с конструкцией MAJ3, показывая сильные стороны, аналогичные Supreme 10HT при низких температурах и Redux 326 при высоких температурах.

### 2.4.2.2 Механика повреждения

В настоящее время доступны современные методы моделирования, которые обеспечивают точные прогнозы отказов, превосходящие ограничения предыдущих подходов. Как правило, структурные повреждения могут возникать из-за микротрещин в ограниченном объеме или межфазной области, что снижает передачу нагрузки. Моделирование FE, основанное на моделировании сплошного континуума, неверно выводит обобщенную пластификацию в элементах без эволюции повреждения, в то время как модель механики повреждения может фактически вызывать повреждение в элементах путем уменьшения передаваемых нагрузок. В итоге, допускаются поэтапное моделирование разрушения и разрушение на заранее определенной траектории трещины или произвольно в пределах конечной области [1].

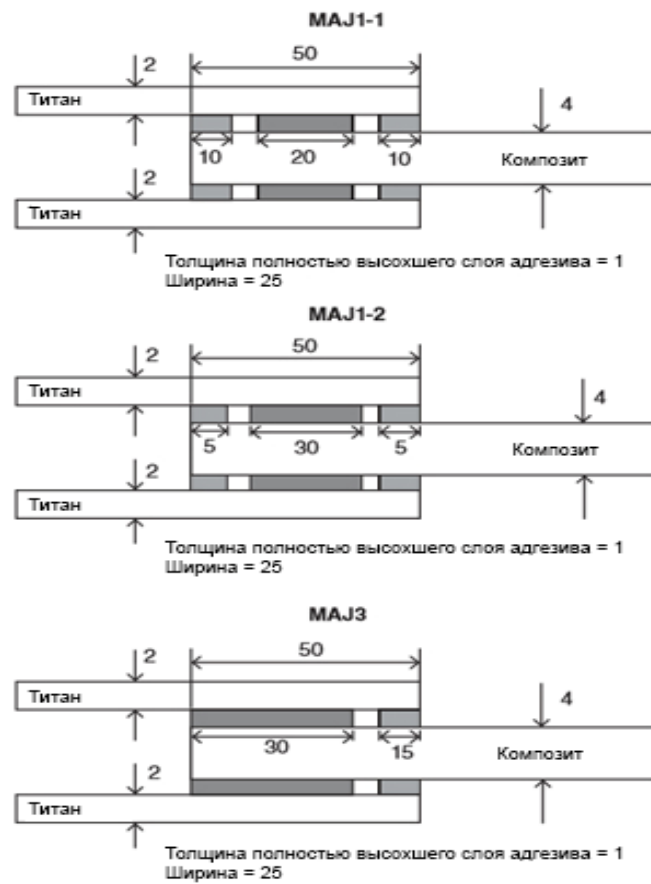


**Рис. 2.5** Испытанные конфигурации гибридного соединения (а) и текущая нагрузка прогнозирования FE для титано-композитных соединений (b). (Источник: да Сильва и Адамз2007 [7]. Воспроизводится с разрешения Elsevier.)

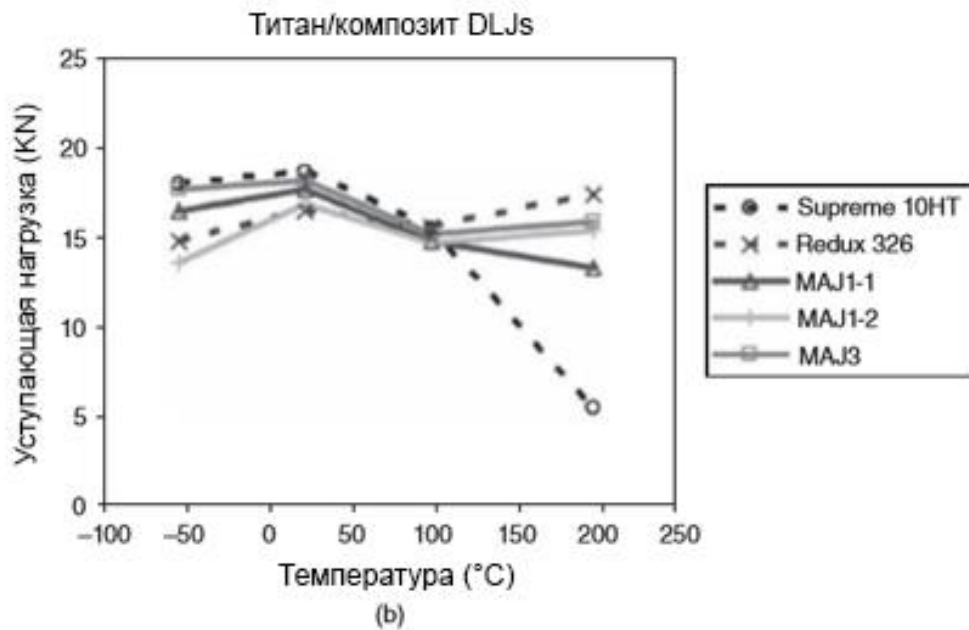


**Рис. 2.5** (Продолжение)

Хотя эти методы доступны довольно давно, только недавно они были применены к гибридным структурам. Несмотря на этот факт, эта область все еще находится в стадии интенсивного развития и касается более точных методов моделирования, надежных и простых методов оценки параметров материала, повышения надежности и устранения проблем сходимости [43]. Методы моделирования повреждений могут быть локальными или основанными на постоянстве. Повреждение происходит в линии или поверхности нулевого объема (2D или 3D анализ, соответственно), имитируя межфазное разрушение между материалами, например, между клеевым соединением и сцеплением, межслойным разрушением слоистых композитов или линиями раздела между твердыми фазами материалов в рамках моделирования локальных повреждений. При непрерывном моделировании повреждение распространяется на область или объемно (2D или 3D анализ, соответственно), чтобы имитировать массовый отказ или моделировать когезионное разрушение клея [1].

**Моделирование когезионной зоны** Компьютерная реализация методов линейно-упругой механики разрушения (LEFM) имел большой успех несколько десятилетий назад, но они были ограничены мелким выходом за пределы трещины. Кроме того, современные ударопрочные адгезивы образуют пластиковые зоны под нагрузкой, которые могут быть больше, чем толщина адгезивов. CZM были разработаны в конце 1950-х / начале 1960-х годов [44] для описания повреждений при статических нагрузках в зоне когезионного процесса перед кончиком видимой трещины. Затем CZM были улучшены, чтобы имитировать возникновение и распространение трещин при проблемах когезионного и межфазного разрушения или расслоения композитов. CZM может опираться на пружину или более традиционно связанные элементы, и их можно легко включить в обычный анализ FE для моделирования поведения разрушения в различных материалах, включая клеевые соединения [1]. Основная концепция CZM заключается в том, что одна или несколько линий раздела или областей разлома могут быть искусственно внедрены в конструкции, в которых рост повреждения допускается путем прохождения возможного разрыва в поле смещения. Это стало возможным благодаря определению законов разделения тяги для моделирования границ раздела или конечных областей. Законы CZM применяются между парными узлами связанных элементов, и они могут соединять наложенные узлы элементов, представляющих разные материалы или разные слои в композитах, для имитации линии раздела нулевой толщины (локальный подход), или они могут применяться непосредственно между двумя бесконтактными материалами для имитации тонкой полосы конечной толщины между ними, например, для имитации клеевого соединения (непрерывный подход). Таким образом, CZM обеспечивают макроскопическое воспроизведение повреждения вдоль предварительно установленной траектории за счет отклика относительного вытяжения между парными узлами вдоль траектории трещины, который опирается на крупномасштабные параметры, которые определяют процесс роста трещины, такие как энергии разрушения. Эволюция прочности и размягчение до разрушения моделируются, чтобы учесть постепенное ухудшение свойств материала.

Подробнее о 3D CZM формулировке использованной в Abaqus®, представителя типичных законов, используемых в рамках связанных структур, можно найти в работе Campilho et al. [45]. Эта методология в течение некоторого времени использовалась для связанных конструкций, включая темы общего прогнозирования прочности, оптимизации геометрии, расслоения в композитных структурах, ударных явлений, старения материалов, а в последнее время была применена к гибридным структурам в попытке смоделировать детали различные повреждения могут происходить в этих структурах, особенно для конструкций FML.

Rudawska [4] оценил прочность на разрыв связанных конструкций между одинаковыми и разнородными сцеплениями, учитывая как эксперименты, так и CZM для прогнозирования разрушения. Программа испытаний, касающихся гибридных структур, включала соединения арамид/эпоксидный композит, связанные с титановыми или алюминиевыми листами. Моделирование проводилось на основе геометрических нелинейностей для учета дисбаланса и соответствующих отклонений суставов с помощью инкрементно-итеративного решателя Ньютона-Рафсона, в то время как адгезивный слой моделировался связными элементами для прогнозирования разрушения. Сетки были построены с постепенным изменением размеров элементов к концам перекрывающихся областей,

чтобы учесть отмеченные градиенты напряжения. Кроме того, чтобы позволить уменьшить количество элементов, адгезивный слой и сцепные сетки не были согласованы, что сделало необходимым применять ограничения связи поверхности-основы между соседними частями. Сравнивая арамидные/эпоксидно-титановые соединения с негибридными соединениями, изготовленными из арамида/эпоксиды и титана, гибридный раствор улучшал прочность соединения по сравнению с соединением, для которого было получено более низкое значение прочности. Наоборот, арамидные/эпоксидно-алюминиевые соединения показали противоположные результаты, так как его прочность была аналогична меньшей прочности между двумя соответствующими однокомпонентными соединениями (то есть алюминий).

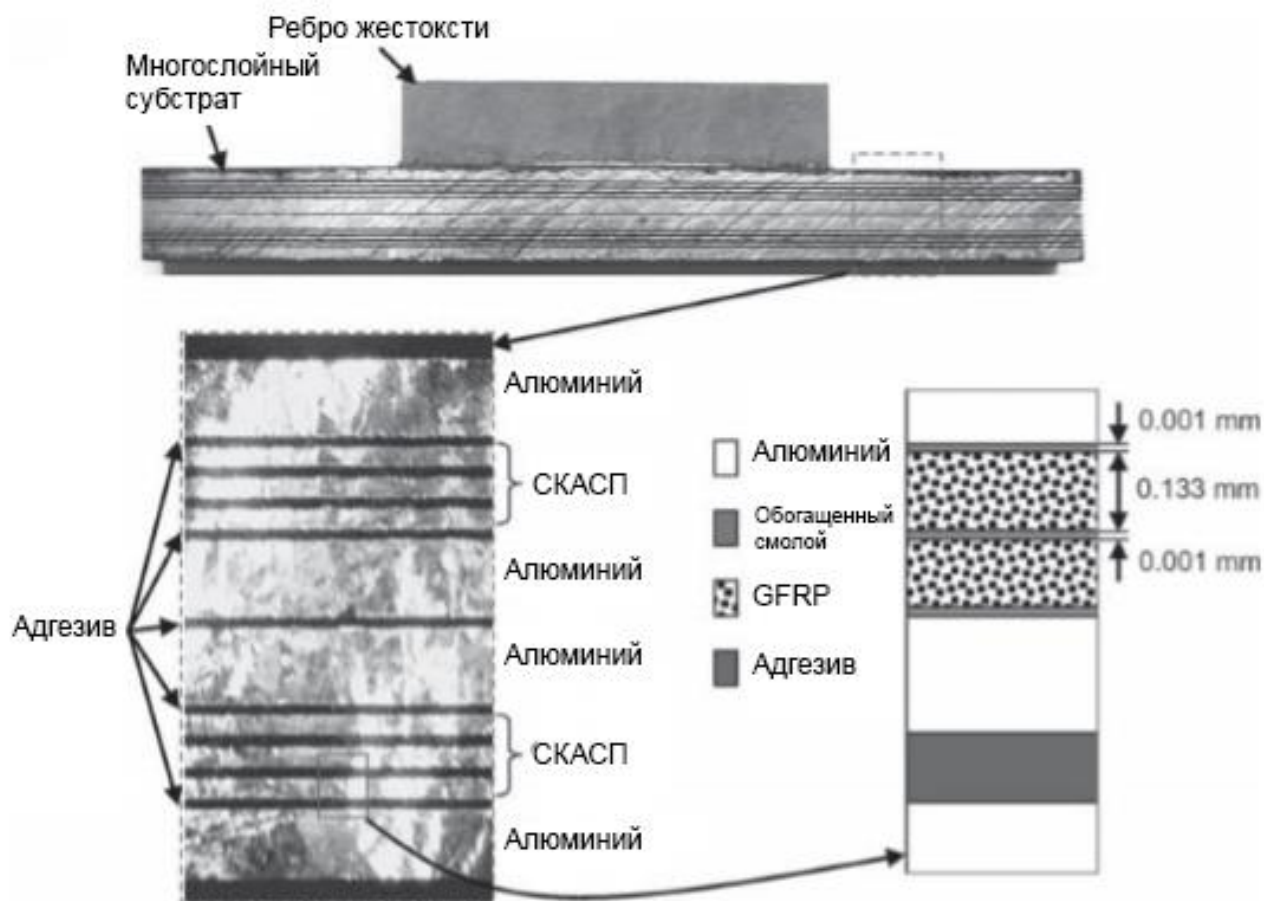


**Рис. 2.6** Гибридный усиленный образец алюминия -СКАСП. (Источник: Sugiman соавтор. 2011 [25]. Воспроизведено с разрешения Elsevier.)

Анализ FE позволил построить график распределения напряжений в адгезивном слое, чтобы понять различия между конфигурациями соединений, и показал точность метода CZM в прогнозировании прочности соединений при различных условиях материала.

Экспериментальное и численное исследование Sugiman et al. [25] сообщает о статическом механическом отклике связанных алюминиево- конструкций Glare, усиленных ребрами жесткости на одной из лицевых панелей (рис. 2.6), в качестве программы предварительных испытаний для их сертификации Airbus в качестве авиационных панелей. Использовался клей FM 73 M от Cytec. Испытанные купоны имели волокна Glare, параллельные нагрузке (по длине) или ортогональные (по хорде). Из-за производственных ограничений касательно максимальных размеров листа, листы Glare неизбежно должны были соединяться где-то вдоль длины слоя, что ясно представляет слабое место и потенциальное место возникновения трещины.

В результате их расположение оценивалось вдоль панели. Экспериментальные результаты показали более высокую прочность для поперечных образцов без приклада, за которыми следуют хордовые образцы без стыка с приложением вблизи центра пролета ребра жесткости, и, в завершении, худшие результаты выявлены для образцов со стыком вблизи торцов ребра жесткости, где возникают концентрации напряжений. Модели FE были построены для прогнозирования данных испытаний с учетом моделирования повреждений при разрушении в композитном слое и линиях соединения композит/алюминий и алюминий/алюминий. Окончательный отказ алюминия не был приравнен, хотя модели FE учитывали рассеивание пластика. Критерий Hashin использовался для инициирования повреждения в композитных слоях, в то время как развитие повреждения было спрогнозировано энергией разрушения. Треугольник CZM, характеристика свойств которого была выполнена с помощью испытаний на разрушение, использован для моделирования роста повреждений по линиям связывания как продольных, так и стыковых. Для окончательного отказа условия повреждения в смешанном режиме были определены с помощью квадратичного критерия напряжения для начала повреждения и критерия Безнегах и Кенан [46]. В двумерных моделях FE использовались 4-узловые элементы поврежденностного натяжения слоев алюминия и прожилок, а также 4-узловые связующие элементы для клеевых слоев и областей, пропитанных смолой (рис. 2.6). Результаты FE показали в целом хорошее соответствие с данными испытаний на возникновение отказа при нагрузках и повреждениях.

На рис. 2.7 показаны два примера сравнения данных FE-теста: хордовые образцы без стыковых соединений (a) и хордовые со стыковым соединением вблизи границ центральному ребру жесткости (b). Корреляция была достаточно точной во всех протестированных конфигурациях. Прочность образцов в продольном и хордовом направлениях без стыков определяла несоответствия слоя Glare. Для образцов со стыковым соединением, конечная прочность контролировалась по торцам. В завершении изучения, проверенная методика CZM была успешно применена к гибридным структурам, что показало точные прогнозы нагрузки отказов и событий повреждений. Сугиман и Крокомб [47] расширили ранее упомянутую работу, рассмотрев усталостную реакцию армированных слоев FML на рис. 2.6, а также удвоителей из слоев металла, связанных с Т-панелями. Были применены методы CZM, в том числе повреждение адгезивных слоев, стыковых соединений между слоями FML и слоев металла и волокна. Статическое моделирование выполнялось аналогично [25], в то время как моделирование усталости выполнялось путем статического применения максимальной усталостной нагрузки с последовательными приращениями, причем каждое из этих приращений представляло собой блок циклов из общего числа циклов, которые должны быть моделированы. Постепенно свойства адгезивных элементов CZM ухудшались при применении закона об усталостном повреждении с увеличением длительных циклов, пока материалы больше не могли выдерживать приложенную нагрузку, что приводило к окончательному разрушению. Для моделирования усталостных повреждений в сплошных элементах алюминиевых слоев применяемый подход был применен к их упругим свойствам. Прогнозируемые данные включали кривые нагрузки и срока службы и механизмы отказов, которые соответствовали данным испытаний. Стыки скрепленных накладных слоев демонстрировали наличие влияния на статическую и усталостную реакцию конструкции. В гибридном FML, принимая во внимание ориентацию волокон в продольном и хордовом направлениях, наиболее критическое положение стыков находилось вблизи двойных торцов. Для испытываемых образцов без стыков статический отказ определялся разрушением слоев Glare, а усталостная прочность снижалась из-за разрушения алюминиевого листа.

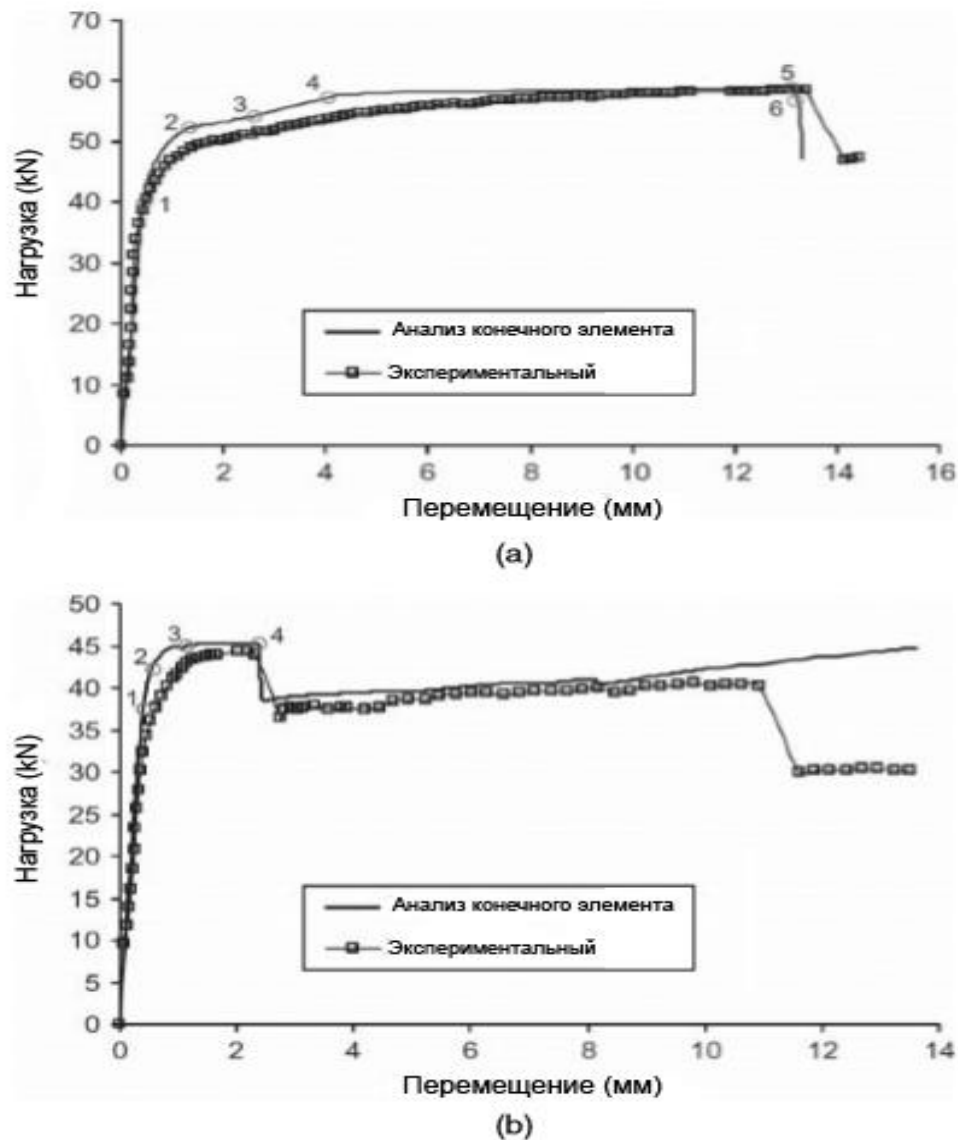


**Рис. 2.7** Экспериментальные и кривая FE P-S в направлении хорды без стыковых соединений (сплошные слои волокна) (а) и в направлении хорды со стыком возле центральной линии прожилок (б). (Источник: Sugiman соавтор. 2011 [25]. Воспроизведено с разрешения Elsevier.)

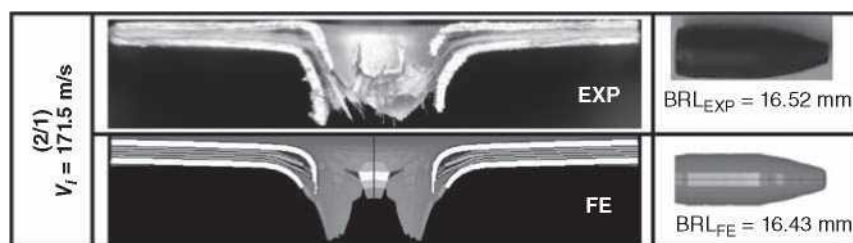
**Альтернативные подходы к моделированию когезионной зоны** Этот раздел описывает альтернативные подходы к методам CZM (ACZM), но это может быть классифицировано в рамках механики повреждений за счет снижения упругих свойств элементов на основе континуума. Эти методы основаны на параметрах повреждения, чтобы модифицировать конститутивную реакцию материалов путем уменьшения жесткости или прочности, чтобы представить серьезность поглощения повреждения материала при его нагрузке (либо повреждение до трещины, либо рост трещины) [48]. Переменные ущерба могут быть разделены на две основные группы: (1) переменные, которые предсказывают величину ущерба путем переопределения составляющих свойств материала, но которые не имеют прямого отношения к механизму повреждения, и (2) переменные, связанные с физическим определением определенного вида повреждений, таких как пористость или относительная площадь микрополостей. Эти методы также позволяют использовать различные механизмы повреждения, каждый из которых имеет

независимую переменную ущерба. Рост разрушения основан на данных по нагрузке в статической модели или циклическом подсчете для моделирования усталости.

ACZM также применялся к модели усталости постоянной и переменной амплитуды [49]. Для склеенных соединений, гибридных или нет, в этой области опубликовано мало работ. По сравнению с усталостным CZM, методы ACZM страдают от отсутствия четкого различия между фазами инициирования усталости и распространения, хотя они могут служить основой для прогнозного анализа. С другой стороны, моделирование повреждений с усталостным CZM требует предопределенных путей трещин до начала анализа. Таким образом, если повреждение широко распространено в материалах или пути разрушения неизвестны, рекомендуется ACZM.

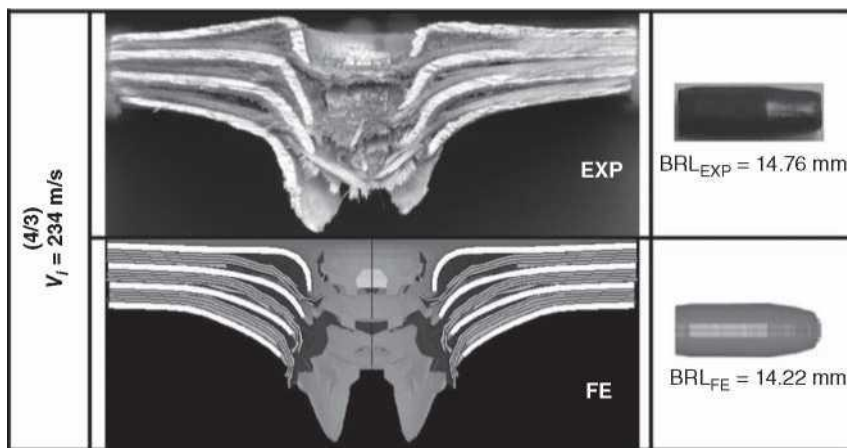
Ягуби и Ляв [21] опубликовали экспериментальную и основанную на повреждениях численную работу по баллистической ударной вязкости балок FML Glare различной толщины. Экспериментальные испытания первоначально позволили получить точные отснятые материалы с высокоскоростной камеры для измерения удара и скорости остаточного / отскока, но также дали подробные данные о прогрессии повреждения на панелях FML. Предельная баллистическая скорость, определяемая как скорость, необходимая для снаряда, чтобы пробить цель, была рассчитана из ударной и остаточной скоростей с использованием эмпирического закона для дальнейшей обработки и проверки с результатами FE. Было обнаружено, что межфазное расслоение, изгиб и растяжение в слоях алюминия играют существенную роль в рассеивании энергии удара в пучках FML.

Трехмерный анализ FE был проведен в LS-DYNA, который использовался для моделирования и валидации экспериментально полученных результатов по ударной и остаточной скоростям снаряда, механизмам повреждения и остаточной длине пули. Первоначальный анализ позволил выбрать параметры сетки из-за зависимости напряжения от размера элемента. Таким образом, модель FE была оптимизирована с доступной вычислительной мощностью, чтобы обеспечить относительно нечувствительные результаты, так как предложенная модель повреждения использовала критерии разрушения деформации. Кроме того, рассматривалась только четверть симметричная модель с более мелкой сеткой в области удара. Пластическое поведение алюминиевых слоев и медной пули аппроксимировалось упрощенной моделью материала Джонсона-Кука, которая игнорировала тепловые эффекты и повреждения. Повреждение в слоях стекла моделировалось с помощью критериев Чанг-Чанга (модель линейно-ортотропного материала с хрупким разрушением), учитывающих три варианта разрушения: растрескивание матрицы, разрушение при сжатии и разрушение волокна. Критерий на основе деформации затем использовался для обнаружения разрушения и эрозии элемента, то есть, когда какой-либо из критериев был выполнен на данном элементе, он был размыт и удален из расчетов. Сравнения баллистической предельной скорости были довольно близки. На рис. 2.8 представлены результаты испытаний на удар при последующем повреждении для гибридной пластины 2/1 (2 слоя алюминия/1 слой стеклокомпозита)



a)





b)

**Рис. 2.8** Данные испытания Конечного элемента для сравнения повреждения после удара для гибридных пластин 2/1 (а) и 4/3 (b). (Источник: Yaghoubi and Liaw 2012 [21]. Воспроизводится с разрешения Elsevier.)

начальная скорость снаряда 171,5 м/с (а) и гибридная пластина 4/3 (4 слоя алюминия/3 слоя стеклянного композита) и начальная скорость снаряда 234 м/с (b).

Хорошее соответствие было получено при всех проверенных сценариях, хотя разорванные волокна, которые появляются в экспериментах вокруг области воздействия, не видны в прогнозах FE из-за критериев повреждения на основе удаления элементов. Остаточную длину пули, то есть после перфорации, также сравнивали (рис. 2.8) с хорошим соответствием между двумя анализами. После проверки данных FE сила сопротивления проникновению в зависимости от временных графиков была проанализирована и сопоставлена с событиями повреждения, что позволило полностью охарактеризовать процесс.

## 2.5 Выводы

Доступные методы адгезивного соединения между композитными материалами и легкими металлами были подробно описаны, что дает представление о современном уровне техники в области гибридных связей и FML. Потенциальными преимуществами использования гибридных соединений по сравнению с обычными видами связывания (между идентичными материалами) являются снижение веса, повышение конструктивной эффективности, улучшение поведения в широком диапазоне температур, а также повышение устойчивости к повреждениям (статическим и усталостным) и ударопрочности. В результате изучения вопросов изготовления и проведения испытаний таких структур определены важные принципы принятия надлежащих процедур (некоторые из них являются общими для обычных клеевых соединений, а другие были специфичными для гибридных связей), которые в своей совокупности необходимы для получения высококачественного связывания. Методы прогнозирования прочности доступны для этих структур, хотя моделирование является более сложным, чем для обычных соединений, из-за увеличения количества и сложности механизмов разрушения. Из рассмотренных методов прогнозирования CZM, вероятно, является наиболее подходящим для гибридного совместного анализа, при условии, что предрасположенные к возникновению механизмы отказа могут быть определены для конкретной геометрии. Фактически, CZM может предоставить полную и точную характеристику разрушения, но для правильного определения численной моделью необходимы данные локализаций повреждений. Альтернативные модели механических повреждений могут быть рекомендованы вместо CZM, если повреждение более широко распространено или если локализация повреждения заранее неизвестна, принимая во внимание, что данный метод не такой точный, как CZM. Аналитическое и FE моделирование сплошных сред являются еще одним возможным решением в сочетании с критериями напряжения или деформации для

прогнозирования прочности, но сходность результатов этих методов моделирования ухудшается за счет зависимости от стеки. Методы, основанные на разрушении и XFEM не принято использовать для таких структур из-за сложности моделирования и ограничений самого метода; XFEM недавно разработанный метод, который еще предстоит изучить для этого конкретного сценария.

## Список сокращений

|      |                                                  |
|------|--------------------------------------------------|
| 2D   | двумерный                                        |
| 3D   | трехмерный                                       |
| CNE  | коэффициент температурного расширения            |
| FE   | конечные элементы                                |
| FML  | слоистые волокнистые материалы                   |
| GPE  | Обобщенная плоская деформация                    |
| HTA  | высокотемпературный адгезив                      |
| IA   | внутренний адгерент                              |
| LEFM | линейно-упругая механика разрушения              |
| LTA  | низкотемпературный адгезив                       |
| LVDT | измерительный трансформатор линейных перемещений |
| PE   | плоская деформация                               |
| PS   | плоское напряжение                               |
| VCCT | Метод виртуального закрытия трещин               |
| XFEM | расширенный метод конечных элементов             |

## Литература

- 1 da Silva, L.F.M. and Campilho, R.D.S.G. (2011) *Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints*, Springer, Heidelberg.
- 2 da Silva, L.F.M., Cichner, A., and Adams, R.D. (eds) (2011) *Handbook of Adhesion Technology*, Springer, Heidelberg.
- 3 Campilho, R.D.S.G., Pinto, A.M.G., Banea, M.D., and da Silva, L.F.M. (2012) Optimization study of hybrid spot welded-bonded single-lap joints. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 37, 86–95.
- 4 Rudawska, A. (2010) Adhesive joint strength of hybrid assemblies: titanium sheet-composites and aluminium sheet-composites – experimental and numerical verification. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 30, 574–582.
- 5 Kolesnikov, B., Herbeck, L., and Fink, A. (2008) CFRP/titanium hybrid material for improving composite bolted joints. *Compos. Struct.*, 83, 368–380.
- 6 Matsuzaki, R., Shibata, M., and Todoroki, A. (2008) Reinforcing an aluminum/GFRP co-cured single lap joint using inter-adherend fiber. *Composites Part A*, 39, 786–795.
- 7 da Silva, L.F.M. and Adams, R.D. (2007) Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 27, 362–379.
- 8 Romilly, D.P. and Clark, R.J. (2008) Elastic analysis of hybrid bonded joints and bonded composites repairs. *Compos. Struct.*, 82, 563–576.
- 9 Kang, S.G., Kim, M.G., and Kim, C.G. (2007) Evaluation of cryogenic performance of adhesives using composite-aluminium double-lap joints. *Compos. Struct.*, 78, 440–446.
- 10 Cao, J. and Grenestedt, J.L. (2004) Design and testing of joints for composite sandwich/steel hybrid ship hulls. *Composites Part A*, 35, 1091–1105.
- 11 Caccese, V., Kabche, J.P., Berube, K.A., and Boone, M.J. (2007) Structural response of a hybrid composite/aluminum strut assembly. *Compos. Struct.*, 80, 159–171.
- 12 Matsuzaki, R., Shibata, M., and Todoroki, A. (2008) Improving performance of GFRP/aluminum single lap joints using bolted/co-cured hybrid method. *Composites Part A*, 39, 154–163.

- 13 Shin, K.C., Lee, J.J., Kim, K.H. et al. (2002) Axial crush and bending collapse of an aluminium/GFRP hybrid square tube and its energy absorption capability. *Compos. Struct.*, 57, 279–287.
- 14 Vlot, A. (2002) *Glare: History of the Development of a New Aircraft Material*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- 15 Vogelesang, L.B. and Vlot, A. (2000) Development of fiber mcoавtop laminates for advanced aerospace structures. *J. Mater. Process. Technol.*, 103, 1–5.
- 16 Kawai, M. and Arai, Y. (2009) Off-axis notched strength of fiber-mcoавtop laminates and a formula for predicting anisotropic size effect. *Composites Part A*, 40, 1900–1910.
- 17 Alderliesten, R.C. and Homan, J.J. (2006) Fatigue and damage tolerance issues of Glare in aircraft structures. *Int. J. Fatigue*, 28, 1116–1123.
- 18 Jin, Z.-H. and Batra, R.C. (1996) Residual strength of centrally cracked mcoавtop/fiber composite laminates. *Mater. Sci. Eng., A*, 216, 117–124.
- 19 Burianek, D.A. and Spearing, S.M. (2002) Fatigue damage in titanium–graphite hybrid laminates. *Compos. Sci. Technol.*, 62, 607–617.
- 20 Bagnoli, F., Bernabei, M., Figueroa-Gordon, D., and Irving, P.E. (2009) The response of aluminium/GLARE hybrid materials to impact and to in-plane fatigue. *Mater. Sci. Eng., A*, 523, 118–124.
- 21 Yaghoubi, A.S. and Liaw, B. (2012) Thickness influence on ballistic impact behaviors of GLARE 5 fiber-mcoавtop laminated beams: experimental and numerical studies. *Compos. Struct.*, 94, 2585–2598.
- 22 Fink, A., Camanho, P.P., Andr s, J.M. et al. (2010) Hybrid CFRP/titanium bolted joints: performance assessment and application to a spacecraft payload adaptor. *Compos. Sci. Technol.*, 70, 305–317.
- 23 Park, S.W., Kim, H.S., and Lee, D.G. (2006) Optimum design of the co-cured double-lap joint composed of aluminum and carbon epoxy composite. *Compos. Struct.*, 75, 289–297.
- 24 Lawcock, G., Ye, L., Mai, Y.W., and Sun, C.T. (1997) The effect of adhesive bonding between aluminium and composite prepreg on the mechanical properties of carbon-fiber-reinforced mcoавtop laminates. *Compos. Sci. Technol.*, 57, 35–45.
- 25 Sugiman, S., Crocombe, A.D., and Katnam, K.B. (2011) Investigating the static response of hybrid fibre-mcoавtop laminate doublers loaded in tension. *Composites Part B*, 42, 1867–1884.
- 26 Owens, J.F.P. and Sullivan, P.L. (2000) Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminium joints II. Experimental. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 20, 47–58.
- 27 da Silva, L.F.M. and Adams, R.D. (2007) Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 27, 216–226.
- 28 Kweon, J.H., Jung, J.W., Kim, T.H. et al. (2006) Failure of carbon composite-to-aluminium joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding. *Compos. Struct.*, 75, 192–198.
- 29 Lee, D.G., Kim, H.S., Kim, J.W., and Kim, J.K. (2004) Design and manufacture of an automotive hybrid aluminum/composite drive shaft. *Compos. Struct.*, 63, 87–99.
- 30 Abdullah, M.R. and Cantwell, W.J. (2006) The impact resistance of polypropylene-based fiber-mcoавtop laminates. *Compos. Sci. Technol.*, 66, 1682–1693.
- 31 Volkersen, O. (1938) Die nietkrafterteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten. *Luftfahrtforschung*, 15, 41–47.
- 32 Adams, R.D. and Peppiatt, N.A. (1974) Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. *J. Strain Anal.*, 9, 185–196.
- 33 Harris, J.A. and Adams, R.D. (1984) Strength prediction of bonded single-lap joints by non-linear finite element methods. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 4, 65–78.
- 34 Sosa, J.L.C. and Karapurath, N. (2012) Delamination modeling of GLARE using the eXtended finite element method. *Compos. Sci. Technol.*, 72, 788–791.
- 35 Goland, M. and Reissner, E. (1944) The stresses in cemented joints. *J. Appl. Mech.*, 66, 17–27.
- 36 Panigrahi, S.K. and Pradhan, B. (2007) Three-dimensional failure analysis and damage propagation behavior of adhesively bonded single lap joints in laminated FRP composites. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 26, 183–201.
- 37 Hart-Smith, L.J. (1981) Stress analysis: a continuum mechanics approach, in *Developments in Adhesives*, 2nd Edition (ed. A.J. Kinloch), Applied Science Publishers, London, 1–44.

- 38 Penado, F.E. (1998) A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint. *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 11, 272–287.
- 39 Owens, J.F.P. and Sullivan, P.L. (2000) Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminium joints I. Theoretical model. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 20, 39–45.
- 40 Delale, F., Erdogan, F., and Aydinoglu, M.N. (1981) Stresses in adhesively bonded joints: a closed-form solution. *J. Compos. Mater.*, 15, 249–271.
- 41 Hoo Fatt, M.S., Lin, C., Revilock, D.M., and Hopkins, D.A. Jr. (2003) Ballistic impact of GLARE™ fiber-mcoавtop laminates. *Compos. Struct.*, 61, 73–88.
- 42 Jumbo, F.S., Ashcroft, I.A., Crocombe, A.D., and Abdel Wahab, M.M. (2010) Thermal residual stress analysis of epoxy bi-material laminates and bonded joints. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 30, 523–538.
- 43 Liljedahl, C.D.M., Crocombe, A.D., Wahab, M.A., and Ashcroft, I.A. (2006) Damage modelling of adhesively bonded joints. *Int. J. Fract.*, 141, 147–161.
- 44 Barenblatt, G.I. (1959) The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axisymmetrical cracks. *J. Appl. Math. Mech.*, 23, 622–636.
- 45 Campilho, R.D.S.G., Banea, M.D., Pinto, A.M.G. et al. (2011) Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 31, 363–372.
- 46 Benzeggagh, M.L. and Kenane, M. (1996) Measurement of mixed-mode delaminations fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus. *Compos. Sci. Technol.*, 56, 439–449.
- 47 Sugiman, S. and Crocombe, A.D. (2012) The static and fatigue response of mcoавtop laminate and hybrid fibre-mcoавtop laminate doublers under tension loading. *Compos. Struct.*, 94, 2937–2951.
- 48 Voyiadjis, G.Z. and Kattan, P.I. (2005) *Damage Mechanics*, Marcell Dekker, New York.
- 49 Bhattacharya, B. and Ellingwood, B. (1998) Continuum damage mechanics analysis of fatigue crack initiation. *Int. J. Fatigue*, 20, 631–639.

## 3 Фрикционные точечные соединения (FSpJ)

Seyed M. Goushegir<sup>1</sup> and Sergio T. Amancio-Filho<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Materials Research, Materials Mechanics, Solid State Joining Processes, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Centre for Materials and Coastal Research, Geesthacht, Germany

<sup>2</sup>Current affiliation: Institute of Materials Science, Joining and Forming, Graz University of Technology, Graz, Austria

### 3.1 Введение

Требования современного общества изменились на протяжении веков и особенно в последние несколько десятилетий. Одними из требований этой новой эры являются надежные и безопасные конструкции с высокими эксплуатационными характеристиками, новыми источниками энергии и экологически чистыми, устойчивыми продуктами и процессами. Кроме того, быстрые перевозки стали основным требованием с необходимостью путешествий и экспорта товаров и услуг по всему миру в результате глобализации. Революционные транспортные концепции, такие как транспортные средства без трения, летающие машины, сверхбыстрые поезда и сверхзвуковые самолеты, были разработаны или их разработка предложена для будущих поколений. Кроме того, защита окружающей среды в настоящее время является серьезной проблемой. Сокращение выбросов парниковых газов (таких как углекислый газ), особенно от транспортных средств, благодаря снижению веса и снижению расхода топлива, помогает обойти негативные воздействия на окружающую среду. Такие требования и проблемы побудили ученых и инженеров в научных сообществах и промышленных секторах к разработке легких, но механически прочных и надежных конструкций. Легкие конструкции в настоящее время становятся все более востребованными для широкого спектра инженерных применений, таких как транспортная промышленность [1-3], ветроэнергетика [4] и строительство мостов [5]. В частности, в транспортной отрасли, где требуется энергоэффективность, использование высокоэффективных полимеров и их соответствующих композитов, таких как полимеры, армированные углеродным волокном (ПАУВ), и полимеры, армированные стекловолокном (ПАСВ), появилось в проектировании гибридных, мультиматериальных структур. Это связано, прежде всего, с присущей им способностью снижать вес инженерной конструкции, например самолета или автомобиля. В дополнение к легкому характеру композитов, они обладают большой коррозионной стойкостью, устойчивостью окружающей среды, высокой прочностью и высокие усталостные характеристики, что делает их привлекательными для различных отраслей промышленности [6, 7]. Кроме того, усовершенствованные легкие металлы, такие как алюминиевые, титановые и магниевые сплавы, получают дальнейшее развитие, чтобы уменьшить вес конструкции при сохранении высоких механических характеристик. Разработка и использование различных материалов с различным диапазоном свойств помогает конструкторам выбрать правильную комбинацию материалов для выполнения требуемых свойств желаемой структуры [6]. Например, самолеты нового поколения, Боинг 787 Dreamliner и Аэробус A350 XWB, являются примерами больших мультиматериальных структур. На обоих самолетах примерно 50wt% композитов смешаны с 50 wt% сплавов легких металлов такие как алюминий [8,9].

Более того, автопроизводители намерены использовать больше полимеров и композитов в кузовах своих автомобилей [10-14]. Недавно было заявлено, что к 2030 году в Соединенных Штатах полимеры и композиты станут основными материалами, используемыми в автомобильной промышленности для удовлетворения своих потребностей [12]. Таким образом, в ближайшем будущем в автомобилях ожидается большее смешение материалов. Исследовательский автомобиль Mercedes-Benz F125 [15] является примером новой концепции, разрабатываемой на период до 2025 года и далее. Автомобиль будет состоять из металл-полимерных гибридных структур, чтобы достичь своей цели безэмиссионной мобильности.

Несмотря на преимущества использования различных легких материалов в структуре, объединение разнородных материалов, таких как металлические сплавы и композиты,

представляет большую проблему из-за их отличных физико-химических свойств [2]. Amancio-Filho и dos Santos [16] классифицировали различные технологии соединения для металл-полимерных гибридных структур; они варьируются от более традиционного клеевого соединения и механического крепления до новых технологий на основе сварки. Тем не менее, традиционные соединения и механическое крепление имеют технологические и экологические ограничения. Например, время отверждения клея для структурного клеевого соединения является основным недостатком. Кроме того, связывание термопластичных композитов требует специальной предварительной обработки для увеличения внутренней адгезии между композитом и клеем, чтобы улучшить смачиваемость и поверхностное натяжение термопластов [17]. О проблемах механического крепления металлокомпозитных соединений также сообщалось для Аэробус А380 [6]. На этапе разработки крыла А380 композитные ребра были соединены с металлической обшивкой болтами на алюминиевых кронштейнах. Во время операции в скобках появились трещины, которые могли привести к выходу из строя всего компонента. Такие технические ограничения побудили недавние исследования альтернативных и передовых технологий соединения, подходящих для гибридных структур, преодолеть или уменьшить недостатки традиционных методов.

Фрикционное соединение — это альтернативная технология соединения металлокомпозитных соединений, запатентованная и разработанная в Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Германия [18]. Как видно из названия, Фрикционное соединение относится к технологиям сварки и сварки на основе трения. Новая технология была разработана как вариант точечной фрикционной сварки (FSpW) металлов [19], полимеров [20], армированных волокном полимерных композитов [21] и нанокompозитов [22]. Эта глава направлена на рассмотрение фундаментальных научных и технологических аспектов процесса Фрикционного соединения. Приведены примеры различных комбинаций материалов для решения различных особенностей соединений. Особое внимание уделяется алюминиевому сплаву AA2024 и армированным углеродным волокном композитам из поли (фениленсульфида) (CF-PPS) из-за их применения в транспортной промышленности.

## **3.2 Принципы выполнения FSpJ соединений**

### **3.2.1 Инструмент для выполнения FSpJ соединений**

При выполнении FSpJ фрикционного соединения используется неплавящийся инструмент, состоящий из трех компонентов, в результате работы которого генерируется теплота трения. Инструмент включает в себя зажимное кольцо, втулку и штифт, которые установлены соосно и могут перемещаться независимо друг от друга (рис. 3.1). Зажимное кольцо является внешним компонентом инструмента, который используется для хранения части должны быть соединены друг с другом в ходе процесса против опорной панели. Штырь и ниппель могут перемещаться вертикально и вращаться независимо. Они производят необходимое тепло в результате трения между этими частями и металлом [24].

### **3.2.2 Оборудование для выполнения FSpJ соединений**

В настоящее время существуют различные компании, производящие соединительное оборудование для Фрикционного соединения [25-27]. В настоящее время доступным оборудованием для производства фрикционных соединений являются машины с управлением перемещением. Эти машины были первоначально изготовлены для точечной фрикционной сварки, таких как алюминий и магний. Одним из преимуществ процесса

фрикционного соединения является то, что одно и то же оборудование точечной фрикционной сварки.

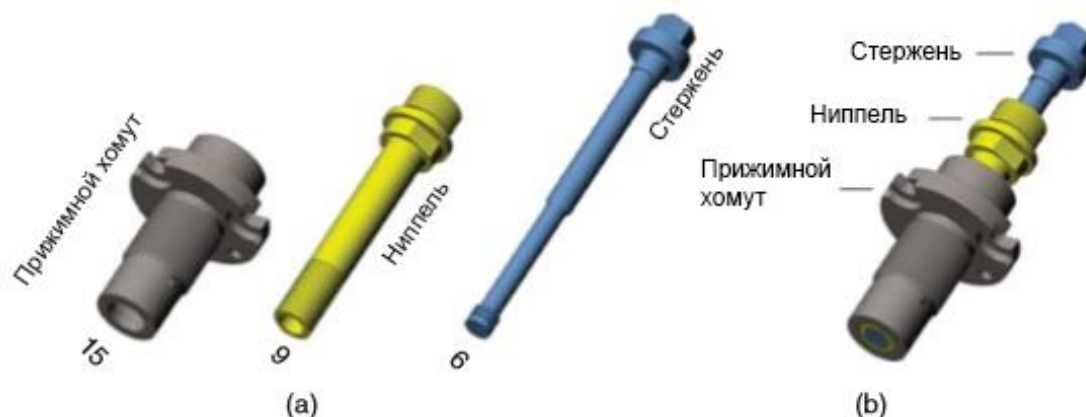


**Рис. 3.1** Изображение инструмента фрикционного соединения; (а) состоит из трех частей (размеры в миллиметрах) и (b) части инструмента соосмонтированные вместе. (Источник: Гушегир и соавт. 2015 [23]. Воспроизводится с разрешения John Wiley & Sons.)

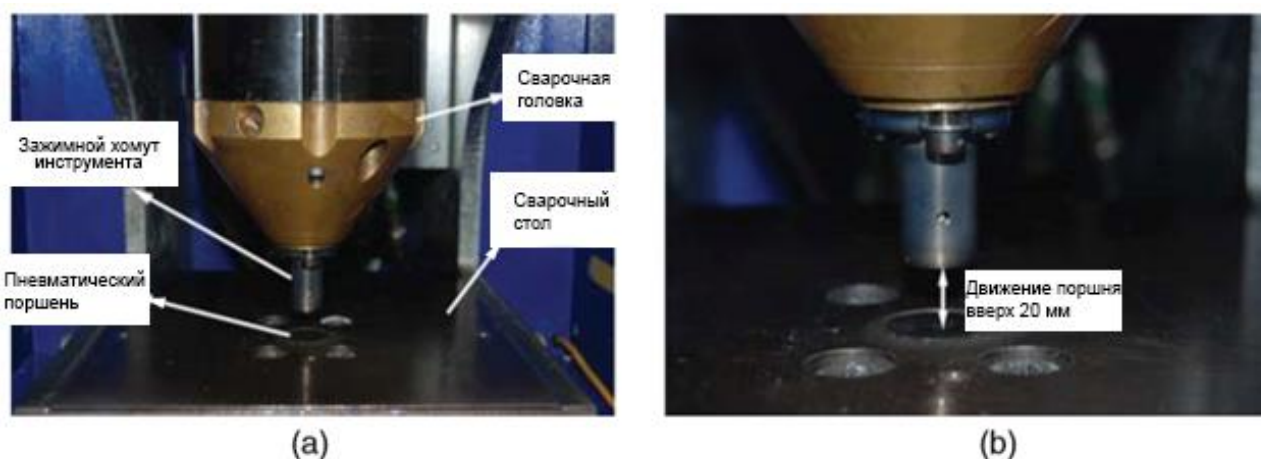


**Рис. 3.2** (а) Фотография сварочной головки RPS100, сборочного инструмента, сварочного стола, поршня пневмоцилиндра (b) увеличенное изображение сварочной головки и таблицы, показывающее ход вверх в оборудовании.

Оборудование состоит из сварочной головки, в которой собран инструмент фрикционного соединения, и пневматического поршня, который прикладывает давление соединения (ДС) к инструменту Фрикционного соединения. В этой работе использовалось оборудование RPS100 (Harms & Wende GmbH, Германия). Конструкция оборудования такова, что сварочная головка закреплена, а пневматический поршень прикладывает ДС снизу. Поршень перемещается вверх и вниз вертикально, чтобы применить и выпустить ДС. Сварочный стол используется для размещения соединительных деталей или держателя образца. Шкаф управления присоединен к оборудованию в качестве основного электрического блока для управления вращением и движением частей инструмента фрикционного соединения. На рис. 3.2 показаны различные характеристики оборудования RPS100 Точечная фрикционная сварка или соединение.

Станок способен применять скорость вращения инструмента (RS) в диапазоне 500-3300 об/мин. Образец можно охладить после процесса соединения, продувая поток сжатого воздуха, и поток воздуха можно контролировать.



### 3.2.3 Процесс выполнения FSpJ соединения

Перед началом процесса соединяемые листы удерживаются в конфигурации наложений на держателе образца с помощью прижимного устройства. Детали остаются зажатыми в течение всего процесса, чтобы исключить разделения листов во время фазы охлаждения. Это связано с большими различиями в коэффициентах теплового расширения и усадки металла и полимера. Затем станок перемещается к верхнему листу (в данном случае, металлический сплав), и соединительные детали крепятся с помощью зажимного кольца к несущему цилиндру под влиянием прижимного давления (JP). Рис. 3.3 иллюстрирует конфигурацию соединяющих частей перед началом процесса.

Процесс фрикционного соединения можно разделить на три основных этапа [24]. Есть два возможных варианта техники исполнения фрикционного соединения: «погружение штыря» и «погружение ниппеля» [24]. В варианте погружения ниппеля, первый этап процесса начинается, когда вращающийся ниппель погружается в металлический лист в заданном положении, и штырь убирается вверх. Из-за трения между вращающимся ниппелем и металлом локальная температура повышается вокруг инструмента, но ниже точки плавления металла, это вызывает локальное размягчение и пластификацию металлического сплава. Пластифицированный металлический сплав течет в резервуар, оставленный позади путем втягивания штыря (Рис. 3.4 (a)).

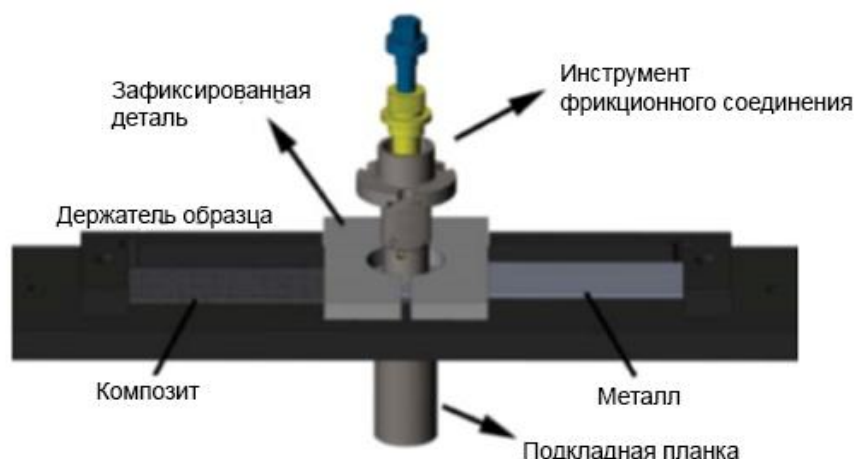


**Рис. 3.3** Конфигурация соединительных частей и инструмента FSpJ до начала процесса. (Источник: Goushegir 2016 [28]. Воспроизведено с разрешения Springer.)

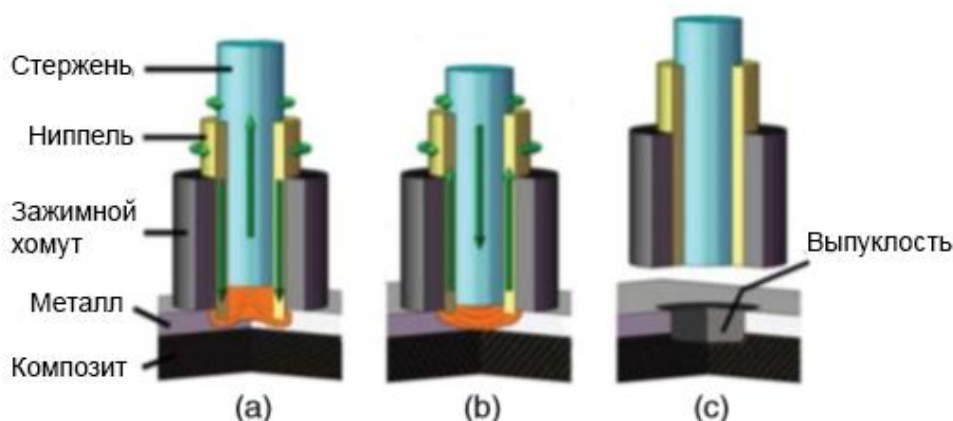


**Рис. 3.4** Схематическое представление этапов процесса FSpJ; (a) погружение рукава пластифицирует металл, (b) точечная заправка, и (c) совместная консолидация. (Источник: Amancio-Filho et al. 2011 [24]. Воспроизведено с разрешения Elsevier.)



В качестве второго шага штырь прижимается к размягченному металлу, чтобы заполнить замочную скважину, оставшуюся в металлическом листе, который был образован погружным ниппелем (рис. 3.4 (b)). В итоге, инструмент отводится, и соединение укрепляет при охлаждении и давлении (Рис. 3.4 (c)). Обратите внимание, что инструмент погружается в металлическую часть только на небольшую глубину, которая не достигает композитной линии раздела, чтобы избежать любого повреждения несущей сети волокон. Рис. 3.5 изображает вид сверху прочного соединения металл-композит Фрикционного соединения.

В варианте погружки штыря, штырь проникает в металлический элемент, когда ниппель вытягивается [24]. Другие этапы процесса эквивалентны тем для погружения ниппеля. Так как площадь ниппеля больше, чем площадь штыря,

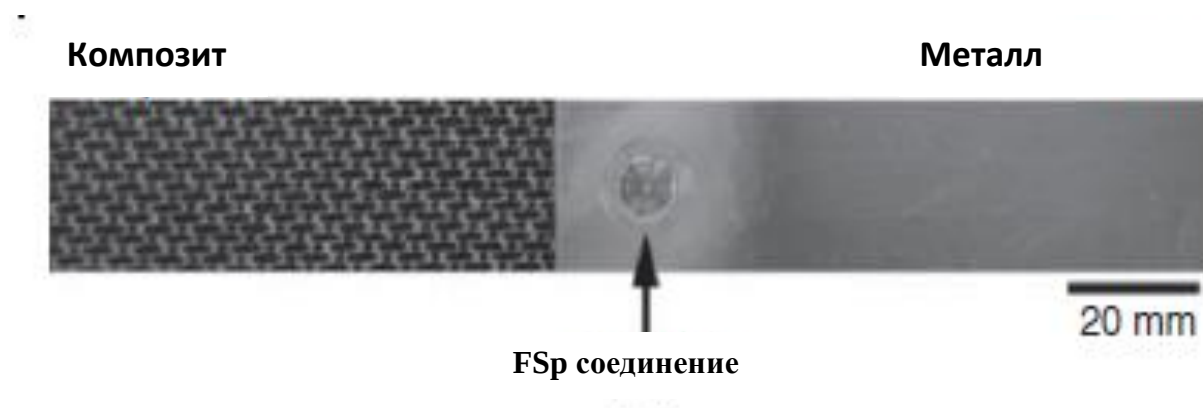


**Рис. 3.5** Вид сверху качественной поверхности металло-композитного соединения FSp; (Ex.: AA2024/CF-PPS). (Источник: Гушегир и соавт..2015 [29]. Воспроизведено с разрешения Elsevier.)

можно предположить, что в варианте погружения ниппеля площадь соединения больше, что обусловлено более высоким подводом тепла, и, следовательно, могут быть достигнуты лучшие механические характеристики. Вариант погружения ниппеля используется в этой главе для объяснения процесса.

Здесь стоит упомянуть, что существует три основных различия между Фрикционным соединением и точечной фрикционной сваркой [30]. Во-первых, в отличие от точечной фрикционной сварки металлов и термопластов, инструмент при выполнении фрикционного соединения погружается лишь на небольшую глубину в металлическую часть и не достигает композита. Причина заключается в том, чтобы избежать чрезмерной деградации матрицы из композита и повреждения его сети несущих волокон. Во-вторых, с Фрикционным соединением силы адгезии от образования расплавленного слоя действуют как один из основных механизмов связывания. Однако атомная диффузия (в металлических точечных сварных швах) и молекулярная взаимная диффузия (в термопластичных точечных сварных швах) являются основными механизмами, приводящими к образованию сварного шва. Кроме того, во Фрикционном соединении смешивание материала не происходит из-за огромных физико-химических различий в металлических и полимерных деталях, которые обычно приводят к резким границам раздела.

Пятно, образованное во фрикционном соединении, состоит из трех концентрических колец. Рис. 3.6 иллюстрирует подробный вид колец, связанных с отпечатками деталей инструмента Фрикционного соединения, которые остались на металле в области пятна. Рис. 3.6 (a) иллюстрирует вид сверху области пятна, тогда как рис. 3.6(b) показывает его 3D изображение.

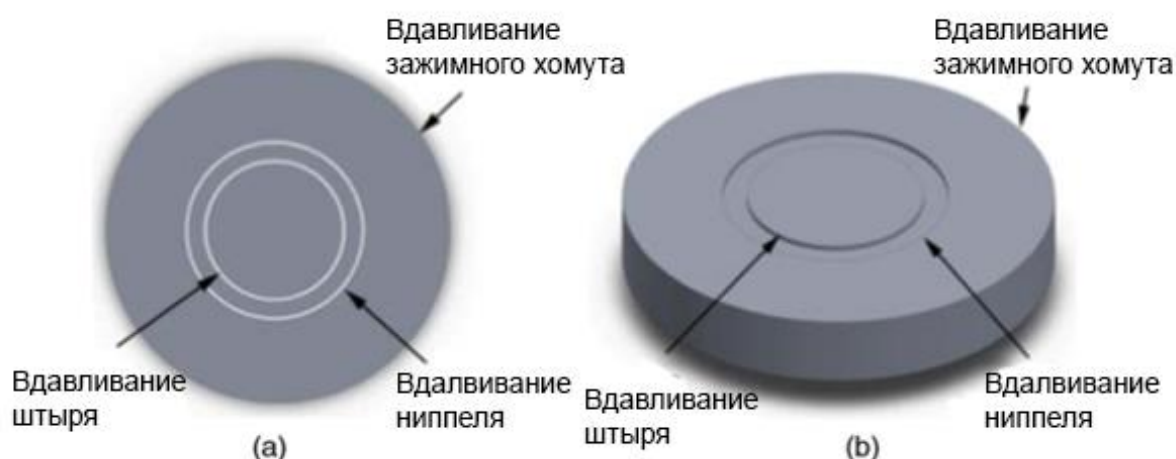


**Рис. 3.6** Схематическое изображение области пятна, показывающее впечатление от частей инструмента на верхней поверхности металла; (a) вид сверху и (b) 3D вид.

Наружное кольцо соответствует вдавливанию, оставленному зажимным хомутом, среднее кольцо связано с ниппелем, а внутреннее кольцо появляется из-за вдавливания штыря. Однако не всегда возможно различить вдавливания штырей и ниппелей, и один хомут, вероятно, наблюдается в результате смешивания материалов ниже ниппеля и штыря, как показано в [24].

Во время процесса соединения высокие температуры вокруг инструмента увеличивают локальную формуемость металла. По этой причине пластифицированный металл деформируется за счет врезного движения ниппеля и стержня и создает геометрическое углубление в форме «выступа» [24]. В результате осевого усилия, прилагаемого инструментом, выступ немного вставлен в композит, и это увеличивает механическое сцепление между соединяющимися частями. На рис. 3.7 показано поперечное сечение фрикционного соединения в середине пятна, где выступ обозначен черным прямоугольником. Создан резервуар в центре выступа, где композит захватывается и размещается внутри. Резервуар выступа также обозначен на трехмерном графическом изображении области пятна на рис. 3.8 (без составного партнера, чтобы помочь визуализации).

Форма выступа зависит не только от локальной формуемости металла при высокой температуре, но также и от свойств композита под металлом. Как правило, выступ в случае непрерывного армированного волокнами композита не так выражен из-за высокой жесткости сети волокон

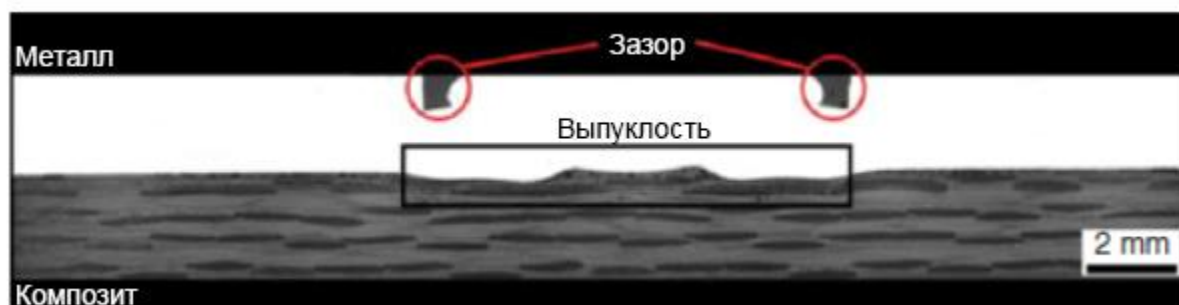
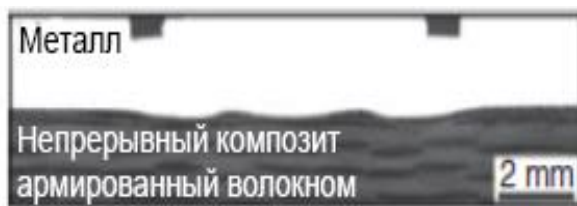
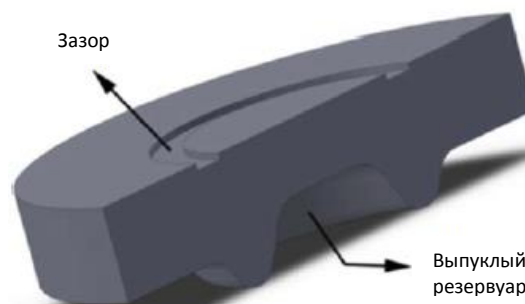


**Рис. 3.7** Пример поперечного сечения соединения FSp в середине пятна. Прямоугольник указывает на выступ, а красные кружки показывают образование зазора под погружным рукавом; (Ex.: AA2024/CF-PPS). (Источник: Goushegir et al. 2016 [31]. Воспроизведено с разрешения Elsevier.)

**Рис. 3.8** Схематическое изображение поперечного сечения середины области пятна. Формируется утолщенный резервуар, в котором размещается расплавленный полимер. Композитный партнер не использован для лучшей визуализации.

(Источник: Goushegir 2016 [28].  
Воспроизведено с разрешения Springer.)



а)



б)

**Рис. 3.9** Сравнение формы выпуклости в случае (а) непрерывный композит армированный волокном и (б) композит, армированный короткими волокнами; (Ex.:AA2024/CF-PPS)

В дополнение к жесткости волокнистой сети большая объемная доля непрерывных волокон в композите затрудняет перемещение металла в пучки волокон и проникновение в композит. Напротив, использование неармированного полимера или полимера, армированного короткими волокнами и более низкой локальной жесткостью, приводит к более заметному выступу. На рис. 3.9 показано поперечное сечение двух фрикционных соединений, сравнивающих форму выступа при использовании (а) композитов, армированных непрерывным волокном, и (б) полимера, армированного короткими волокнами. В обоих случаях параметры соединения, металлический сплав и матрица композитов одинаковы; единственная разница заключается в использовании сплошных и коротких волокон. Из этих поперечных сечений ясно, что использование менее жесткого композитного материала, армированного коротким волокном, приводит к увеличению выступа. Об этом наблюдении также сообщили Amancio-Filho et al. [24] для Фрикционного соединения из магниевого сплава с композитом, армированным непрерывным и коротким углеродным волокном.

Другой особенностью, которая может наблюдаться во фрикционном соединении, является образование зазора под ниппелем (между вдавливаниями штыря и ниппеля), как это видно на рисунках 3.7 и 3.8. Зазор образуется на поверхности металла ниже погружного ниппеля, поскольку часть массы металла смещается в композит на границе раздела в области выступа. Смещение массы происходит из-за повышенной локальной деформируемости металла, вызванной высокой температурой и осевым усилием, приложенным инструментом. Это означает, что недостаточно материала, чтобы полностью заполнить зазор, который создается под погружным ниппелем. Следует отметить, однако, что степень зазора очень сильно зависит от формы выступа. Если ниппель не вставлен глубоко в композит, то доступно больше материала, чтобы заполнить промежуток.

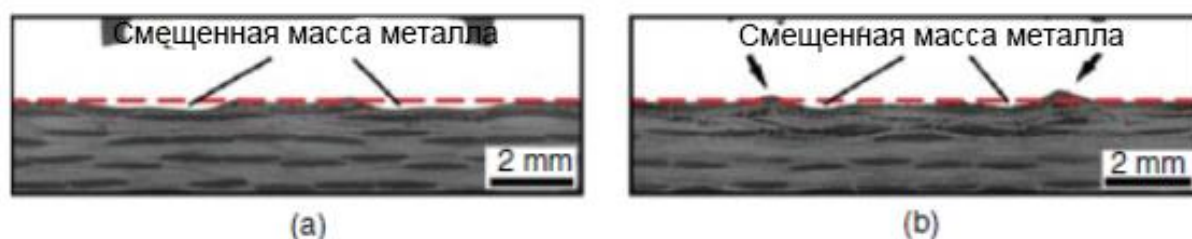


**Рис. 3.10** Сравнение зазора, образованного на поверхности металла с PD (a) 0.8 мм и (b) 0.5 мм. Пунктирные линии показывают среднюю плоскость между металлом и композитом до процесса соединения. Стрелки в (b) указывают две неровности, помогающие заполнить замочную скважину; (Ex.: AA2024/CF-PPS).

На рис. 3.10 показано поперечное сечение двух соединений: (a) где зазор выражен в результате большого смещения массы металла в композит и (b) где почти нет зазора на поверхности металла, потому что меньше металла смещается в композит, и замочная скважина полностью заполнена. Горизонтальные пунктирные линии на рис. 3.10 иллюстрируют среднюю плоскость перед соединением, то есть исходный уровень металла на границе с композитом (и вне области выступа). Все белые части под линиями показывают смещение металла в композит. Кроме того, два небольших выступа (обозначенных стрелками) на рис. 3.10 (b), которые образовались по бокам выступа, помогают заполнению замочной скважины. Обычно большая глубина погружения инструмента (PD) приводит к смещению большей массы металла и, следовательно, образованию зазора на верхней поверхности металла. На Рис. 3.10 (a), PD 0,8 мм был использован по сравнению с Рис. 3.10 (b), где ГП была 0,5 мм.

### 3.2.4 Механизмы связывания

В процессе соединения, генерируемая теплота трения передается от металлического сплава к композитной границе через проводимость. В результате очень низкой теплопроводности композита это тепло накапливается на границе раздела и приводит к локальному повышению температуры. Так как температура превышает температуру плавления или стеклования композитной матрицы, в области пятна образуется тонкий слой расплавленного или размягченного полимера.

Часть расплавленного слоя выдавливается и течет в поперечном направлении по всей области перекрытия в результате осевого давления инструмента. Затем расплавленный слой уплотняется под давлением, благодаря чему он вызывает силы сцепления между металлом и композитом. Общая площадь FSpJ соответствует внешней периферии консолидированного расплавленного слоя, как показано на рис. 3.11. Рис. 3.11 (a) изображает наличие сил сцепления между металлом и композитом внутри области связывания.

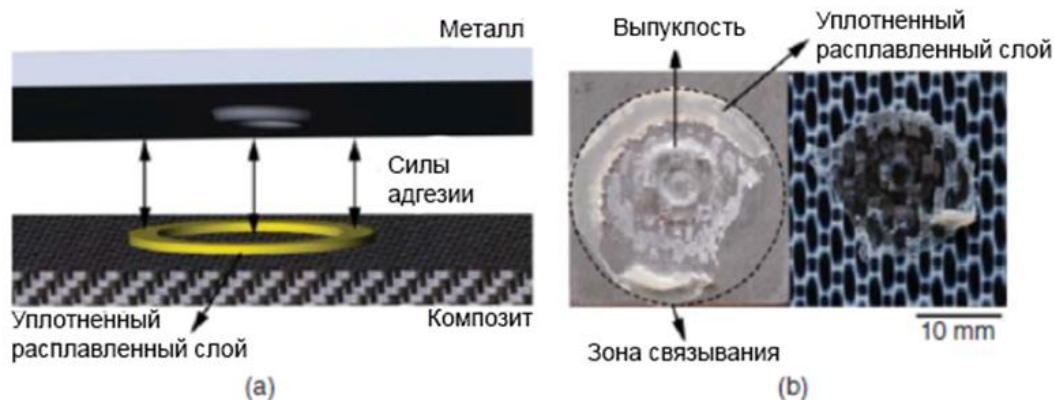




**Рис. 3.11** (а) Изображение сил адгезии как один из первичных механизмов связывания в FSpJ и (b) пример разрушения поверхности FSp соединения наложением при смещении; (Ex.: AA2024/CF-PPS). (Источник: Goushegir 2016 [28]. Воспроизведено с разрешения Springer.)

Поверхность излома соединения после испытания внахлестку при сдвиге также показана на рис. 3.11(b) где общая площадь связывания обозначена пунктирной окружностью на металлической части.

«Механическая централизация» и «силы адгезии» являются основными механизмами связывания в точках фрикционного соединения. Оба эти механизма связывания можно дополнительно подразделить на подтипы. Механическое крепление происходит как на макро, так и на микроуровне. Макромеханическое крепление является результатом захвата полимера в пределах сформированного участка. Также может возникнуть микромеханическая блокировка. Предварительная обработка поверхности часто использовалась для увеличения шероховатости поверхности и образования пор, трещин и неровностей. Проникновение расплавленного полимера в такие микромасштабные металлические неровности приводит к явлению микромеханической блокировки. Кроме того, при использовании FSpJ некоторые волокна в композите захватываются металлом, в частности, внутри и вокруг области выступа, где металл пластифицируется и слегка деформируется. Захват волокна также относится к категории микромеханической блокировки. Силы адгезии также можно разделить на физическую и химическую связь. Считается, что физическая адсорбция и связь (в результате слабых ван-дер-ваальсовых сил) присутствуют во FSpJ, где расплавленный полимер находится в тесном контакте с металлом. Кроме того, между расплавленным полимером и соединяющимися частями может происходить сильная химическая адсорбция и связывание, если поверхность металла и/или композита активируется подходящей предварительной обработкой поверхности [23].

Была предложена простая модель для обсуждения зон связывания и механизмов разрушения в FSpJ [30]. Как показано на рис. 3.12 (а), на поверхности разрушения FSp соединения можно выделить три зоны. Первая зона соответствует области, в которой присутствует механически деформированный кусок, и температура процесса была достаточно высокой в области, чтобы получить тонкий слой расплавленного полимера. Эта зона называется пластически деформированной зоной (PDZ). Предполагается, что PDZ является самой прочной частью соединения, поскольку существует тесный контакт между матрицей композита и углеродными волокнами с объемом пластифицированного металла.

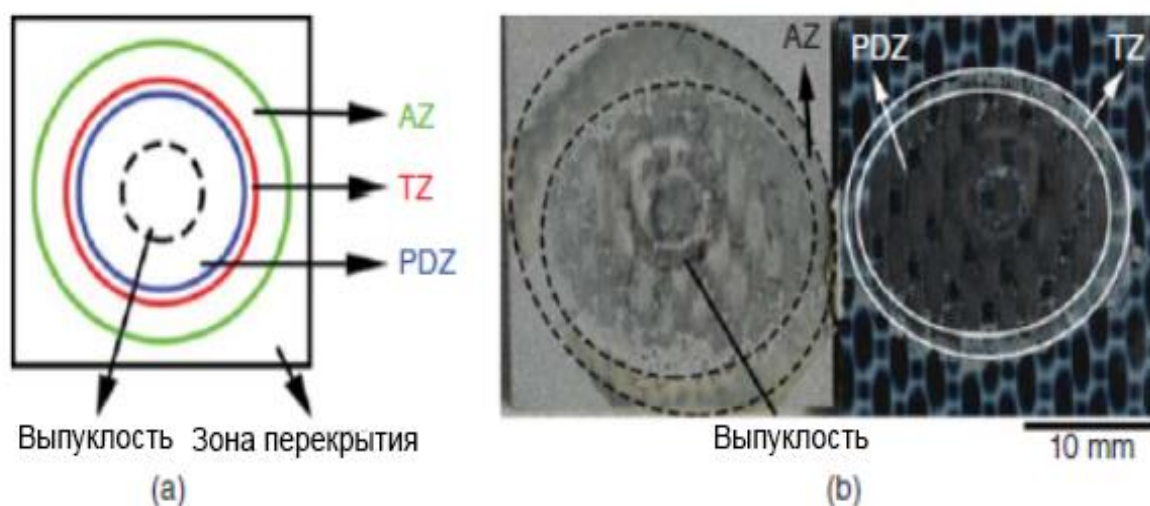


**Рис. 3.12** (а) Схематическая поверхность излома фрикционного соединения и (b) реальная поверхность разрушения соединения AA2024/CF-PPS FSp, с указанием трех зон связывания; пластически деформированная зона (PDZ), переходная зона (ПЗ), и зона связывания (ЗС). (Источник: Гушегир и соавт. 2015 [29]. Воспроизведено с разрешения Elsevier.)

Большинство механизмов разрушения, таких как когезионное разрушение внутри композита и частичное разрушение волокна, происходят в этой области. Внешняя область — это зона, в которой текучий расплавленный полимер уплотняется за несколько секунд в результате очень высоких скоростей охлаждения (CRs). Эта зона называется зоной адгезии (AZ). Существует также переходная зона (TZ), указанная рядом с внутренней границей консолидированного слоя. Из-за низкой вязкости текучего расплавленного полимера во время процесса соединения пузырьки воздуха остаются захваченными в этом слое. Как правило, эти три зоны не распределены равномерно вокруг выступа, как показано на рис. 3.12 (б), что может указывать на неоднородное распределение тепла в металлическом сплаве.

Как объяснено, механическая блокировка в FSpJ соединении подразделяется на «макромеханическую» и «микромеханическую». Макромеханическая блокировка является только результатом вставки выступа в композит внутри PDZ. Напротив, микромеханическая блокировка происходит по всей области скрепления во всех трех зонах. Полимерный расплавленный слой протекает в пористости и неровности на поверхности металлического сплава, создавая микромеханическое сцепление. Другой подкатегорией механической блокировки является улавливание волокна металлом. Некоторые из углеродных волокон внедряются в металл внутри PDZ, благодаря чему достигается дальнейшая микромеханическая блокировка. Рис. 3.13 (а) и (б) иллюстрируют поперечное сечение соединения, исследованного с помощью лазерной сканирующей конфокальной микроскопии (LSCM), демонстрируя явление микромеханическую централизацию металлической порой и щелевым заполнением при захвате расплавленного полимера и волокна в PDZ. Сканирующая электронная микроскопия (SEM) с большим увеличением (рис. 3.13 (с)) показывает, что в некоторых случаях слой расплавленного полимера протекает между углеродными волокнами и металлом. Хотя прямой контакт между металлическими и углеродными волокнами может улучшить механические характеристики соединений за счет улучшенной микромеханической блокировки, он, тем не менее, может оказаться вредным для его коррозионных свойств при воздействии агрессивной среды. Следовательно, наличие такого слоя может фактически снизить скорость коррозии.

### 3.2.5 Технологические параметры

Есть четыре основных параметра процесса в FSpJ похожие на FSpW металла [24,29,34]: RS погружного ниппеля, PD ниппеля в металлический сплав, время соединения (JT), и JP. Другими важными параметрами процесса являются: давление зажима (CP), когда соединяемые части зажимаются, чтобы избежать разделения на этапе охлаждения, и CR в конце процесса соединения. Параметры процесса влияют на механизмы связывания, микроструктуру и, следовательно, на механические характеристики соединений. RS контролирует подвод тепла и изменение температуры во время цикла соединения. Из-за изменений температуры процесс влияет на локальную микроструктуру металлической части. Кроме того, количество образующегося расплавленного полимера напрямую связано с подводом тепла и, следовательно, СВ ниппеля.

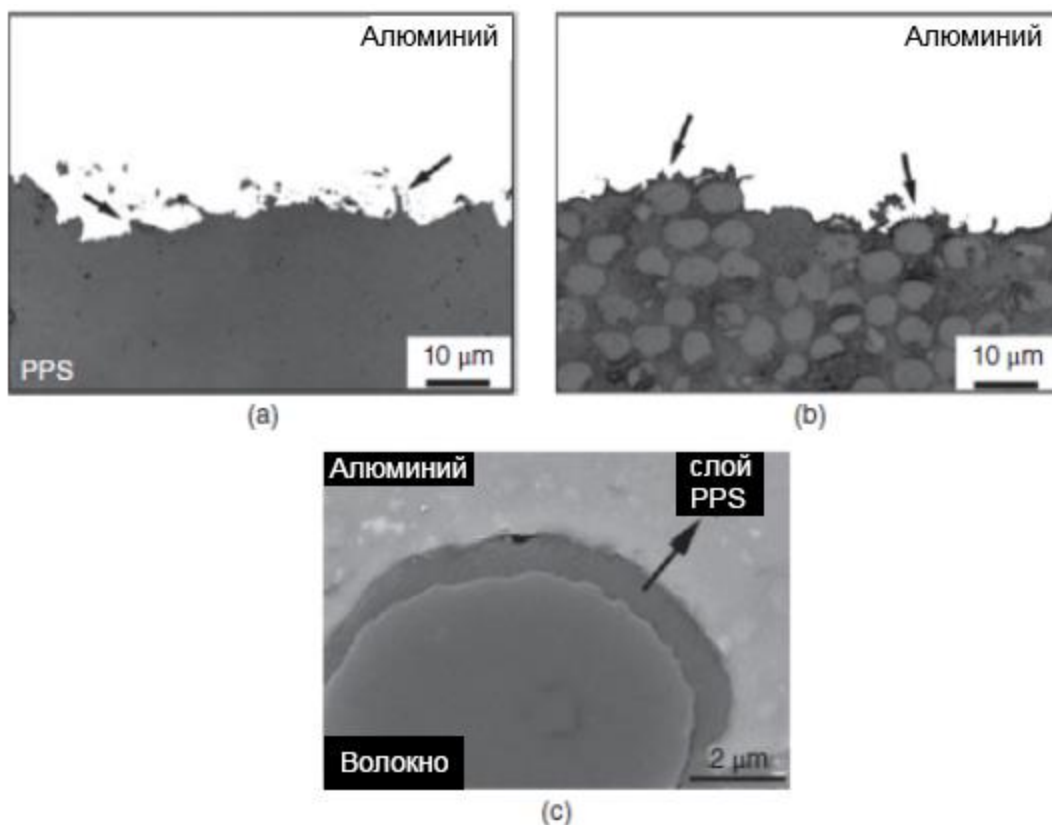


**Рис. 3.13** Поперечное сечение соединения AA2024/CF-PPS FSr в PDZ изученного LSCM показывая микромеханическую блокировку через (а) заполнение алюминиевой поры/щели расплавленным PPS в области, богатой смолой и (b) захват волокна. (Адаптировано с Литература [30].)

(с) Изображение SEM с высоким увеличением показывающий тонкий слой PPS между алюминием и углеродными волокнами. (Источник: Goushegir 2016 [28]. Воспроизведено с разрешения Springer.)

Кроме того, вязкость расплавленного полимера, его реологическое поведение, а также образование и степень дефектов в композите - все это температурно-зависимые явления, на которые косвенно влияет RS. JT, которая включает в себя время погружения ниппеля и время втягивания, определяет скорость соединения. Это также влияет на количество подводимого тепла в процесс и степень повышения температуры вокруг инструмента. Подобно RS, вышеупомянутые температурно-зависимые явления также подвержены влиянию JT. Еще одной важной функцией RS и JT является косвенное управление формой металлического куска, поскольку генерирование большего количества тепла при трении увеличивает локальную формуемость металла. PD ниппеля выполняет функциюковки и в основном отвечает за форму и глубину вставки выступа в композит. Более высокая PD обычно приводит к более глубокому вдавливанию деформированного металла в композит, таким образом, улучшается макромеханическая блокировка между деталями, как мы недавно сообщали в наших рукописях [29,34]. JP является параметром, основной функцией которого является управление потоком расплавленного полимера. Приложенная осевая сила в области пятна в результате приложенного JP влияет на боковой поток расплавленного полимера. Комбинация подводимого тепла и JP влияет на поток и площадь соединения, как объяснено в [29]. Кроме того, тесный контакт между расплавленным полимером и металлом на границе раздела зависит от применяемого JP. Это особенно важно, когда поверхность металла шероховата, например, в результате предварительной обработки поверхности. Полное заполнение неровностей на поверхности металла расплавленным полимером нанесенным JP приводит к увеличению

микромеханической блокировки и, следовательно, механических характеристик соединений.

CR требуется вовремя и после цикла соединения, чтобы избежать разделения соединяющих частей. Однако очень высокая CR может препятствовать боковому течению расплавленного полимера и, таким образом, уменьшать общую площадь соединения. CR является еще одним параметром, который влияет на характеристики сустава. Фаза охлаждения начинается после втягивания инструмента путем подачи сжатого воздуха в зону соединения. CR может влиять на кристаллическое состояние расплавленного полимера в случаях полукристаллических термопластов, таких как поли (фениленсульфид) (PPS). Очень высокий CR может снизить кристалличность расплавленного полимера или даже превратить его в аморфное состояние, что влияет на локальные механические свойства этого слоя. Также обсуждалось, что генерация больших остаточных тепловых напряжений на границе металл-композит может быть другим эффектом быстрых CRs [35]. CR может также влиять на создаваемые объемные дефекты, так как более низкая CR дает больше времени для захваченного воздуха выходить из расплавленного слоя, что приводит к уменьшению дефектов. В таблице 3.1 приведены параметры фрикционного соединения и их соответствующие функции.

**Таблица 3.1** Управляемые технологические параметры Фрикционного соединения и их соответствующие функции.

| Параметр соединения | Символ | Функция                                                                                                                                 |
|---------------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Скорость вращения   | СВ     | Влияет на тепловыделение и изменение температуры, форму выступа, микроструктурные изменения в металле и композите, образование дефектов |
| Глубина погружения  | ГП     | Управляет формой выступа и глубиной его вставки в композит                                                                              |
| Время соединения    | ВС     | Управляет скоростью соединения, степенью изменения температуры вокруг инструмента                                                       |
| Давление соединения | ДС     | Управляет типом потока расплавленного полимера                                                                                          |
| Зажимное давление   | ЗД     | Контролирует плотный контакт между соединяющимися частями и препятствует их разделению во время фазы охлаждения                         |
| Скорость охлаждения | СО     | Влияет на кристалличность полукристаллических композитов, а также на образование объемных дефектов                                      |



Влияние параметров процесса на микроструктуру и механическое поведение фрикционных соединений FSp с использованием различных комбинаций соединяющих деталей, таких как магний Mg AZ31/CF-PPS [36], AA5754/CF-PPS [37], AA6181/CF-PPS [34, 35], и AA2024/CF-PPS [29] был тщательно исследован. Поскольку влияние параметров процесса варьируется в зависимости от выбранных базовых материалов (BM), для получения дополнительной информации обратитесь к каждой отдельной публикации.

### 3.3 Выработка тепла во время выполнения FSpJ соединений

Во время процесса FSpJ, трение между врезным инструментом и металлическим листом вырабатывает тепло от трения. Подвод тепла является важным параметром во всех процессах соединения в твердом состоянии, поскольку он определяет температуру в зоне соединения и, следовательно, микроструктуру, локальные и глобальные свойства соединений. Уравнение 3.1 показывает модель, используемую для процесса точечной фрикционной сварки (FSSW) для оценки потребляемой энергии [38]:

$$Q_{\text{прикл}} = \sum_{n=1}^N F(n)(X_n - X_{n-1}) + \sum_{n=1}^N M(n)\omega(n)\Delta t \quad (3.1)$$

где  $X$ , это PD,  $M$  это крутящий момент ( $\text{Н}\cdot\text{м}$ ),  $\omega$  это скорость вращения ( $\text{рад/с}$ ) инструмента,  $\Delta t$  это  $\text{JT}$ , и  $n$  относится к номеру эксперимента. Предполагая, что вся механическая энергия преобразуется в подвод тепла во время процесса, - соглашение, обычно предполагаемое в процессах соединения на основе трения [39] - Уравнение (3.1) может использоваться для лучшего понимания влияния параметров процесса на генерируемое тепло трения. Из-за сходства в тепловыделении между FSpJ и FSSW это уравнение можно использовать для объяснения влияния параметров процесса FSpJ на тепловыделение.

Было пояснено [29], что согласно Уравнению (3.1), RS и JT непосредственно управляют подводом тепла: увеличение в обоих из них увеличивает подвод тепла в процессе. Также обсуждалось, что повышение температуры в результате тепловыделения при твердом трении пропорционально обратной теплопроводности материала [40,41]. Из-за низкой теплопроводности полимеров проводимое тепло от металла к границе раздела накапливается в области соединения, что приводит к более высокой температуре в объеме композита в центре соединения. Следовательно, ожидается снижение вязкости образованного полимерного расплавленного слоя. Полимерный расплавленный слой с низкой вязкостью легче течет и распространяется в боковом направлении наружу в большей области под нанесенным JP. Однако через короткое время вязкость текучего расплавленного слоя начинает увеличиваться (из-за очень быстрой CR после процесса соединения), что приводит к образованию TZ перед окончательным уплотнением слоя в области AZ. В общем случае площадь соединения увеличивается с увеличением температуры процесса, что приводит к повышению прочности соединения [29, 34].

### 3.4 Микроструктурные зоны FSpJ соединений

Микроструктурные зоны образуются в FSp в результате взаимодействия инструмента с металлом, генерируя тепло от трения и локальное повышение температуры, а также количество тепла, передаваемого из металла в композит. Как правило, микроструктурные зоны можно разделить на четыре зоны: зона перемешивания металла (MSZ), зона термомеханического воздействия металла (MTMAZ), зона термического влияния металла (MHAZ), и зона термического влияния полимера (PHAZ).

Микроструктурные зоны очень сильно зависят от типа выбранного металлического сплава. Генерируемая микроструктура может варьироваться между термообработываемыми и не термообработываемыми сплавами, а также литыми металлами. Для описания микроструктурных зон, пример соединения AA2024/CF-PPS выбранного здесь.

Микроструктурные зоны на алюминии очень похожи на те, о которых сообщалось для FSpW AA2024 [32] и AA6181 [42]. Микроструктурные зоны в FSpJ показаны на рис. 3.14, где Рис. 3.14(a) показывает обзор микроструктуры, а рис. 3.14(b)-(f) проиллюстрировать

подробную микроструктуру каждой зоны. Рис. 3.14(b) и (c) относительно сравнивают микроструктуру ВМ и МТМАЗ. Микроструктура АА2024 в МТМАЗ зависит от относительно высокой температуры, достигнутой во время процесса, а также от серьезной деформации [32, 42]. Эта зона образуется в объеме, близком к погружной втулке, где на алюминиевые зерна влияет высокая скорость деформации в результате скорости вращения инструмента, а также осевого перемещения [32, 42, 43]. Таким образом, микроструктура в этой зоне характеризуется удлинёнными зёрнами, которые повернуты примерно на  $45^\circ$  по сравнению с неизменными частицами. Можно увидеть, что частицы в МТМАЗ вытянуты и повернуты от левого верхнего до правого нижнего угла (Рис. 3.14(c)) по сравнению с АА2024 ВМ (Рис. 3.14(b)). Индуцированная деформация частицы в этой зоне может способствовать усилению деформации [42]. Однако, поскольку температура и скорость деформации относительно высоки в МТМАЗ, может также произойти некоторое динамическое восстановление, которое уменьшает эффект деформационного упрочнения [44, 45]. Кроме того, из-за относительно высокой температуры, достигнутой в этой области, также может иметь место укрупнение упрочняющих частиц [46]. Поэтому на локальную механическую прочность алюминиевого сплава 2024 в МТМАЗ влияют эти конкурирующие явления (деформационное упрочнение, динамическое восстановление и остаточное огрубление).

MSZ находится в центре пятна, которое подвергается наибольшей скорости деформации в результате перемешивания алюминия инструментом [42, 47]. В этой зоне также ожидается наибольшее тепловыделение при трении и достигнутая температура [42, 47]. Динамическая рекристаллизация (DRX) является одним из основных механизмов, происходящих в MSZ в FSpW алюминия, что приводит к равноосной, очищенной зернистой структуре [32, 42]. DRX встречается во многих металлических материалах выше  $0,6 T_m$  при высоких напряжениях или высоких скоростях деформации [44, 45]. Высокие температуры, полученные во время FSpJ АА2024/CF-PPS [29] в сочетании с высокой скоростью деформации из-за скорости вращения инструмента, приводят к очень тонкой зернистой структуре в MSZ.

MHAZ это третья зона, образованная в процессе FSpJ между ВМ и МТМАЗ. В этом участке алюминий не подвергается механическому воздействию, а температура не такая высокая, как в MSZ и МТМАЗ.

Умеренные температуры, достигнутые в MHAZ, могут привести к явлению восстановления и огрублению упрочняющих частиц [42]. Хотя такие металлургические явления могли иметь место, никаких различий в структуре зерна между MHAZ и ВМ с помощью оптической микроскопии не наблюдалось. Рис. 3.14 (f) иллюстрирует границу между МТМАЗ (левая часть рисунка) и MHAZ (правая часть рисунка).

В дополнение к микроструктурным зонам в алюминии, PHAZ был обнаружен в CF-PPS, как показано на Рис. 3.15. Пунктирная линия на рис. показывает границу между PHAZ и CF- ПФС ВМ.

Сообщалось, что температура в PHAZ выше чем  $T_g$  CF-PPS а также выше  $T_m$  в непосредственной близости от линии раздела [48]. Некоторые из расплавленных матриц PPS выдавливаются из выпуклости. Кроме того, вязкость расплавленного полимера снижается, что приводит к улавливанию воздушных карманов в медленно протекающих PPS. Поскольку CR очень быстрая, эти захваченные воздушные карманы не могут выйти из PPS и остаются в виде объемных дефектов в соединениях. Основной тип дефекта, идентифицированный в PHAZ вблизи границы с алюминием, был описан как поры и пустоты [48]. Образование пустот, приводящих к дефектам в результате захвата воздуха, также обнаружено при контактной сварке [49] и лазерной сварке [50] из термопластов.

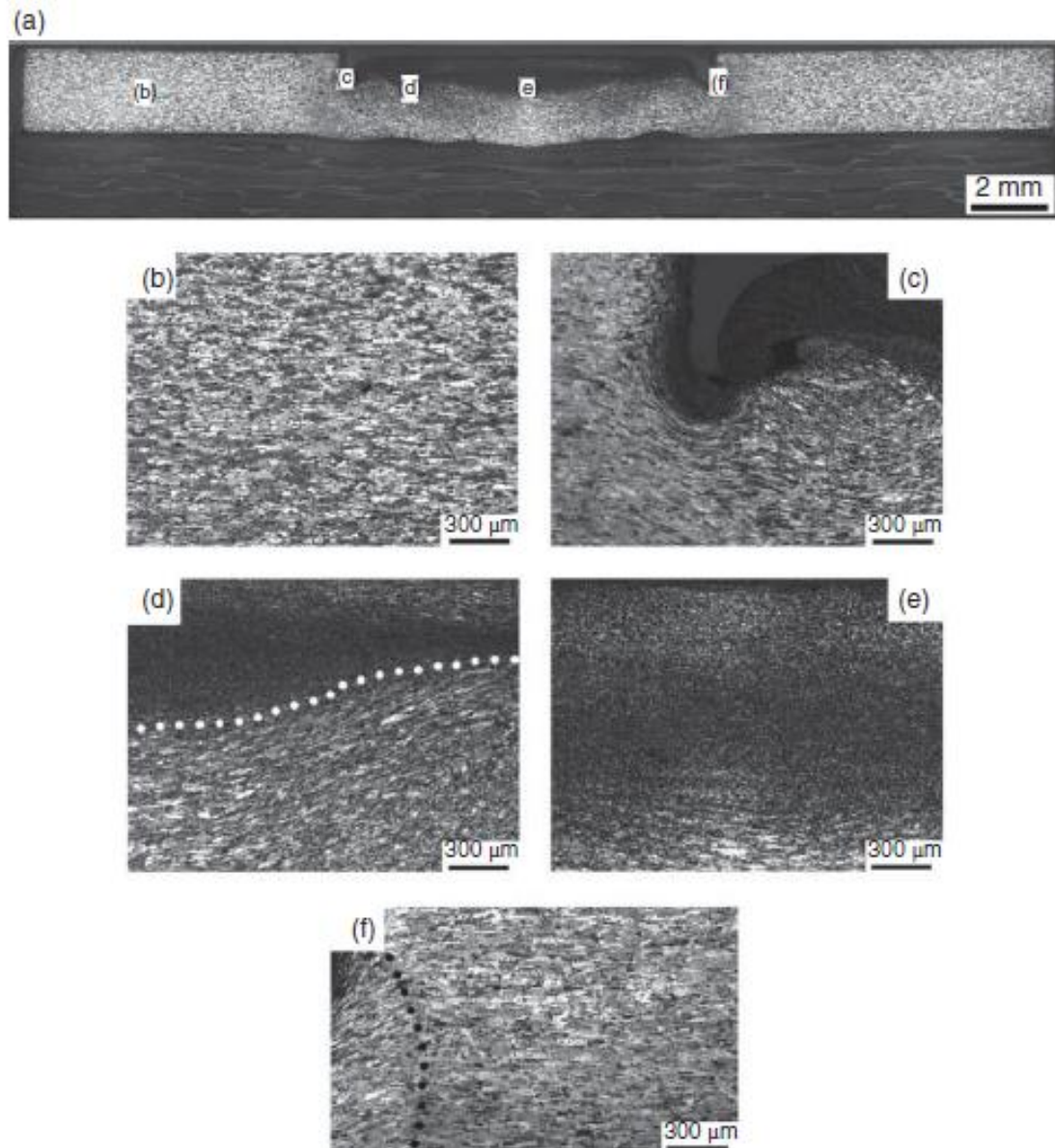


**Рис. 3.14** Микроструктурные зоны, которые образуются в алюминии. (а) Общий обзор микроструктуры соединений, (b) микроструктура СМ, (с) 3ТМВМ показывая удлиненные частицы повернуты по сравнению с частицами СМ, (d) граница между 3ТМВМ и МСЗ, (е) МСЗ отображающие очень мелкие частицы ДР, и (f) граница между 3ТМВМ и 3ТВМ. (Источник: Goushegir 2016 [28]. Воспроизведено с разрешения Springer.)

Рис. 3.14(d) отображает границу между MSZ и MTMAZ, и Рис. 3.14(e) иллюстрирует структуру MSZ очень мелкой частицы. В дополнение к измельчению частиц в MSZ ожидается солубилизация упрочняющих частиц в ходе цикла соединения в результате высокой температуры. Считается, что повторное осаждение этих частиц во время фазы охлаждения увеличивает локальную прочность MSZ [42].

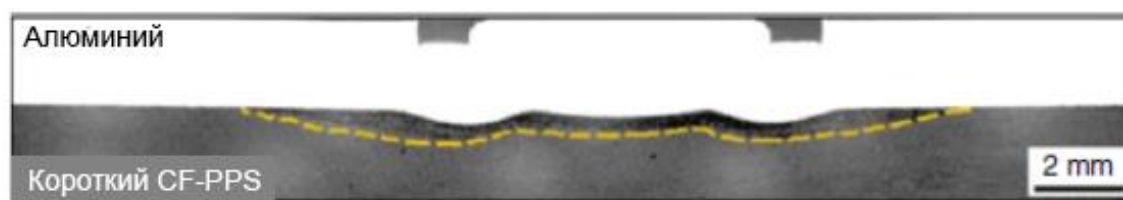


**Рис. 3.15** Микроструктура соединения AA2024/CF-PPS. Пунктирная линия обозначает границу между PHAZ и BM.

## 3.5 Механические свойства FSpJ соединений

### 3.5.1 Локальные механические свойства

Местные механические свойства в FSpJ делятся на свойства металла и композитных свойств. Микротвердость была использована для оценки локальных механических свойств соединяемых деталей. Аналогично микроструктурному анализу. Соединение AA2024/CF-PPS выбран здесь для описания локальных механических свойств металлического сплава. В случае локальных механических свойств композитного материала соединение между Mg AZ31 и выбирается PPS композит, армированный коротким стекловолокном.

#### 3.5.1.1 Металл (AA2024)

Рис. 3.16 отображает карту микротвердости алюминиевой части. Из-за микроструктурной симметрии вокруг центра пятна в FSpJ, для создания карты микротвердости потребовалась только половина материала.

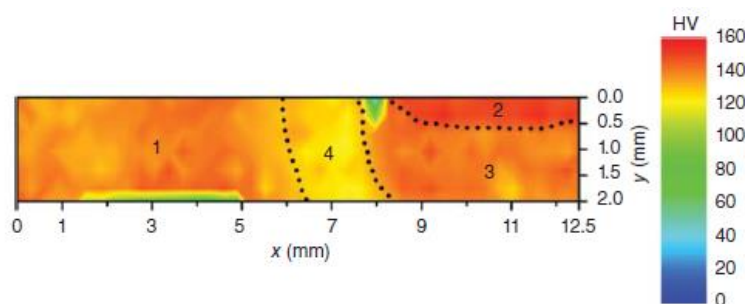


**Рис. 3.16** Карта микротвердости AA2024 от края образца ( $x = 0$  мм) к середине пятна ( $x = 12.5$  мм) в соединениях AA2024/CF-ПФС. (Источник: Гушегир 2016 [28]. Воспроизведено с разрешения Springer.)

На оси  $x$ , 0 мм соответствует краю образца, тогда как 12.5 мм точный центр пятна. На оси  $y$ , 0 мм показывает верхнюю поверхность алюминия, приближается к линии раздела с CF-ПФС при 2 мм.

Из карты микротвердости, представленной на Рис. 3.16, можно понаблюдать за четырьмя различными зонами, пронумерованными на рисунке. BM (область 1) со средней твердостью 135 HV начинается от края образца. BM заканчивается на расстоянии примерно 6 мм от края соединения. Неоднородное распределение карты микротвердости в этой области можно объяснить распределением упрочняющих частиц. Для точек соприкосновения или приближения индентора к частицам получено более высокое значение твердости.

MSZ (Зона 2) с более высокой твердостью по сравнению с BM очевидно, как верхняя часть алюминиевой части внутри области пятна, со средней твердостью 151 HV. Высокая твердость MSZ связана с очень мелкими DRX частицами, а также с переосаждением упрочняющих частиц, как объяснено в предыдущем разделе.

Площадь под MSZ, приближенная к линии раздела, представляет собой смесь MTMAZ (Зона 3) и MHAZ со средним значением 139 HV. Как объяснялось ранее, есть три конкурирующих механизма, происходящих в MTMAZ. Из результатов по микротвердости видно, что деформационное упрочнение оказывает большее влияние, чем динамическое восстановление или остаточное огрубление, поскольку средняя твердость выше, чем у BM. В заключение, MHAZ (Зона 4) с гораздо меньшей твердостью 123 HV виден между BM и начало области пятна. Восстановление и огрубление упрочняющих частиц являются основными механизмами, ведущими к снижению твердости в MHAZ.

Стоит отметить, что области на рис. с очень низкой твердостью в верхней части алюминиевой поверхности и вблизи границы раздела являются следствием очень близких отступов для заливочной смолы и полимера PPS, соответственно.

### **3.5.1.2 Композит (полифениленсульфид наполненный коротким стекловолокном PPS)**

Чтобы объяснить изменения локальных механических свойств полимерной или композитной детали в процессе выполнения FSpJ соединения, по всей толщине композита (короткое армированное стекловолокном PPS) были равномерно распределены три линии [36]. Как видно на рис. 3.17(a), верхняя горизонтальная линия вблизи раздела с металлом «вторгается» в область PHAZ в центре пятна. Это является причиной резкого снижения твердости композита (5-10 HV), по сравнению с областями, расположенными поодаль от центра пятна ближе к краю соединения (~20HV), как показано на Рис. 3.17(b). Как пояснено в предыдущем разделе, PHAZ может содержать дефекты, такие как поры и пустоты. Несмотря на то, что сообщений не имеется, термическая деградация, снижение молекулярной массы и переориентация цепей также могут происходить в PHAZ, что зависит от типа используемого полимера или композита [36]. Поскольку PPS является высокопроизводительным техническим термопластиком хорошей термостабильности, то при оптимизации процесса FSpJ не ожидается значительного теплового разложения [48]. Вторая и третья линии расположенные дальше от PHAZ (Рис. 3.17(a)) показать более постоянный и стабильный профиль твердости со средним значением PPS BM (~20HV). Были обнаружены незначительные колебания в профиле жесткости всех линий (Рис. 3.17(b)), который считается результатом наличия коротких волокон. В некоторых областях, отступ в непосредственной близости от стекловолокна был неизбежен, что привело к более высоким значениям твердости.

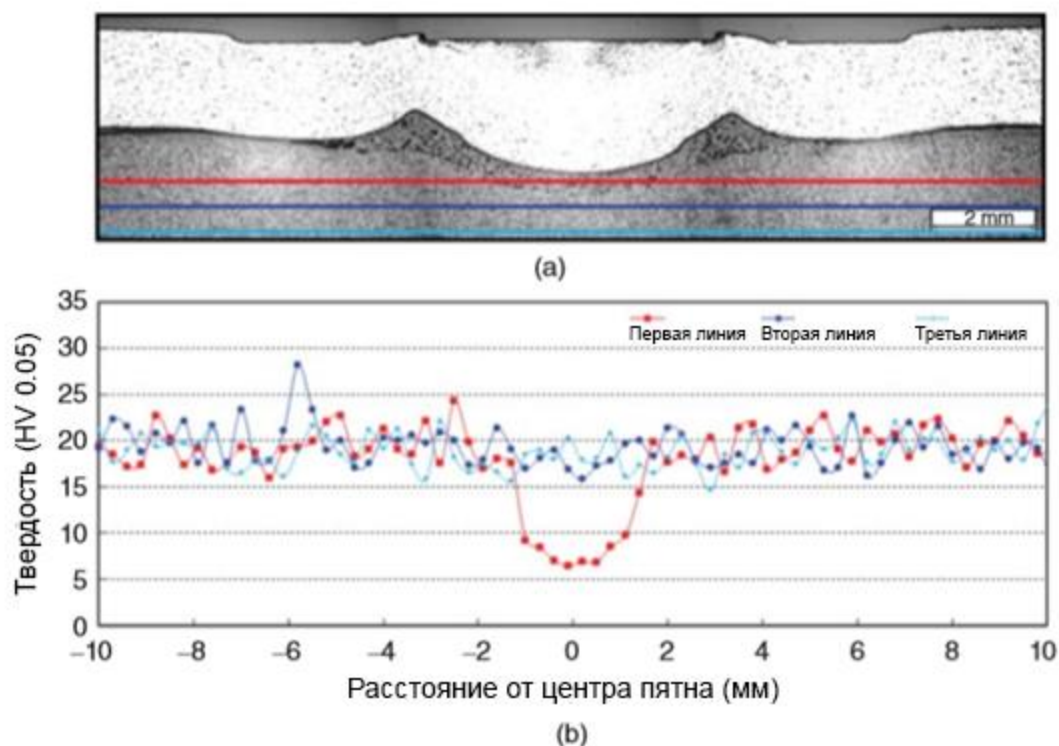


**Рис. 3.17** (а) Микроструктура соединения Mg AZ31/GF-PPS: три линии микротвердости композита и (б) изменение твердости композита, армированного коротким стекловолокном PPS вдоль линий (а).

Сочетание микроструктурного анализа и локальных механических свойств позволяет предположить, что полимерная или композитная деталь в FSpJ содержит одну пораженную зону, PNAZ, в области вокруг точечного соединения и вблизи границы с металлом.

### 3.5.2 Квазистатические общие механические свойства

#### 3.5.2.1 Влияние предварительной обработки поверхности

Как объяснялось ранее, механические силы сцепления и адгезии являются основными связующими механизмами, обнаруженными в FSpJ. Таким образом, любое изменение на поверхности металлической детали, приводящее к изменениям морфологии и химического состава поверхности, будет влиять на механизмы связывания и, следовательно, на прочность FSp соединений.

Различные обработки поверхности металла были исследованы, чтобы понять их влияние на прочность FSp соединений. В ранней работе [51], было показано, что простое ручное механическое шлифование (MG) на Mg AZ31 образцы увеличили прочность на растяжение соединения AZ31/CF-PPS в сравнении с условием получения (AR) примерно на 50% от 1500 до 2200 N. Кроме того, кислотное травление (AP) привело к увеличению примерно 20% от 1500 до 1800 N. В другой работе, Эстевес и соавт. [35, 52] продемонстрировал, что сила растяжения соединения с односторонним наложением AA6181-T4/CF-PPS (SLS) увеличивается, когда AP, MG, и комбинация обеих предварительных обработок применена к алюминиевому образцу. Увеличение до 160% по сравнению с состоянием AR (от  $708 \pm 55$  N до  $1861 \pm 203$  N) было достигнуто, когда была выбрана комбинация AP и MG.

В этих работах было описано, что механические предварительные обработки, такие как MG, увеличивают шероховатость поверхности металлической детали, создавая хорошо распределенные поверхностные трещины и поры. Такие трещины увеличивают микромеханическое сцепление между металлической частью и полимерным



расплавленным слоем на границе раздела, увеличивая прочность соединений на растяжение. Поскольку микромеханическая блокировка является одним из основных механизмов сцепления в FSpJ, любой тип предварительной обработки поверхности, увеличивающий шероховатость поверхности металла, приведет к увеличению прочности соединений на растяжение в поперечном направлении. Кроме того, AP может также генерировать очень тонкую пористую структуру на поверхности металла; однако поры не так выражены, как поры, порожденные MG. Кроме того, AP увеличивает поверхностное натяжение металлической детали, удаляя поверхностные загрязнения, что приводит к большим силам сцепления между прилегающими поверхностями на границе раздела.

Влияние различных предварительных обработок на механические характеристики FSpJ AA2024-T3/CF-PPS были недавно исследованы [30,48]. Предварительная обработка поверхности варьировалась от механической до химической и электрохимической предварительной обработки, а также от комбинаций механической и химической предварительной обработки.

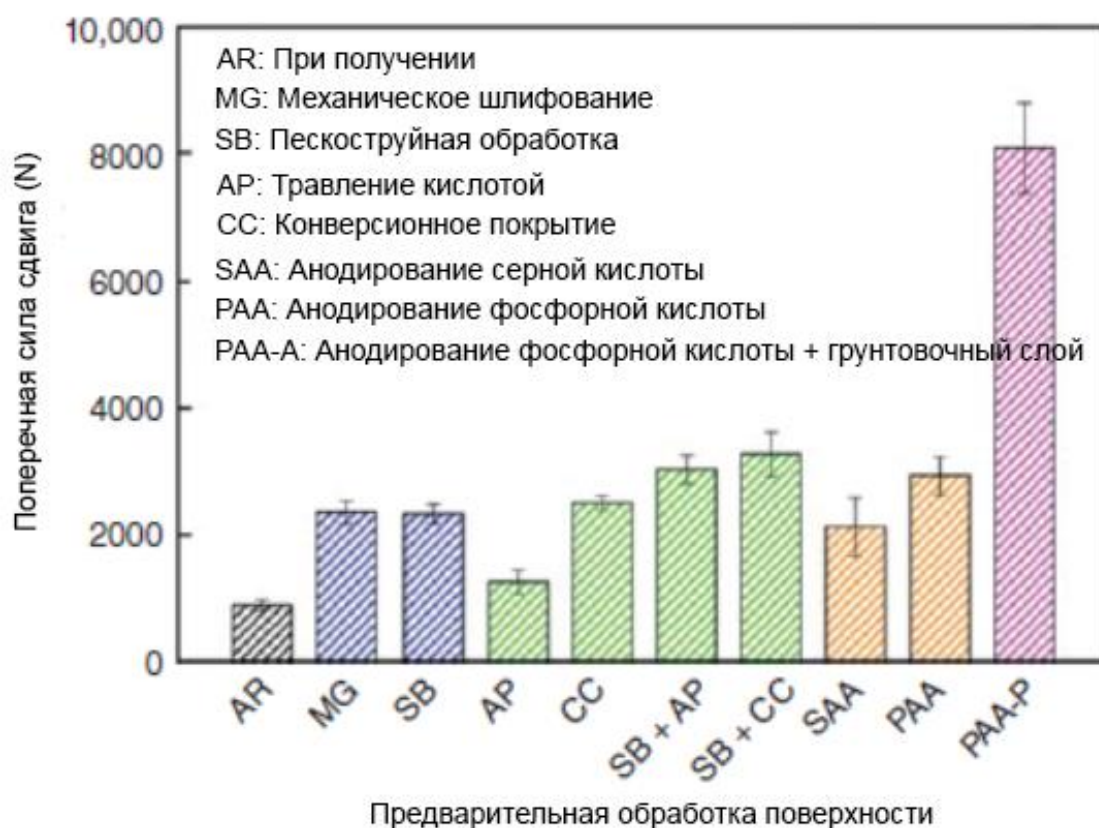


**Рис. 3.18** Механическая прочность на растяжение с односторонним наложением соединения AA2024/CF-PPS FSp после предварительной обработки алюминиевой поверхности. (Источник: Goushegir 2016 [28]. Воспроизведено с разрешением Springer.)

Предварительная обработка всей алюминиевой поверхности в некоторой степени увеличила прочность соединений с односторонним наложением по сравнению с условием AP, как показано на Рис. 3.18.

Как коротко пояснялось ранее, механическая предварительная обработка поверхности, а также некоторые электрохимические предварительные обработки, такие как анодирование фосфорной кислоты (PAA), увеличивают шероховатость поверхности алюминия и, следовательно, прочность на растяжение FSp соединения. Мы недавно показали, [23] что специфическая предварительная обработка поверхности, такая как конверсионное покрытие (CC), привела к образованию прочных химических связей между предварительно обработанным алюминием и расплавленным слоем полимера на границе раздела. Осаждение новых элементов на поверхности AA2024 после определения CC с

помощью Рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS). Новые элементы, такие как цирконий, были способны прочно склеиваться с углеродом из расплавленного слоя полимера, увеличивая прочность соединений. Была достигнута приблизительная наивысшая прочность соединения наложением  $8 \pm 0.7$  kN, когда РАА предварительная обработка сопровождалась нанесением грунтовочного слоя (РАА-Р) [48]. Это объясняется тем фактом, что грунтовка представляла собой эпоксидный слой на основе углерода, приводящий к очень прочным первичным связям углерод-углерод с расплавленным слоем полимера во время цикла соединения [48].

### 3.5.2.2 Влияние геометрических размеров соединения

Геометрия соединения с односторонним наложением является наиболее используемой конфигурацией из-за ее простоты и эффективности [53]. Тем не менее, хорошо известно [54], что геометрия соединения с односторонним наложением является худшим сценарием проектирования с точки зрения передачи нагрузки и механических характеристик, когда соединение подвергалось сдвиговым нагрузкам. Это связано с наличием эксцентриситета нагрузки, вызывающего неплоскостные, отслаивающие напряжения на краях стыковочного шва. Такие напряжения отслаивания обычно больше деформационного напряжения в плоскости, что приводит к преждевременному разрушению и снижению механических характеристик.

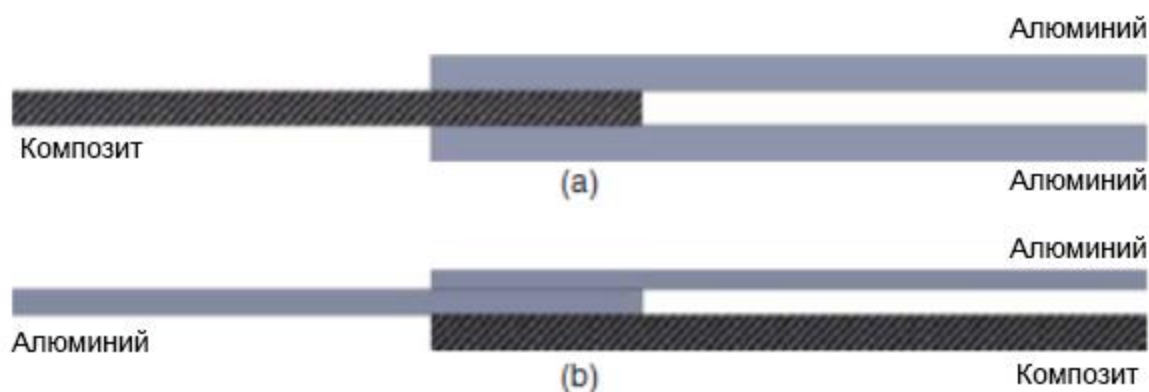


**Рис. 3.19** Конфигурация соединения с двухсторонним наложением, (а) последовательность (АСА) и (б) последовательность алюминий- алюминий-композит (ААС)

Другой геометрией соединения с лучшими механическими характеристиками является конфигурация соединения с двойным наложением, так как эксцентриситет нагрузки и напряжения отслаивания в значительной степени снижаются [53, 54].

Подобно другим методам соединения, геометрия соединения влияет на механические характеристики  $F_{Sp}$  соединений. Были исследованы два соединения с двухсторонним наложением. В первой конфигурации композитный образец был помещен между двумя алюминиевыми частями, то есть последовательность алюминий-композит-алюминий (АСА), как показано на рис. 3.19 (а), тогда как вторая конфигурация была в последовательности алюминий-композит. алюминиевый композит (ААС), как видно на рис. 3.19(б).

Механическое поведение образцов с двухсторонним наложением с конфигураций АСА было очень похоже на поведение образцов с односторонним наложением, как показано на рис. 3.20 (а). Оба образца показали квазилинейную упругую область до окончательного катастрофического отказа. Это связано с тем, что поведение соединения определяется каждым отдельным соединением алюминий/композит. На последнем этапе обе алюминиевые детали были отделены от композита одновременно. Предельная сила растяжения внахлест (ULSF) для образцов соединений с двухсторонним наложением составляла от 50% до более 100%, чем у образцов соединений с односторонним наложением, в зависимости от предварительной обработки поверхности алюминия.



В отличие от конфигурации АСА, когда детали соединяются в соответствии с последовательностью ААС, поведение образца соединений с двухсторонним наложением сильно отличается по сравнению с соединением с односторонним наложением. Как видно из кривой сила-смещение, показанной на рис. 3.21 (а), образец соединений с двухсторонним наложением ААС сначала продемонстрировал квазилинейное упругое поведение аналогичное геометрии соединения с односторонним наложением, до разрушения соединения алюминий/композит (Точка 2). Этот отказ соответствует хрупкому, катастрофическому типу перелома.

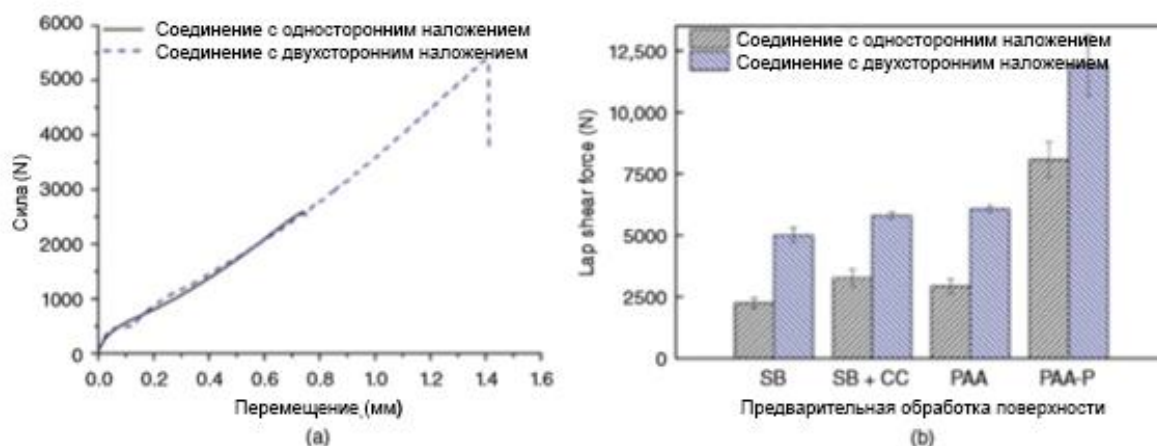
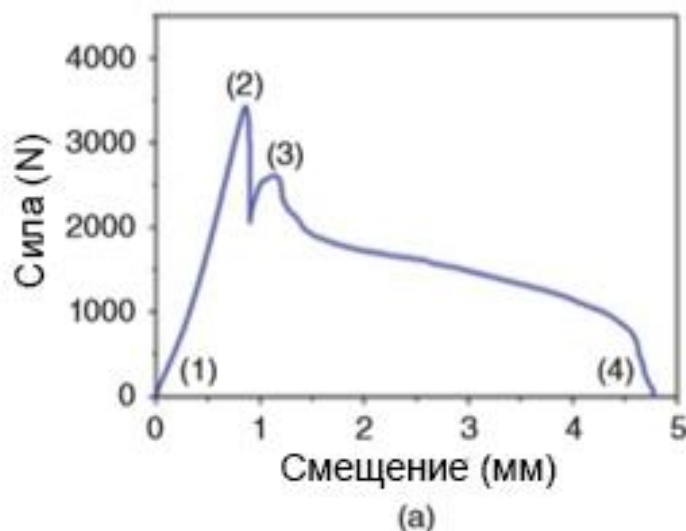


**Рис. 3.20** (а) Сравнение кривых сил-смещений при смещении с односторонним наложением и при смещении с двухсторонним наложением соединения AA2024/CF-PPS и (b) механическая сила



на растяжение соединения с односторонним наложением после предварительной обработки алюминиевой поверхности.

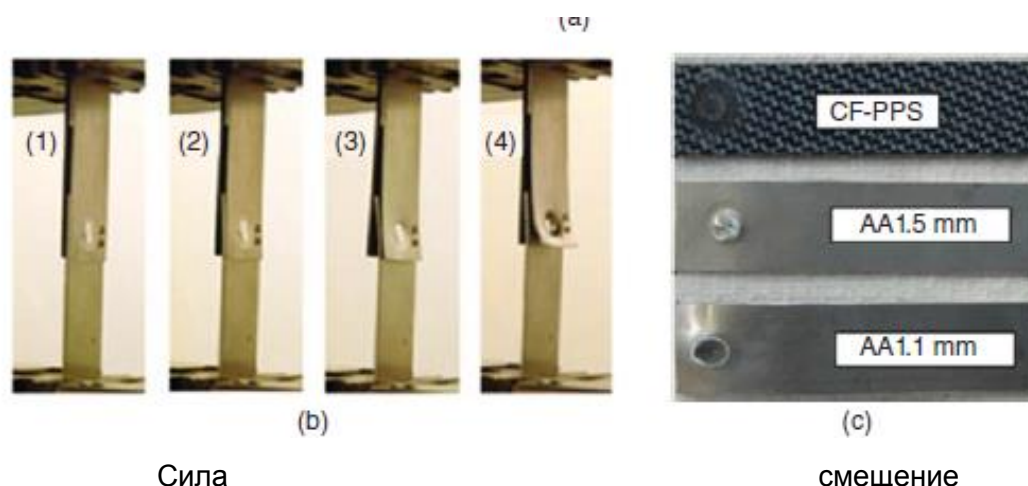


Рис. 3.21 (а) Кривая силы смещения AA6181/CF-PPS соединения с двухсторонним наложением согласно конфигурации AAC, (b) последовательность разрушения соединения при испытаниях на квазистатическую деформацию, и (c) поверхность разрушения алюминиевых листов и композита поврежденного образца.

На этом этапе сила внезапно уменьшается из-за потери соединения алюминий/композит. При дальнейшей нагрузке соединение показало нелинейное пластическое поведение; алюминиево-алюминиевая точечная сварка определяет поведение соединения. Сила немного увеличивается (до Точки 3), пока кольцевые и кольцевые трещины не начали распространяться в точечную сварку. Наконец, точечный сварной шов алюминий/алюминий был поврежден по типу трещины с удалением заглушки (точка 4), где заглушка оставалась прикрепленной к средней алюминиевой пластине. Сообщалось, что тип разрушения заглушки привел к пластичному разрушению в точечных сварных швах алюминия [32], что также можно наблюдать здесь. На рис. 3.21 (b) показана последовательность разрушения соединения при деформационной нагрузке, в то время как на рис. 3.21 (c) показаны окончательные трещины листов. Разрыв вылезания вилки может наблюдаться между двумя алюминиевыми деталями, где MSZ удален из верхнего алюминия и оставался прикрепленным к среднему алюминиевому листу.

Кроме того, чтобы понять поведение соединений при растягивающей нагрузке в режиме I (что может быть важно для определенных инженерных применений), геометрия поперечного растяжения (СТ) была выбрана, как показано на Рис. 3.22.

**Рис. 3.23** показывает прочность СТ (достигнута окончательная прочность СТ) FSp соединения AA2024/CF-PPS для выбранных предварительных обработок.

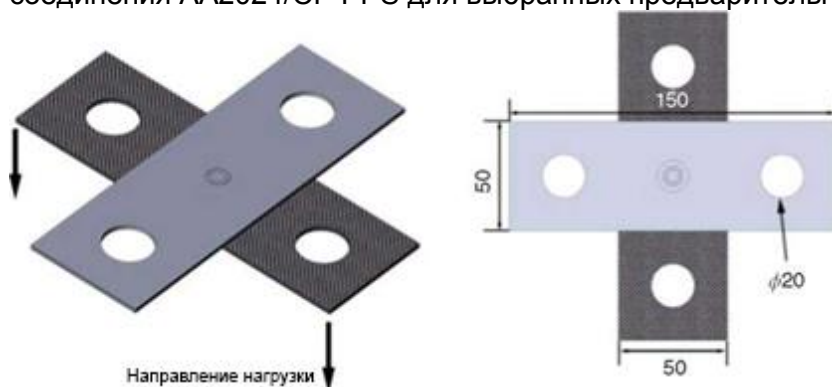


Рис. 3.22 (а) Схематическое изображение геометрии соединения СТ и (b) вид сверху разработки соединения с используемыми относительными размерами. Все размеры даны в миллиметрах.

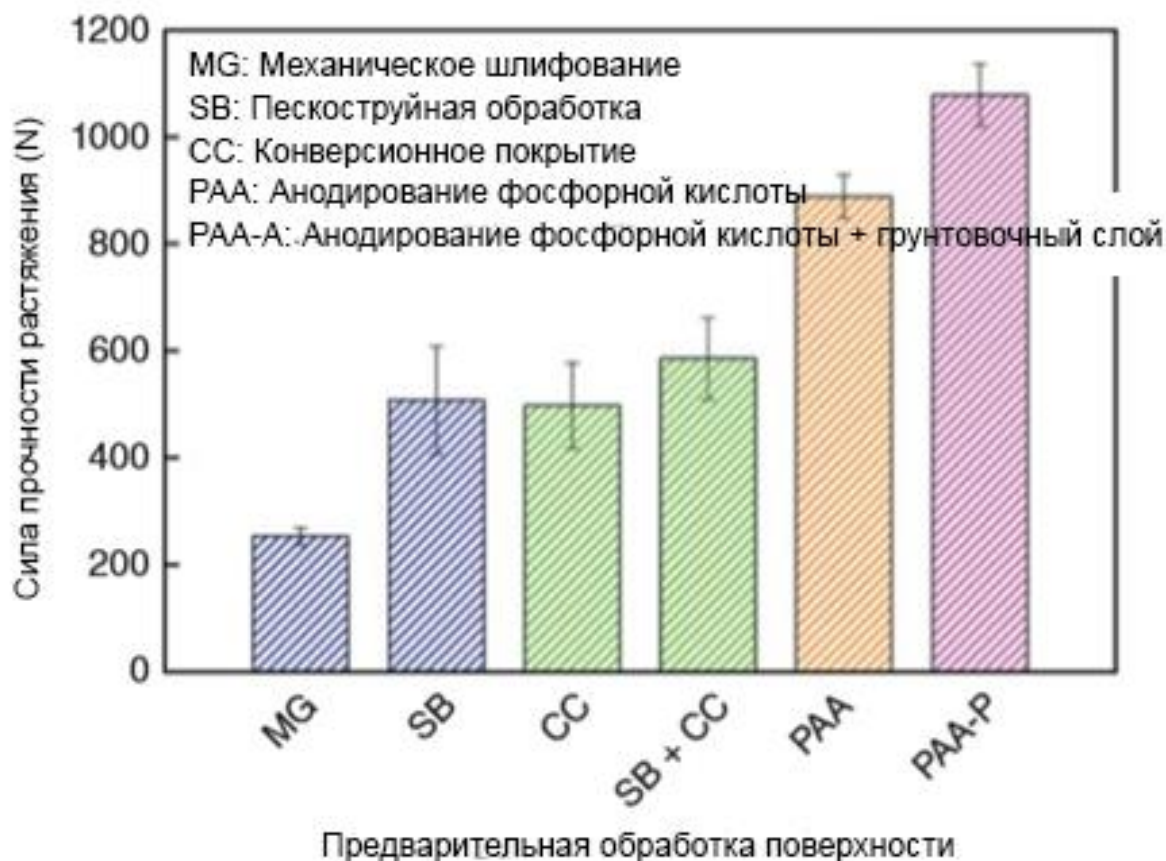


**Рис. 3.23** Поперечная прочность соединения AA2024/CF-PPS FSp после предварительной обработки выбранной алюминиевой поверхности.

Можно заметить, что прочность соединения при растягивающей нагрузке намного ниже, чем для нагрузки при сдвиговом напряжении (см. Рис. 3.18). Подобно результатам SLS, обсуждавшимся ранее, PAA-P достиг самой высокой прочности СТ ( $1078 \pm 58$  Н) среди протестированных предварительных обработок поверхности благодаря сильным первичным связям между слоем грунтовки и слоем расплавленного полимера.

В итоге: мощность СТ FSp соединения составляла приблизительно 10-30% от соответствующей мощности SLS для различных предварительных обработок поверхности [48]. Тестирование СТ не часто использовалось в литературе для оценки механических характеристик металл-полимерных соединений. Из скудных результатов в литературе, например, Seidlitz et al. [55] недавно сообщалось о мощности СТ стальных/GFRP клепаных соединений, а в их работе сообщалось о мощности СТ между примерно 500 и 1200 Н. Следовательно, сообщаемая СТ мощность FSp соединений дает сопоставимые результаты с данными, сообщенными в [55].

### 3.5.3 Циклические общие механические свойства

В этом разделе кратко описываются усталостные характеристики соединений SLS AA2024-T3/CF-PPS FSp на основе расчета вероятного срока службы кривой S-N, при постоянной амплитудной нагрузке. Использовались коэффициент нагрузки  $R=0.1$  (обычный в авиастроении) и частота 5 Hz. Для проведения усталостных экспериментов были выбраны четыре предварительные обработки поверхности алюминия; это были пескоструйные (SB), пескоструйная обработка с последующим конверсионным покрытием (SB + CC), PAA, и PAA с последующим нанесением грунтовки (PAA-P). Экспоненциальная модель (также

известен как Lin-Log) был выбран для сравнения усталостного поведения предварительно обработанных образцов.

Это сравнение показано на Рис. 3.24. Можно наблюдать, что образцы PAA-P показали гораздо лучшие показатели усталости по сравнению с остальной частью предварительной обработки. Это ожидалось, потому что квазистатическая прочность соединений PAA-P была выше, как показано на Рис. 3.18. Остальные три обработки поверхности показали аналогичные усталостные характеристики, но образцы SB+CC выполнили немного лучше, чем образцы PAA и SB.

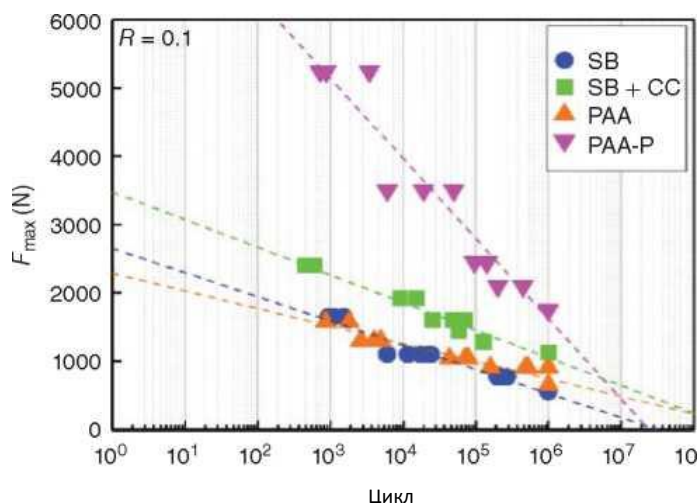


**Рис. 3.24** Сравнение кривых S-N различных образцов предварительной обработки поверхности на основе экспоненциальной модели (AA2024/CF-PPS). (Источник: Goushegir 2016 [28]. Воспроизведено с разрешения Springer.)

Это также соответствует их квазистатической прочности, где SB + CC показал более высокую прочность, чем образцы PAA и SB. Можно также заметить, что усталостные характеристики предварительно обработанных образцов в режиме низкой циклической усталости (НЦУ) (103 цикла) были очень похожи на их квазистатическую прочность, будучи намного выше для PAA-P. В отличие от этого, при высокой усталости цикла (ВЦУ) (106 циклов), усталостные характеристики образцов PAA-P имели тенденцию приближаться к другим поверхностным обработкам, хотя он остается лучше, чем у других образцов, как показано на рис. 3.24.

Известно, что геометрия SLS имеет очень низкое сопротивление к нагрузкам при сдвиговом напряжении за счет влияния вторичного изгиба [56, 57]. Также сообщается, что во время усталостных испытаний напряжения отслаивания генерируются на краях суставов во время каждого цикла [56, 57]. Поскольку приложенные усталостные нагрузки были выше для образцов PAA-P, считается, что в этих соединениях создавались более высокие напряжения отслаивания, особенно в режиме HCF. Такие напряжения отслаивания снижают усталостные характеристики соединений SLS. Кроме того, исходя из принципов адгезионного связывания хорошо известно, что сдвиговое напряжение максимально (пиковое сдвиговое напряжение) по краям соединения. Как правило, более высокие приложенные внешние нагрузки и модуль смещения адгезива увеличивают пиковое сдвиговое напряжение по краям [58-60]. Можно сделать аналогичные выводы из-за сходства между фрикционным и клеевым соединением. Поскольку образцы PAA-P приводили к гораздо более прочным соединениям по сравнению с другими видами предварительной обработки поверхности, и приложенные усталостные нагрузки также были выше, можно ожидать увеличения сдвигового напряжения по краям соединения. Увеличение напряжения отслаивания и пиковое сдвиговое напряжение в образцах PAA-P обуславливают собой более крутой угол наклона по кривой S-N.

Усталостные нагрузки, при которых образцы выдержали 1 миллион циклов, соответствуют 25% начальной прочности на растяжение при соединении наложением для образцов SB, PAA и PAA-P и 35% для образцов SB+CC.

### 3.6 Сравнение квазистатических механических характеристик FSp и склеенных соединений современного технического уровня

Было проведено сравнение с современным клеевым соединением для оценки механических характеристик FSpJ. Адгезионное связывание было выбрано потому, что это одна из доступных в настоящее время в промышленности технологий соединения гибридных конструкций. Более того, FSpJ имеет сходство в механизмах связывания и разрушения с адгезионным связыванием, что делает такое сравнение актуальным.

Для прямого сравнения использовались AA2024 и CF-PPS. Кроме того, PAA-P был выбран в качестве предварительной обработки поверхности алюминия из-за его актуальности в аэрокосмической промышленности. Образцы были склеены в соответствии со стандартами авиационной промышленности с использованием конструкционного клея. Для получения дополнительной информации о выбранных параметрах и пробоподготовке обращайтесь на [28,48].

**Таблица 3.2** Сравнение механических характеристик FSpJ и склеенных соединений.

| Процесс соединения    | ULSF(H)     | Перемещение (мм) |
|-----------------------|-------------|------------------|
| FSpJ                  | 8264±645    | 1.7 ± 0.1        |
| Адгезивное связывание | 5459 ± 2036 | 0.9 ± 0.3        |

Обе FSp и клеевые соединения были испытаны при нагрузке соединения наложением для оценки их квазистатических механических характеристик. В таблице 3.2 приведены средние значения ULSF и среднее смещение при полученной пиковой нагрузке.

Можно заметить, что FSp соединения показали примерно на 50% выше ULSF и увеличение смещения на 88% по сравнению с современными склеенными соединениями. В дополнение к лучшим механическим характеристикам, у FSpJ есть два преимущества над клеевым соединением. Во-первых, JT для FSpJ намного быстрее (4 с в упомянутой работе) по сравнению с несколькими минутами и часами для клеевого соединения. Кроме того, FSp соединение легче, чем связанные образцы (в данном случае ~ 3,5%), поскольку для соединения деталей с дополнительными материалами, такими как адгезив, не требуется фрикционное соединение [28,48].

Упомянутые преимущества показывают потенциал процесса FSpJ для дальнейших исследований и будущих применений в промышленности для объединения металлокомпозитных гибридных структур.

### 3.7 Несовершенства FSpJ соединений

В методах соединений, основанных на сварке, где используются высокие температуры и плавление термопластичной матрицы [16], дефекты могут быть введены в область соединения. В FSpJ могут быть обнаружены два основных типа дефектов [24,29, 34,52, 61].

Первый тип дефектов связан с явлением деконсолидации, которое также сообщается в литературе как основной дефект, возникающий при сварке термопластов. В FSpJ могут происходить два типа деконсолидации: во-первых, образование пустот и пористости в консолидированном расплавленном слое, особенно вблизи поверхности раздела с металлом (рис. 3.25 (а)); и, во-вторых, расслоение волоконной матрицы (рис. 3.25 (б)). Предполагается, что пустоты образуются в результате захвата воздуха в расплавленном полимере во время уплотнения. Поскольку температура во время цикла соединения является относительно высокой, вязкость расплавленного полимера



уменьшается, и воздух может попасть в расплавленный слой. Во время фазы уплотнения, когда CR очень быстрая, этот захваченный воздух не может выйти из расплавленного слоя, и это оставляет пустоты воздушных карманов после уплотнения. Чтобы уменьшить количество пустот деконсолидации, необходимо приложить достаточное давление во время процесса соединения [62]; в противном случае может произойти слияние и рост объемных пустот.

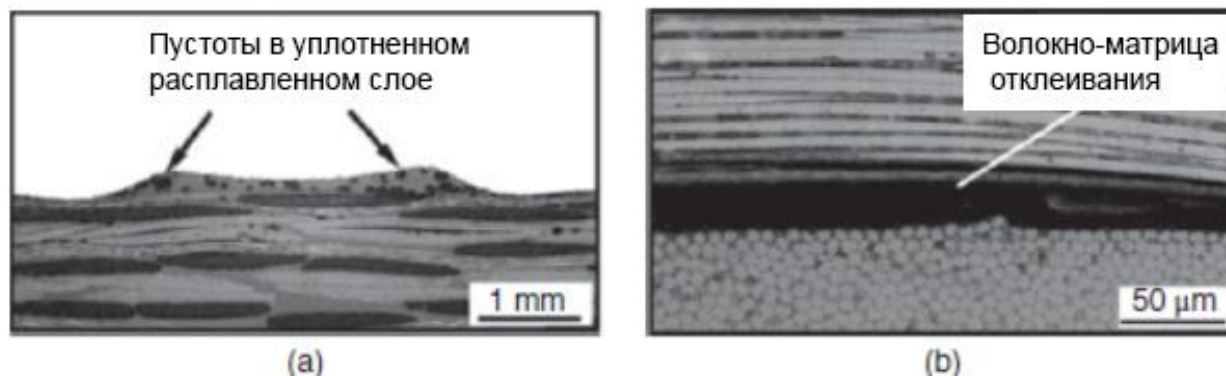


**Рис. 3.25** Дефекты деконсолидации в композите с FSpJ, отображающий (a) пустоты в уплотненном расплавленном слое и (b) волокнисто-матричное отклеивание; (Ex.: AA2024/CF-PPS). (Источник: Goushegir 2016 [28]. Воспроизводится с разрешения Springer.)

Помимо захвата воздуха примерами других явлений, которые могут вызывать объемные дефекты в соединении, являются термическая деградация полимера и выделение структурной или поглощенной воды [63]. Образование пустот в результате термического разложения и разложения особенно отмечается при лазерном соединении термопластов и металл-полимерных систем [64-68] в результате очень высокой концентрации температуры. Второй тип дефекта деконсолидации, отслоение волоконной матрицы, происходит потому, что коэффициент теплового расширения и усадочные свойства волокон и термопластичной матрицы огромны. Кроме того, сжатие потока расплавленного полимера с низкой вязкостью приводит к смещению массы из центральной области точечного соединения, что может способствовать образованию пустот, а также явлению отслоения. Другой причиной дефектов деконсолидации может быть термопластическая деградация. Поскольку температура процесса высокая, часть термопластичной матрицы может подвергаться термическому разложению. Тем не менее, тепловое разложение вряд ли произойдет из-за очень короткого цикла соединения.

В дополнение к вышеупомянутым причинам, которые приводят к образованию дефектов деконсолидации, существуют и другие явления, которые следует учитывать. При производстве армированных волокном композитных ламинатов для обработки ламината и упаковки волоконных пучков используется относительно высокое давление уплотнения. Такое давление генерирует упругую энергию в пучках волокон [69]. Во время процесса соединения, когда вязкость полимерной матрицы уменьшается, запасенная упругая энергия высвобождается, что потенциально вызывает деконсолидацию и образование неоднородных термических напряжений является важным явлением, которое приводит к образованию дефектов, особенно в полукристаллических термопластичных композитах [49]. CR оказывает противоположное влияние на генерацию остаточных термических напряжений в кристаллической и аморфной фазах [70]. Это приводит к различным способам усадки двух фаз, что, в свою очередь, может способствовать возникновению дефектов пустот. Кроме того,

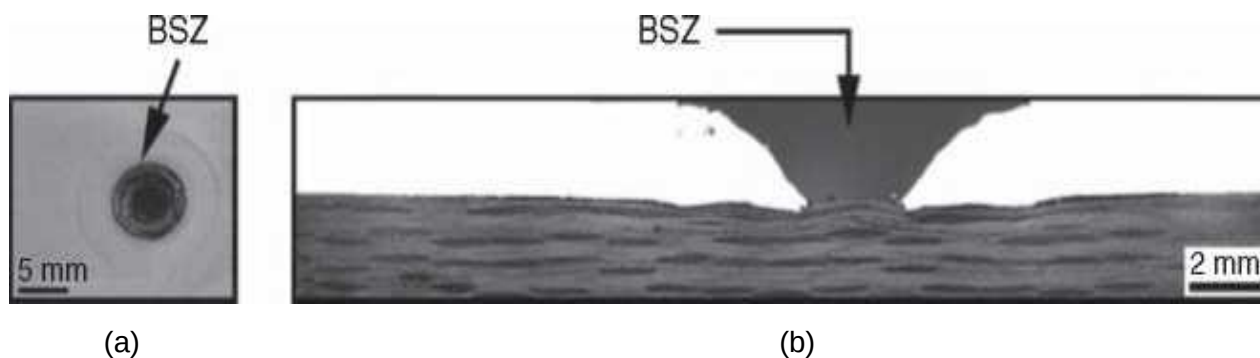


Рис. 3.26 Изображение вскрытой зоны перемешивания (BSZ), которая происходит в металлической части; (a) вид металлической части сверху и (b) поперечное сечение соединения в (a) в центре пятна; (Ex.: AA2024/CF-PPS).

Второй тип дефекта, о котором мы сообщали для FSpJ [29, 34, 61], известен как нарушенная зона перемешивания (BSZ). Часть металла под инструментом в центре точечного соединения разрывается и отрывается. Разбитый металл остается прикрепленным к втянутому штифту и удаляется из области соединения, как показано на рис. 3.26. Поскольку сломанная часть удаляется из зоны перемешивания в металле, этот дефект называется BSZ.

Причины возникновения BSZ объясняются [34, 61] из-за чрезмерной формруемости металла и инструмента PD, как это видно на рис. 3.27. Чрезмерный подвод тепла увеличивает локальную формемость металла под гильзой и штифтом. Кроме того, локальная прочность металла снижается из-за высокой температуры вокруг инструмента [29, 34]. Известно, что прочность и ударная вязкость металлов (например, алюминия) снижаются при повышении температуры [71, 72]. Когда втулка чрезмерно погружается в металлический кусок, толщина металла под втулкой значительно уменьшается, как показано на рис. 3.27 (a). Такое сочетание высокой температуры и низкой толщины снижает локальную прочность размягченного металла. Кроме того, локальная жесткость композита под инструментом снижается в результате образования расплавленного полимера, и поэтому он не может поддерживать пластифицированный металл, чтобы выдерживать приложенное давление поршня. Следовательно, нагрузка, создаваемая поршневой втулкой, превышает локальную прочность металла, что приводит к возникновению трещин, как показано на рис. 3.27 (b). Считается, что возникновение трещины связано с: (1) снижением локальной прочности металла, (2) уменьшением толщины металла под гильзой, (3) уменьшением локальной жесткости композита и (4) концентрацией напряжений на поверхность раздела металла и расплавленного полимера ниже рукава.

Инициированные трещины начинают распространяться в направлении инструмента на границе раздела между пластифицированным и непластифицированным металлом, когда штифт толкает смещенный размягченный металл вниз к исходной металлической поверхности, как показано на рис. 3.27 (c). В конце концов, кусок металла удаляется и остается прикрепленным к инструменту после втягивания (рис. 3.27 (d)). Композит под BSZ, таким образом, подвергается воздействию условий окружающей среды, которые могут дополнительно ухудшить механические свойства соединения.

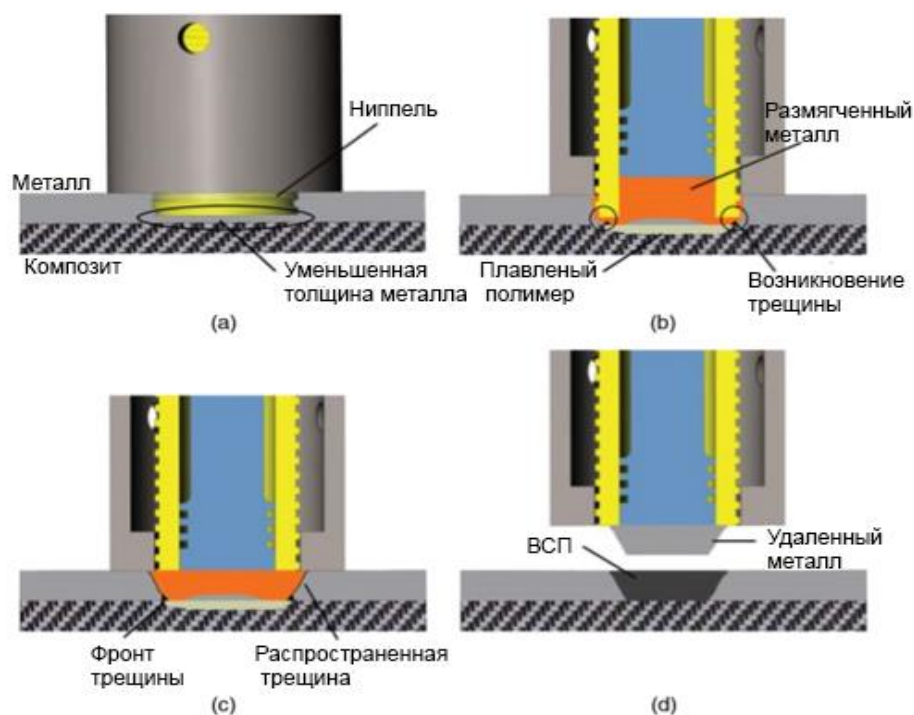


**Рис. 3.27** Механизм образования BSZ; (a) чрезмерное погружение ниппеля, (b) возникновение микротрещин в металле, (c) распространение трещины, и (d) формирование BSZ.

### 3.8 Преимущества, ограничения, и потенциальные применения

Основные преимущества FSpJ перечислены ниже:

а) *Короткие циклы соединения*: JT в FSpJ варьируется от 2 до 8 с в зависимости от металлического сплава и используемого полимера или композита [24], что намного быстрее, чем у современного адгезивного соединения.

б) *Снижение веса*: потому что в FSpJ не требуется обязательное использование дополнительного материала (такого как наполнители или заклепки) никакой дополнительный вес не добавляется в конструкцию для соединяющихся частей.

в) *Отсутствие сверления*: в отличие от традиционных методов механического крепления, нет необходимости предварительно сверлить отверстие с помощью FSpJ. Это особенно важно в случаях непрерывных армированных волокнами композитов, поскольку эти материалы очень подвержены растрескиванию в результате сверления, что ухудшает их локальную механическую прочность, что приводит к преждевременному разрушению соединения.

г) *Экологически чистые*: процесс экологичный, экологически чистый, потому что не происходит выбросов во время или после цикла присоединения [24].

д) *Ремонтопригодность*: поскольку термопласты (как одна из соединительных частей) могут выдерживать переплавку и затвердевание несколько раз, соединения могут ремонтироваться в одном месте (предварительный результат приведен в [48]).

е) *Возможность вторичной переработки*: соединения могут быть переработаны путем разделения соединяющихся частей. Соединение может быть нагрето выше температуры плавления термопласта, чтобы отделить металл от композита.

ж) *Соединение поверх герметика*: в реальных применениях соединения обычно герметизированы от коррозии и воздействия окружающей среды. Если соединение может быть выполнено поверх предварительно нанесенного герметика (например, путем добавления пленочного промежуточного слоя, как мы показали в [61]), время и необходимое усилие для повторного нанесения герметика уменьшаются.



h) *Недорогая техника*: оборудование, необходимое для производственного использования FSpJ, такое же, как и имеющаяся машина FSpW, и никаких дополнительных изменений или адаптации не требуется [24].

Помимо основных преимуществ, которые предлагает FSpJ, существует несколько ограничений процесса:

- a) *Геометрия соединения*: только соединения конфигурации перекрытия могут быть изготовлены с FSpJ [24].
- b) *Разборка*: так как соединяемые части физически и химически связаны, нет возможности разборки и сборки соединений.
- c) *Низкая прочность на скручивание и отслаивание*: аналогично адгезивному соединению, FSp соединения в основном способны выдерживать нагрузку при сдвиговом напряжении, но прочность скручивания и отслаивания соединений относительно низкая.
- d) *Толщина металлического листа*: из-за локальной механической деформации металла (площадь выступа) и возможности образования дефектного соединения (BSZ, как объяснялось ранее), тонкие металлические листы (<1 мм для инженерных алюминиевых сплавов) не могут быть соединены фрикционно с последними данными.

Снижение веса является основной проблемой в транспортных средствах, поэтому растет тенденция использовать преимущества термопластичных композитов и легких металлических сплавов в инженерных конструкциях. По этой причине FSpJ может рассматриваться как потенциальная технология для транспортировки, особенно в аэрокосмической и автомобильной промышленности, для соединения металлокомпозитных гибридных структур.

На рис. 3.28 показан пример потенциального металлокомпозитного гибридного фюзеляжа самолета, в котором детали могут быть соединены с помощью передовых технологий соединения на основе трения. На рис. 3.28 (a) показан внутренний вид предполагаемой перекрывающейся металлокомпозитной структуры, усиленной металлическими и композитными ребрами жесткости. Внешний вид гибридной оболочки можно увидеть на рис. 3.28 (b), где можно использовать FSpJ для соединения двух перекрывающихся частей оболочки.

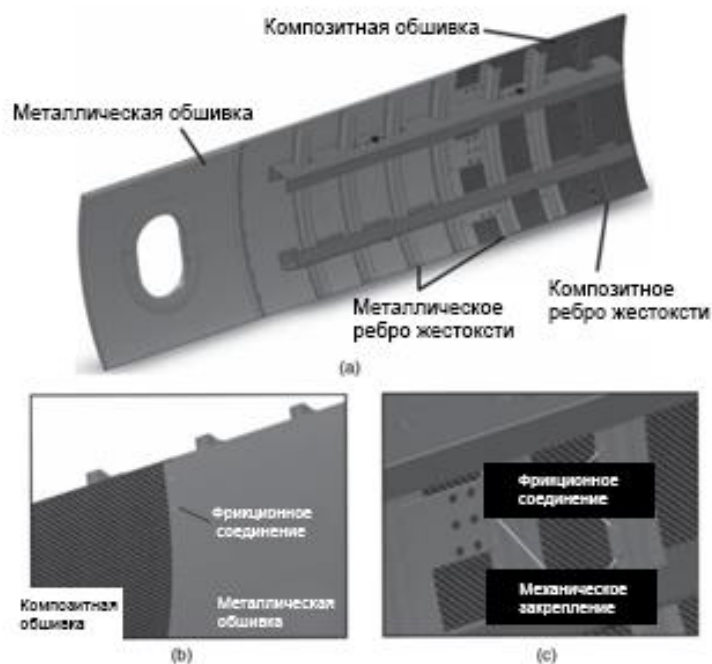


**Рис. 3.28** Схематическое изображение применения потенциального FSpJ; (a) в конструкции самолета, для соединения (b) металлическая обшивка на композитную обшивку и (c) металлическое ребро жесткости для композитной обшивки.

Кроме того, металлические ребра жесткости, которые используются в качестве элементов жесткости для обшивки, являются другими потенциальными областями для использования FSpJ. На рис. 3.29 показан пример подкомпонента из алюминиево-композитного материала для ребра жесткости, изготовленного из FSpJ. Механическое крепление является доминирующим методом при соединении деталей через ребро жесткости [73, 74], что действительно увеличивает вес конструкции при использовании заклепок. Как видно из рисунка 3.28 (с), некоторые из этих крепежных элементов могут быть заменены на FSpJ. Комбинация FSpJ и механического крепления может дать необходимую механическую прочность, приводя к надежной конструкции и в то же время значительно экономя вес всей конструкции. Риск возникновения трещины также может быть уменьшен в результате меньшего количества сверления, необходимого для композита, что дополнительно приводит к более безопасной конструкции и повышает гибкость проектирования самолетов нового поколения.



**Рис. 3.29** Алюминиево-композитный субкомпонент- ребро жесткости изготовлено совместно из FSpJ.

### 3.9 Заключительные примечания

Основной целью этой главы было дать общий обзор различных аспектов процесса FSpJ. Помимо поднятых тем в этой главе, были подробно исследованы другие вопросы, такие как влияние предварительной обработки поверхности металла на поведение FSp соединений, долговечность соединений, усталостные характеристики, а также микромеханизмы разрушения. Поэтому мы хотели бы призвать тех, кто заинтересован в процессе FSpJ, следовать и ссылаться на наши недавно опубликованные рукописи.

### Литература

- 1 Zhang, J. et al. (2012) Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures. J. Mater. Des., 36, 75–80.
- 2 Mallick PK, Joining for lightweight vehicles, in Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles, Mallick PK. 2010, Woodhead Publishing Ltd: Cambridge. 275–308.
- 3 Dursun, T. and Soutis, C. (2014) Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. J. Mater. Des., 56, 862–871.

- 4 Li, Y. and Lu, J. (2014) Lightweight structure design for wind energy by integrating nanostructured materials. *J. Mater. Des.*, 57, 689–696.
- 5 Sedlacek, G. and Trumpf, H. (2007) Innovative developments for bridges using FRP composites, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge.
- 6 Marsh, G. (2014) Composites and mcoavtops – a marriage of convenience? *Reinf. Plast.*, 58, 38–42.
- 7 Peters, S.T. (1998) Handbook of composites, 2nd edn, Chapman & Hall, London.
- 8 Airbus A350 XWB Official webpage, [www.a350xwb.com](http://www.a350xwb.com) (accessed 5 January 2015).
- 9 Boeing Boeing 787 from the Ground Up, [www.boeing.com](http://www.boeing.com) (accessed 5 January 2015).
- 10 Sloan, J. The Making of the BMW i3, <http://www.compositesworld.com> (accessed 3 January 2015).
- 11 Drake, N. (1998) Thermoplastics and Thermoplastic Composites in the Automotive Industry 1997–2000. Rapra Industry Analysis Report Series. Smithers Rapra Publishing.
- 12 2014) Plastics and Polymer Composites Technology Roadmap for Automotive Markets, American Chemistry Council.
- 13 Yancey, R. (2013) Carbon fiber composites: into the automotive mainstream? in High-Performance Composites. Gardner Business Media, Inc., Cincinnati, OH, USA, 7.
- 14 Srivastava, V. and Srivastava, R. (2013) Advances in automotive polymer applications and recycling. *Int. J. Innov. Res. Sci., Eng. Technol.*, 2 (3), 744–746.
- 15 Mercedes-Benz Forschungsfahrzeug F 125!, [www.daimler.com](http://www.daimler.com) (accessed 25 January 2015).
- 16 Amancio-Filho, S.T. and dos Santos, J.F. (2009) Joining of polymers and polymer–mcoavtop hybrid structures: recent developments and trends. *J. Polym. Eng. Sci.*, 49 (8), 1461–1476.
- 17 Kinloch, A.J. and Kodokian, G.K.A. (1989) The adhesive bonding of thermoplastic composites, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.
- 18 Amancio-Filho, S.T. and dos Santos, J.F. (2012) Method for joining mcoavtop and plastic workpieces. European Patent No. EP2329905B1.
- 19 Schiling, C. and dos Santos, J.F. (2005) Method and device for linking at least two adjoining work pieces by friction welding. International Patent Publication WO/2001/036144.
- 20 Oliveira, P.H.F. et al. (2010) Preliminary study on the feasibility of friction spot welding in PMMA. *Mater. Lett.*, 64, 2098–2101.
- 21 Gonзалves, J. et al. (2016) Improvement of friction spot welding (FSpW) to join polyamide 6 and polyamide 66/carbon fibre laminate. *Weld. Int.*, 30, 247–254.
- 22 Junior, W.S. et al. (2014) Friction spot welding of PMMA with PMMA/silica and PMMA/silica-g-PMMA nanocomposites functionalized via ATRP. *J. Polym.*, 55, 5146–5159.
- 23 Goushegir, S.M. et al. (2015) XPS analysis of the interface between AA2024-T3/CF-PPS friction spot joints. *Surf. Interface Anal.*, 48, 706–711. doi: 10.1002/sia.5816
- 24 Amancio-Filho, S.T. et al. (2011) On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber-reinforced polymer composite hybrid structures. *J Mater Sci Eng.*, 528, 3841–3848.
- 25 ColdWater, Machine Company (2016) Friction Stir Spot Welding, <http://www.coldwatermachine.com/files/page/CMC%20SpotMeld.pdf> (accessed 19 December 2016).
- 26 Harms und Wende GmbH (2016), Reibpunktschweißen, [http://www.harmswende.de/fileadmin/hwh/HWH\\_brochures/30960-00-000-de\\_RPS100\\_Prosekt.pdf](http://www.harmswende.de/fileadmin/hwh/HWH_brochures/30960-00-000-de_RPS100_Prosekt.pdf) (accessed 16 December 2016).
- 27 Okada, H. Refill Friction Spot Joining, Kawasaki Heavy Industries, Ltd., Japan. <https://ewi.org/eto/wp-content/uploads/2014/10/04-Okada-Joining-Aerospace-Materials-KHI-OKADA.pdf>, (accessed 19 December 2016).
- 28 Goushegir, S.M. (2016) Friction spot joining (FSpJ) of aluminum-CFRP hybrid structures. *J. Weld. World*, 60, 1073–1093.
- 29 Goushegir, S.M., dos Santos, J.F., and Amancio-Filho, S.T. (2015) Influence of process parameters on mechanical performance and bonding area of AA2024/carbon-fiber-reinforced poly(phenylene sulfide) friction spot single lap joints. *J. Mater. Des.*, 83, 431–442.
- 30 Goushegir, S.M., dos Santos, J.F., and Amancio-Filho, S.T. (2014) Friction spot joining of aluminum AA2024/carbon-fiber reinforced poly(phenylene sulfide) composite single lap joints: microstructure and mechanical performance. *J. Mater. Des.*, 54, 196–206.
- 31 Goushegir, S.M., dos Santos, J.F., and Amancio-Filho, S.T. (2016) Failure and fracture micro-mechanisms in mcoavtop-composite single lap joints produced by welding-based joining techniques. *Composites Part A*, 81, 121–128.

- 32 Amancio-Filho, S.T. et al. (2010) Preliminary investigation of the microstructure and mechanical behaviour of 2024 aluminium alloy friction spot welds. *Mater. Trans.*, 52 (5), 985–991.
- 33 Suhuddin, U., et al. (2013) A review on microstructural and mechanical properties of friction spot welds in Al-based similar and dissimilar joints. 1st International Joint Symposium on Joining and Welding, Osaka, Japan.
- 34 Esteves JV, et al., Friction spot joining of aluminum AA6181-T4 and carbon fiber-reinforced poly(phenylene sulfide): effects of process parameters on the microstructure and mechanical strength. *J. Mater. Des.*, 2014. 66 (Part B): 437–445.
- 35 Esteves, J.V. (2014) Unio Pontual por Fric3ro (“Friction Spot Joining”) de Alum3nio 6181-T4 com Comp3sito Laminado de Poli(Sulfeto de Felinelo) e Fibra de Carbono (CF-PPS). MSc thesis. Federal University of Sro Carlos (UFSCar), Sro Carlos.
- 36 Hoppe, A. (2009) On the feasibility of joining polymer and mcoавtop with the new friction spot joining technique. BSc thesis. Hamburg University of Technology (TUHH), Hamburg.
- 37 Rocha Luiz, T. (2010) Study on the feasibility of CFRP and aluminium alloys through friction spot joining, Helmholtz-Zentrum Geesthacht (ГЦГ), Geesthacht.
- 38 Su, P., Gerlich, A., and North, T.H. (2005) Friction stir spot welding of aluminum and magnesium alloy sheets. SAE Technical Paper, 2005-01-1255.
- 39 Su P, et al. (2006) Energy generation and stir zone dimensions in friction stir spot welds. SAE Technical Paper, 2006-01-0971.
- 40 Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C. (1986) *Conduction of Heat in Solids*, Clarendon Press, New York.
- 41 Stokes, V.K. (1988) Analysis of the friction (spin)-welding process for thermoplastics. *J. Mater. Sci.*, 23, 2772–2785.
- 42 Rosendo, T. et al. (2011) Mechanical and microstructural investigation of friction spot welded AA6181-T4 aluminium alloy. *J. Mater. Des.*, 32, 1094–1100.
- 43 Hancock, R. (2004) Friction welding of aluminum cuts energy costs by 99%. *Weld. J.*, 83 (2), 40.
- 44 Laughlin, D.E. and Hono, K. (eds) (2014) *Physical Mcoавtoplurgy*, 5th edn, vol. 3, Elsevier, Oxford.
- 45 Cahn, R.W. and Haasen, P. (eds) (1996) *Physical Mcoавtoplurgy*, 4th edn, Elsevier, Amsterdam.
- 46 Olea, C.A.W. (2008) Influence of energy input in friction stir welding on structure evolution and mechanical behaviour of precipitation–hardening in aluminium alloys (AA2024-T351, AA6013-T6 and Al–Mg–Sc). Dissertation. University of Bochum, Bochum.
- 47 Gerlich, A., Avramovic-Cingara, G., and North, T.H. (2006) Stir zone microstructure and strain rate during Al 7075-T6 friction stir spot welding. *Mcoавtopl. Mater. Trans. A*, 37, 2773–2786.
- 48 Goushegir, S.M. (2015) Friction spot joining of mcoавtop-composite hybrid structures. Dissertation. Hamburg University of Technology (TUHH), Hamburg.
- 49 Ageorges, C., Ye, L., and Hou, M. (2000) Experimental investigation of the resistance welding of thermoplastic-matrix composites. Part II: optimum processing window and mechanical performance. *Compos. Sci. Technol.*, 60, 1191–1202.
- 50 Amanat, N. et al. (2010) Transmission laser welding of amorphous and semi-crystalline poly-ether–ether–ketone for applications in the medical device industry. *J. Mater. Des.*, 31, 4823–4830.
- 51 Bueno, C.C. (2010) Spot-joints on lightweight alloys and thermoplasticcomposites. BEng thesis. Federal University of Sro Carlos (UFSCar), Sro Carlos.
- 52 Esteves, J.V., et al. (2012) Friction spot joining of aluminum 6181-T4 and carbon fiber reinforced poly(phenylene sulfide). 70th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers 2012, ANTEC 2012: Orlando, FL. 1698–1704.
- 53 Banea, M.D. and da Silva, L.F.M. (2009) Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. *J. Mater. Des. Appl.*, 223 (1), 1–18.
- 54 Niedermeier, M. (2010) *Vorlesung Leichtbau III: Desig von Composite Strukturen*, ETH Zurich.
- 55 Seidlitz, H., Ulke-Winter, L., and Kroll, L. (2014) New joining technology for optimized mcoавtop/composite assemblies. *J. Eng.*, 2014, 1–11.
- 56 Dube, M. et al. (2008) Fatigue performance characterisation of resistance-welded thermoplastic composites. *Compos. Sci. Technol.*, 68, 1759–1765.

- 57 Quaresimin, M. and Ricotta, M. (2006) Fatigue behaviour and damage evolution of single lap bonded joints in compositematerial. *Compos. Sci. Technol.*, 66, 176–187.
- 58 da Silva, L.F.M. et al. (2009) Analytical models of adhesively bonded joints – part I: literature survey. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 29, 319–330.
- 59 da Silva, L.F.M. et al. (2009) Analytical models of adhesively bonded joints—part II: comparative study. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 29, 331–341.
- 60 Goland, M. and Reissner, E. (1944) The stresses in cemented joints. *J. Appl. Mech.*, 11, A17–A27.
- 61 Andre, N.M., et al. (2014) On the microstructure and mechanical performance of friction spot joining with additional film interlayer. Annual Conference of the Society of Plastics Engineers, ANTEC 2014. Las Vegas, CA.
- 62 Ye, L. et al. (2005) De-consolidation and re-consolidation in CF/PPS thermoplastic matrix composites. *Composites Part A*, 36, 915–922.
- 63 Amancio-Filho, S.T. et al. (2008) Thermal degradation of polyetherimide joined by friction riveting (FricRiveting). Part I: influence of rotation speed. *Polym. Degrad. Stab.*, 93, 1529–1538.
- 64 Yusof, F. et al. (2012) Effect of anodizing on pulsed Nd:YAG laser joining of polyethylene terephthalate (PET) and aluminium alloy (A5052). *J. Mater. Des.*, 37, 410–415.
- 65 Jung, K.W. et al. (2013) Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to zinc-coated steel. *J. Mater. Des.*, 47, 179–188.
- 66 Arai, S., Kawahito, Y., and Katayama, S. (2014) Effect of surface modification on laser direct joining of cyclic olefin polymer and stainless steel. *J. Mater. Des.*, 59, 448–453.
- 67 Katayama, S. and Kawahito, Y. (2008) Laser direct joining of mcoавtop and plastic. *Scr. Mater.*, 59, 1247–1250.
- 68 Tan, X. et al. (2015) Characteristics and formation mechanism of porosities in CFRP during laser joining of CFRP and steel. *Composites Part B*, 70, 35–43.
- 69 Ageorges, C. and Ye, L. (2002) *Fusion Bonding of Polymer Composites; From Basic Mechanisms to Process Optimization*, Springer, London.
- 70 Parlevliet, P.P., Bersee, H.E.N., and Beukers, A. (2006) Residual stresses in thermoplastic composites – a study of the literature – part I: formation of residual stresses. *Composites Part A*, 37, 1847–1857.
- 71 Maksimovich, G.G. et al. (1975) Effect of temperature on the strength of aluminum alloy base composites reinforced with networks. *Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov*, 11 (2), 57–60.
- 72 Cervay, R.R. (1975) *Temperature Effect on the Mechanical Properties of Aluminum Alloy 2124-T851*, University of Dayton Research Institute.
- 73 Skorupa, A. and Skorupa, M. (2012) *Riveted Lap Joints in Aircraft Fuselage: Design, Analysis and Properties*, Springer, London.
- 74 Gudmundsson, S. (2013) *General Aviation Aircraft Design: Applied Methods and Procedures*, Butterworth-Heinemann, Stoneham, MA.

## 4 Индукционная сварка металлокомпозитных гибридных конструкций

*Mirja Didi u Peter Mitschang*

*Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, University of Kaiserslautern, Kaiserslautern, Германия*

### 4.1 Введение

В настоящее время методы соединения металл / композитных гибридных конструкций можно разделить на адгезивное связывание, термические и механические методы, основанные на принципах их соединения. В то время как термореактивные материалы могут быть соединены только с помощью механических способов крепления и клеевого соединения, термопласты могут быть термически соединены, например, с помощью технологий сварки. В этой главе металлокомпозитные конструкции определяются как комбинация полимерных композитов, армированных металлом и волокном (FRPCs), с термопластичной матрицей. Термопластичные материалы могут извлечь выгоду из их свойств размягчения и плавления, будучи термически соединяемыми или свариваемыми материалами, в то время как термореактивные материалы не плавятся из-за их плотно сшитой макромолекулярной структуры.

Индукционная сварка металлокомпозитных гибридных конструкций — это новая технология сварки. Термическое соединение осуществляется путем нагрева металлического компонента переменным электромагнитным полем. Плавление (для полукристаллических полимеров) или размягчение (в случае аморфных полимеров) термопластичной матрицы компонента FRPCs достигается в основном за счет тепла, подводимого от металлического компонента (в случае полимеров, армированных углеродным волокном (CFRPs), проводящего углерода волокна также будут нагреваться), устанавливая тесный контакт между компонентами после уплотнения. Как правило, прочность сварного шва в основном зависит от предварительной обработки поверхности детали, температуры, приложенного давления и времени выдержки [1].

Принципы процесса, общее описание свойств, преимуществ и ограничений, областей применения и доступного оборудования будут представлены в следующих разделах.

### 4.2 Описание принципов метода соединения

#### 4.2.1 Обзор процесса

Как объяснялось ранее, для индукционной сварки металлокомпозитных гибридных структур термопластичный композит должен быть размягчен или расплавлен, и для надлежащего соединения необходим тесный контакт между компонентами.

На рис. 4.1 показан пример прерывисто работающего устройства для индукционной сварки. Образцы фиксируются на держателе образца (металл на FRPC). Для генерирования тепла, оборудование для индукционной сварки обеспечивает магнитное поле, чередующееся с частотой от 20 кГц до 10 МГц. Во-первых, металлический компонент нагревается переменным магнитным полем индуктора. После этого держатель образца перемещается в узел уплотнения, где обе части прижимаются друг к другу, чтобы позволить размягченному или расплавленному матричному материалу смачивать металлическую поверхность и заполнять естественные или искусственные неровности поверхности - обычно предварительно обработанной поверхности, например, пескоструйная обработка - металлическая составляющая. Наконец, сформированное соединение охлаждают ниже температуры стеклования компонента FRPC. Узел уплотнения, показанный на рис. 4.1, состоит из пневматического цилиндра, который подает давление, и штамп с регулируемой температурой.



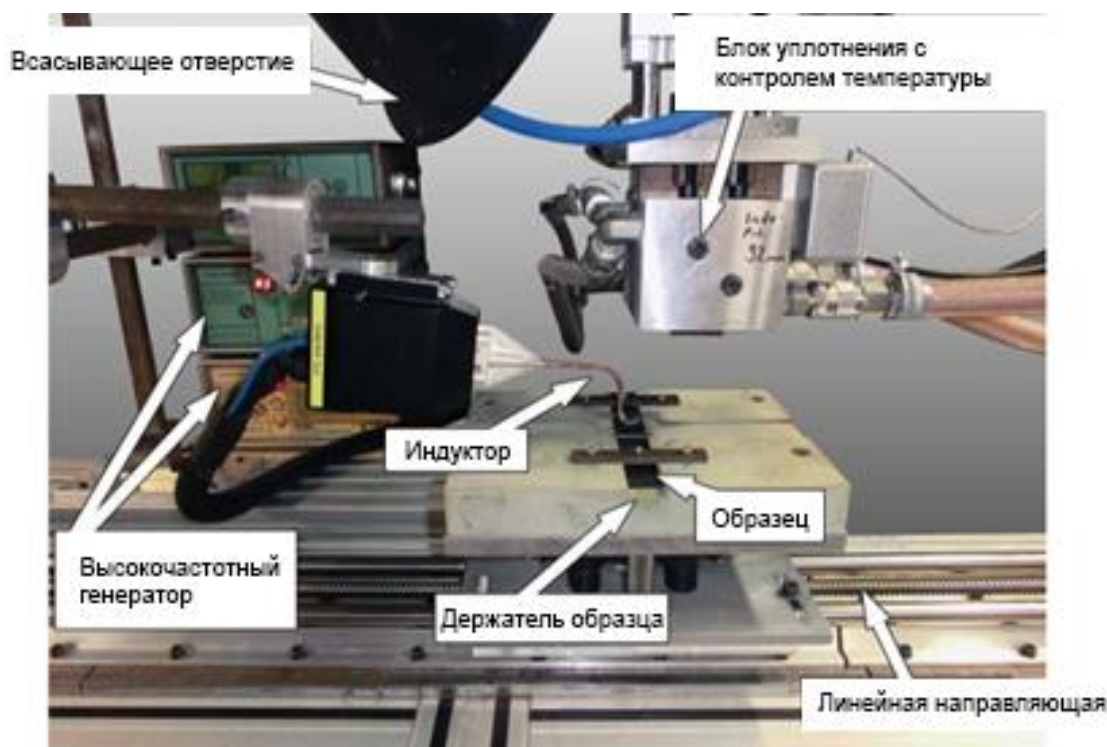


**Рис. 4.1** Экспериментальная установка аппарата для непрерывной индукционной сварки.

### 4.2.2 Процесс нагрева

Одним из основных физических явлений в индукционной сварке является то, что каждый электрический ток окружен электрическим полем. Если электрическое поле изменяется в зависимости от времени или места, создается магнитное поле. Переменное магнитное поле индуцирует вихревые токи в электропроводящий материал [2]. Этот эффект используется для индуктивного нагрева. Переменный ток проходит через индуктор, генерируется переменное электромагнитное поле, а переменное магнитное поле индуцирует вихревые токи в металлическом компоненте. В зависимости от используемого металла (или композитов, армированных углеродным волокном), нагрев Джоуля и - если металл магнитный - потери гистерезиса ответственны за выработку тепла. На рис. 4.2 представлено переменное магнитное поле и наведенные вихревые токи при индукционной сварке.

Энергия вихревых токов преобразуется в тепло благодаря электрическому сопротивлению материала. Эти потери называются джоулевыми потерями. В контуре проводника индуцированная реальная мощность является функцией индуцированного напряжения и сопротивления. Следующее уравнение описывает индуцированное рассеивание мощности (мощность, полностью преобразованную в тепло) в идеальном резисторе,

$$P_{\text{инд}} = \frac{U_{\text{инд}}^2}{R_f} = \frac{4 \pi^2 \cdot f^2 \cdot \mu^2 \cdot H^2 \cdot A^2}{R_f} \quad (4.1)$$

где  $U_{\text{инд}}$  это указанное напряжение и  $R_f$  сопротивление материала, в котором индуцируется напряжение. В этом уравнении есть два вида доли: свойства материала металлического компонента, которые представляют собой электрическое сопротивление ( $R_f$ ) и магнитная проницаемость ( $\mu$ ), и технологические параметры, которыми являются напряженность магнитного поля ( $H$ ), закрытая область ( $A$ ) и частота ( $f$ ).

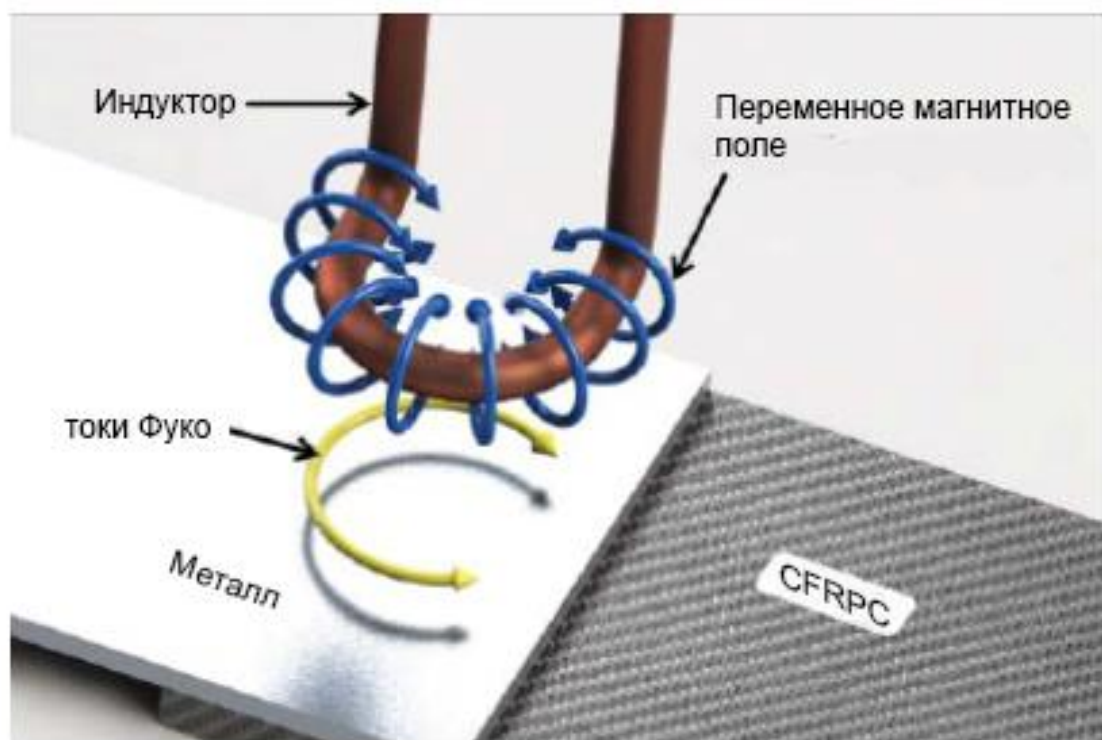


**Рис. 4.2** Принцип индукционного нагрева в гибридных сварных соединениях.

Из уравнения 4.1 видно, что частота - управляемый процессом параметр соединения - оказывает существенное влияние на индуцированную мощность. Высокая частота приводит к быстрому нагреву и, следовательно, уменьшает время процесса соединения. Другим важным параметром соединения является напряженность магнитного поля  $H$ , которая будет обсуждаться в разделе 4.2.2.1.

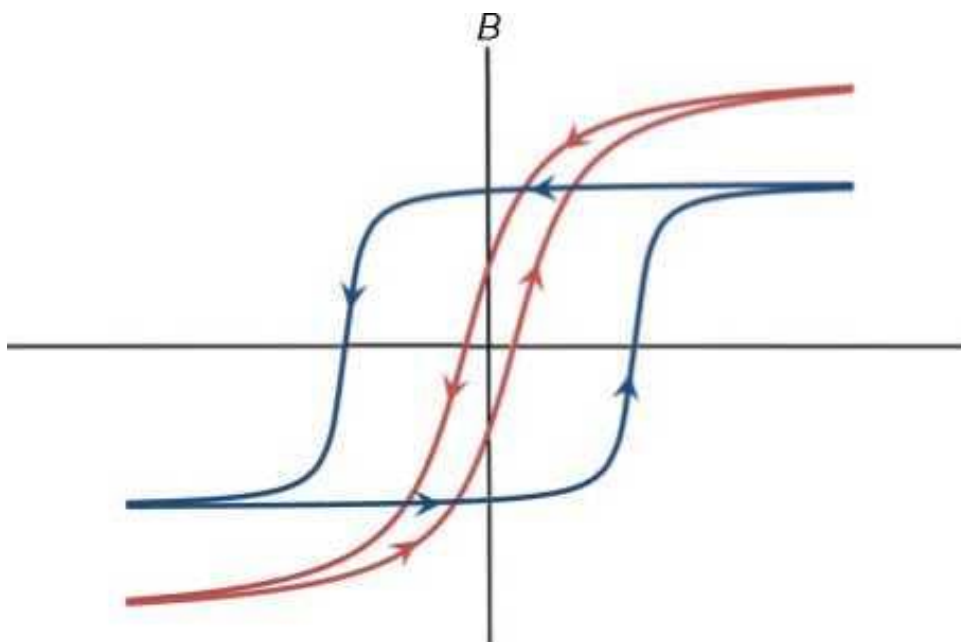
Магнитное поле, характеризуемое напряженностью магнитного поля, выравнивает поляризацию магнитных доменов металла. Переменное магнитное поле переключает выравнивание, чтобы соответствовать поляризации внешнего поля. Следовательно, магнитный поток будет создан. Плотность магнитного потока ( $B$ ) в металле зависит от напряженности магнитного поля ( $H$ ). Плотность магнитного потока всегда отстает от приложенного магнитного поля, поэтому вызывает гистерезис. Когда поляризация достигает своего максимума, достигается насыщение плотности потока. Потери гистерезиса вызваны энергией, необходимой для переключения магнитной поляризации материала с каждым циклом внешнего магнитного поля, и, таким образом, тепло генерируется внутренним трением [2].

Рис. 4.3 отображает пример двух кривых гистерезиса для мягкого и магнитотвердого материала. Потери гистерезиса пропорциональны площади внутри петель. Свойство, которое объединяет напряженность магнитного поля ( $H$ ) и плотность магнитного потока ( $B$ ), является магнитной проницаемостью ( $\mu$ ).

$$B = \mu \cdot H \quad (4.2)$$

Потери гистерезиса линейно возрастают с частотой, тогда как потери Джоуля показывают квадратичное увеличение. Таким образом, джоулевые потери становятся доминирующей частью нагревательного механизма при индукционной сварке металлоконструкций [2].





— Магнитно-мягкий материал — Магнитно-твердый материал

**Рис. 4.3** Кривые гистерезиса мягких и магнитотвердых материалов

Влияние частоты на глубину нагрева более подробно описано в разделе 4.2.2.2, поскольку оно также сильно зависит от свойств материала. Для металлов высокая частота приводит к малой глубине нагрева, и вихревые токи возникают в основном на поверхности, обращенной к индуктору и непосредственно под ним.

#### 4.2.2.1 Геометрия индуктора и магнитное поле

Для стабилизированного переменного тока напряженность магнитного поля ( $H$ ) тонкого проводника любой геометрии можно пунктуально описать как суперпозицию электромагнитных полей, создаваемых всеми бесконечно малыми элементами проводника.

$$\vec{H} = \frac{I}{4\pi} \oint \frac{d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3} \quad (4.3)$$

Это может быть получено из закона Biot-Savart и описано в уравнении 4.3:

где  $I$  ток проводника,  $ds$  - это элемент кривой проводника в направлении тока,  $r$  - вектор от элемента кривой до точки, а  $r$  - расстояние между проводником и точкой измерения. Становится ясно, что расчет индуцирующих токи магнитного поля в заготовке является сложным и может быть рассчитан только путем численного моделирования. Следовательно, напряженность магнитного поля зависит от расстояния до индуктора, а также от переменного тока, генерируемого переменным током.

Чтобы преобразовать большую часть магнитной энергии в тепло, необходимо расположить соединяющих партнеров очень близко к индуктору, где плотность магнитного поля высока. При увеличении расстояния до индуктора образуется однородная зона нагрева, но энергетическая эффективность технологии индукционной сварки уменьшается, и требуется более длительный период нагрева, пока не будет достигнута желаемая температура.

Помимо индуцированного тока, распределение индуцированного тока является еще одним важным параметром в индукционном нагреве. На этот параметр влияет геометрия индуктора. Геометрия индуктора не может быть понята как один проводник; он более сложный и, следовательно, его можно интерпретировать как несколько токнесущих проводников в непосредственной близости. Каждый проводник имеет свое собственное магнитное поле, которое влияет на окружающих. Этот эффект называется эффектом

близости. Это явление искажает магнитное поле отдельных проводников, косвенно влияя на распределение тока и плотности мощности. Если токи двух проводников протекают в разных направлениях, магнитное поле концентрируется между двумя проводниками, поскольку оба поля складываются. В этом случае внешнее поле слабое. Если ток течет в одном направлении, он концентрируется в противоположном направлении. В этом случае поля между проводниками компенсируют друг друга, и внешнее поле является сильным, поскольку поля добавляются друг к другу. Поэтому описание магнитного поля индуктора со сложной геометрией является сложной задачей. Кроме того, катушка индуктивности и заготовка, где также индуцируется ток, также могут пониматься как два проводника. Другими словами, индуцированное магнитное поле заготовки также влияет на распределение тока в индуктивности [3].

На рис. 4.4 показано распределение индуцированной температуры для разных геометрий индуктивности. В этом примере армированный углеродным волокном ламинат нагревается и регистрируется термокамерой. При использовании ламината эффект магнитного поля может быть продемонстрирован лучше, чем при использовании металла. Это может быть объяснено из-за более низкой теплопроводности, которая замедляет тепловыделение, концентрируя индуцированное тепло вокруг углеродных волокон (проводник нагревается индукционно). Из рисунка 4.4 видно, что максимум магнитного поля плоскоспиральной катушки индуктивности и плоскоспиральной катушки индуктивности с концентратором потока сосредоточен ближе в кольцеобразной области при расположении холодной областью в центре. И наоборот, дроссельная заслонка концентрирует магнитное поле больше в одной точке (на рис. 4.4b), но менее эффективна. Следствием этого является то, что при использовании дросселя-бабочки с одинаковыми параметрами для частоты и тока в индуктивности процесс нагрева происходит медленнее, а максимальная температура ниже, чем при использовании плоскоспиральной катушки индуктивности.

Плоскоспиральная катушка индуктивности с концентратором потока (рис. 4.4c) индуцирует магнитные поля, ориентированные в предпочтительном направлении. Это позволяет разместить сильное магнитное поле с более однородной формой там, где это необходимо (позиции нагрева в сварочных деталях). Поэтому выбор этих индукторов с концентраторами потока обычно уменьшает расстояние связи и паразитные потери. Там, где концентратор потока покрывает индуктор, магнитное поле сжимается в сторону до непокрытых объемов. Обычно С-образная форма используется вокруг индуктора, так что открытая сторона обращена к заготовке. Этот эффект называется «эффект слота», который коррелирует с эффектом близости. Наиболее важными свойствами идеального материала концентратора потока являются высокая плотность потока насыщения и высокая магнитная проницаемость, но потери гистерезиса должны быть низкими. Следовательно, идеальный материал концентратора потока будет иметь более высокую петлю гистерезиса, стремящуюся к нулю. В действительности используемые материалы концентратора потока представляют собой, так называемые магнитомягкие материалы, и по сравнению с магнитотвердым материалом они имеют высокую и узкую кривую петли гистерезиса. Кроме того, материал должен иметь высокое электрическое сопротивление и теплопроводность, чтобы поддерживать низкие джоулевые потери [4].

#### 4.2.2.2 Поверхностный эффект

Поверхностный эффект возникает, когда глубина проникновения индуцированного тока мала, а это означает, что токи будут индуцироваться на поверхности нагретого материала. Электромагнитные свойства материалов оказывают существенное влияние на процесс индукционной сварки. Индуцированный ток  $I_0$  внутри заготовки уменьшается с расстоянием от поверхности (уравнение 4.4, [3]).

Индуцированный ток  $I_x$  в определенном месте  $x$  можно рассчитать, как

$$I_x = I_0 \cdot e^{-2\pi x \sqrt{\frac{f \cdot \mu}{\rho_{el} \cdot 10^{-7}}}} = I_0 \cdot e^{-\frac{x}{\delta}}$$

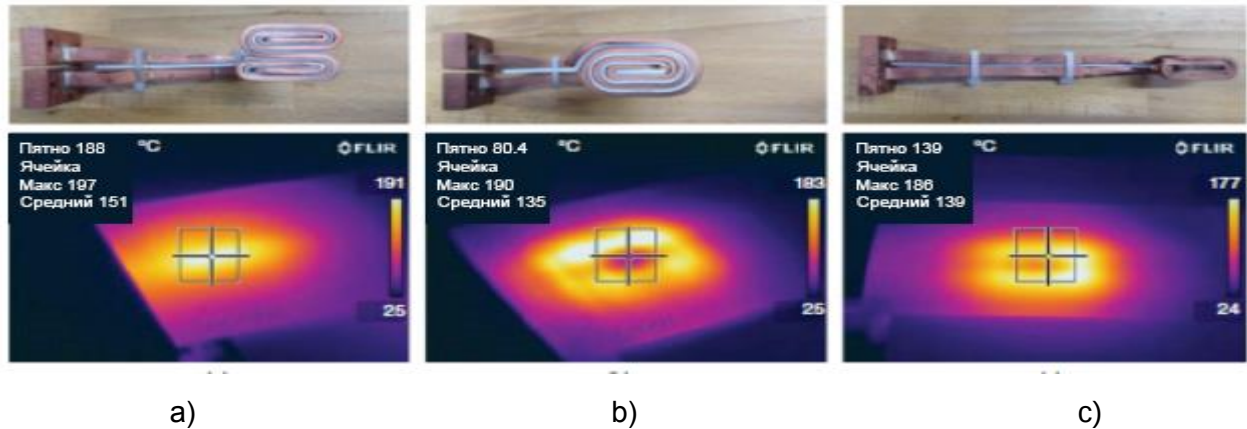


**Рис. 4.4** Различные индукторы и их образцы нагрева ((a) «Бабочка»; (b) «Плоская спираль»; и (c) «Плоская спираль» с концентратором потока) композитов, армированных углеродным волокном.

где  $f$  частота переменного магнитного поля,  $\mu$  это магнитная проницаемость, и  $\rho_{el}$  это электрическое сопротивление, которое влияет на параметры. Магнитная проницаемость определяет проницаемость вещества для магнитных полей. Этот параметр является свойством материала, а для ферромагнитных материалов он зависит от напряженности магнитного поля и температуры. Электрическое сопротивление также зависит от температуры и может увеличиваться во время нагрева.

Глубина проникновения (глубина обшивки) определяется

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_{el} \cdot 10^7}{f \cdot \mu}} \quad (4.5)$$

$$I(\delta) = 0.368 \cdot I_0 \quad (4.6)$$

как расстояние от поверхности заготовки, где ток  $I_0$  уменьшается в  $e^{-1} = 0.368$  [3].

На рис. 4.5 показана глубина проникновения для разных материалов. Электрическое сопротивление ламинированного полотна CF-PPS составляет  $2.1 \times 10^{-4} \Omega$  м измеренный в [5] и его магнитная проницаемость может быть приближена к  $1.256 \times 10^{-6} \text{ Н/м}$ , воздушная магнитная проницаемость.

Влияние частоты на глубину нагрева для разных материалов показано на рис. 4.6. Как видно, скин-эффект увеличивается, так как глубина проникновения меньше, когда частота выше.

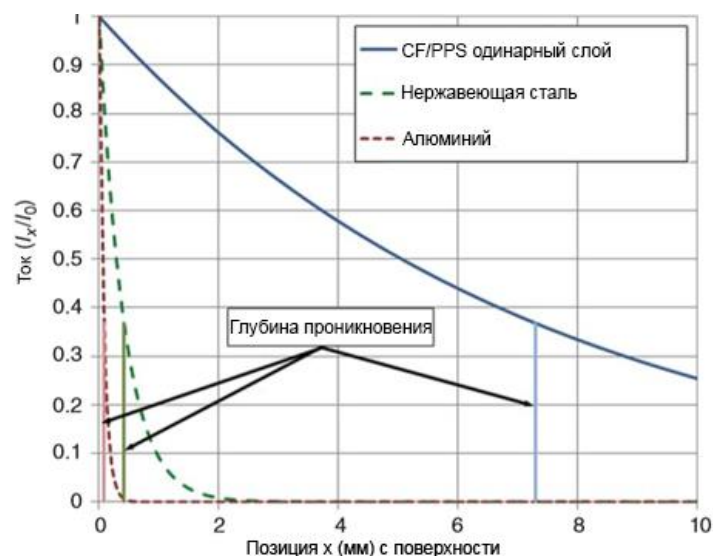


**Рис. 4.5** Плотность тока внутри разных материалов ( $f = 1 \text{ MHz}$ ).

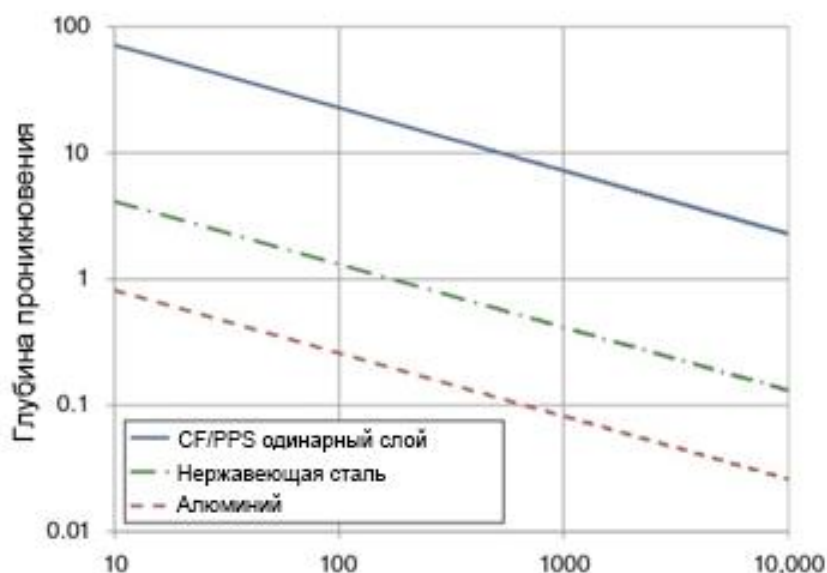


Рис. 4.6 Зависимость глубины проникновения от частоты

### 4.2.3 Теория адгезии и влияние поверхности

Адгезия между гибридными материалами включает довольно сложную феноменологию, и для объяснения их механизмов предлагаются различные теории. Обычно они группируются по следующим категориям: (1) механизмы механической адгезии и (2) специфическая адгезия (рис. 4.7). В первом описываются механизмы механического сцепления, такие как проникновение клея в поры, щели и другие неровности поверхности металлической соединительной части. Второй механизм учитывает сложное физическое и химическое соединение, которое происходит на поверхностях сопрягающихся партнеров. Физическая адгезия состоит из дипольных сил, дисперсионных сил и водородных мостиков. Химическая связь образуется функциональными полимерными группами, которые способны создавать прочные связи между соединяющимися частями.



Рис. 4.7 Различные модели адгезии. (Источник: Mitschang et al. 2009 [6]. Воспроизводится с разрешения Издательства SAGE.)

Термодинамическое связывание – это модель термодинамической адсорбции или модель смачивания, предложенная Шонхорном [7],- которая происходит из-за специфической границы раздела и поверхностных энергий, которые играют важную роль в совместимости соединений [6]. Это может произойти, когда силы межмолекулярного связывания имеют одинаковые величины и молекулярное расстояние. Как объяснил Шонхорн, идеальной предпосылкой для хорошей адгезии является установление тесного контакта между соединяющимися частями. Более того, в случае индукционной сварки, когда происходит плавление термопластичной матрицы, связывание может иметь место только в том случае, если расплавленный полимерный материал смачивает поверхность металла.

Как описано в нескольких источниках (например, [8]), важность предварительной обработки поверхности клеевых соединений является ключевым фактором для прочных соединений. Из-за сходства индукционной сварки металлических/композитных конструкций, необходимо провести предварительную обработку поверхности. По той причине, что в процессе сварки поверхность композита расплавляется, следует понимать предварительную обработку металлической детали. Как показано в Таблице 4.1, существуют разные методы предварительной обработки поверхности с совершенно разными эффектами, доступными для индукционной сварки. Инженерный выбор наиболее адекватного метода должен осуществляться исходя из их стоимости и требуемого качества связывания. Различные методы обработки поверхности могут совершенно по-разному влиять на прочность сцепления и могут также ослабить партнеров по соединению, если их не применять надлежащим образом.

Чтобы сравнить различные методы обработки, необходимо охарактеризовать поверхность соединительной части. Одной из возможностей является измерение шероховатости поверхности в случае металлической детали до и после обработки поверхности.

Таблица 4.1 Типичные методы обработки поверхности, используемые при индукционной сварке гибридных соединений металл / композит.

| Метод                  | Обработка                                | Эффект                                                |
|------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Очистка, уменьшение    | • Чистка растворителем (то есть, ацетон) | • Чистка поверхности соединяемого партнера            |
| Механическая обработка | • Полировка                              | • Увеличение шероховатости поверхности                |
|                        | • Измельчение                            | • Удаление загрязняющих слоев и окисленного материала |
|                        | • Пескоструйная                          |                                                       |
| Химическая обработка   | • Травление в кислоте                    | • Формирование слоя сцепления                         |
|                        | • Травление в NaOH                       | • Изменения в химической структуре поверхности        |
|                        | • Анодирование                           |                                                       |
| Физическая обработка   | • Плазменная чистка                      | • Удаление органической структуры                     |
|                        |                                          | • Поверхностная активация                             |

Источник Mitschang соавтор. 2009 [6]. Воспроизводится с разрешения SAGE Publications.

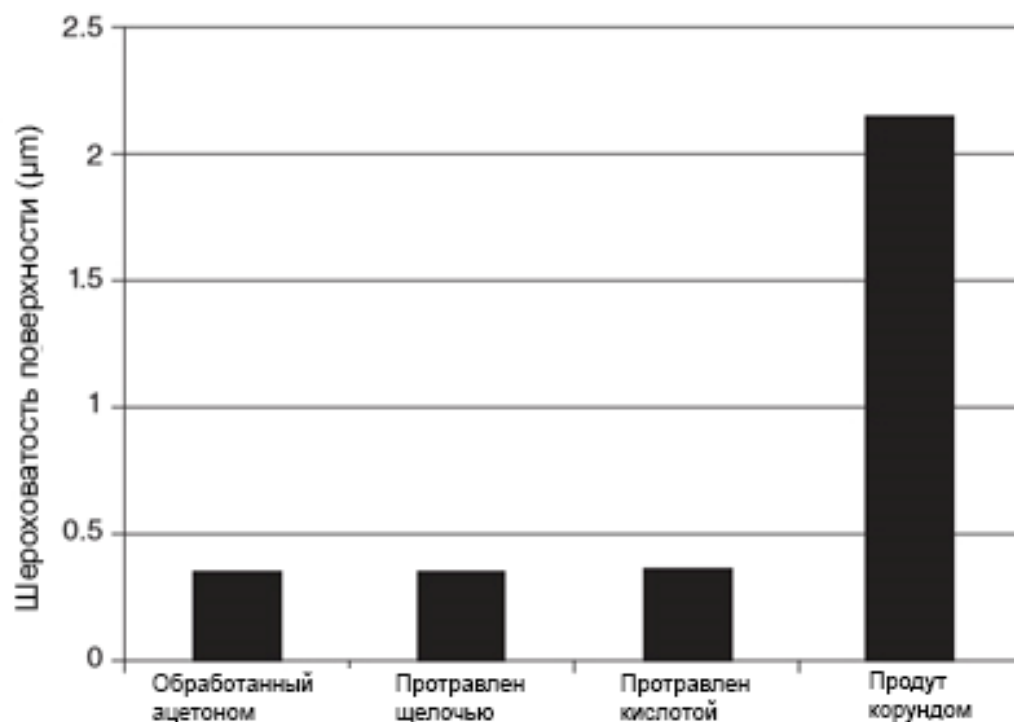


Рис. 4.8 Шероховатость поверхности (Ra) AlMg<sub>3</sub> сплава с различными методами обработки поверхности.

Рис. 4.8 показывает, что механическая обработка наиболее подходит для увеличения шероховатости поверхности (в рамках выбранных методов обработки поверхности в этом примере), в то время как кислотное или щелочное травление лишь немного увеличивает шероховатость. Протирка ацетоном не влияет на шероховатость поверхности, поэтому это значение можно рассматривать как эталонное значение шероховатости поверхности без обработки. Увеличение шероховатости поверхности вызывает увеличение площади поверхности. В этом контексте (механические механизмы связывания) результатом увеличения площади поверхности является увеличение площади связывания, что приведет к более прочным сварным соединениям индукционной сварки.

Еще один способ охарактеризовать качество поверхности — это рассчитать свободную энергию поверхности после различных методов обработки. Смачиваемость поверхности является важной проблемой для обеспечения тесного контакта между соединяемыми материалами. Если расплавленная термопластичная матрица не легко течет по металлической поверхности, трудно установить тесный контакт между соединяемыми материалами. Следовательно, пустоты могут оставаться захваченными в области соединения. Эту эффективность смачивания можно оценить путем определения свободной энергии на поверхности обеих соединяемых частей, например, посредством измерений угла контакта.

Как показано на Рис. 4.9, наибольшая свободная энергия поверхности алюминиевых листов AlMg<sub>3</sub> достигается после щелочного травления. Однако кислотное травление и взрыв корунда также приводят к увеличению свободной энергии на поверхности. Наилучшая обработка поверхности для CF/PA66 (рис. 4.10), экспериментально, — это предварительная обработка плазмой, в то время как протирка ацетоном не оказывает влияния или даже уменьшает поверхностную свободную энергию.

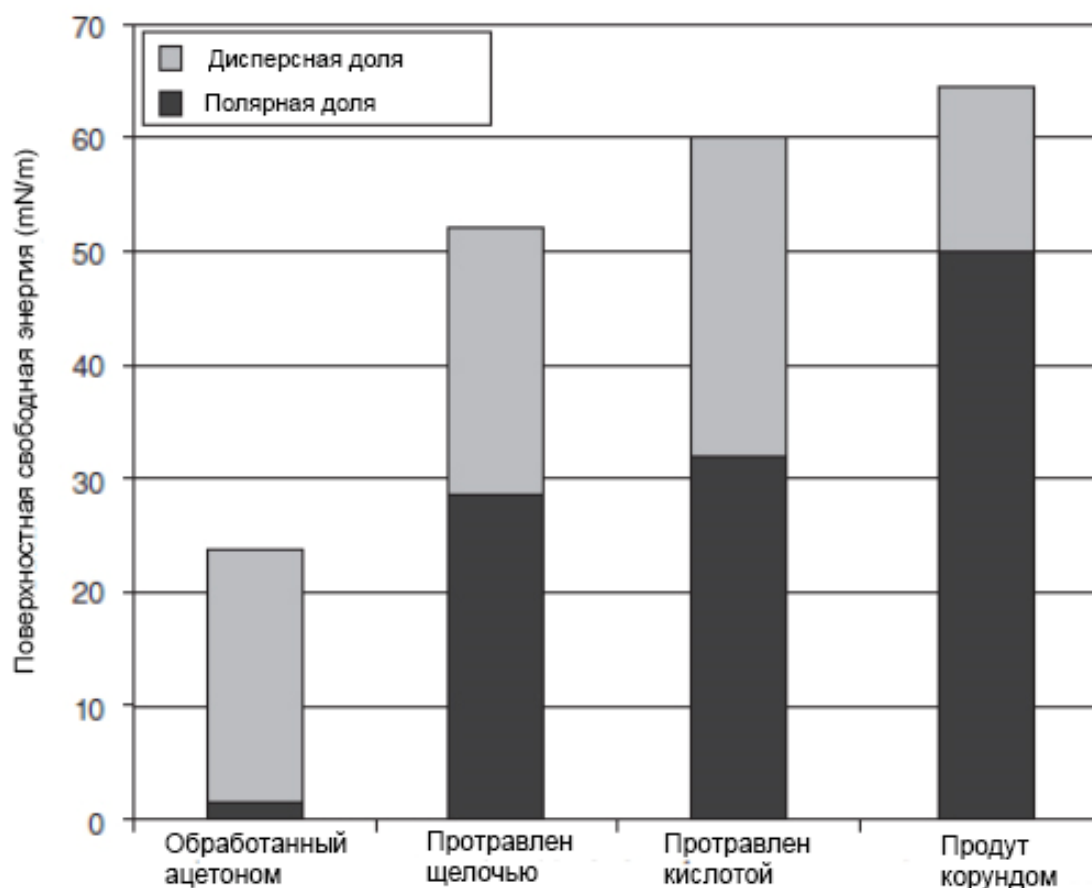


**Рис. 4.9** Сравнение поверхностных свободных энергий сплава  $\text{AlMg}_3$  в зависимости от предварительной обработки поверхности (рассчитано по методу Owens-Wendt-Rabel-Kaelble). (Адаптированы из Velthuis, R. [1] и Hellerich соавтор. 2001 [9].)

Химия поверхности может быть оценена с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS). Уровень углерода на поверхности детали может быть использован в качестве индикатора органического загрязнения. Низкие уровни углерода означают, что поверхность почти чистая, чего можно добиться путем струйной обработки корундом или щелочного травления, как показано в таблице 4.2. Высокая концентрация алюминия на поверхности и, следовательно, активной поверхности может быть получена при помощи струйной обработки корундом, а также щелочного и кислотного травления [6].

На рис. 4.11 показано влияние предварительной обработки поверхности на предел прочности к сдвиговому напряжению для образцов соединений, выполненных односторонней индукционной сваркой. Геометрия соединения составляла 100 мм длины и 25 мм ширины с перекрытием 12,5 мм. Параметры испытаний были выполнены в соответствии с DIN 1465. Сварные детали состояли из листа алюминиевого сплава  $\text{AlMg}_3$  толщиной 1 мм, предварительно обработанного различными методами. Композитная часть представляла собой лист CF-PA66 толщиной 2 мм, обезжиренный ацетоном. Усилитель из углеродного волокна представлял собой стандартную тканую ткань (атласное плетение 5Н) на основе 3к-углеродных волокон. Трехфазный процесс прерывистой индукционной сварки был использован для получения образцов.

В то время как щелочное травление приводит к самой высокой поверхностной свободной энергии (рис. 4.9), прочность соединения наложением (рис. 4.11) практически не изменилась по сравнению с протиркой ацетоном.



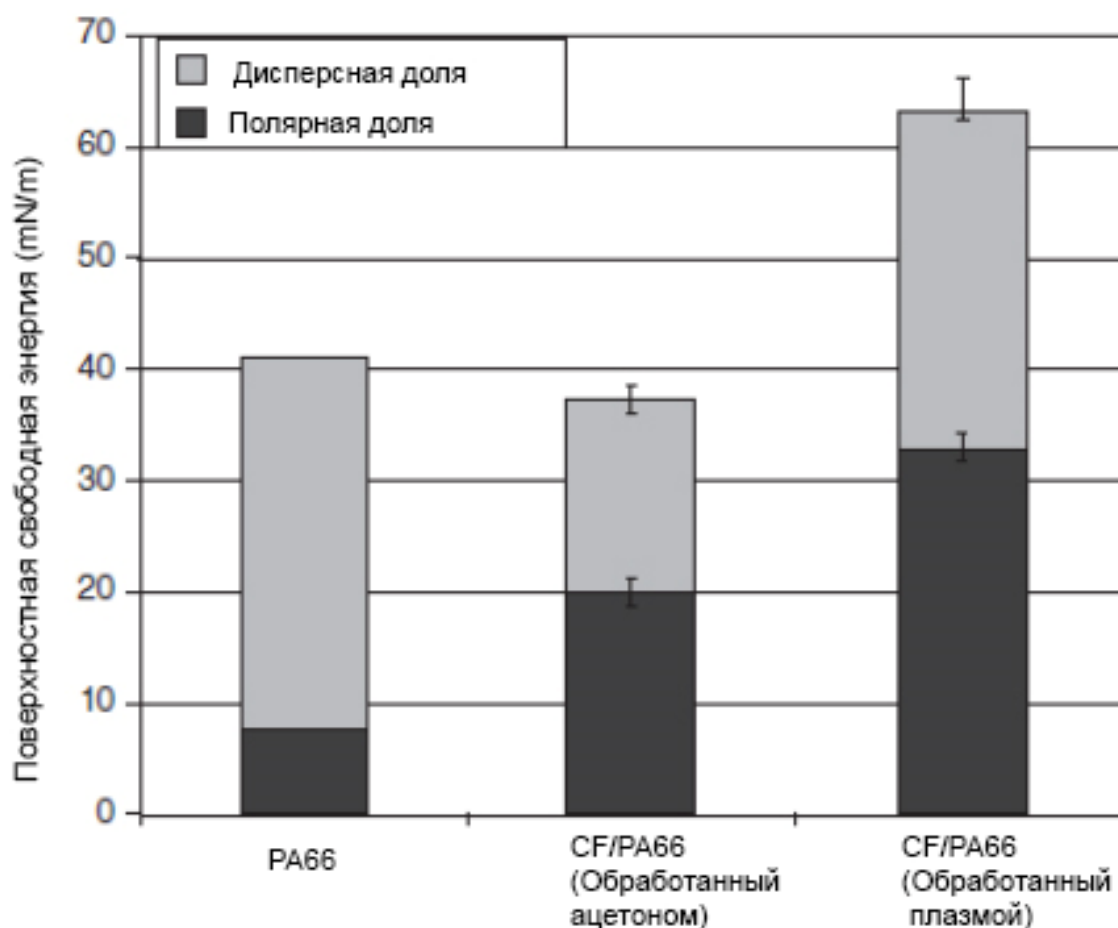


**Рис. 4.10** Сравнение свободных поверхностных энергий CF / PA66 и независимость предварительной обработки поверхности (рассчитывается по методу Owens-Wendt-Rabel-Kaelble). (Адаптированы из Velthuis, R. [1].)

**Таблица 4.2** Поверхностные концентрации на обработанных поверхностях AlMg3 полученных путем анализа XPS.

| Обработка           | Концентрация элемента (в.%) |        |         |         |           |
|---------------------|-----------------------------|--------|---------|---------|-----------|
|                     | C (1s)                      | O (1s) | Al (2p) | Mg (1s) | Другие    |
| Ацетон              | 33                          | 47     | 8       | 5       | Остальные |
| Продут корундом     | 15                          | 52     | 26      | 1       | Остальные |
| Протравлен щелочью  | 11                          | 59     | 22      | 1       | Остальные |
| Протравлен кислотой | 32                          | 44     | 22      | 1       | Остальные |

Похоже, что для достижения высоких прочностей связывания увеличение площади поверхности с помощью Корундовой струи играет более важную роль, чем увеличение свободной энергии на поверхности. Подробности о проведенных экспериментах можно найти в [6].

#### 4.2.4 Термическая деструкция

Термическая деградация относится к изменениям физических свойств полимеров, вызванным чрезмерными температурами. Уровень термического разложения зависит от температуры и времени выдержки материала при этой температуре.

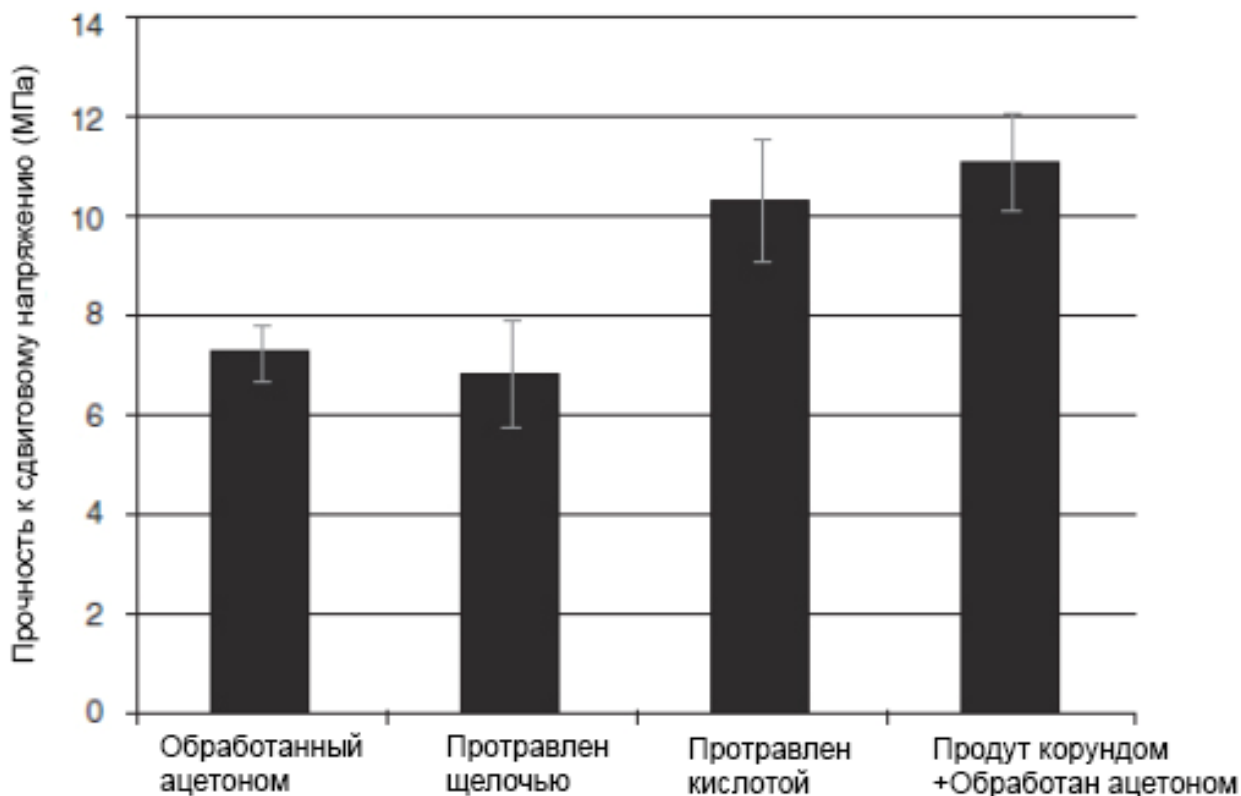


**Рис. 4.11** Влияние предварительной обработки поверхности на предел прочности к сдвиговому напряжению AlMg3/CF-PA66 индукционных сварных швов. (Источник. Velthuis 2007 [1]. Воспроизводится с разрешения Института композитных материалов.)

Термическая деградация — это непрерывный процесс, в котором молекулы полимера разлагаются на небольшие фрагменты, такие как свободные радикалы, свободные ионы,  $H_2$ , CO и т. д., то есть его составные части. Эти физико-химические изменения вызывают значительное уменьшение массы и механических свойств, и их следует избегать или уменьшать во время индукционной сварки.

Не существует четкого правила измерения уровня термического разложения. Однако одной из возможностей является измерение изменения веса с помощью термогравиметрического анализа (TGA) и сравнение с эталонной массой или снижением специальных механических свойств, таких как прочность к сдвиговому напряжению. Существуют и другие доступные методы изучения деградации полимера, связанной с процессом соединения. Дифференциальная сканирующая калориметрия (DSC) и динамический термический анализ (DTA) более эффективны для обнаружения физических изменений в полимерах, таких как изменения стеклования, степени кристалличности и т. д., на которые влияет термическое разложение. Кроме того, методы, основанные на анализе термического испарения (TVA) в сочетании с ультрафиолетовой (UV), инфракрасной (IR) и масс-спектрометрией, являются мощными для идентификации продуктов разложения и понимания механизмов разложения во время индукционной сварки. Изменения молекулярной массы, вызванные термическим разложением, также можно оценить хроматографическим анализом.

При нагреве полимеров выше их рабочих температур, что, в случае индукционной сварки полукристаллических композитов, температуры плавления, невозможно избежать

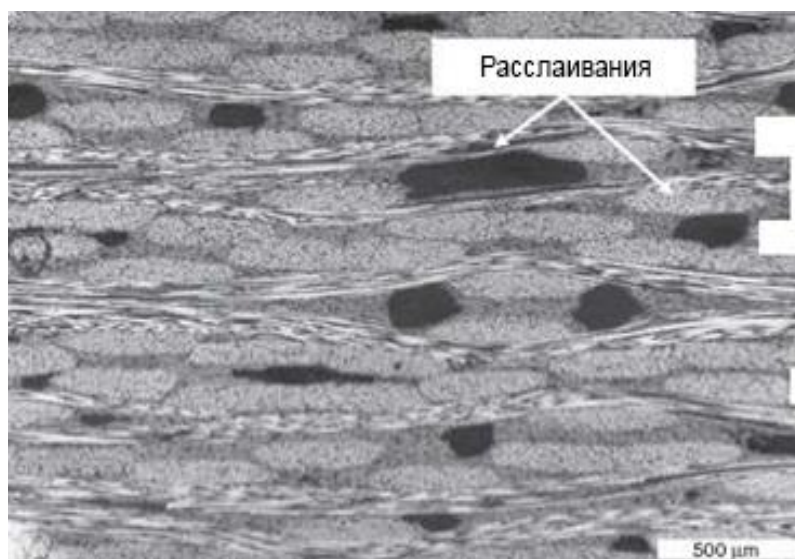
термического разрушения. Единственная контрмера - подвергать полимеры при этих температурах как можно короче, но достаточно долго, чтобы обеспечить надлежащее соединение. Например, для матрицы РА 66 было предложено максимум 6 минут при 280°C (536°F) [9]. Во время индукционной сварки материал матрицы нагревается до температуры процесса в течение не более 1 минуты, что означает, что не должно происходить значительного ухудшения качества.

## 4.2.5 Деконсолидация и консолидация

### 4.2.5.1 Деконсолидация

Деконсолидация — это отрицательный эффект расширения FRPC (образование внутренних пустот и разделение различных слоев, если температура ламината превышает температуру плавления в термопластичной полимерной матрице. Для упрощения (подробное обсуждение см. В [10]) деконсолидация происходит в индукционной сварке, когда приложенное давление слишком низкое. В результате зазоры и пустоты в ламинате могут привести к плохому сцеплению. Наряду с отрицательным влиянием на прочность соединения, качество поверхности также может быть затронуто, что приводит к снижению качества чистовой обработки. Поверхностное искажение также может происходить, когда расплавленный поверхностный полимер затвердевает при разных скоростях охлаждения, что, как правило, вызывает различные степени кристаллизации (т. е. дифференциальное сжатие приводит к искажению).

Пример деконсолидации (в данном случае приводящей к расслоению слоев) показан на Рис. 4.12. Композит состоит из тканого полипропилена (PP) армированного стекловолокном.



|                                  |             |
|----------------------------------|-------------|
| GF/PP                            |             |
| Тип плетения                     | Сатин 1/4   |
| Плотность пряжи (Пряжи/см)       | 22          |
| Линейная плотность (г/км)        | 68          |
| Объемная доля волокна (%)        | 48.6        |
| Начальная толщина (мм)           | 3.02        |
| Измеренная толщина (мм)          | 3.32 ± 0.04 |
| Начальная доля пустот (мм)       | 3.14 ± 0.24 |
| Измеренная доля пустот (мм)      | 5.5 ± 0.4   |
| Начальное содержание пустот (%)  | 2.8 ± 0.8   |
| Измеренное содержание пустот (%) | 12.9 ± 0.5  |

**Рис. 4.12** Деконсолидация

композитов GF-P

Образец нагревали со скоростью от 10°C/с до 140°C и затем выдерживали в течение 5 минут, чтобы обеспечить равномерное распределение температуры по толщине. На втором этапе образец нагревали до 195 °C со скоростью 10°C/с и выдерживали при этой температуре в течение 10 минут. Наконец, образец охлаждали до комнатной температуры со скоростью 1°C/с. Анализ деконсолидации материала показывает, что толщина увеличилась на 0,3 мм, а объем пустот увеличился с 2,8% до 12,9%.

### 4.2.5.2 Консолидация

Чтобы создать надлежащее соединение, необходимо удерживать оба соединяющихся партнера под давлением во время плавления полимерной матрицы и последующей

консолидации. Это давление гарантирует необходимый тесный контакт, увеличивает площадь контакта и заставляет расплавленный полимер течь в микропоры и неровности металлической части [11]. Если приложенное давление слишком высокое, расплавленный полимер будет выдавливаться из зоны сварки, что приведет к снижению прочности сварного шва.

#### **4.2.6 Охлаждение**

Для разработки надежного процесса индукционной сварки необходимо контролируемое охлаждение компонентов ниже температуры затвердевания термопластичного полимера. Для полукристаллических полимеров скорость охлаждения влияет на скорость кристаллизации и образования сферолитов в зоне соединения, что может повлиять на механические характеристики соединений. Кроме того, на стадии охлаждения могут возникать искажения и остаточные напряжения, которые могут быть связаны с ориентацией замороженной молекулы параллельно приложенному давлению.

#### **4.2.7 Внутренние напряжения в зоне сварки**

Соединение материалов с различными коэффициентами теплового расширения приводит к остаточным напряжениям в зоне сварки. Коэффициенты теплового расширения металлов (например, для алюминия  $\alpha = 2,35 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  между 23 и 80°C [9]) очень высоки по сравнению с композитными слоями. Композит представляет собой комбинацию волокон и полимерной матрицы, и, следовательно, различные коэффициенты теплового расширения отдельных компонентов, а также количество и ориентация влияют друг на друга. В то время как матричные материалы и стеклянные волокна растягиваются во всех направлениях при повышении температуры, арамидные волокна и углерод расширяются перпендикулярно оси волокон и укорачиваются в направлении волокон. Для композитов CFRP с объемным содержанием волокон от 40% до 60% коэффициент теплового расширения в продольном направлении можно принять в хорошем приближении как 0 K<sup>-1</sup>. Перпендикулярно направлению волокон, углеродные волокна также вызывают снижение смешанного коэффициента теплового расширения по сравнению с неармированным матричным материалом. Тем не менее, влияние значительно низкое [12].

Во время индукционной сварки металл и композит одновременно нагреваются. В этом измененном состоянии они зажаты вместе. Когда материал остывает ниже температуры стеклования, напряжение начинает нарастать.

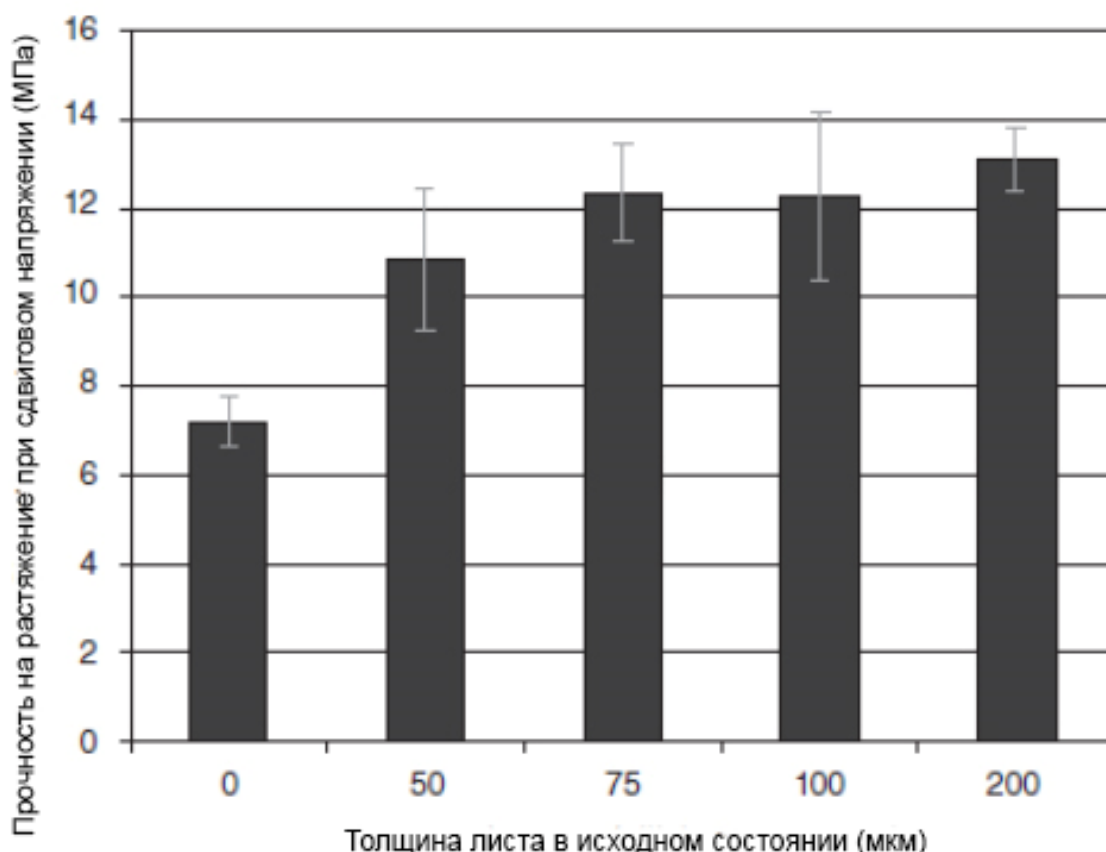


**Рис. 4.13** Влияние толщины листа в зоне сварки на прочность при сдвиговом напряжении соединения наложением (AlMg<sub>3</sub>/CF-/PA66) швов, выполненных индукционной сваркой [1].

Продолжающееся снижение температуры приведет к тому, что металлический компонент будет сжиматься гораздо больше до его первоначальной геометрии, чем CFRP. Это приводит к внутренним напряжениям в зоне сварки. Эти напряжения могут быть выше сопротивления полимера и повредить зону соединения, уменьшая прочность соединения. В случае клеевого соединения используются толстые клеевые слои или пленки, когда соединяются материалы с различными коэффициентами теплового расширения. Эти адгезивные слои или пленки компенсируют внутренние напряжения за счет несущей части, наложенной пластического сдвига [13]. Аналогичный эффект наблюдается при добавлении чистого полимерного слоя в зону соединения металлического CFRP с индукционной сваркой соединений наложением. Улучшение прочности к сдвиговому напряжению соединения наложением можно обнаружить по результатам испытаний на растяжение с однократным наложением, как показано на рис. 4.13. Образцы подготовлены в соответствии с DIN 1465.

## 4.2.8 Изменение параметров процесса

Существуют разные варианты процесса в индукционной сварке. Непрерывный процесс и процесс точечной сварки описаны в этом разделе.

### 4.2.8.1 Трехфазный неоднородный процесс сварки

Как показано на рис. 4.14, процесс трехфазной прерывистой сварки характеризуется точечным нагревом металла (при работе с CFRP также может быть создан некоторый индукционный нагрев), плавлением полимерной матрицы на границе раздела, после чего следует транспортировка в единицу консолидации и объединение соединений.

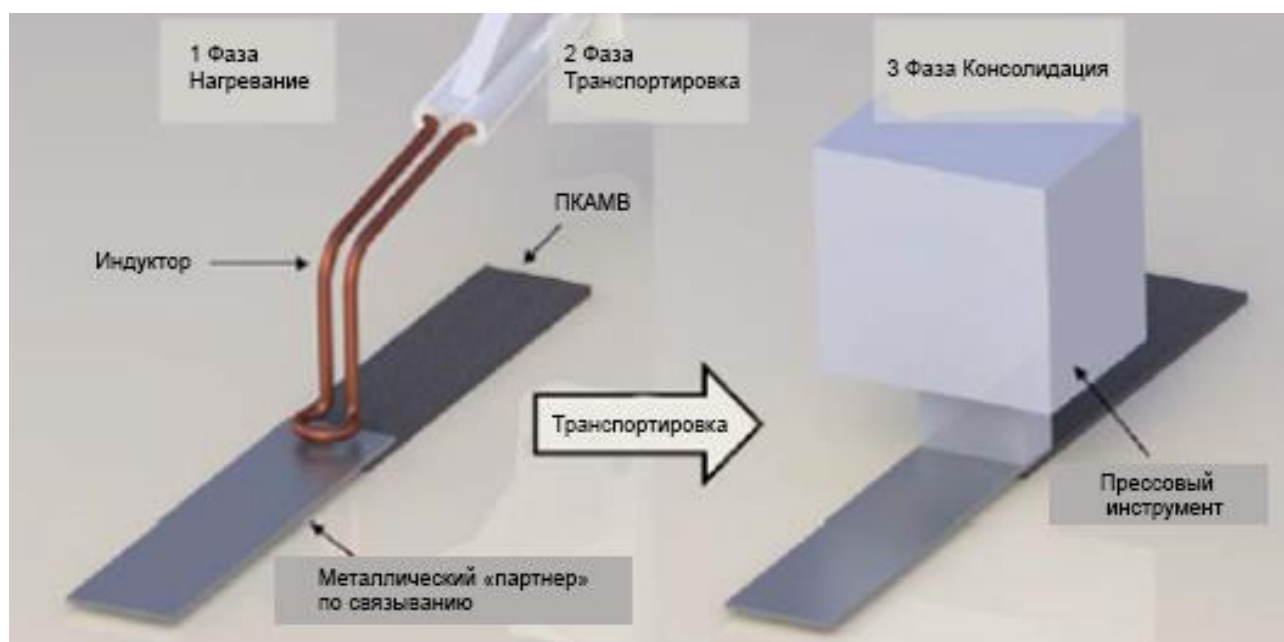


Рис. 4.14 Настройка трехфазной прерывистой индукционной сварки.

Уплотнение может привести к потере тепла образца. Это может быть облегчено с помощью охлажденного штампа. Кроме того, температура штампа может контролироваться, что может повлиять на кристалличность полукристаллических полимеров, что, в свою очередь, меняет прочность соединения.

Температурный профиль в зоне сварки трехфазного прерывистого процесса показан на рис. 4.15. На первом этапе температура в зоне сварки поднимается выше температуры плавления полимерной матрицы.

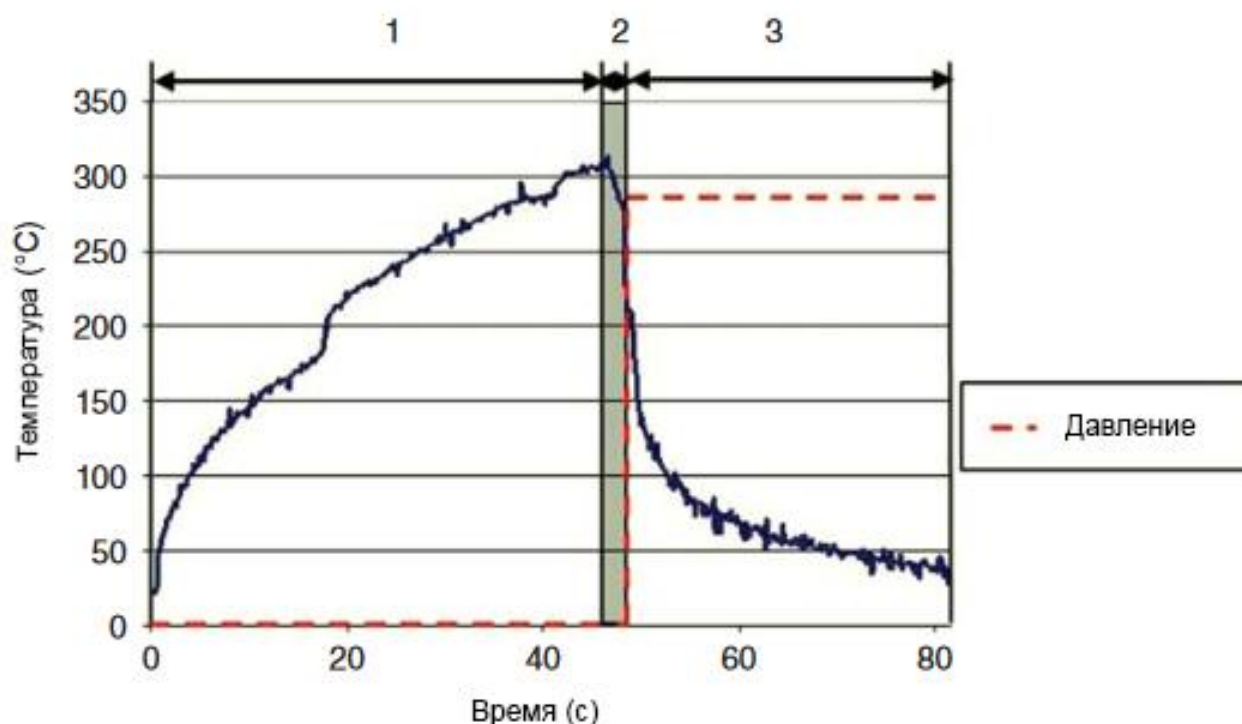


Рис. 4.15 Трехфазная прерывистая индукционная сварка, температурный профиль и давление (давление представлено качественно без оси Y).

Сварной материал - сплав  $AlMg_3$  с CF/PA66. Температурная кривая на рисунке 4.15 показывает, что в фазе 1 температура в зоне сварки выше температуры плавления PA66 ( $264^{\circ}C$ ). Когда матрица расплавлена, весь образец перемещается в единицу консолидации и, таким образом, прессуется для ее получения и охлаждения. Во время этой транспортной фазы (фаза 2) происходят температурные потери; поэтому для снижения тепловых потерь необходимо нагревать свариваемые детали до температуры выше температуры плавления. Фаза 3 показывает уплотнение сварного шва, где компоненты сжимаются и охлаждаются.

Основным преимуществом этого процесса является простота реализации различных геометрий индуктивности и единиц консолидации. Это дает много возможностей конструкции. Другим аспектом является управление процессом. Образец не покрывается штампом во время фазы нагрева, что позволяет лучше контролировать нагрев на поверхности соединения.

#### 4.2.8.2 Точечная сварка

В отличие от трехфазного прерывистого процесса, компоненты нагревают под давлением в процессе точечной сварки. Как показано на рисунке 4.16, индуктор расположен в середине единицы консолидации. Единица консолидации состоит из кольцевого штампа с камерой охлаждения, которая закрыта крышкой. Отверстия интегрированы в крышку для входа и выхода охлаждающей воды. Это охлаждение концентрирует температуру в одной точке и предотвращает нагрев материала вне зоны сварки. Оно также водит к уровню температуры постоянного головки пятна-заварки. Таким образом, может быть достигнута высокая воспроизводимость технологических параметров. Кольцевой штамп закрывается вставкой. Возможно использовать различные материалы для инкрустации, в зависимости от материалов соединяемых компонентов. Керамическая инкрустация, например, невидима для магнитного поля, но вызывает увеличение расстояния связи и меньшую энергоэффективность. Ферромагнитная вставка нагревалась бы сама индукцией очень эффективно, но также приводит к дополнительной теплопередаче между штампом и компонентом.

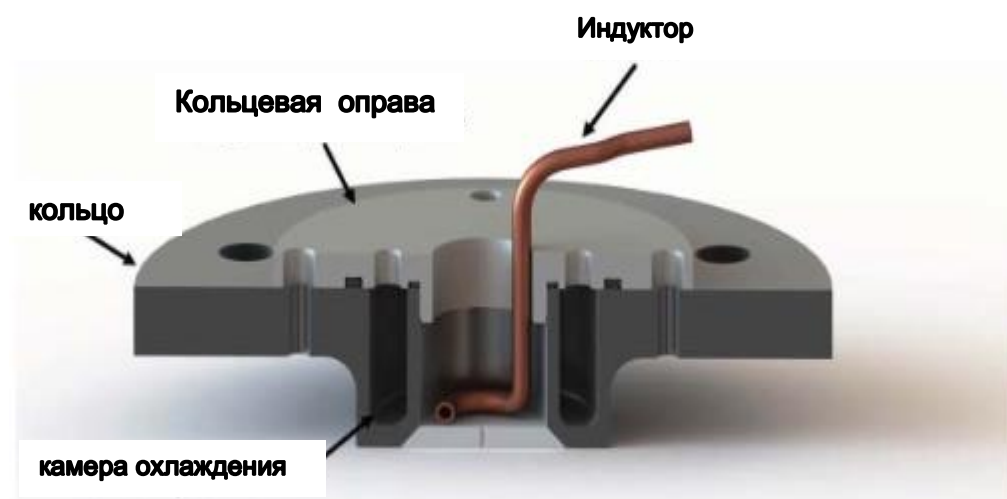


Рисунок 4.16 Установка индукционной точечной сварки.



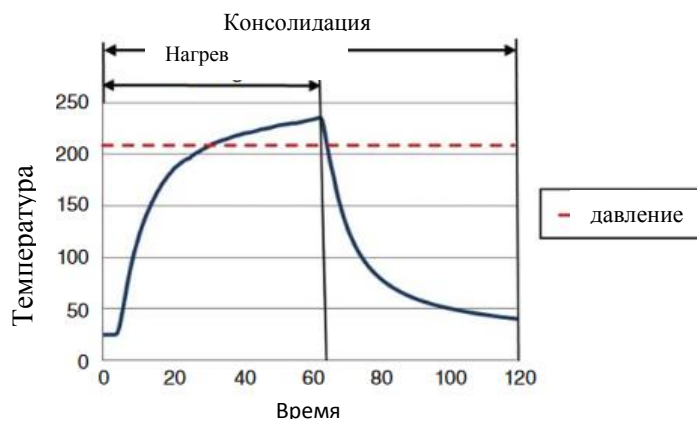


**Рис. 4.17** Профили температуры и давления процесса индукционной точечной сварки (давление представлено качественно без оси).

Все типы вкладок могут обеспечить нагрев под давлением независимо от используемого материала.

До начала процесса, индукция точечной сварки устройство позиционируется нажатием для соединения к опорной плите. Впоследствии индуктор начинает нагревать детали, в то время как осевое давление поддерживается постоянным. После достижения точки плавления полимера в определенной области (размер точечной сварки) индуктор выключается и нагрев прекращается. Устройство поддерживает давление на компоненты, чтобы консолидировать соединение при охлаждении. На рис. 4.17 показан пример температурного профиля в зоне сварки соединения металл / композит с индукционным точечным узлом.

Охлаждение очень важно для снижения внутренних напряжений. Металл расширяется больше, чем композит, когда весь компонент нагревается во время процесса сварки. После сварки металл снова сжимается, что приводит к остаточным напряжениям, иногда искажению деталей и даже к полному разъединению или частичному повреждению сварных деталей. Обычно охлаждаемый прессующий инструмент используется для предотвращения термических изменений механических свойств окружающего материала и уменьшения теплового расширения металлической детали из-за ограничения объема нагрева.

На качество сварного шва влияют три важные температуры процесса: (1) максимальная температура процесса, которую можно использовать, не вызывая чрезмерного термического разрушения материала матрицы; (2) температура плавления полимера, которая должна быть достигнута на краю точечной сварки; и (3) максимальная температура, которая является приемлемой на краю кольцевого штампа для предотвращения повреждений в результате теплового расширения. На рис. 4.18 показан пример реального распределения температуры внутри зоны сварки. Схематическое изображение на заднем плане предназначено для иллюстрации того, в каких положениях под устройством точечной сварки измерения проводились в соединяемых деталях.

Распределение температуры внутри зоны сварки

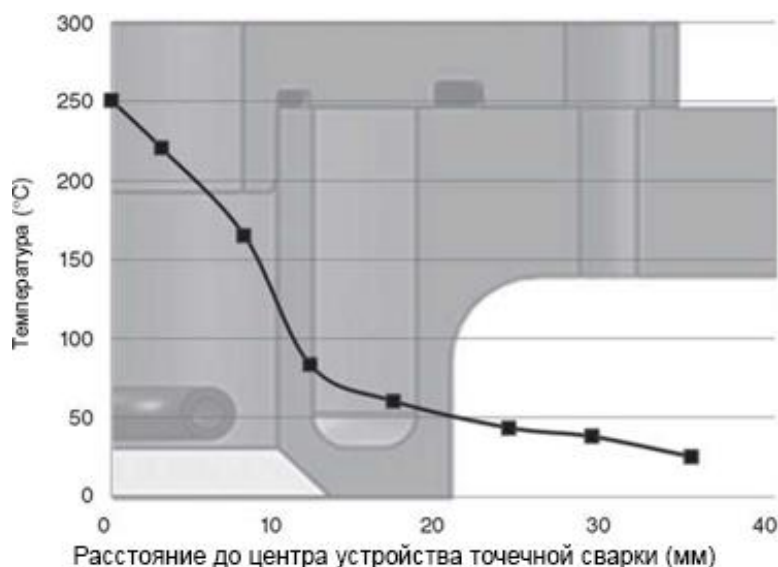


**Рис. 4.18** Распределение температуры точечной сварки в зоне сварки.

Охлаждающий элемент инструмента точечной сварки расположен в кольце с радиусами 10 и 20 мм; поэтому под этим местом температура в сварочных деталях значительно снижается.

Ограничением этого процесса является размер индуктора. Индуктор должен быть водяным охлаждением, а скорость потока должна быть достаточно высокой, чтобы избежать перегрева вследствие джоулевых потерь, возникающих в результате переменного тока на его поверхности. Другой факт заключается в том, что приложение энергии зависит от размера индуктора и также может быть ограничением. Здесь концентратор потока может частично компенсировать этот дефицит.

### 4.3 Механические характеристики индукционного сварного шва по сравнению с адгезивным связыванием

Цель этого раздела - сравнить гибридные структуры металл/композит с индукционной сваркой в сравнении с клеевым соединением. Клеевое соединение — это универсальный процесс соединения с широким спектром применения. Одной из общих свойств клеевого соединения, также используемой в технологии индукционной сварки, является механизм связывания силами сцепления. Следовательно, прочность соединения, полученного с помощью этих двух методов соединения, будет зависеть от метода предварительной обработки присоединяющихся партнеров (как обсуждалось ранее в разделе 4.2.3).

В соответствующем выбранном исследовании случая, соединяемыми компонентами были алюминиевый сплав ( $AlMg_3$ ) толщиной 1 мм и CFRP (CF/PA66) толщиной 2 мм. Усиление состояло из тканого материала (атласное 5H) на основе углеродных волокон 3k. Объемное содержание волокна установлено на 50%. Геометрия однопольных соединений составляла 100 мм в длину и 25 мм в ширину с перекрытием 12,5 мм. Эта геометрия и параметры испытаний были выбраны в соответствии с DIN 1465. Для изготовления образцов использовался трехфазный прерывистый процесс.

Адгезивно скрепленные металл/композитные гибридные соединения были изготовлены с использованием стандартного адгезива с эпоксидной смолой 1 К, который обычно используется для соединения аналогичных конфигураций CFRP в автомобильной промышленности. Щелочное травление было выбрано для предварительной обработки алюминиевой детали, в то время как детали из CFRP обезжиривали ацетоном перед приклеиванием. Металлический «партнер» образцов, сваренных индукционной сваркой, подвергался струйной обработке корундом, и в зоне перекрытия помещалась дополнительная полимерная пленка (промежуточный слой). Части CFRP обезжиривали ацетоном. Впоследствии склеенные образцы были подвергнуты механическим испытаниям

для определения прочности на сдвиг внахлест и по сравнению с прочностью на сдвиг внахлест для образцов, сваренных индукционной сваркой. Результаты показаны на рис. 4.19.

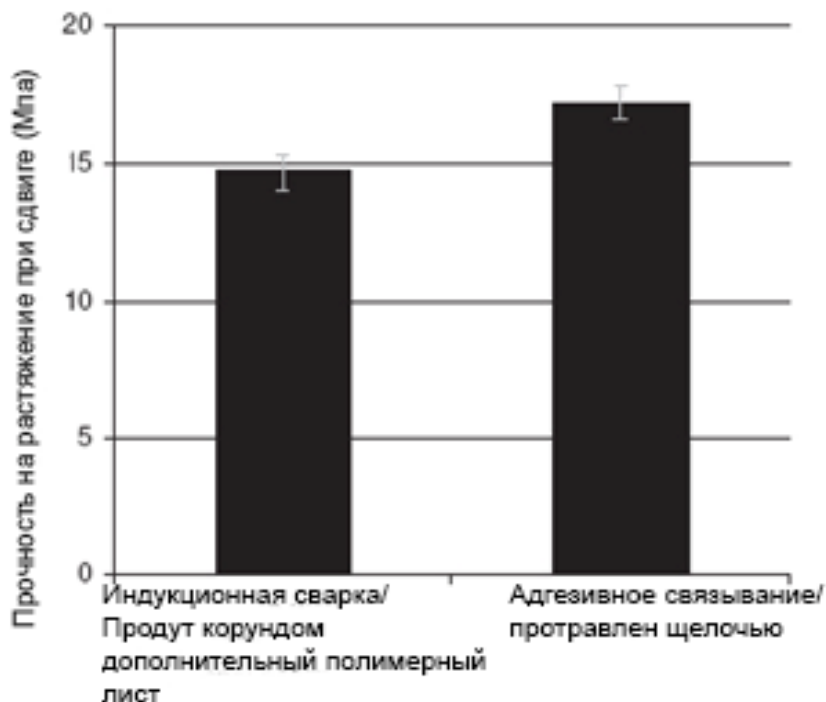


**Рис.4.19** Сравнение механических характеристик индуктивно сварных и клеевых образцов. (Источник:Velthuis 2007 [1]. Воспроизводится с разрешения Института Композитных Материалов.)

Прочность на растяжение при сдвиге (то есть предельная прочность на сдвиг внахлест) клеевых соединений была примерно на 15% выше, чем прочность при сдвиге внахлест оптимизированных индукционных сварных швов. Принимая во внимание тот факт, что образцы, сваренные индукционной сваркой, могут быть загружены непосредственно после подготовки, и нет необходимости в отверждении или кондиционировании, технология индукционной сварки может рассматриваться как конкурентоспособная технология по сравнению с клеевым соединением, которое требует от нескольких минут до нескольких часов для отверждения.

## 4.4 Преимущества и ограничения

Основным преимуществом индукционной сварки является высокая гибкость процесса. Оборудование может использоваться повсеместно и может быть установлено на промышленном роботе. Следовательно, можно сваривать/соединять сложные детали, и процесс практически не зависит от размера компонента. Кроме того, нагрев происходит только с одной стороны, что уменьшает проблему доступности. По сравнению с использованием механических креплений, индукционная сварка снижает концентрацию напряжений (отсутствие сквозных отверстий), и дополнительные соединительные элементы не нужны. По сравнению с другими технологиями сварки, такими как вибрационная сварка, инвестиционные затраты невелики. Другим преимуществом является относительно короткое время обработки, так как не требуется время отверждения по сравнению с клеевым соединением. Тем не менее, следует отметить, что время процесса является ограничением (от нескольких секунд до нескольких минут). Существуют сварочные процессы, такие как ультразвуковая сварка, которые происходят намного быстрее (обычно менее секунды).

## 4.5 Применения

Техника индукционной сварки уже нашла свое применение в автомобильной и авиационной промышленности, хотя и не с гибридным соединением (только похожие сварные швы): элеватор и руль Gulfstream G650, состоящий из CF/PPS, свариваются путем индуктивного нагнетания [14]. Что касается автомобильной промышленности, то для BMW M3 CSL была разработана легкая опора спинки заднего сиденья, которая сварена индуктивным нагревом [15]. Было достигнуто снижение веса на 50% без потери стабильности [16].

В настоящее время интенсивно изучается индукционная сварка металлов к FRP. Упомянутые ранее трудности, такие как различные коэффициенты теплового расширения партнеров по соединению, требуют глубокого понимания корреляции между параметрами сварки/соединения и свойствами соединения. Потенциальные применения в автомобильной или авиационной промышленности возможны, так как выбор и применение металла/FRP растут в обеих отраслях. Например, автомобильные накладки или панели приборов, которые крепятся к кузову автомобиля, могут быть прикреплены с помощью индукционной сварки, а также других крышек. Чтобы уменьшить вес, а также оптические характеристики, профессиональные гоночные автомобили, капоты двигателя, крыши и крышки багажника сделаны из углепластика. Эти детали в настоящее время приклеиваются к кузову автомобиля, но также могут быть приварены. Такое же предположение справедливо для самолетов, где внутренние панели пассажирского салона могут быть прикреплены к кузову без дополнительной арматуры индукционной сваркой.

## 4.6 Доступное оборудование и инструменты

Переменный электрический ток обеспечивается высокочастотными генераторами. Эти генераторы могут различаться по своей конструкции. Из-за прикрепления индуктора некоторые из них более подходят, например, для крепления к роботу. В зависимости от свариваемых материалов клиенты могут выбирать между различными уровнями мощности и частотными диапазонами. Они могут варьироваться от 500 кВт до 50 МГц соответственно [17, 18]. Чтобы применить силу уплотнения, необходимы различные инструменты прессования в зависимости от процесса, материалов и геометрии соединения. Эти пресс-инструменты должны быть индивидуально разработаны для каждого применения и не являются коммерчески доступными.

## 4.7 Дополнительное чтение и дополнительная литература

Очень всеобъемлющей книгой о технологии индукционной сварки является «Руководство по индукционному нагреву» [3]. Оно относится не к композитным материалам, а к металлам, и очень подробно описывает теоретические основы и различные электромагнитные явления. Между 2006 и 2012 годами исследовательский отдел 524 DFG работал над темой «Изготовление, свойства и моделирование сварных легких конструкций из металла/FRPCS». Три различных процесса сварки, ультразвуковая сварка, индукционная сварка и импульсная сварка, были исследованы и сравнены. Многие результаты были опубликованы в специальном издании журнала *Advanced Engineering Materials* в сентябре 2013 г. [19]. Наконец, физические механизмы материалов, участвующих в процессе соединения сплавлением соединения композитных и разнородных, хорошо описаны в [20, 21].

## Литература

- 1 Velthuis, R. (2007) Induction welding of fiber reinforced thermoplastic polymer composites to mcoавтоps. Dissertation, IVW-Schriftenreihe Band 75, Kaiserslautern.
- 2 Weyh, U. (1993) Feldlehre, R. Oldenbourg Verlag GmbH, Мнchen.
- 3 Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R., and Black, M. (2003) Handbook of Induction Heating, Marcel Dekker, New York.
- 4 Rudnev, V.I. (2004) An objective assessment of magnetic flux concentrators, Heat treating progress.
- 5 Rodolf, R. (2000) Entwicklung einer neuartigen Prozess- und Anlagentechnik zum wirtschaftlichen Fügen von thermoplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden. Dissertation, IVW-Schriftenreihe Band 10, Kaiserslautern.
- 6 Mitschang, P., Velthuis, R., Emrich, S., and Kopnarski, M. (2009) Induction heated joining of aluminum and carbon fiber reinforced nylon 66. J. Thermoplast. Compos. Mater., 22 (6), 767–801.
- 7 Schonhorn, H. (1963) Generalized approach to adhesion via the interfacial deposition of amphipathic molecules. I. Adhesion of polyethylene to aluminum. J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem., 1, 2343–2359.
- 8 Fourche, G. (1995) An overview of the basic aspects of polymer adhesion. Part II: Application to surface treatments. Polym. Eng. Sci., 35 (12), 958–975.
- 9 Hellerich, W., Harsch, G., and Haenle, S. (2001) Werkstoffführer für Kunststoffe, Hanser Fachbuch.
- 10 Wolfrath, J., Michaud, V., and Menson, J.-A.E. (2005) Deconsolidation in glass mat thermoplastic composites: analysis of the mechanisms. Composites Part A, 36 (12), 1608–1616.
- 11 Grewell, D., Benatar, A., and Park, J. (2003) Plastics and Composites Welding Handbook, Hanser, Мнchen.
- 12 Ehrenstein, G.W. (2006) Faserverbund- Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, Мнchen.
- 13 Schürmann, H. (2007) Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- 14 Ingen, J.W., Buitenhuis, A., Wijngaarden, M., and Simmons, F. (2010) Development of the gulfstream G650 induction welded thermoplastic elevators and rudder. Proceedings of the International SAMPE Symposium and Exhibition, Seattle, WA.
- 15 Velthuis, R. and Mitschang, P. (2003) Indction welding of fibre reinforced thermoplastic composites in case of a rear seat back support. 6th AVK-TV Conference, Baden-Baden.
- 16 Wacker, M. (2004) Thermoplastische Hochleistungsverbunde auf dem Weg zu Sereienanwendungen. IVW Kolloquium, IVW Schriftenreihe Band 48, Kaiserslautern.
- 17 Hüttinger (2012) <http://www.huettinger.com/produkte/induktionserwaermung/truheat-hf.html>. (accessed 8 October 2012).
- 18 HAUG (2012) <http://www.fw-haug.com/de/loeten/power-cubebrhfgenerator>. html. (accessed 8 October 2012).
- 19 Mitschang, P., Velthuis, R., and Didi, M. (2013) Induction spot welding of mcoавтоp/CFRP hybrid joints. Adv. Eng. Mater., 15 (9), 804–813.
- 20 Ageorges, C. and Lin, Y. (2002) Fusion Bonding of Polymer Composites, Springer-Verlag, Berlin.
- 21 Bischof, C. (1993) ND-Plasmatechnik im Umfeld der Haftungsproblematik bei Mcoавтоpl-Polymer-Verbunden. Materialwiss. Werkstofftech., 24, 33–41.

## **5 Соединение металла и пластика с помощью лазера без промежуточного слоя**

Сейджи Катаяма и Юсоке Кавахито

Научно-исследовательский институт соединения и сварки, Университет Осаки, Осака, Япония

### **5.1 Введение**

Металлы и термопласты широко используются во многих промышленных применениях, таких как самолеты, автомобили и транспорт, измерительные приборы и электронные устройства [1]. С одной стороны, металлы обладают основными свойствами: высокой прочностью, высокой ударной вязкостью, высокой теплопроводностью и хорошей стабильностью при высоких температурах. С другой стороны, пластмассы характеризуются легким весом, высокой коррозионной стойкостью и отличной формовкостью. Соединение металла и термопластика — это чрезвычайно важная и неизбежная технология с точки зрения производства. Соединение обычно выполняется с помощью клеевого соединения (клея) или механических крепежных элементов, таких как болты, винты и заклепки [2]. Однако такие способы соединения для металл-термопластичных соединений имеют несколько ограничений, и соответствующие преимущества свойств металла и пластика используются не полностью. Клеи или клеи несут нагрузку на окружающую среду и требуют строгого контроля качества в процессе производства. В частности, ограничение выбросов летучих органических соединений (VOC) было определено как важная проблема, которую необходимо решить. Обычное механическое соединение металлопластиковых конструкций имеет некоторые ограничения, такие как негибкая конструкция или низкая производительность из-за использования крепежных элементов, винтов или заклепок. Поэтому авторы этой главы недавно разработали процесс прямого лазерного соединения для соединения металл-полимер, названный «лазерное соединение металлопластика (LAMP)» технология соединения, которая осуществляется без клеевых соединений или адгезивов, крепежных элементов, винтов или заклепок. [3-10] Соединение LAMP представляет собой простую процедуру, при которой лазерный луч направлен прямо на лист металла или термопластика, наложенных друг на друга. Этот процесс может быть автоматизирован и вместе с его применением приходит возможность разрешения вопросов, относимых к типовым методам соединения связыванием с использованием адгезивов или механических крепежей.

В этой главе описаны некоторые важные моменты, касающиеся процедур соединения LAMP: (1) характеристики методов и соединений LAMP, (2) образование прочных соединений, (3) оценка механических свойств, (4) механизмы соединения LAMP, (5) испытания для оценки надежности соединения при испытаниях на герметичность и тепловой удар, и (6) развитие технологии LAMP соединений применительно разнородных металлов.

### **5.2 Ход выполнения соединения металла и пластика с помощью лазера без промежуточного слоя (LAMP соединение)**

Лазерные источники, такие как алюмо-иттриевый гранат (YAG), волоконный и дисковый (дисковый) лазер с длиной волны 1,03-1,09 мкм и диодный лазер с длиной волны 0,8-1 мкм, могут использоваться в режиме непрерывной или импульсной волны. CO<sub>2</sub>-лазер с длиной волны 10,6 мкм также может быть использован аналогично в случае прямого наведения лазерного луча на металлическую поверхность и для некоторых прозрачных

смола. Пример устройства с прямым диодным лазером максимальной мощностью 3 кВт и экспериментальной компоновкой для LAMP соединения приведен на рис. 5.1.

Лазерный луч наводится фокусирующей оптикой. Сфокусированные лучи и плотности мощности YAG-лазера и диодного лазера показаны на рис. 5.2. Такой сфокусированный луч YAG-лазера, волоконного или дискового лазера используется рядом с фокусной точкой для растворения металла или для нагрева более широкой области в расфокусированных условиях. Линейный режим пучка может быть использован для LAMP соединения. Лазер для LAMP соединения обычно используется в расфокусированных условиях YAG-лазера (рис. 5.2 (а)), но в фокусном положении для диодного лазера линейного луча (рис. 5.2 (б)).

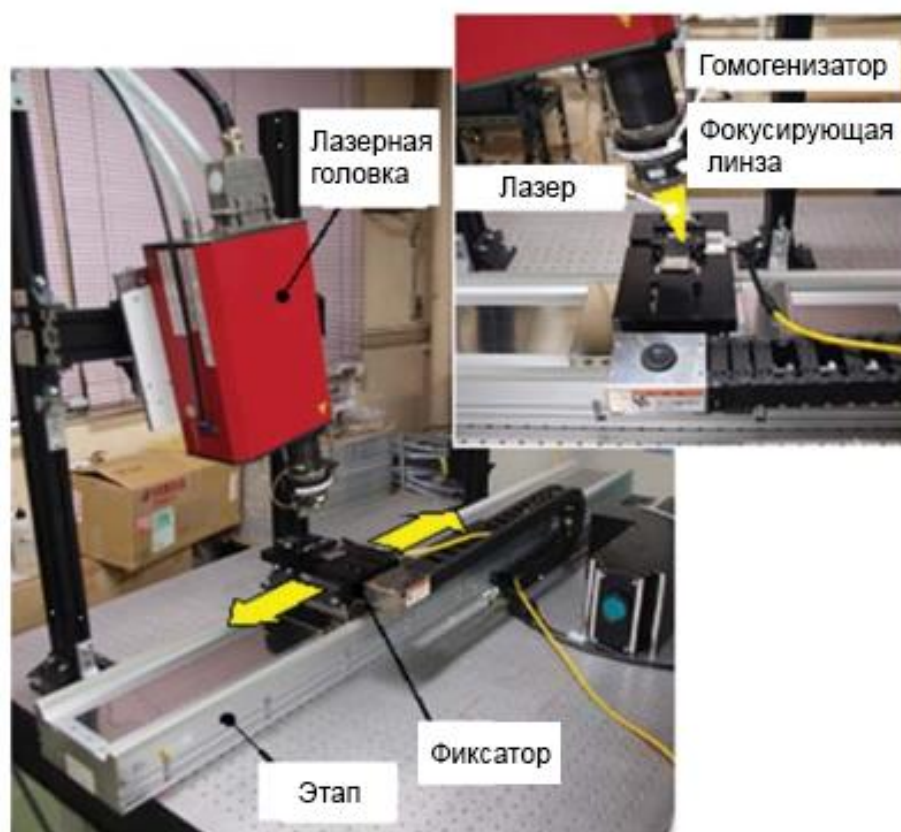


**Рис. 5.1** 3 кВт kW диодный лазерный аппарат, оснастка, и этап и их расположение для соединения ЛСМП.



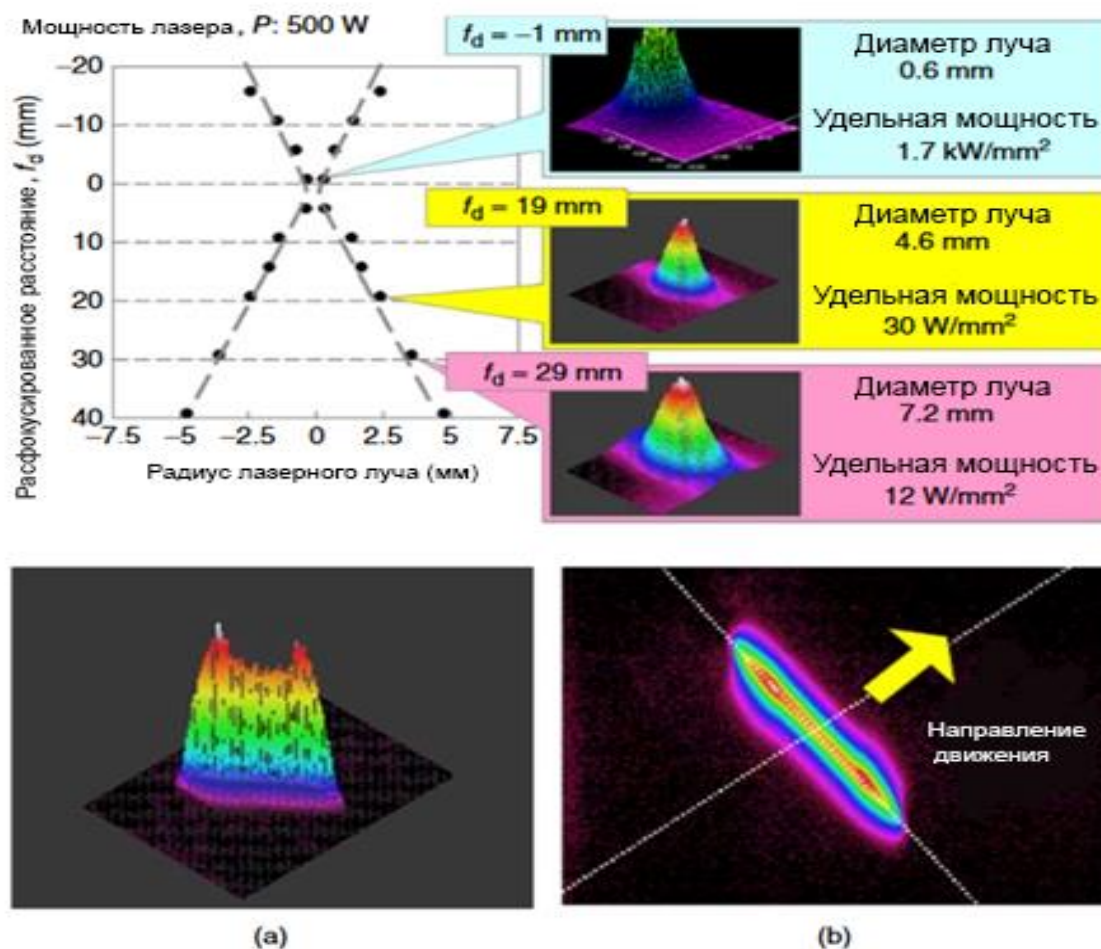


**Рис. 5.2** Особенности распределения плотности мощности и режима лазерного пучка YAG и диодного лазерного пучка (b). в (a), фокусировка лазерного пучка YAG отображается как функция расфокусированного расстояния, моды, плотности мощности и диаметра луча. На (b) подробно описаны распределение плотности мощности, режим и направление движения луча диодного лазера.

Методы выполнения LAMP соединения схематично показаны на рис. 5.3. Лазерный луч падает с металлической или пластиковой стороны в режиме непрерывной или импульсной волны на наложенные друг на друга листы металла и пластика для того, чтобы расплавить полимер вблизи поверхности соединения наложением и одновременно создать небольшие пузырьки в расплавленном пластиковом материале. Полимер с высокой лазерной прозрачностью более 70% может быть непосредственно подвергнут лазерной обработке со стороны пластиковой поверхности (рис. 5.3 (a) и (b)).

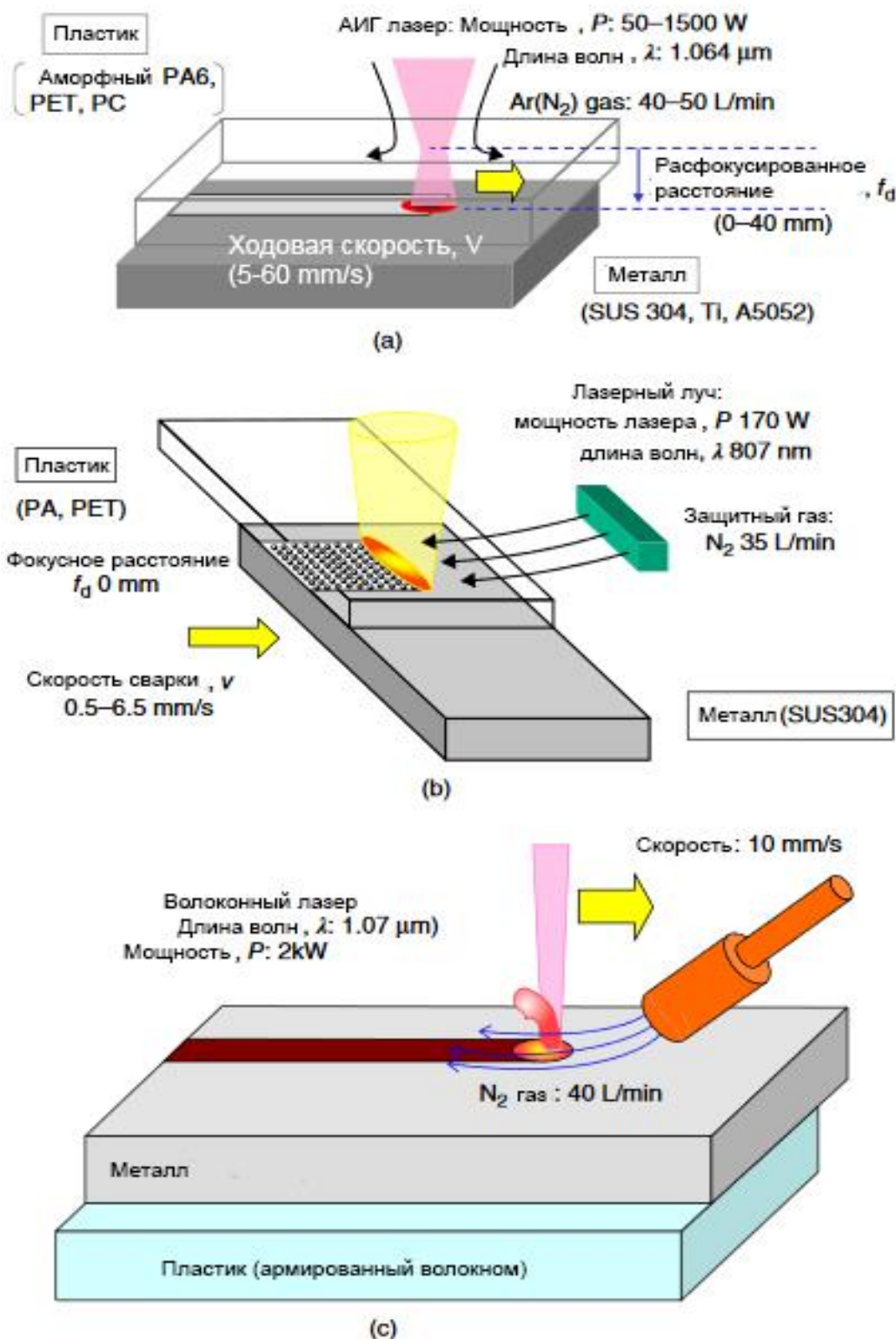


**Рис. 5.3** Схематическая экспериментальная установка LAMP соединения без промежуточного слоя с использованием различных видов лазерной сварки: (а) YAG лазерная сварка прозрачного пластика, (б) наведение диодного лазера на прозрачный пластик и (б) наведение волоконного лазера на непрозрачный пластик. Возможные комбинации материалов и параметры их соединения показаны на схеме.

С другой стороны, лазерная прострелка металлической поверхности может быть применена к любому термопластику (в том числе к непрозрачному), особенно для CFRP композитов. Условия лазерного соединения выбираются в зависимости от свойств и толщины металлической пластины. Лазерное соединение выполняется под потоком защитного газа, аналогично обычной лазерной сварке металла. Кроме того, в случае нагрева со стороны металла (рис. 5.3 (с)) могут быть использованы другие источники тепла, такие как электронный луч, плазма, дуга, трение (например, процесс соединения пятна трения, см. Главу 3).

Преимущества процесса LAMP соединения заключаются в следующем: (1) короткое время соединения, приводящее к высокой производительности; (2) простая автоматизация; (3) долговременная стабильность из-за связывания из-за плавления пластиковой матрицы без адгезивных соединений или клеев; (4) отсутствие или снижение поверхностной обработки, необходимой для металлической пластины; (5) небольшое рассеяние механических свойств соединения; (6) высокая прочность на разрыв и прочность на отрыв; (7) значительное сокращение выбросов летучих органических веществ (VOC); (8) нет необходимости в использовании, приготовлении и хранении адгезивов или механических креплений; (9) нет ограничений по размеру детали и сопутствующим расходам; (10) выполнимо для любого металла; и (11) нет какого-либо утяжеления, так как не используются крепежи. Недостатки или ограничения LAMP соединения перечислены следующим образом: (1) недавно разработанные процессы и ограниченные данные исследований для комбинаций металлов и пластмасс; (2) не подходит для всех полимеров (термореактивные материалы не подходят для LAMP); (3) требуется плотный контакт между металлом и пластиком (без зазора); (4) возможно большое разнообразие геометрий деталей; (5) ограниченные экспериментальные данные о механических свойствах, усталостных свойствах, жаростойкости и других свойствах соединений, необходимых для проектирования гибридных деталей.

### **5.3 Особенности и механические свойства металлопластиковых лазерных соединений (LAMP соединения)**

Как упоминалось ранее, соединение LAMP возможно между любыми металлическими и термопластичными материалами, но не для термореактивных смол, которые не плавятся и не уплотняются. На Рис. 5.4 показан пример LAMP соединения наложением между пластиной из нержавеющей стали Тип 304 толщиной 3 мм и листом аморфного PA (полиамида; PA6) толщиной 2,3 мм. Сторона PA была обработана лазером CW Nd: YAG. Верхняя поверхность листа PA не повреждена, изображая собой гладкую поверхность. Приведенный пример LAMP соединения, которое было выполнено путем плавления термопластичной матрицы, прилегающей к границе раздела металла, хотя поверхность металла не была расплавлена. Некоторые небольшие пузырьки также присутствуют в зоне пластического плавления в результате термического разложения.

На рис. 5.5 показаны соединения, полученные при мощности лазера (P0) от 110 до 850 Вт на расфокусированном расстоянии 20 мм и скорости сварки (v) 10 мм/с. Ширина валика (сварного шва) увеличивалась с увеличением мощности лазера. В результате термического разложения внутри полимерной части LAMP соединения при мощности лазера 300 Вт образуется много пузырьков.

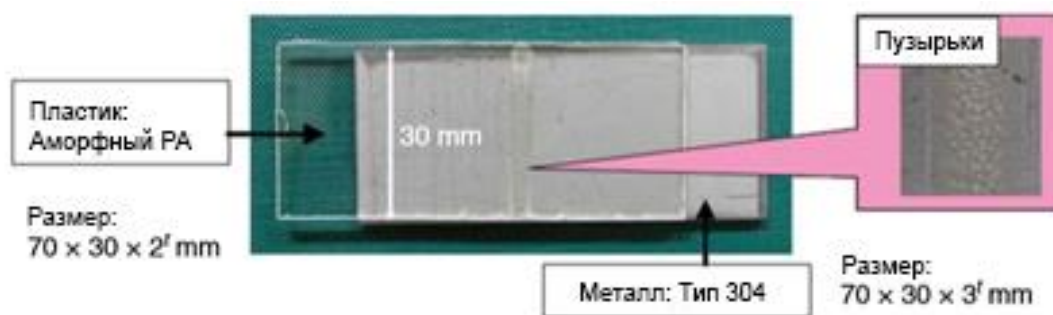


**Рис. 5.4** Поверхностные появления LAMP соединения аморфного ПА6 и листы Типа 304 сделанные с помощью лазера YAG при  $f d = 20$  и скорости сварки  $v = 10$  мм/с. Детальная картина показывает маленькие пузырьки в сварном шве.

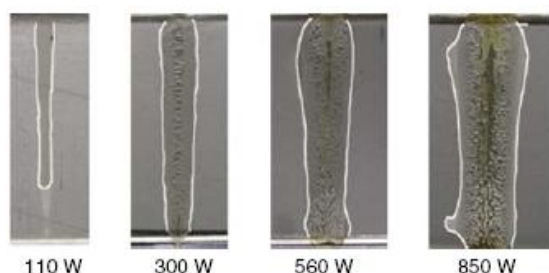


**Рис. 5.5** Влияние мощности YAG лазерного луча на выполнение сварного стыка LAMP соединений листов из аморфного ПА 6 и нержавеющей стали типа 304 . (Параметры соединения: расфокусированное расстояние,  $f d$ : 20 мм; скорость движения,  $V$ : 10 мм/с, скорость потока Ar газа: 50 л/мин)

Размер и количество пузырьков визуально увеличиваются с увеличением мощности лазера. Если мощность лазера установлена слишком высокой, в объеме расплавленного пластика образуются большие пузырьки или отверстия, что снижает механические свойства соединения.

Квазистатическая прочность LAMP соединений наложением оценена путем испытания на сдвиговое растяжение. Рис. 5.6 (a) и (b) демонстрируют примеры LAMP соединений между нержавеющей сталью типа 304 и ПА6 или PET после испытания. Трещина произошла за пределами соединяемой области в полимерной базовой пластине (рис. 5.6 (a)); в некоторых случаях окончательная трещина не возникает одновременно с пластическим сдвигом в эластичной полимерной базовой пластине (рис. 5.6(b)).

На рис. 5.7 показаны растягивающие сдвиговые нагрузки соединений LAMP между нержавеющей сталью типа 304 и аморфным ПА в зависимости от мощности лазера YAG на трех расфокусированных расстояниях. Наибольшие нагрузки получают при разрушении пластической базовой пластины при соответствующих мощностях лазера для соответствующих расфокусированных расстояний. Предельная сила сдвига в круговом направлении 2000 Н была достигнута при мощности лазера 750 Вт, с расфокусированным расстоянием 30 мм и скоростью 10 мм/с. Меньшие силы или уменьшение прочности соединений объясняются более узкими областями соединения при более низких мощностях и образованием больших пузырьков (термическое разложение) при более высоких мощностях. На рис. 5.8 показаны растягивающие сдвиговые нагрузки соединений LAMP между нержавеющей сталью типа 304 и PET, изготовленной с помощью диодного лазера с лучом в форме линии. Может быть получена разрушающая нагрузка, составляющая примерно 3000 Н, для окончательного разрушения при удлинении PET несущей плиты.

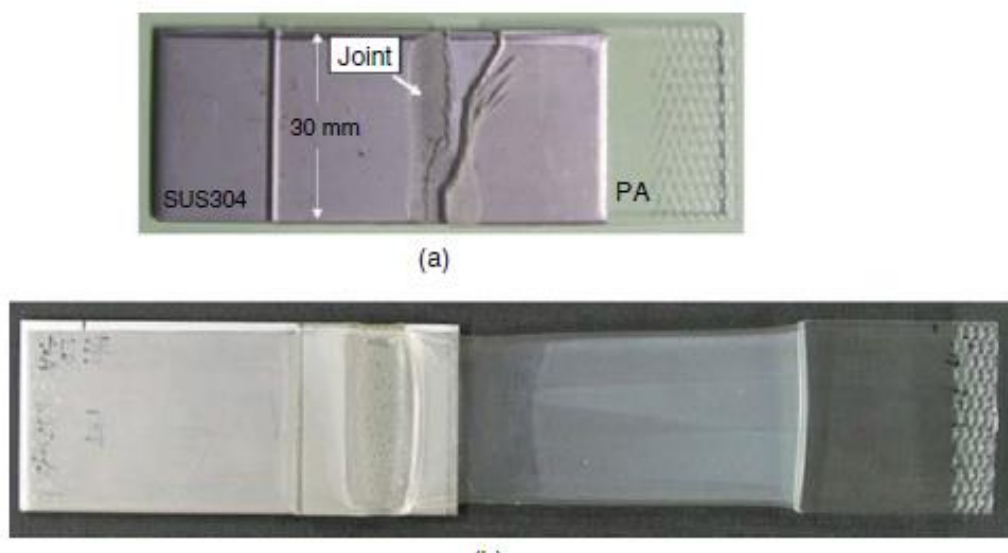


**Рис. 5.6** LAMP соединения после испытания на растяжение, показывая перелом у основания PA (a) и удлинение основания PET (b).

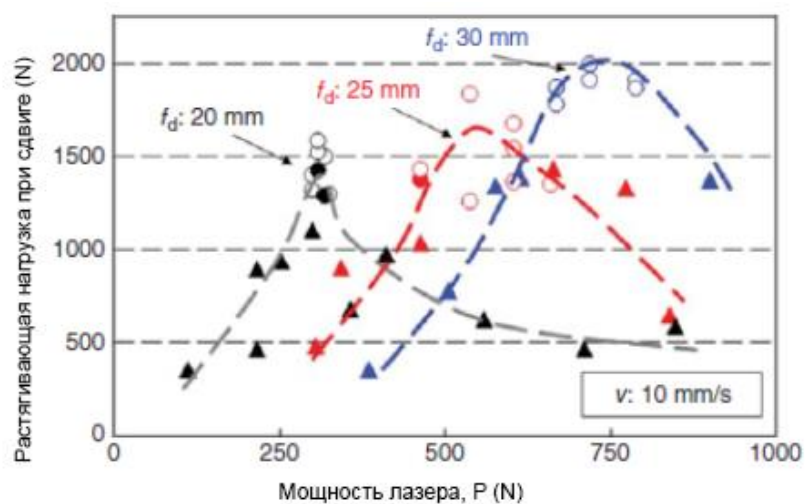


**Рис. 5.7** Влияние мощности лазера и расфокусированного расстояния на растягивающие сдвиговые нагрузки LAMP соединения между нержавеющей сталью Типа 304 и аморфный PA6 произведенный с помощью лазера YAG.



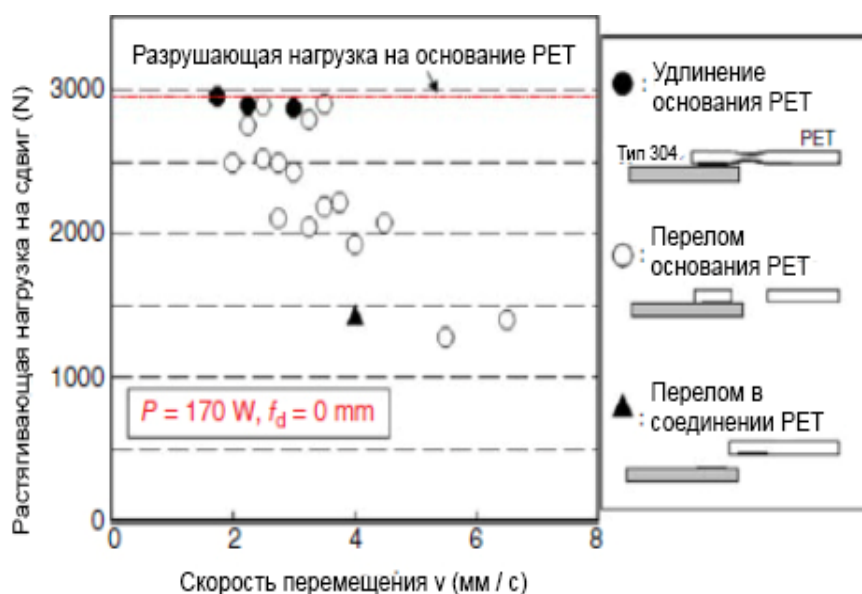


**Рис. 5.8** Влияние скорости движения на растягивающие сдвиговые нагрузки соединений LAMP из нержавеющей стали типа 304 и аморфного PET, изготовленных с помощью диодного лазера линейного луча.

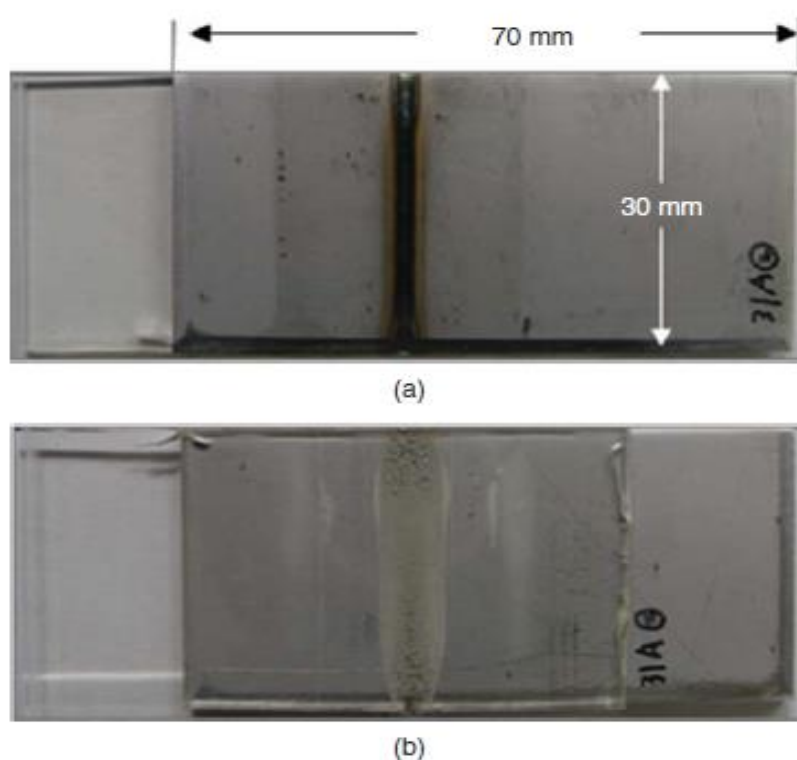


**Рис. 5.9** Внешний вид поверхности LAMP соединения материала из нержавеющей стали Типа 304 и аморфных листов PA с помощью наведения лазерного луча на металлическую поверхность, отображая частичное плавление Типа 304, частичное плавление PA ближайшего раздела (ов), и образование пузырьков в растворенном PA (b).

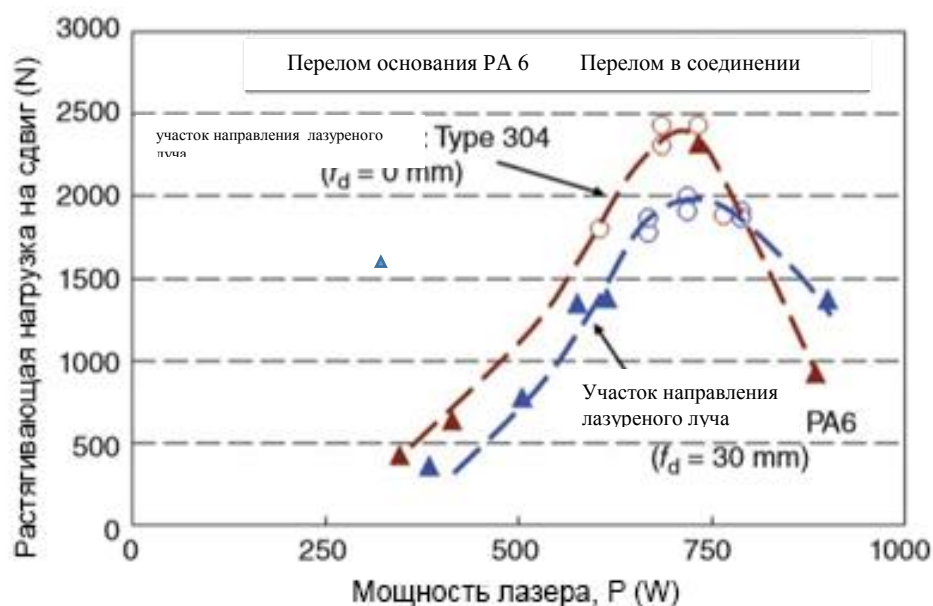


**Рис. 5.10** Эффекты направления лазерного излучения YAG и мощности лазера на растягивающей сдвиговой нагрузке LAMP соединения нержавеющей стали Типа 304 и аморфного ПА6.

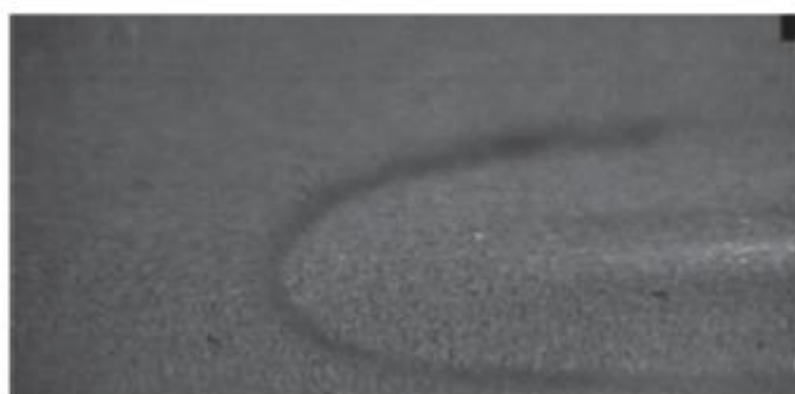
Рассматривая вариант с применением менее прозрачных полимеров, лазерный луч должен быть направлен на металлическую поверхность. На рис. 5.9 показано LAMP соединение между пластиной из нержавеющей стали толщиной 3 мм толщиной 304 и аморфным листом ПА6 толщиной 2,3 мм, полученным путем наведения волоконного лазера на поверхность металла мощностью 2 кВт, на расфокусированном расстоянии 20 мм со скоростью 10 мм/с и скоростью потока азота 40 л/мин (сопло диаметром 8 мм). Частично проникающая зона лазерного плавления образована в нержавеющей стали типа 304, и в ПА пластике присутствует зона расплава, включающая множество мелких пузырьков, которые являются неотъемлемой частью процесса соединения LAMP. На рис. 5.10 сравниваются растягивающие сдвиговые нагрузки LAMP соединений, создаваемые лазерным лучом, направленным на металлическую и пластиковую поверхность. Высокие нагрузки суставов могут быть получены путем разрушения полимерной опорной плиты при надлежащих условиях в обоих процессах. В случае ПА6, включающего 30% стекловолокна (GFRP), может быть получено соединение с максимальной нагрузкой около 4000 Н (результаты, не показанные в этой главе).

Недавние исследования в Университете Осаки [3-10] показали, что прямое соединение металлов и пластмасс с помощью лазера (LAMP) было осуществимо между некоторыми инженерными пластиками, такими как аморфный, кристаллический и аморфно-кристаллический смешанный ПА (полиамид), аморфный PET, PC, и PBT, ПА, армированные стекловолокном, и ПА и PC, армированные углеродными волокнами, и различными металлами, такими как мягкая сталь, сталь с цинковым покрытием, нержавеющая сталь типа 304, алюминиевый сплав AA 5052, титан и магний сплав.

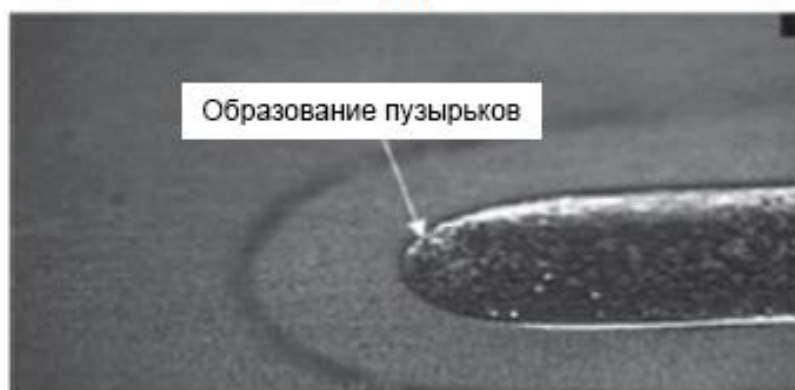
## 5.4 Механизмы выполнения LAMP (лазерная обработка металла и пластика) соединения без промежуточного слоя

Чтобы понять механизмы соединения LAMP, во время соединения были выполнены высокоскоростное видеонаблюдение и измерение температуры с использованием термопар и радиационной термометрии или пирометрии. Эти результаты представлены на рис. 5.11. При мощности лазера около 215 Вт (рис. 5.11 (а)) вокруг пятна лазерного луча наблюдались тепловые изменения, но без образования больших пузырьков. При мощности около 310 Вт (рис. 5.11 (б)) внутри и вблизи расплавленной области полимера образовались маленькие пузырьки. При 560 Вт (рис. 5.11 (с)) размер и количество пузырьков визуально увеличивались, в то время как большие пузырьки, приводящие к низкой прочности соединения, сохранялись. Кроме того, резкие газовые извержения наблюдались в виде узких линий от границы расплавленной области (рис. 5.11(с)).

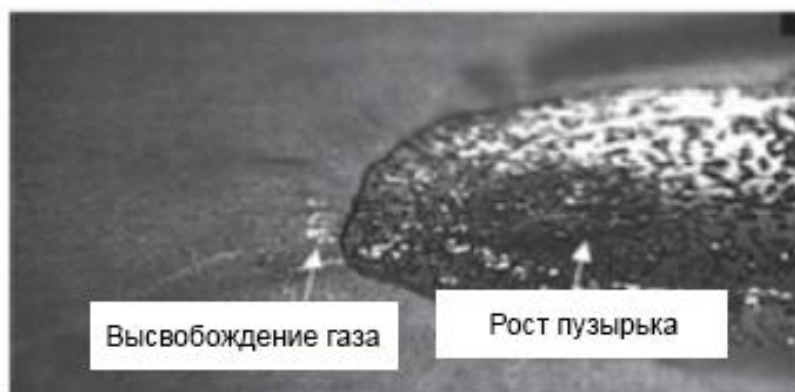




(a)



(b)



(c)

Рис. 5.11 Результаты высокоскоростного видеонаблюдения вблизи участка лазерного излучения во время LAMP соединения листа РА сложенный на плите из нержавеющей стали Типа 304: (a) мощность лазера 215 W, (b) мощность лазера 310 W, и (c) мощность лазера 560 W.

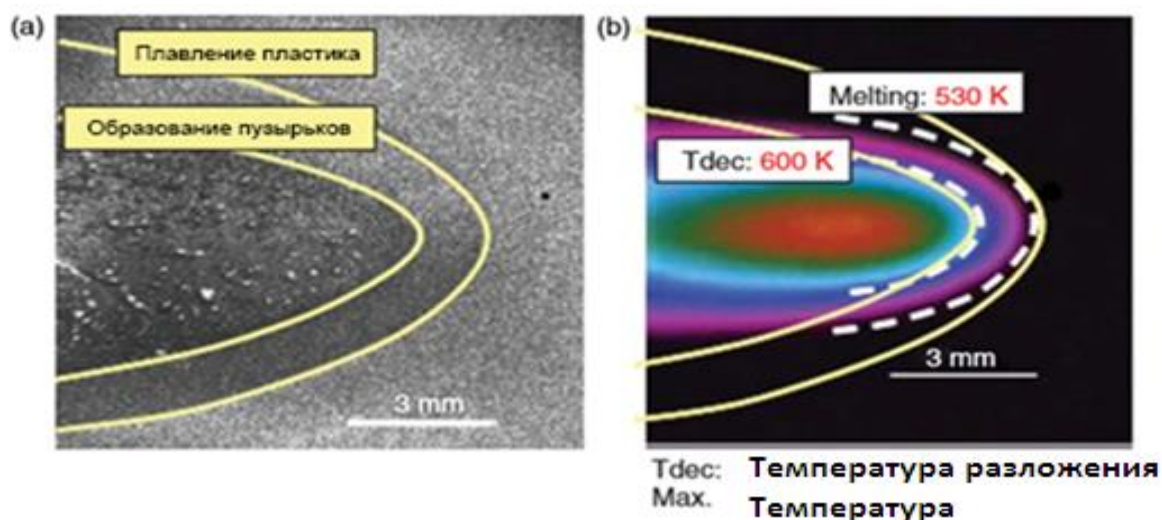


**Рис. 5.12** Результаты высокоскоростного видео и термометра нижней части плиты Типа 304 при LAMP соединении: (а) высокоскоростное изображение и (b) термометр наблюдения.

Это говорит о том, что высокое давление газа вызвано образованием пузырьков в процессе выполнения соединения. На рис. 5.12 (а) и (b) показаны примеры результатов высокоскоростной видеозаписи и термометрии нижней стороны полимера и металла при лазерном соединении (луч лазера направлен на металлическую поверхность). Во время соединения термопласт размягчается и расплавляется, и затем образуются пузырьки. Большие пузырьки вдоль центральной линии легко образуются из-за более высоких температур процесса. Линейно направляемый лазерный луч должен быть предпочтительным, чтобы предотвратить образование больших пузырьков, так как такое направление допускает быстрые скорости нагрева и охлаждения.

Состав газа внутри пузырьков исследован масс-спектрометрией в процессе просверливания пластикового листа бором диаметром 2 мм по направлению к стальной пластине под вакуумом  $7 \times 10^{-6}$  Па. Масс-спектры высвобождаемого газа измеряли Q-масс-спектрометром. Полученные результаты и состав газа приведен на рис. 5.13. Когда наконечник бора достигает области деформированного полимера, выделяется газ, загрязняя вакуум.

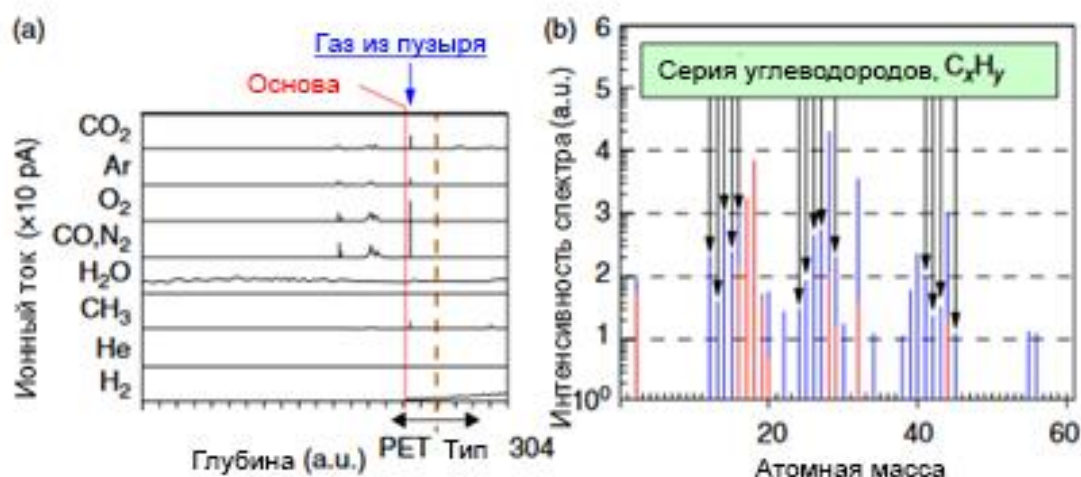


**Рис. 5.13** Результаты измерений Q-масс-спектрометром, показывающие высвобождения газов из захваченных пузырьков (а), а также составы и количество газов, выделяющихся из пузырьков и основы (b).

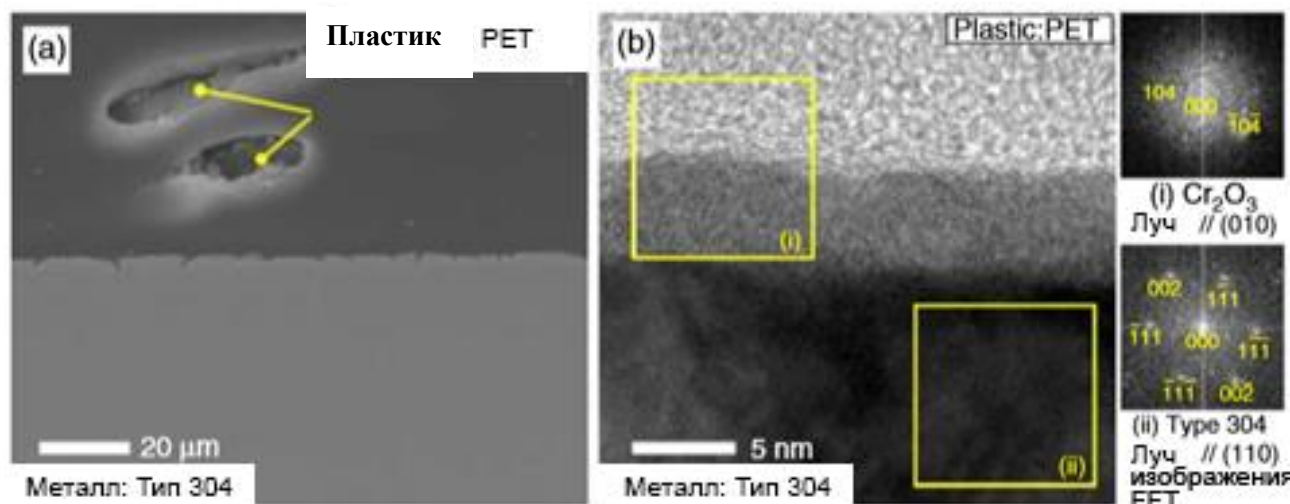


**Рис. 5.14** Наблюдения SEM и TEM и результаты анализа LAMP соединения из нержавеющей стали типа 304 и аморфного PET, изготовленного с помощью диодного лазера. а) Металлополимерная поверхность раздела с небольшими пузырьками; б) Детальный вид границы раздела металл-полимер, показывающий проникновение полимера в природную оксидную пленку, покрывающую металл.

Было подтверждено, что пузырьковые газы состояли из воздуха ( $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$ ), присутствующего в зазоре между листами перед соединением, и нескольких видов углеводородов из-за обширного разложения пластика.

Проведено наблюдение за выполнением LAMP соединений при увеличении визуализации с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM) и просвечивающей электронной микроскопии (TEM). Примеры соединения между нержавеющей сталью типа 304 и PET показаны на рис. 5.14. Изображение SEM показывает, что полимер связан по всей границе раздела с металлом, и в термопласте вблизи стыка присутствуют небольшие пузырьки (рис. 5.14 (a)). Основной металл и промежуточный слой на изображении TEM показан на рис. 5.14 (b) были идентифицированы как fcc-аустенитная фаза и пленка Cr-оксида толщиной 5 нм по дифракционным картинам соответственно. Изображение TEM демонстрирует, что металл и полимер тесно связываются на атомном или молекулярном уровнях через естественную оксидную пленку, всегда покрывающую металл. Кроме того, LAMP соединения были проанализированы с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) и масс-спектрометрии вторичных ионов по времени пролета (TOF-SIMS), чтобы подтвердить возможность химической связи. Результаты в [8] показывают, что существует возможность химической связи из-за образования металлоорганических связей, таких как  $\text{C}_6\text{H}_7\text{OCr}$ , металл-Cr-O или Cr-O в соединении LAMP.

Рис. 5.14. Результаты наблюдений и анализа SEM и TEM LAMP соединения из нержавеющей стали типа 304 и аморфного PET, изготовленного с помощью диодного лазера.

На рис. 5.15 показана фотография, полученная с помощью SEM, вблизи стыка PET и магниевых сплавов AZ91D (с углублениями или порами, полученными искусственно путем обработки поверхности). Результаты точечного анализа EDX области (1) и (2) в обработанном углублении также представлены на рисунке. Можно видеть, как расплавленный PET заполняет поры в магниевом сплаве. Поскольку EDX обнаруживает присутствие полимера в поре, это указывает на наличие высокого давления, которое вызвано плавлением полимера на поверхности металла, и, вероятно, образованием пузырьков в пластике во время выполнения LAMP соединения.

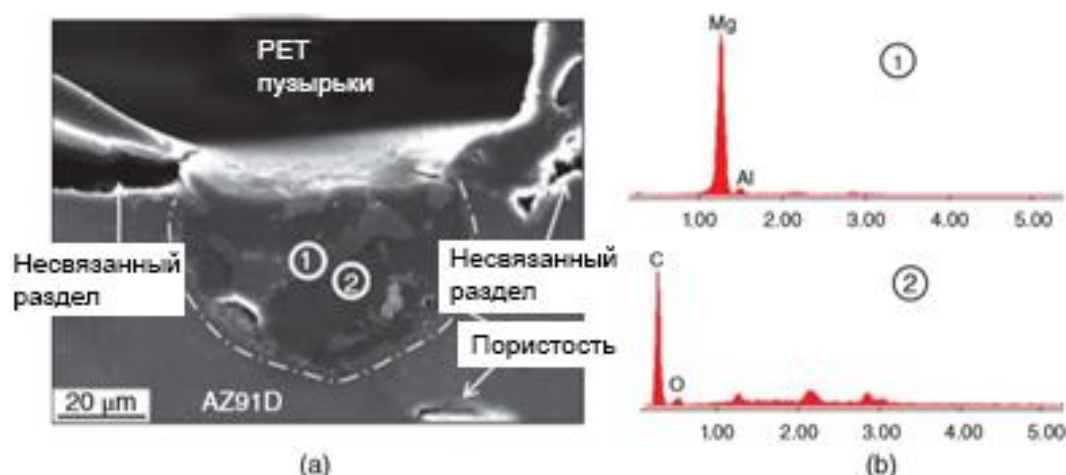


**Рис. 5.15** (а) SEM изображение LAMP соединения, выполняемого диодным лазером между механически обрабатываемой поверхностью AZ91D и аморфным PET (b) результаты EDX анализа области (а) Mg пор (а), с изображением заполнения пор расплавленным пластиком.

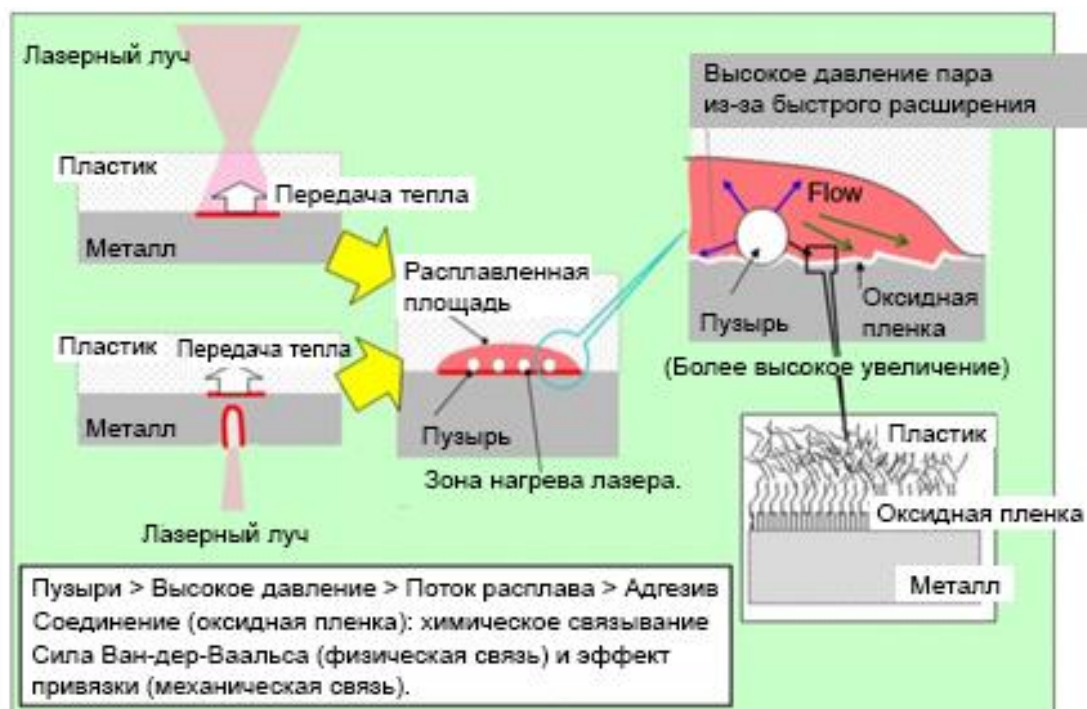


**Рис. 5.16** Схематическое изображение механизмов лазерного соединения металла и пластика без промежуточного слоя (LAMP соединения).

Из предыдущего наблюдения и исследования результатов, механизмы LAMP соединения схематично представлены на рис. 5.16. Лазерный луч направлен через прозрачный пластиковый лист или непосредственно на металлическую пластину, чтобы расплавить пластик. Термопласт расплавляется, и образуется несколько пузырьки небольшого размера за счет расширения воздуха или частичного разложения расплавленного полимера. Материал активно расплавляется и под действием температуры течет по поверхности металла. Расплавленный полимер заполняет поры и связывается с оксидной пленкой. Следовательно, прочные LAMP соединения могут быть получены с помощью эффекта якоря (механического сцепления), а также силы взаимодействия Ван-дер-Ваальса и химического соединения.



## 5.5 Испытания надежности системы

Испытание герметичности выполнено для соединений материалов: нержавеющей стали типа 304 и PET LAMP соединений, выполненных линейным диодным лазером. Схематические и фактические процедуры и результаты измерений показаны на рис. 5.17. В результате было подтверждено, что LAMP соединения устойчивы к утечке, несмотря на наличие эффекта барботирования. Это означает наличие области плотного связывания.

Выполнено испытание стойкости к тепловому циклу LAMP соединений. Образцы, показывающие максимальную прочность на срез при растяжении LAMP соединений между PET и нержавеющей сталью, изготовлены с диодным лазером мощностью 170 W, со скоростью сварки 3 мм/с. Условия испытаний и внешний вид образцов после испытания в тепловом цикле и результаты испытания на срез при растяжении показаны на рис. 5.18. Температура находилась в диапазоне от -40 °C (233 K) до 40 °C (313 K) с одночасовым периодом между изменением. Циклы повторялись 25 и 50-кратно, для которых, соответственно, использовали по три и тринадцать образцов.

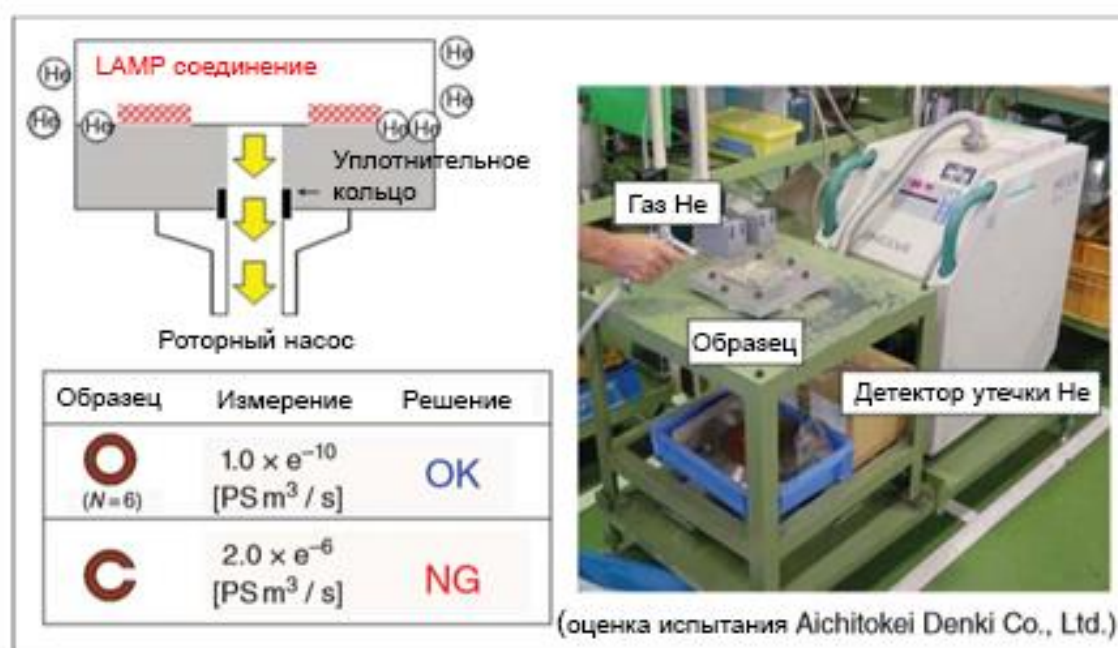


**Рис. 5.17** Схематическое и фактическое изображение процедуры испытания на герметичность и результатов измерения для LAMP соединения. (Запись: Решение «OK»: соединение прошло испытание; Решение NG: соединение не прошло испытание). (Предоставлено Aichitokei Denki Co., Ltd.).

После испытания в тепловом цикле образцы испытывали при растягивающем сдвиговом нагружении и сравнивали с теми, которые были до испытания в тепловом цикле. Полученные образцы делятся на три группы в соответствии с условиями присоединения. Следовательно, некоторые LAMP соединения могут противостоять тепловым циклам, где области соединения все еще присутствуют и растягивающие сдвиговые нагрузки достигают более 2700 Н. С другой стороны, растягивающие сдвиговые нагрузки других групп образцов уменьшаются в зависимости от областей соединения, оставшихся после тест теплового цикла.

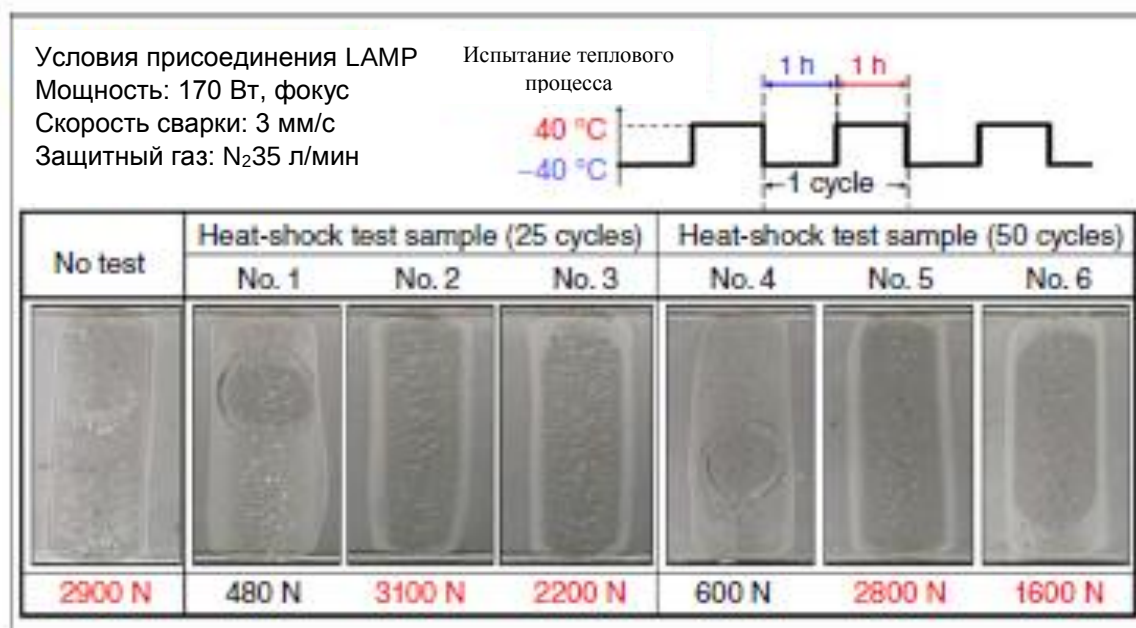


**Рис. 5.18** Результаты испытаний теплового удара LAMP соединения: н/с Типа 304 и PET. (разрушающая нагрузка перед испытанием на ударную нагрузку: 2900 Н).

## 5.6 Развитие технологии выполнения LAMP соединения

Лазерная сварка или соединение разнородных металлов, соединенных промежуточным полимерным слоем, осуществлялась с использованием технологии LAMP соединения. Процесс получения соединения из мягкой стали с алюминиевым сплавом с промежуточным слоем из PET показан на рис. 5.19. Первый этап сварки разнородных металлов выполнялся LAMP соединением между PET и мягкой сталью лазерной сваркой боковой поверхности пластика, а второй этап выполнялся между AA 5052 и PET лазерной сваркой металлической поверхности. Высокая предельная нагрузка более 5000 Н была достигнута, как показано на рис. 5.20. Одним из преимуществ этой геометрии LAMP соединения по сравнению с соответствующими разнородными сварными швами является возможное улучшение коррозионной стойкости между различными металлами благодаря использованию промежуточного слоя PET.

Различное соединение наложением между пластиной из нержавеющей стали типа 304, стальным листом с покрытием Zn или листом из алюминиевого сплава AA 5052 и листом из углепластика можно получить путем наведения дискового лазера на пластину из нержавеющей стали типа 304 (результаты не приведены в этой главе).

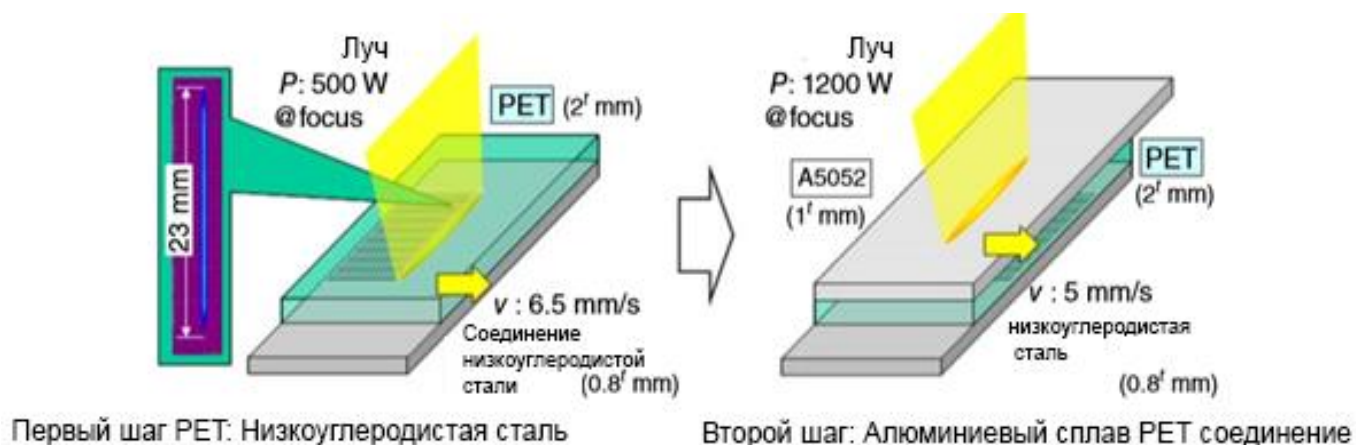


**Рис. 5.19** Схема выполнения соединения разнородных материалов: нержавеющая сталь Типа 304 и листы AA 5052 с промежуточной PET пластиной.

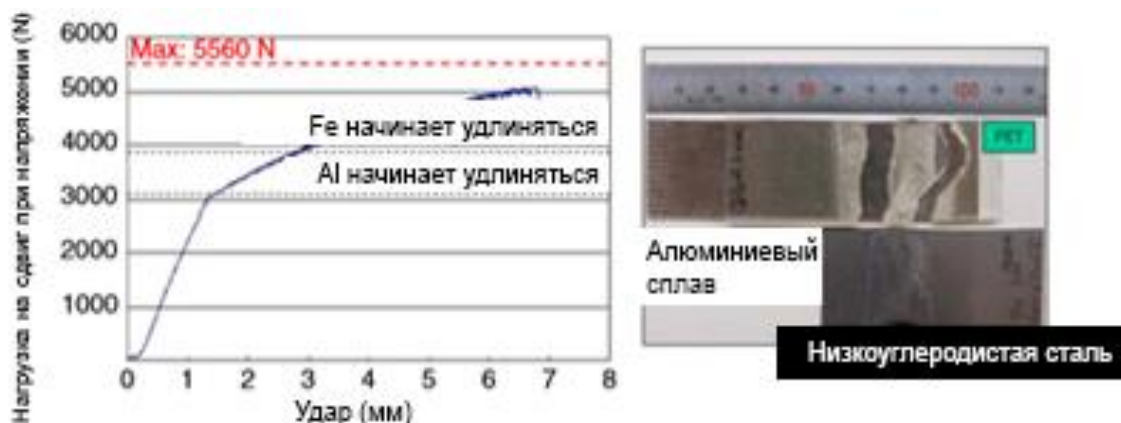


**Рис. 5.20** Результаты механических испытаний (кривая напряжения- сдвиговое напряжение) и сломанный образец листа из разнородного материала: нержавеющей стали Типа 304 и листов AA5052 с промежуточной PET пластиной.

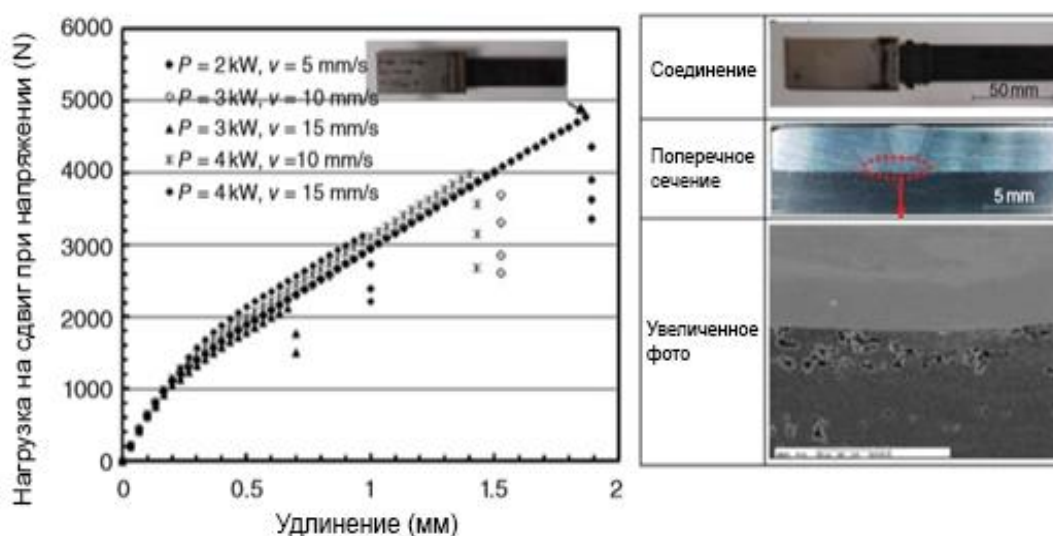


**Рис. 5.21** Результаты испытаний на растяжение при сдвиге Типа 304 из нержавеющей стали и листов CFRP LAMP соединения (а), и пример образца, поперечное сечение шва, и увеличенное фото возле стыка, показывающее пузыри в CFRP (б).

Результаты испытаний на растяжение при сдвиге, образец и поперечные сечения соединения показаны на рис. 5.21 для нержавеющей стали Типа 304 - CFRP соединений толщиной 3 мм и шириной 20 мм. Как правило, высокая механическая прочность была достигнута. Окончательный перелом произошел в опорной плите CFRP, где также присутствовали захваченные пузырьки газа. Некоторые соединения были очень прочными, в зависимости от областей соединения в соответствии с условиями соединения установки. Предельная сила сдвига при растяжении достигла 4770 N в образце шириной 20 мм. 3000 N нагрузки могли быть достигнуты для соединения толщиной 3 мм пластины CFRP и стали покрытой цинком толщиной 0.7 мм или листом алюминиевого сплава толщиной 1 мм. Таким образом, было подтверждено, что могут быть получены высокопрочные соединения CFRP и металла.

## 5.7 Выводы

В этой главе мы продемонстрировали и описали новый метод лазерного прямого соединения (LAMP) для металлополимерных гибридных конструкций. Практически любой



металлический сплав можно напрямую соединить с инженерными термопластами, включая композитные листы GFRP and CFRP. LAMP соединения с высокой квазистатической прочностью могут быть выполнены при соблюдении надлежащих технологических параметров или условий выполнения соединения. Термическая деградация и воздушно-расширенные пузырьки присутствуют в расплавленном пластике. Однако соединения с мелкими пузырьками прочны и долговечны при квазистатической нагрузке. В ближайшем будущем промышленное применение лазерного соединения металла и пластика (LAMP соединение) без промежуточного слоя адгезива можно видеть в отношении легковесных конструкций.

## Литература

- 1 O'Brien, R.L. (1991) Welding Handbook Welding Process, 8th edn, AWS, Miami, FL.
- 2 Kedward, K.T. (1981) Joining of Composite Materials, ASTM, Philadelphia, PA.
- 3 Katayama, S., Kawahito, Y., Tange, A., and Kubota, S. (2006) Laser-assisted mcoавтор and plastic (LAMP) joining. Online Proceedings of LAMP, May 16–19, 2006, #06-7.
- 4 Kawahito, Y., Tange, A., Kubota, S., and Katayama, S. (2006) Development of direct laser joining for mcoавтор and plastic. Congress Proceedings of ICALEO 2006, LIA, Scottsdale, Paper#604, (CD), 376–382.
- 5 Niwa, Y., Kawahito, Y., Kubota, S., and Katayama, S. (2007) Development and improvement in laser direct joining of mcoавтор and plastic. Proceedings of ICALEO 2007, LIA, Orlando, 461–470.
- 6 Katayama, S., Kawahito, Y., Niwa, Y., and Kubota, S. (2007) Laser-assisted mcoавтор and plastic joining. Proceedings of LANE 2007, 41–51.
- 7 Niwa, Y., Kawahito, Y., Kubota, S., and Katayama, S. (2008) Evolution of LAMP joining to dissimilar mcoавтор welding. Proceedings of ICALEO 2008, LIA, Temecula, 311–317.
- 8 Katayama, S. and Kawahito, Y. (2008) Laser direct joining of mcoавтор and plastic. Scr. Mater., 59 (12), 1247–1250.
- 9 Wahba, M., Kawahito, Y., and Katayama, S. (2011) Laser direct joining of AZ91D thixomolded Mg alloy and amorphous polyethylene terephthalate. J. Mater. Process. Technol., 211, 1166–1174.
- 10 Jung, K.-W., Kawahito, Y., and Katayama, S. (2011) Laser direct joining of carbon fibre reinforced plastic to stainless steel. Sci. Technol. Weld. Joining, 16 (8), 676–680.

## **Часть II**

**Процессы соединений на основе  
механической блокировки**

## 6 Принципы выполнения механической блокировки структурных компонентов

Carlos E. Chaves, Diego J. Inforzato, и Fernando F. Fernandez  
Embraer S.A., São José dos Campos, São Paulo, Brazil

### 6.1 Введение

Глава начинается с одного из первых вопросов, которые возникают по механическому креплению: «почему детали должны быть механически скреплены?» Ответ на этот вопрос прост и очевиден: потому что некоторые детали могут достичь определенной функциональности только тогда, когда скреплены друг с другом. Тем не менее, существует несколько причин, по которым детали должны изготавливаться отдельно, а затем соединяться друг с другом, и мы можем привести некоторые из них:

*Техническая осуществимость:* некоторые свойственные ограничения в производственном процессе, такие как размеры оборудования и сырья, не позволяют изготавливать детали до их первоначального желаемого размера, поэтому это заставляет всю эту деталь изготавливаться в виде подкомпонентов меньших размеров, прежде чем они не составят окончательную сборку (например, катаные листы для изготовления сегментов всего фюзеляжа самолета);

*Относительное движение:* чтобы детали подвергались относительному смещению и движению (например, приводы летательных аппаратов со штоками и подшипниками);

*Вмещающие компоненты:* чтобы можно было собирать детали в отсеках (например, двигатели с внутренними компонентами, а также с относительным движением);

*Сборочный состав:* разрешить объединение деталей из различных видов материалов и технологий в один конечный продукт (например, электронные устройства, металлы, керамика, пластмассы и т. д.);

*Структурные требования:* удовлетворять определенным требованиям, например, налагая ограничения на рост трещин (например, панели обшивки крыльев с перегородками, чтобы избежать распространения трещин);

*Доступность:* разрешить временный доступ к конкретному закрытому отсеку (например, смотровым дверям в конструкции самолета).

Необходимость соединения для получения новой детали со специфической функциональностью возникала уже в древние времена, когда люди создавали грубые инструменты из камня и древесины.

Первые металлические крепежи относятся к эпохе бронзы, когда изготавливали грубые гвозди для крепления дерева.

С тех пор концепции и устройства механического крепления ушли далеко вперед и в современных промышленных условиях соединение с помощью крепежных элементов является широко распространенным.

В собранном автомобиле имеются сотни винтов и болтов для механического крепления деталей двигателя, подвески, рулевого управления и всех систем автомобиля. Типичный автомобиль может иметь в среднем 1500 болтов и винтов. В современных авиационных конструкциях применяемые термообработываемые алюминиевые сплавы не демонстрируют хорошую свариваемость плавлением - еще одна причина широкого использования крепежных деталей. Например, в реактивном самолете должно быть более сотни тысяч заклепок, винтов, болтов и другого оборудования, участвующего в механическом креплении конструкций крыла, опор, фюзеляжа, шасси, гидравлической системы, топливной системы, воздушной системы, и так далее. Типичный региональный самолет может иметь более 400 000 креплений. Для более крупных самолетов это число может достигать нескольких миллионов. Другим символическим примером является Эйфелева башня с более чем двумя с половиной миллионами заклепок в ее железной структуре.

В промышленности существует много видов процессов соединения. Например, сварка плавлением является своего рода процессом, рекомендуемым для постоянного соединения (металл-металл), демонстрирующим хорошую свариваемость плавлением. Относительно новые процессы, такие как фрикционная сварка и деривации, не зависят от свариваемости плавлением и могут удовлетворить потребность в соединении разнородных материалов, практически не свариваемых обычными методами сварки плавлением.

В этой главе основной целью нашего пересмотра является механическое крепление в авиационной промышленности, что означает соединение деталей с использованием крепежных элементов для сборки самолета и связанных с ними концепций. Эта глава в основном посвящена механическому поведению скрепленных конструкций. В нем также рассматриваются совместные концепции конструкционных конструкций и пересматриваются коррозионные свойства и основные свойства материала крепежа для механически скрепленных конструкций.

## 6.2 Общее конструктивное исполнение соединения

Соединения обычно интерпретируются как самая слабая часть конструкции по сравнению с соединяемыми компонентами или деталями, и по этой причине они обычно заслуживают особого внимания с точки зрения статической прочности, а также усталости, сопротивления росту трещин, и иногда устойчивость к динамическим нагрузкам. Чтобы обеспечить безопасную и оптимальную конструкцию, соединения часто подвергаются более детальному анализу по сравнению с другими компонентами и дополнительным испытаниям для проверки их структурной целостности и долговечности, а также для корреляции с данными анализа. Кроме того, когда экспериментальные данные недоступны, конкретные конструктивные факторы часто применяются для соединения компонентов.

Выбор соединения зависит от применения конструкции, геометрии и условий нагружения. Производственные процессы и требования к техническому обслуживанию также должны быть приняты во внимание. Что касается технического обслуживания, некоторые соединения рассчитаны на сборку и разборку, в то время как для других необходимо обеспечить, чтобы после их сборки во время изготовления их свойства (такие как зажим, затяжка крепежа, натяжение и т. д.) оставались неизменными в течение длительного времени. периоды без обслуживания.

Большинство аэрокосмических конструкций все еще полагаются на механическое крепление, в то время как в гражданских и морских применениях широко используется сварка. Некоторые конструкционные детали соединяются посредством клеевого соединения (например, когда один или оба элемента соединения изготовлены из неметаллических материалов), и были найдены некоторые комбинации клеевого соединения и крепления с целью обеспечения определенного уровня избыточности.

Для всех типов конфигураций соединений соединяемые материалы могут быть одинаковыми или разными, в зависимости от назначения конструкции. Примеры разнородных материалов включают соединения различных металлических сплавов и гибридные соединения металл-композит - клепаные, сварные или склеенные соединения. Обычно, когда соединяются разные материалы, необходимо соблюдать все аспекты конструкции, связанные с подобными материалами, и другие проблемы, которые могут возникнуть из-за различий. Некоторыми примерами конструктивных соображений для соединений разнородных материалов являются тепловые нагрузки (когда оба материала имеют разные коэффициенты расширения) и коррозия на границе раздела материалов (когда материалы имеют разные гальванические свойства).

Соединения могут работать, подвергаясь растяжению, изгибу, сдвигу или комбинации этих нагрузок. Даже когда дистанционная нагрузка представляет собой натяжение, если между соединенными частями имеется некоторая степень эксцентриситета, локально произойдет так называемый вторичный изгиб, влияние которого, в частности, на поведение при усталости соединений, будет рассмотрено далее в этой главе.

На рис. 6.1 показаны некоторые примеры сдвиговых и натяжных соединений. Сдвиговые соединения делятся на соединения наложением и стыковые соединения, а также могут быть разделены на конфигурации с одним или двумя сдвигами (рис. 6.1 (a) и (b)). Натяжные соединения могут подвергаться только растягивающим нагрузкам

(симметричным) и растягивающим и изгибающим нагрузкам (несимметричным) (Рис. 6.1 (c) и (d)).

## 6.3 Соединение наложением

### 6.3.1 Виды повреждений (отказа)

Как и большинство конструктивных элементов, соединения рассчитаны на статические и динамические нагрузки. В идеале, для соответствующей калибровки, нагрузка и условия окружающей среды должны быть хорошо поняты.

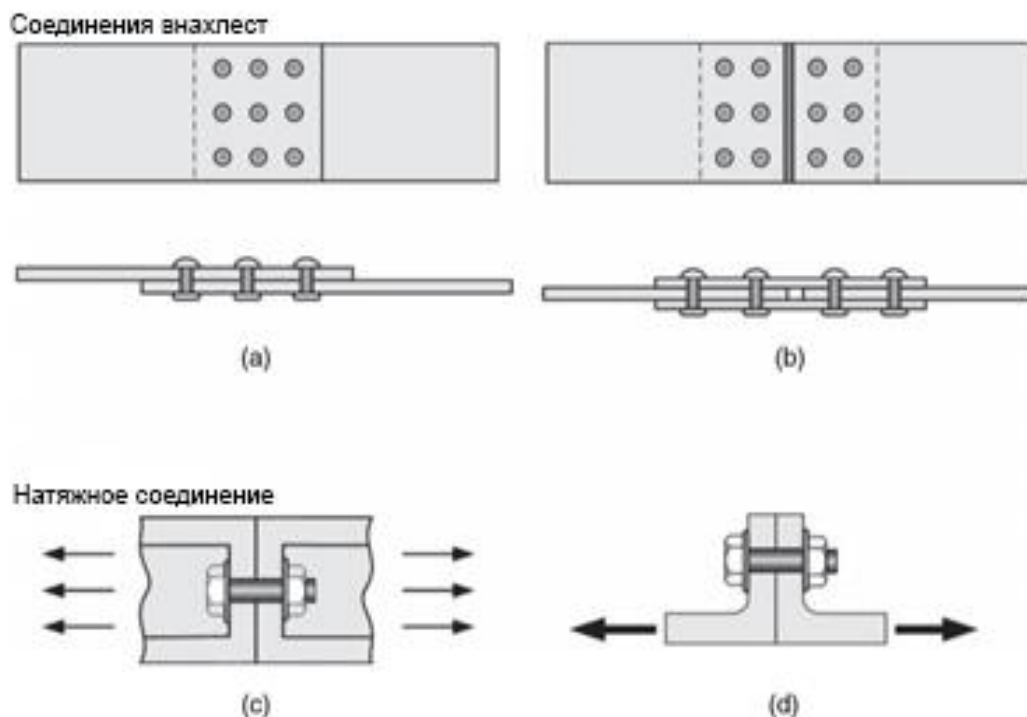


**Рис. 6.1** Типы соединения (общее). (a) Лап соединение, односрезное; (b) стыковое соединение, двухсрезное; (c) осевое (без изгиба); (d) напряжение и изгиб

Для статической нагрузки, скрепленные соединения могут выйти из строя из-за сдвига крепежа и отверстия подшипника, сдвига пластины и натяжения пластины. Эти четыре вида отказа схематично изображены на рис. 6.2. Если срыв крепления и расхождение шва можно легко спрогнозировать простым методом расчета, на основе допустимых пределов прочности материала (например, осадка и разрыв), то смещение по отверстию является более сложным видом повреждения, и допустимые пределы, как правило, определяются экспериментальным методом. Также, как видно на рисунке, смещение по отверстию может иметь смешанный вид с некоторым изгибом пластины, таким образом крепление выпадает из зажима. Допустимые показатели крепежных отверстий, применительно к различным материалам, приведены в таблицах [2] и [3,4] вместе с допустимыми комбинациями типовых крепежных элементов и материалов пластин, используемых в аэрокосмической промышленности.

Даже соединения одинаковым типом и размером крепежа могут подвергаться различным видам разрушения, в зависимости от толщины пластины, шага крепежа и расстояния до края. Например, увеличение толщины пластины отвечает за переходы от

опоры крепежа к сдвигу и от срывов плиты к отказам натяжения плиты. Расстояние от отверстия для крепежа до края пластины (в любом направлении) также является важным параметром конструкции, и в конструкции самолета обычно рекомендуются расстояния до краев, превышающие диаметр отверстия в два раза.

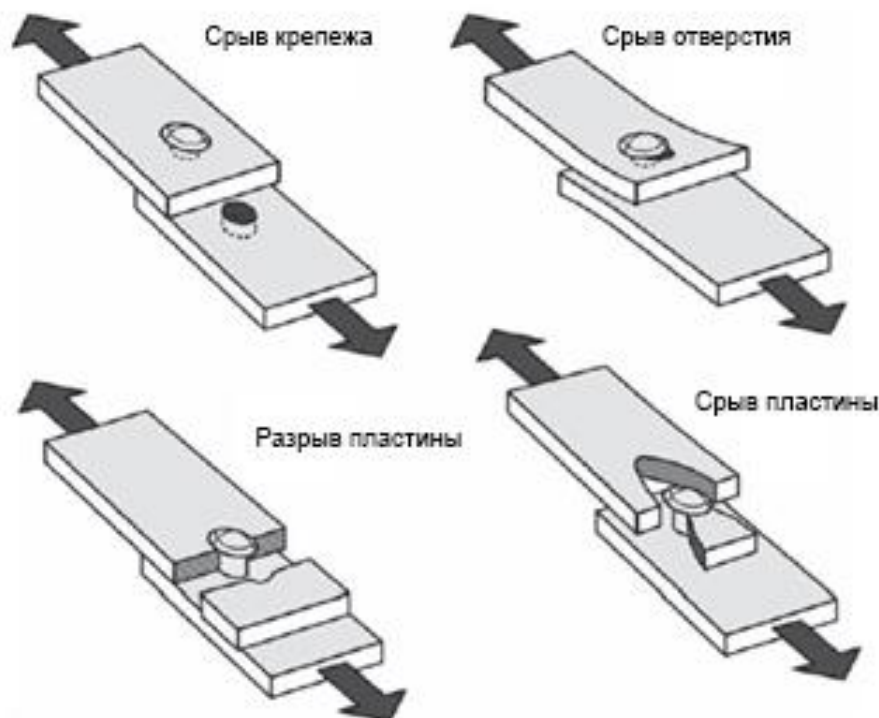


**Рис. 6.2** Виды статического разрушения в соединениях (Источник: Адаптировано из Rijck 2005 [1]).

Помимо статического разрушения из-за предельных нагрузок, наиболее важной проблемой, наблюдаемой в механически закрепленных соединениях, является разрушение из-за усталости. Когда соединение подвергается циклической нагрузке в течение длительного периода, могут развиваться небольшие трещины на краях отверстий и распространяться в направлении соседних отверстий (например, в металлических конструкциях). По сравнению со статическим отказом повреждение из-за усталости интенсивно изменяется и зависит от других аспектов, таких как обработка отверстий, помехи и обработка поверхности пластины. К счастью, в настоящее время существуют различные инженерные методы для прогнозирования зарождения трещин и решения проблемы распространения трещин в механически скрепленных соединениях, такие как аналитические и численные подходы, которые будут дополнительно обсуждаться в этой работе.

Все виды отказов для скрепляемых соединений в первую очередь связаны с передачей нагрузки. Нагрузка, которая передается от одного элемента к другому, может быть разделена на две части: (1) нагрузка, которая проходит через элементы, обычно называемая обходной нагрузкой; и (2) нагрузка, которая эффективно передается от одного элемента к другому через крепежные детали, которые называются нагрузкой на крепежное отверстие. В то время как первые два вида повреждений на рис. 6.2 (срыв крепежа и отверстия), связаны с высокой нагрузкой на крепежное отверстие, два других вида отказа (сдвиг пластины и натяжение) связаны с высокими обходными нагрузками.

Скрепленный шов или стыковое соединение, как правило, внешний ряд, наиболее нагружено, и, следовательно, в первую очередь подвержено повреждению. На рис. 6.3 (в качестве гипотетического примера) показано соединение наложением с крепежами в три ряда.

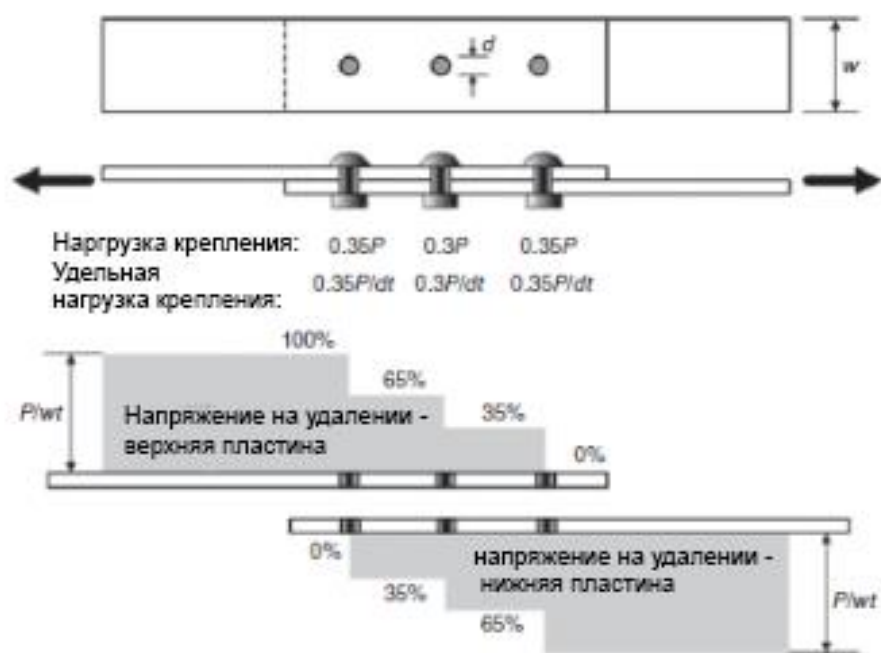


**Рис. 6.3** Перенос нагрузки через закрепленный сдвиг с наложением заклепок в три ряда.

В верхнем левом ряду нагрузка на отверстие составляет 35% от общей нагрузки, а обходная нагрузка - 100%. Сразу после этого во втором ряду нагрузка на отверстие составляет 30% от общей нагрузки, и обходная нагрузка становится 65% от удаленной нагрузки. Следовательно, верхнее левое и нижнее правое отверстие максимально опорные с максимальной обходной нагрузкой, и в этих точках наиболее подвержены повреждениям.

Соединение обычно становится несбалансированным, когда толщина пластины постоянна, а тип и размеры крепежа одинаковы для всех крепежей; или, другими словами, величина несущей и переходной нагрузки, которая проходит через каждый ряд крепежных элементов, будет различной. Степень дисбаланса становится выше, пока увеличивается количество рядов. Многие параметры конструкции могут быть изменены для получения сбалансированного соединения. Увеличение диаметра крепежа влияние на подшипник, потому что будет лучшее распределение напряжений вокруг отверстия крепежа, как только напряжение подшипника  $S_b$  данное  $S_b = P_b/dt$  (где  $P_b$  это нагрузка на подшипник,  $d$  это диаметр, и  $t$  это толщина плиты). Если крепежные элементы слишком жесткие по сравнению с элементами, они не позволят равномерно распределить нагрузку, и, когда это возможно, желательно использовать более гибкие крепежные элементы.

Кроме того, чтобы обеспечить лучшее распределение напряжения при обходе, наиболее распространенной практикой проектирования является увеличение или уменьшение полезной площади элементов. Увеличение площади нетто увеличивает жесткость поперечного сечения, и при условии, что каждая секция работает как упругая пружина, жесткость которой определяется  $k = AE/L$  (где  $A$  это площадь поперечного сечения,  $E$  это модуль упругости, а  $L$  это длина сечения), становится ясно, что если  $A$  увеличивается, жесткость увеличивается, и, как следствие, величина нагрузки, передаваемой через этот участок, будет выше. Следовательно, конические соединения или ступенчатые соединения являются обычной практикой проектирования для обеспечения лучшего распределения нагрузки.

Можно лучше понять влияние байпасных нагрузок на концентрацию напряжений вокруг отверстий крепежа глядя на окрестность крепежа на рисунках 6.4 и 6.5. Как показано на рис. 6.4, пластинчатые элементы создают растягивающие, изгибающие и концентрированные нагрузки на подшипники в крепежных деталях. В то время как влияние подшипника приводит к концентрациям напряжений в местах 1-5, обходная нагрузка более конкретно влияет на место 5, которое обычно является областью, где возникнут



усталостные трещины. На рис. 6.5 схематически показаны профили напряжений из-за удаленной растягивающей нагрузки, удаленного изгиба и локальной нагрузки штифта.

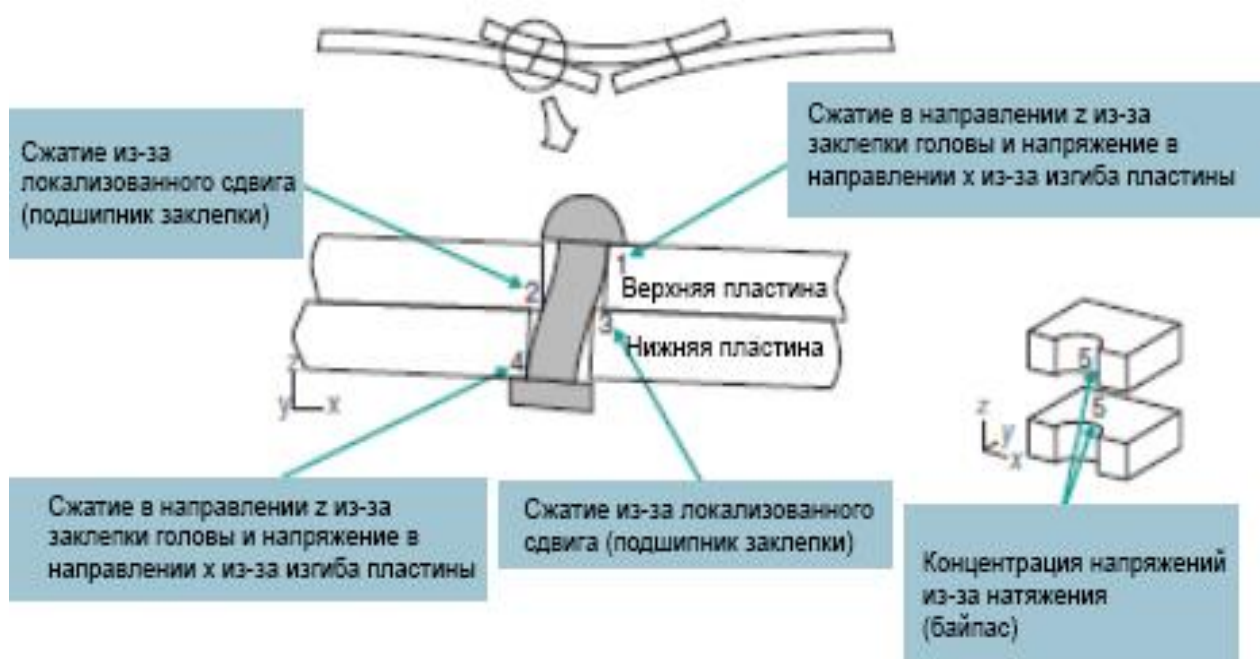


**Рис. 6.4** Концентрация напряжений вокруг отверстий крепежа - влияние опорных и обходных нагрузок.

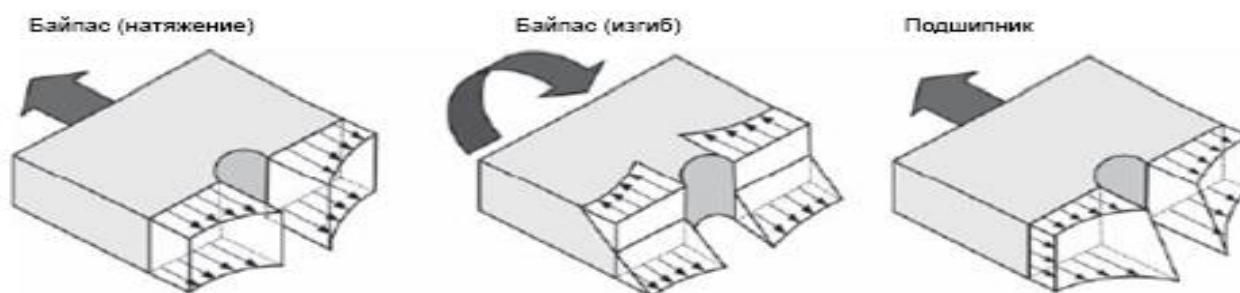


**Рис. 6.5** Профили напряжения (схема) для различных условий удаленной нагрузки.

Суперпозиция напряжений приводит к фактическому профилю напряжения в результате для реального соединения, где обычно существуют эти три усилия. Кроме того, концентрация напряжений, обусловленная каждым условием, может быть получена отдельно, и результирующий коэффициент концентрации напряжений  $K_t$  достигается вокруг отверстия.

Существуют различные способы расчета величины передачи нагрузки, нагрузки на подшипник на каждом крепежном элементе, напряжения на элементах, коэффициентов концентрации напряжений и параметров механики разрушения. Эти темы будут обсуждаться в следующем разделе.

### 6.3.2 Модели для анализа и измерения соединения

Соединения могут быть смоделированы с помощью различных методов и уровней детализации, а концепция иерархического моделирования [5] может быть полезной для надлежащего моделирования и понимания совместного поведения. В таблице 6.1

показаны средства для моделирования металлического кольцевого соединения фюзеляжа самолета в соответствии с результатами, ожидаемыми в результате анализа. Первый аналитический подход [6], в котором учитываются только жесткости заклепок и пластин, позволяет оценить величину передачи нагрузки в каждом ряду крепежных элементов. Эта информация важна в основном для статического анализа. Помимо прямого сравнения с допустимым крепежом, он позволяет приблизительную оценку усталостного ресурса [4]. На шаг вперед - использование теории упругих линий для оценки уровней напряжений компонентов соединения [7], где применение этой теории для расчета изгибающего напряжения в балках показало удивительно точные результаты по сравнению с экспериментальными измерениями.

**Таблица 6.1** Иерархическое моделирование для анализа соединения наложением.

| Тип модели            |                                                                               | Цель                                                                                                                | Примечания     |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Аналитические модели  | Модель с пружинами<br>модель нейтральной линии                                | Передача нагрузки<br>Передача нагрузки +<br>распределение напряжения                                                | Легко и быстро |
| Цифровые (FEM) модели | Элементы стержня(пластины) и                                                  | Передача нагрузки                                                                                                   | Легко и быстро |
|                       | Элементы пластины (пластины) и                                                | Передача нагрузки +<br>распределение напряжения                                                                     | Включает изгиб |
|                       | Твердые элементы (пластины) и элементы пружины и стержня (закрепители)        | Передача нагрузки,<br>распределение напряжения,<br>концентрация напряжения,<br>коэффициент интенсивности напряжения | Включает изгиб |
|                       | Твердые элементы (пластины) и Твердые элементы (закрепители), включая контакт | Более точные результаты для концентрации напряжения и коэффициента интенсивности напряжения стресса                 | Времязатратный |

В таблице 6.1 также представлены различные способы оценки совместного структурного поведения с использованием метода конечных элементов (FEM). В то время как модели с пластинчатыми элементами для соединяемых деталей и пружинными элементами для крепежа позволяют понять поля напряжений и величину передаваемой нагрузки, когда требуется оценка концентрации напряжений вокруг отверстий крепежа для дальнейшего подробного анализа механики усталости и разрушения, численная модель с твердыми элементами, трением и контактом является предпочтительной. На рис. 6.6 показан пример подробной модели FEM, используемой для оценки концентрации напряжений вокруг нагруженных отверстий в сдвиговом соединении фюзеляжа. Контакт между отверстием и поверхностями крепежа из-за подшипника приводит к более высокой концентрации напряжений, которые наблюдаются в модели.

Модели для анализа механики разрушения требуют вычисления полей напряжений, деформаций и смещений для получения параметров движущей силы трещины, таких как коэффициент интенсивности напряжений  $K$ . Модели обычно соответствуют сквозным трещинам или угловым трещинам, которые возникают в местах, где пик значения напряжений наблюдается при статическом анализе FEM или тестах. Моделирование роста трещины, хотя оно следует основным законам механики разрушения, не является очевидной задачей, и сложность анализа может быть объяснена следующими причинами:

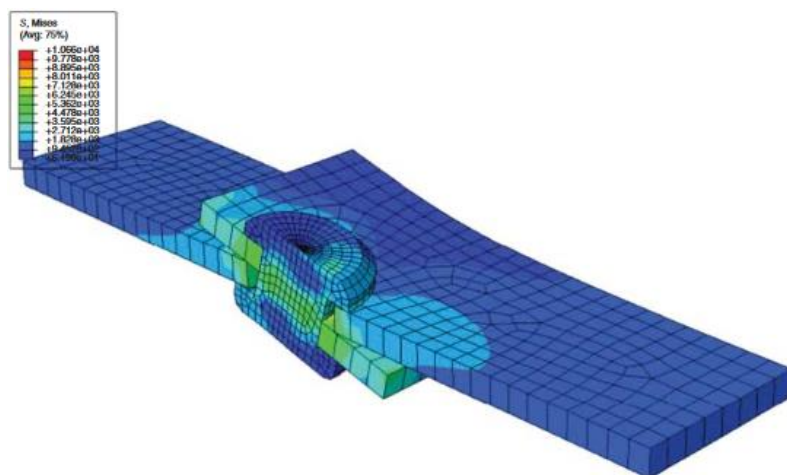


**Рис. 6.6** Детализация FEM анализа: модель твердотельных элементов конструкции, соединение верхней и нижней пластины, и соединение крепежного элемента в отверстие.

(1) Существует множество возможных сценариев зарождения и распространения трещин, включая переход геометрии из угла в сквозную трещину, влияние смежных трещин, отверстий и границ, а также так называемое продолжающееся повреждение, когда увеличивающаяся трещина достигает соседней дыры и новая трещина появляется в отверстии на противоположной стороне; (2) может появиться еще одна увеличивающаяся трещина, характеризующая проблему многоузлового повреждения (MSD); (3) по мере увеличения трещины наблюдается уменьшение рабочего участка

Тем не менее, анализ механики разрушения для соединений может быть выполнен с помощью аналитических методов с объединением основных решений, доступных в руководствах [8], а также с помощью численных подходов, где можно использовать различные коммерческие программы, некоторые из них основаны на встроенных аналитических решениях [9] и других, основанных на FEM и других численных методах.

Следовательно, компромисс между требуемой информацией и уровнем сложности модели, где имеются доступные ресурсы (не только с точки зрения вычислительных ресурсов, что больше не становится проблемой, но в основном следует принимать во внимание наличие квалифицированных специалистов для разработки и оценки широких сложных численных моделей) будет достигнут при анализе соединений. Другими словами, если единственной требуемой информацией является нагрузка на крепеж или величина передачи нагрузки в каждом ряду, аналитические подходы являются более быстрыми и достаточными для этой цели, и сложные численные модели не нужны.

Гибкость соединения или крепления очень важная информация для проектирования и анализа. Для того, чтобы смоделировать соединение надлежащим образом, знание гибкости крепления становится необходимым для закрепленных соединений. Эта информация может быть получена из литературы [10] или путем проведения специальных тестов. Основными параметрами, влияющими на гибкость крепления, являются тип материала (например, алюминий, титан, сталь или сплавы Inconel), диаметр крепления и толщина пластин.

Трение является еще одним свойством, которое влияет на общее поведение соединений. Трение между пластинами в основном связано с силой зажима. Однако довольно трудно определить параметр трения для двух зажимаемых поверхностей, потому что зажим может изменяться со временем, пока работает соединение. Следовательно, сдвиговые соединения обычно оцениваются консервативно с подходом, в котором предполагается, что все нагрузки переносятся подшипником [4].

### 6.3.3 Вторичный изгиб

Два соединенных элемента, подверженные растяжению, такие как продольное кольцевое соединение в фюзеляже самолета с кольцевыми нагрузками, оказывают локальный эффект, называемый вторичным изгибом. Этот эффект схематично показан на рис. 6.7.

Каждая пластина имеет толщину  $t$ , так что между обеими пластинами будет эксцентриситет, равный  $t$ . Пока нагрузка увеличивается, обе нейтральные линии имеют тенденцию к самовыравниванию, и в основном внешние ряды подвергаются более высоким уровням напряжения из-за изгиба, как следствие. В то время как напряжение растяжения линейно зависит от приложенной нагрузки (то есть,  $\sigma t = P/wt$ , где  $w$  это ширина пластины и  $t$  это толщина), напряжение из-за вторичного изгиба первоначально увеличивается (или уменьшается) после нелинейного тренда, пока не будет достигнуто геометрическое условие, так что обе кривые (соответствует минимальному и максимальному напряжению), как правило, увеличивается пропорционально осевому. Напряжению.

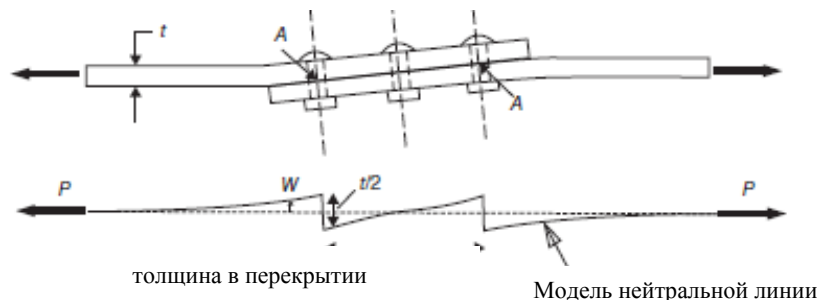


**Рис. 6.7** Отклонение пластины и нейтральной линии для трехзаклепочного соединения наложением (Адаптировано от Schijve 2004 [11]).

Результат этого эффекта с точки зрения значений напряжения может быть количественно определен изгибающим фактором  $k$  (смотрите [11,12], который выражается соотношением между напряжением при изгибе и растягивающим напряжением. Для соединения только с одним рядом крепежа,  $k=3$ , и это оказывается самой критической конфигурацией. Для увеличения количества рядов и увеличения расстояния между рядами,  $k$  уменьшается до значений между 1.0 и 1.5 [13].

Напряжение из-за вторичного изгиба можно рассчитать аналитически, используя модель нейтральной линии. Когда соединение анализируется с FEM, нужно позаботиться о том, чтобы нелинейности, обусловленные этим эффектом, были правильно учтены, поскольку локальный линейный упругий анализ может привести к очень консервативным результатам напряжения при увеличении уровня нагрузки.

С точки зрения проекта, очевидно, что наилучшей практикой для избежания вторичных изгибающих эффектов является использование соединений с двухсторонним наложением, для которого  $k=0$ . Однако есть много обстоятельств, когда это невозможно, и в этих случаях рекомендуется избегать слишком больших эксцентриситетов в качестве хорошей практики (а) увеличить область совместного перекрытия, увеличив число рядов и расстояние между рядами, и (b) использовать шахматные швы, который приводит к намного меньшим значениям  $k$  (смотрите [13]).

### 6.3.4 Многоочаговое усталостное повреждение в заклепочных соединениях

После аварии на Алохе в 1988 году [14], проблема под названием многоочаговое усталостное повреждение (MSD) приобрело большее значение в аэрокосмической промышленности. В аварии на Алохе, из-за MSD самолет Боинг 737 потерял полный раздел фюзеляжа. Это происходило в полете из-за множества усталостных трещин, которые увеличивались из отверстий крепления без предварительного обнаружения. MSD это повреждение, которое возникает, когда закрепленное соединение подвергается очень большому количеству циклов усталости, часто связанных с износом конструкции, которой принадлежит соединение.

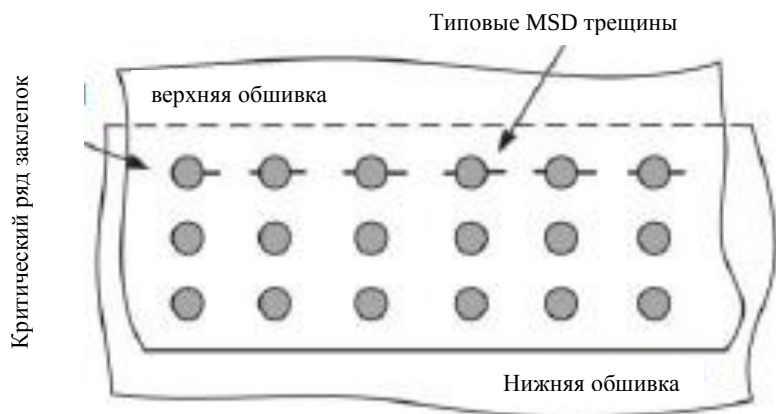


**Рис. 6.8** Схематическое изображение MSD (многоочаговое усталостное повреждение) в фюзеляжном соединении наложением.

На рис. 6.8 изображено соединение наложением, в котором зародилось определенное количество трещин и достигло определенного размера. В первую очередь, важно знать период времени, в течение которого конструкция выдерживает рабочую нагрузку, не теряя своей целостности. Для этой оценки должны быть рассмотрены некоторые важные аспекты, такие как: (1) время зарождения усталостных трещин и распределение этих трещин являются случайными и должны учитываться с помощью статистического анализа; (2) для анализа роста трещины необходимо учитывать взаимодействие между трещинами, например, с помощью компаундирования или соответствующих численных методов; (3) при достижении критического размера трещины возможны два события: во-первых, трещины соединяются, а во-вторых, происходит окончательный отказ. Для каждого из этих событий существуют модели, разработанные на основе теории механики разрушения, такие как касание пластической зоны [15] и раскрытие вершины трещины (CTOD).

Феномен MSD широко изучался в течение последних десятилетий после аварии на Алохе не только с помощью аналитических подходов, но и с помощью различных экспериментов с небольшими купонами, большими панелями, подструктурами и так далее. Эта обширная работа была проделана учеными, исследовательскими центрами и аэрокосмической отраслью. Органы по сертификации воздушных судов продвигают разработку с помощью новых и обновленных требований сертификации, требующих избежания MSD. Это привело к более глубокому пониманию усталости в соединениях и к увеличению усилий, чтобы избежать этой проблемы.

### 6.3.5 Влияние сжимающей силы в заклепочных соединениях

В авиационных конструкциях, когда толщина листа относительно мала или когда величина передаваемой нагрузки не является чрезмерной, широко используются расширенные крепежные элементы из-за их низкой стоимости и простоты установки. Эти крепежные детали механически вставляются в отверстия таким образом, чтобы создать радиальное расширение, которое является функцией силы сжатия, то есть величины силы, приложенной в осевом направлении.

Многие исследования [16] показали, что, особенно для утопленных отверстий, увеличение сил сжатия приводит к возникновению полей сжимающих напряжений вокруг отверстий крепежа и значительно увеличивает усталостную прочность соединения. Аналогичные тенденции наблюдаются для соединений с Hi-lite или Hi-lok крепежи применяются с более высоким уровнем помех. Существуют пределы расширения, переведенные в промышленные стандарты или практики, так что требуемые механические свойства крепежа гарантируются после установки, а поверхности отверстий не повреждаются из-за чрезмерной локальной деформации.



### 6.3.6 Сварные и связанные нахлесточные соединения

Процессы сварки и связывания разработаны в качестве альтернативы для скрепляемых соединений во множестве применений. Недавно лазерная и фрикционная точечная сварка (FSW) получила свое применение для конструкции фюзеляжа коммерческих самолетов в аэрокосмической отрасли, хотя технологии связанных соединений использовались в течение десятилетий.

Склеенные соединения имеют возможность более непрерывно передавать нагрузки от одного элемента к другому, что является главным преимуществом. В отличие от стяжных соединений, где вокруг отверстий для крепления имеются высокие концентрации напряжений, при этом связывание обеспечивает равномерное распределение напряжений. В результате усталостная прочность этих соединений улучшается. Как правило, режимы разрушения связаны с увеличением напряжений на краях перекрытия между листами.

Наиболее важными вопросами, которые следует соблюдать для склеенных соединений, являются: (1) соответствующее адгезионное отверждение для достижения заданных сил сцепления во время процесса сборки соединения; и (2) проверка, посредством обширных экспериментальных кампаний, долговечности соединений при длительном воздействии фактического воздействия окружающей среды. Некоторые производители самолетов применяют связывание к отказоустойчивым компонентам [3] или разрабатывают гибридные (склеивающие и закрепленные) решения для соединения, по-прежнему частично полагаясь на свойства механического крепления, но используя преимущества соединения в качестве средства для оптимизации характеристик соединения.

Что касается сварных соединений, аналогичные выводы можно сделать, если сравнить эту технологию с креплением. Если процесс сварки хорошо контролируется, то вдоль линии соединения получается относительно равномерное распределение напряжений, и, как и ожидалось, прямое сравнение между закрепленным соединением и его многочисленными местами зарождения трещины дает некоторое преимущество для сварного соединения.

Однако, в отличие от связывания, все сварочные процессы включают термически затронутые зоны вдоль поперечного сечения стыка. Эти термические эффекты приводят к остаточным напряжениям, которые, следовательно, влияют на механическое поведение соединения. На рис. 6.9 для сварной пластины длиной  $H$  показаны типичные профили остаточных напряжений после сварки. Для соединений FSW максимальные остаточные напряжения, как правило, не столь значительны по сравнению с рабочими напряжениями, но до тех пор, пока эти значения добавляются, очень важно убедиться, что они надлежащим образом учитываются во время проектирования соединения.

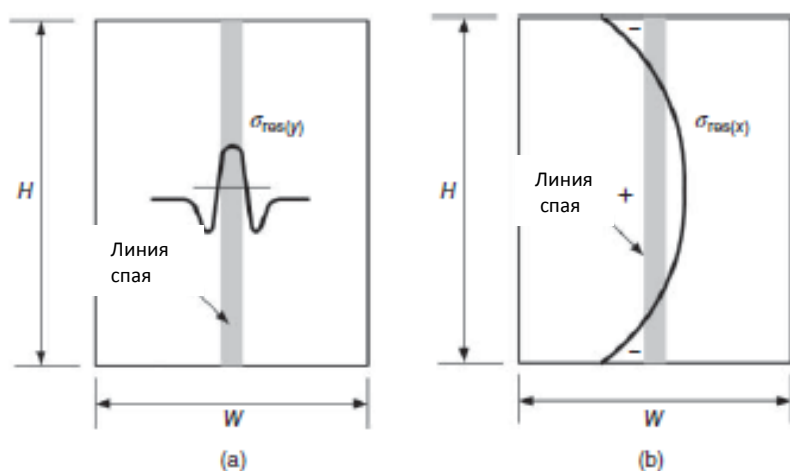


**Рис. 6.9** Обычное остаточное напряжение после сварки (а) в поперечном направлении (b) в продольном направлении.

Кроме того, с точки зрения механики разрушения следует отметить, что в отличие от склеенных соединений, сварные соединения приводят к монолитным конструкциям. Кроме того, сравнивая сварное соединение и закрепленное соединение, можно заметить, что из-за отсутствия концентрации напряжений в отверстиях усталостная трещина займет больше времени для зарождения в сварном соединении. Однако после зарождения трещины перед ним будет меньше элементов, способствующих прекращению образования трещин, поскольку отверстия для крепежа работают не только как места зарождения трещины, но и как ограничители трещины. Другими словами, сварные соединения могут быть менее эффективными с точки зрения механики разрушения, и, как следствие, сварные соединения требуют другой философии для обеспечения требований по устойчивости к повреждениям.

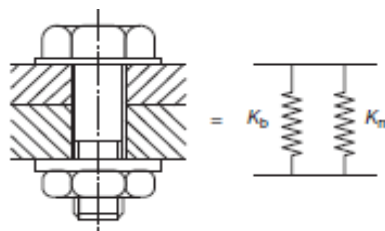
## 6.4 Натяжные соединения

Соединения многократно разрабатывались для работы при растягивающей нагрузке. Это связано с тем, что натяжные соединения обычно собираются с помощью болтов, что позволяет производить сборку и разборку. Однако для конфигураций натяжных соединений существуют конструктивные соображения, отличные от ранее представленных для сдвиговых соединений.

Натяжные соединения также могут быть оценены экспериментальным, аналитическим и цифровыми методами. Пока болты или крепежные детали будут работать в основном в условиях осевой нагрузки, для этих соединений предварительный крутящий момент становится очень важной переменной в проблеме.

Натяжное соединение может быть смоделировано как система упругих пружин, где осевая жесткость является ключевой информацией. Такая система схематично показана на Рис. 6.10, где болт имеет жесткость пружины  $K_b$  и присоединяемые элементы должны иметь

**Рис. 6.10** Пружинная система как идеализация натяжного болтового соединения (воспроизведено с разрешения ESDU 85021 [17]).



постоянная пружины  $K_m$ . Соотношение между приложенными нагрузками и смещениями может быть записано касательно жесткости болта и элементов, как следует из Уравнений 6.1 и 6.2:

$$K_b = P_b / \delta_b \quad (6.1)$$

$$K_m = P_m / \delta_m \quad (6.2)$$

где  $P_b$  и  $P_m$  являются нагрузками на болт и элементы и  $\delta_b$  и  $\delta_m$  это соответствующие смещения. Если нет крутящего момента или рабочих нагрузок, то система отдыхает и  $P_b = P_m = 0$ . Если есть предварительный крутящий момент с соответствующей нагрузкой  $P_t$  и нет рабочих нагрузок, тогда  $P_b = P_m = P_t$ . Когда к системе прикладывается внешняя растягивающая нагрузка, пытающаяся «растянуть» болт и, следовательно, облегчающая элементы, нагрузка на болт увеличивается, и нагрузка на элементы соответственно уменьшается. Наконец, может возникнуть состояние, при котором приложенная нагрузка больше, чем моментная нагрузка, так что элементы будут отделяться. Это условие неприемлемо в конструкции натяжного соединения, и применяемый крутящий момент должен гарантировать, что разделение никогда не произойдет ни при каких условиях работы.

На рис. 6.11 показаны события, описанные ранее, где  $P_a$  представленная на этом рис. соответствует приложенной (рабочей) нагрузке.



Рис. 6.12 показывает, как нагрузка компонента меняется как (а) смещение шва и (b) внешняя (рабочая) нагрузка. Для этих графиков наблюдается, что, когда приложенная нагрузка равна нулю, существует нагрузка предварительного крутящего момента, равная  $P_t$ . График представленный в (b) d результате преобразования графика в (a), где  $\gamma_b$  and  $\gamma_m$  являются только функциями  $K_b$  и  $K_m$  данные Уравнениями 6.3 и 6.4.

$$\gamma_b = \frac{K_b}{(K_m + K_b)} \quad (6.3)$$

$$\gamma_m = \frac{K_m}{(K_m + K_b)} \quad (6.4)$$

Некоторые интересные аспекты, наблюдаемые на этих диаграммах:

- Если материал болта сталь, а элементы изготовлены из алюминия несмотря на то, что модуль упругости стали примерно в три раза больше, чем у алюминия, жесткость соединения учитывает не только жесткость материала, но и площадь контактных поверхностей, такой, как  $K_b$  обычно меньше  $K_m$ .

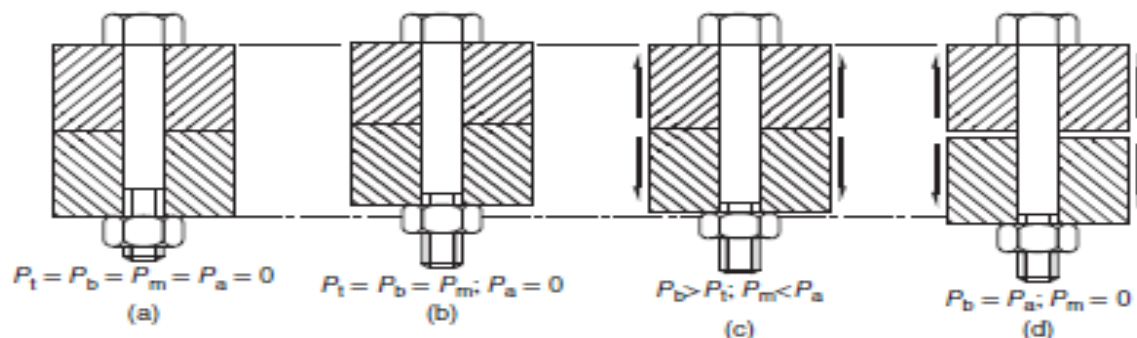


**Рис. 6.11** Возможные конфигурации болтовых соединений: (а) структура отдыхает, (b) применяется предварительный крутящий момент, а конструкция выдерживает постоянную нагрузку  $P_t$  (среднее значение), (с) конструкция подвергается внешним (рабочим нагрузкам) без достижения нагрузки  $P_t$  из-за предварительного крутящего момента, (d) рабочая нагрузка становится выше, чем предварительный крутящий момент, и происходит разделение элементов (Источник: ESDU 2005 [17]. Воспроизводится с разрешения ESDU).

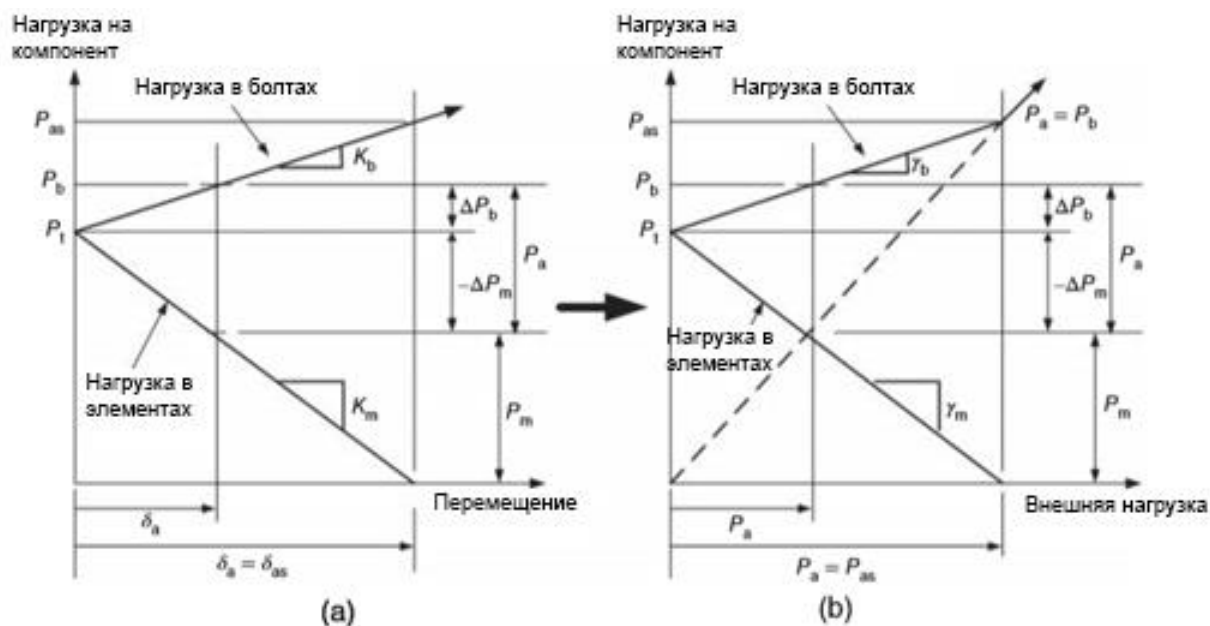
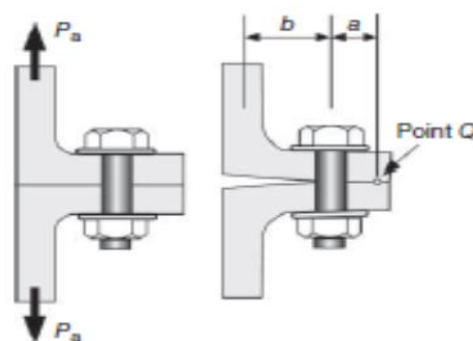


**Рис. 6.12** Диаграммы, связывающие нагрузки компонент с (а) совместное глобальное перемещение и (b) используемые нагрузки (Источник: ESDU 2005 [17]. Воспроизводится с разрешения ESDU).

- Существует момент, когда приложенная нагрузка достигает разделения обеих поверхностей ( $P_a = P_{as}$ ), и после этого момента нагрузка на элементы становится равной нулю, а нагрузка на болт такая же, как и на приложенную нагрузку, как показано в правом графике.

Следовательно, при проектировании натяжного соединения предварительный крутящий момент должен быть рассчитан так, чтобы  $P_{as}$  не был достигнут в условиях предельной нагрузки. Учитывая, что максимальная нагрузка на болт определяется нагрузкой до момента затяжки и максимальной рабочей нагрузкой, часто это критическое условие определяет материал и диаметр болта.

**Рис. 6.13** Схематическое изображение рычажного эффекта.



#### 6.4.1 Рычажный эффект

Для несимметричных натяжных узлов при приложении нагрузок система изгибается, что приводит к увеличению нагрузки на болт  $P_b$  из-за рычажного эффекта. Рис. 6.13 схематически изображает этот эффект, соединение имеет тенденцию вращаться вокруг определенной точки контакта, обозначенной на рис. как Q пока нагрузка не применяется и даже без разделения элементов. В первом приближении нагрузка на болт может быть оценена с помощью простых уравнений шарнира, как показано в уравнениях 6.5 и 6.6.

$$P_b = P_a (1 + b / a) \quad (6.5)$$

$$R = P_a (b / a) \quad (6.6)$$

где  $R$  это реакция в точке контакта. Однако эта точка контакта (или вращения) изменяется с увеличением нагрузки, и это поведение является функцией жесткости пластины, которая в основном связана с ее толщиной.

Возможно, оценить увеличение  $P_b$  из-за рычажного эффекта, с помощью аналитических [17] или цифровых методов, хотя в идеале необходимо принимать во внимание предварительные условия и контакты между участниками, что приводит к более сложному численному анализу. Эта оценка становится существенной, учитывая, что эффект выталкивания приводит к увеличению нагрузки на болты.

#### 6.4.2 Усталостная характеристика натяжного соединения

Результаты эксперимента [11] показали, что увеличение предварительного крутящего момента улучшает усталостную долговечность системы. Это более очевидно для элементов, потому что они находятся в состоянии среднего напряжения сжатия, когда система находится в состоянии покоя, и когда система работает, циклические напряжения будут изменяться вокруг этого среднего значения сжатия.

Однако, как и элементы, болты также обеспечивают более длительные усталостные нагрузки для увеличения значений предварительного крутящего момента. Причина этого почему-то менее очевидна: колебания, которым подвергается болт, значительно ниже, чем общее колебание системы. Другими словами, даже если болт находится в состоянии среднего напряжения растяжения, значения амплитуды напряжения будут значительно меньше, чем значения, соответствующие соединению без предварительного крутящего момента (см. Рис. 6.12 (b) для корреляции между приложенными и болтовыми нагрузками), и с точки зрения усталости часто материальный отклик на циклические нагрузки приводит к большему ущербу, когда он подвергается воздействию высоких амплитуд напряжений, чем когда он подвергается воздействию высоких средних напряжений с более низкими амплитудами.

#### 6.4.3 Метод оценивания зоны контакта и жесткости элемента в натяжных соединениях

На протяжении многих лет было предложено много методов для оценки площади контакта и жесткости соединительных элементов, хотя жесткость болта легко рассчитывается по свойствам и размерам материала. Подводя итог, эти методы включают в себя: фактический профиль напряжения в области воздействия вокруг болта, конус давления, предложенный Roetscher [18], и цилиндр с эффективной площадью, свойства жесткости которого эквивалентны действительной системе давления.

Для проектирования расчет жесткости натяжных швов на основе этих приблизительных методов можно найти в литературе [19] или в базах данных, предоставленных международными ассоциациями по стандартизации. Кроме того, жесткость может быть получена с большей точностью для любых геометрических условий с помощью численных методов, таких как FEM. На рис. 6.14 представлен пример численного анализа, где твердые элементы с осесимметричными граничными условиями и контакт между поверхностями болта и пластины были использованы для получения профилей напряжений вдоль радиального сечения. Как только средняя площадь сжатия известна, расчет жесткости

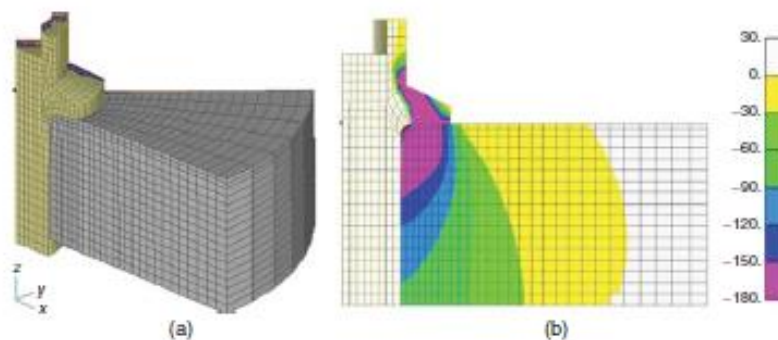


**Рис. 6.14** Пример анализа FEM в болтовом соединении. (а) Модель с твердыми элементами и осесимметричными граничными условиями, (б) полосы сжимающего напряжения (Z напряжение), напряжения в МПа.

## 6.5 Допуски в разработке соединений

В идеале каждая конструкция должна быть собрана идеально, без отклонений от номинальных расчетных значений. Однако отклонения от номинальных значений часто наблюдаются при сборке реальных деталей. Контроль размеров становится более сложным для более крупных конструкций, и здесь общая жесткость конструкции становится ключевым параметром, чтобы обеспечить надлежащую сборку и избежать будущих проблем из-за остаточных напряжений.

Существует много типов проблем толерантности, которые необходимо оценить во время сборки соединения:

- (а) Размер и расположение отверстия и крепежа
- (б) Перпендикулярность отверстия
- (с) Поверхностное смещение из-за смещения между элементами во время сборки
- (д) Поверхностное смещение из-за клиньев между элементами во время сборки

Рис. 6.15 изображает некоторые типовые сценарии, которые необходимо оценить с применением геометрических размеров и допусков (GD&T). В Рис. 6.15, представлен гипотетический сустав с тремя креплениями. Глядя сверху (Плоскость А), представлены три случая, в которых необходимо контролировать выравнивание центра отверстия, диаметр отверстия и диаметр жирного шрифта, чтобы обеспечить надлежащие условия сборки. Далее, вид сбоку (Плоскость В) представляет два сценария, характеризующие параллельный зазор между внутренними поверхностями и угловым зазором.

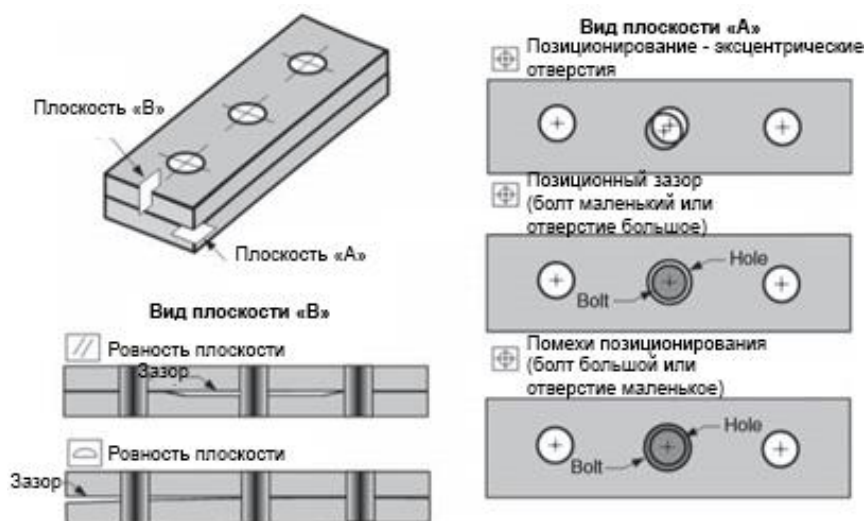


**Рис. 6.15** Некоторые соображения о допусках для сборки соединениями.

Оба условия приведут к принудительной сборке, если эти зазоры не контролируются. Существует еще одно требование, не показанное на рис. 6.15, в отношении прямолинейности отверстий после сверления, где в этом случае также необходимо контролировать перпендикулярность между поверхностями и отверстиями вдоль толщины.

Для натяжного соединения, соединяющего две части первичной конструкции самолета, если отверстия для болтов в каждой части просверлены по отдельности, обычно требуется очень жесткий радиальный допуск и допуск позиционирования, например, 0,1 мм в радиальном направлении. В противном случае, болт как-то теряется или не передает нагрузку соответствующим образом.

Поверхностные или плоскостные смещения обычно также неприемлемы, потому что, когда прикладывается момент затяжки болта, могут возникнуть непредвиденные остаточные напряжения, не предусмотренные во время проектирования соединения. Существуют различные подходы, чтобы избежать или сосуществовать с такими несоответствиями, такие как следующие:

- (a) По возможности, разрабатывать соответствующий инструмент, который позволяет избежать больших ошибок в критических местах соединения
- (b) изменить процесс сборки так, чтобы сверление и обработка поверхности выполнялись на заключительных этапах. Тем не менее, это часто нежелательно, потому что это приводит к сборке, где детали не могут быть заменены позже.
- (c) Для введения твердых или жидких прокладок в пустые пространства, обеспечивая полный контакт между обеими поверхностями

Моделирование процесса сборки также может быть выполнено. Такой анализ может помочь проверить гибкость конструкции на предмет возможных пробелов, которые могут возникнуть во время сборки. Остаточные напряжения, полученные в результате анализа, могут быть добавлены к ожидаемым структурным рабочим нагрузкам.

## 6.6 Материалы

Как обсуждалось ранее, механически скрепленное соединение в основном состоит по меньшей мере из двух частей, соединенных крепежными элементами.

Эти детали могут быть металлическими листами, пластинами, отливками, спеченными или экструдированными деталями, композиционными материалами или даже гибридными материалами, такими как слоистый волокнистый металл (FML) (например, Glare™ и Arall™ [20]) гибридные материалы, которые демонстрируют некоторое сходство с поведением металлических материалов, с некоторыми улучшенными свойствами, такими как устойчивость к повреждениям - распространение трещин с разрывом по слоям - устойчивость к коррозии и огню и меньший удельный вес. Различных металлокомпозитные соединения также очень распространены в конструкциях самолетов.

Крепежи представляют собой особый вид механического оборудования. Они будут подробно описаны в следующих абзацах. Основное внимание будет уделено следующим аспектам: механически закрепленные детали, крепежные детали и взаимодействие между крепежными деталями и соединяемыми деталями.

Соединения и их компоненты предназначены для предотвращения поломок, в основном для предотвращения резких и катастрофических отказов. В идеале, соединение и процесс, используемый для его изготовления, должны создавать такое же прочное соединение, как и соединяемые детали [21]. Несмотря на это, существуют некоторые особые условия, позволяющие проектировать авиационный компонент с небольшими дефектами, такими как небольшие трещины, поскольку они обычно предсказуемы, обнаруживаемы, ремонтируемы и могут контролировать их рост в рамках плана обслуживания деталей. Детали классифицируются в соответствии с их структурной ответственностью и обозначаются как первичные для более высоких обязанностей и как вторичные для более низких обязанностей, и это должно быть включено и учтено в допуске на критерии отказа.

Как показано на рис. 6.2, некоторые примеры типичных режимов разрушения при квазистатической нагрузке: натяжение зоны нетто, разрыв при сдвиге (крепеж или пластина) и подшипник пластины. Есть много других более сложных отказов из-за

действия коробления, динамических нагрузок, вибрации, коррозии и т. д., но все они в основном связаны с первыми.

Из-за важности и надежности авиационных деталей некоторые свойства, особенно физические и механические свойства, являются основополагающими для успеха сборки и безопасности, а также требуют некоторого опыта и знаний для спецификации этих свойств.

Проще говоря, валидация самолета включает в себя конкретные испытания конечного продукта, выполненные не только в купонах, но и в реальных прототипах, которые моделируют реальные нагрузки и проверяют их на статические, динамические (усталость, распространение трещин и т. д.) и результаты потери устойчивости, среди прочего. Для конкретного припуска материала проводится обширная тестовая кампания для достижения нескольких аспектов поведения материала и его механических свойств.

### 6.6.1 Свойства материалов

Мы можем перечислить, кратко описать и сделать соответствующие примечания по некоторым наиболее важным свойствам для авиационных материалов, которые должны учитываться при выборе, проектировании и анализе материалов [21]:

*Твердость*: относится к способности материала противостоять истиранию, проникновению, резанию или постоянным деформациям. Твердость может быть увеличена путем холодной обработки металла, а в случае стали и некоторых алюминиевых сплавов - путем термической обработки. Твердость и прочность являются тесно связанными свойствами металлов [21]. Твердость материала можно рассматривать как грубую меру его прочности [22]. Это очень важный параметр для контроля производства металлического сырья и для контроля некоторых металлических деталей в процессе производства, например, при термообработке.

*Прочность*. Одним из наиболее важных свойств материала является прочность, то есть способность материала противостоять нагрузкам без разрушения. Тип рабочей нагрузки или напряжения влияет на прочность, которую он проявляет [21]. Прочность может быть связана с формой приложения нагрузки, такой как прочность на растяжение, прочность на сжатие, прочность на сдвиг, или может быть связана с уровнем приложения нагрузки, таким как предел прочности и предел текучести. Параметры прочности, такие как предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и др. Могут быть взяты по данным статических испытаний, которые были тщательно разработаны для валидации материала в составе применимых кампаний.

*Плотность (удельный вес)*. Плотность или удельный вес — это вес, полученный для единицы объема материала. Плотность является важной проблемой, которую следует учитывать при выборе материала, который будет использоваться при проектировании детали, чтобы поддерживать надлежащий вес и баланс самолета [21]. Это очень важно, когда рассматривается вместе с прочностью, давая нам удельную прочность материала, которая является реальным пониманием прочности на единицу веса материала (т. е. отношение прочности к весу). Это имеет первостепенное значение при выборе базовых материалов и крепежных элементов, чтобы уменьшить вес конструкции самолета. Например, тенденция к разработке новых сплавов заключается в переходе от простых алюминиевых сплавов к алюминий-литиевым сплавам из-за их более низкого удельного веса. Тесный союз Li с Al обещает существенно снизить вес аэрокосмических сплавов, так как каждый 1 wt% Li добавленный к Al снижает плотность до 3% и увеличивает модуль упругости примерно на 6% [23]. Композиционные материалы очень важны из-за их более низкого удельного веса по сравнению с металлическими сплавами.

*Растяжимость*: Материал податлив, когда он может быть механически сформирован в форме, не растрескиваясь или не вызывая растрескивания, разрушения или оставляя некоторые другие вредные эффекты. Это свойство необходимо в листовом металле, который превращается в изогнутые формы, такие как обтекатели, обтекатели или концы крыльев [21]. Степень податливости может влиять на выбранный процесс формования, делая процесс более гибким. Для материалов, которые легче механически обрабатывать, может потребоваться более простой производственный процесс, снижая таким образом производственные затраты.

*Пластичность:* это свойство материала, которое позволяет ему постоянно вытягиваться, изгибаться или скручиваться в различные формы без разрушения. Пластичные металлы очень предпочтительны для использования в авиации из-за их более легкого формования и более высокой устойчивости к разрушению при ударных нагрузках [21]. Некоторые материалы для авиационного производства, такие как некоторые алюминиевые сплавы в этом случае, демонстрируют высокую пластичность для некоторых конкретных условий термообработки, поэтому их можно подвергать термообработке до другого конечного состояния, в конечном итоге с лучшими механическими свойствами.

*Эластичность.* Эластичность — это свойство, которое позволяет материалу возвращаться к своему первоначальному размеру и форме, когда сила, вызывающая изменение формы, устранена [21]. Чтобы сохранить металл в его упругом состоянии, следует избегать более высоких нагрузок, превышающих предел упругости материала, чтобы предотвратить пластический сдвиг. Некоторые компоненты желательны с высокими упругими свойствами из-за их рабочей функции (например, компоненты, требующие пружинного эффекта).

*Ударная вязкость и вязкость разрушения.* Ударная вязкость — это способность материала противостоять разрыву или сдвигу, позволяя ему растягиваться или деформироваться иным образом без разрушения. Это желательное свойство в авиационных металлах, работающих при растягивающих нагрузках [21]. Вязкость разрушения — это способность материала с начальной трещиной противостоять разрушению вследствие разрушения. Другими словами, это способность материала поглощать значительную энергию перед разрывом. Прочность материала также должна учитываться и оцениваться для более низких температур, когда это свойство материала может уменьшиться, вследствие чего материал может стать хрупким. Увеличение хрупкости считается опасным и нежелательным для конструкции, которая должна быть устойчивой и защищенной от внезапного и катастрофического разрушения.

*Устойчивость к росту трещин:* это поведение материала описывает склонность к распространению трещин. Некоторые условия влияют на распространение трещин в материале, такие как химический состав, механические свойства, процесс изготовления, термическая обработка, вид и уровень рабочих нагрузок, геометрия детали, удаление напряжений и расположение на детали, среди других. Для безопасности требуется, чтобы базовый материал демонстрировал низкие скорости роста трещин, и чтобы такое поведение можно было прогнозировать. Эти прогнозы основаны на результатах механических испытаний. Исходя из этих наблюдений, интервалы технического обслуживания определены для самолета. Как правило, проверка трещин проводится с помощью визуального контроля или даже с помощью некоторых неразрушаемых испытаний, таких как испытание на проницаемость жидкости. Проводятся некоторые проверки в течение жизненного цикла самолета, такие как наземные проверки, поиск несоответствий, таких как небольшие трещины, в то время как другие недоступные области (так называемые слепые зоны) проверяются с помощью специальных ресурсов, таких как промышленные жесткие бороскопы.

*Усталостное сопротивление:* это прочность материала при циклическом нагружении. Срок службы компонента с учетом усталостного ресурса характеризуется некоторыми очень четко определенными событиями: (1) зарождение трещин, которое может длиться около 60-80% срока службы компонента; (2) распространение трещин, которое может продолжаться в течение оставшихся 20-40% срока службы компонента; и (3) наконец, провал (повреждение). Циклическая нагрузка для усталостного механизма должна иметь нагрузку, повторяющуюся, по крайней мере, в любой момент в течение срока службы самолета, с некоторыми уровнями растяжения, поскольку чистые сжимающие нагрузки не приводят к разрушению усталости материала. Проще говоря, только сжимающая нагрузка не запускает процесс усталости (зарождение трещины). Некоторые материалы могут размягчаться во время применения при циклической нагрузке, другие могут затвердевать, а некоторые другие могут демонстрировать оба поведения в течение своей жизни, в зависимости от ряда факторов и их комбинации, включая интенсивность нагрузки, температуру, частоту циклических нагрузок, микроструктуру



материала, термическую обработку, и так далее. Эти смягчающие и упрочняющие свойства могут влиять на общий срок службы компонента.

*Проводимость.* Проводимость — это свойство, которое позволяет материалу проводить тепло или электричество. В авиационных материалах для устранения радиопомех необходимо учитывать электропроводимость вместе с соединением [21]. Вообще говоря, материалы с организованной (кристаллической) микроструктурой имеют большую восприимчивость к проводимости, чем материалы с аморфной структурой. Например, для алюминиевых сплавов существует корреляция между электропроводностью и твердостью. В этом случае электрическая проводимость и твердость обратно пропорционально зависят от уровня кристалличности микроструктуры (например, среднего размера гранул).

*Тепловое расширение:* относится к сжатию и расширению в результате нагревания или охлаждения. Это влияет на конструкцию и допуск детали [21]. Это свойство материала важно для управления размерами и геометрией, и по этой причине для некоторых тесно связанных производственных процессов может потребоваться управляемая среда (например, контроль температуры). Тепловое расширение играет важную роль при проектировании и анализе распределений напряжений в сборках из разнородных материалов из-за различий в тепловых расширениях. В типичных моделях коммерческих самолетов некоторые распространенные температуры полета варьируются от менее  $-40^{\circ}\text{C}$  до более чем  $60^{\circ}\text{C}$ , а некоторые детали с подогревом, такие как детали двигателя, могут достигать гораздо более высоких температурных диапазонов. Эти типичные диапазоны температур вызывают резкие изменения в расширении и сжатии материала. Очевидно, что разные материалы расширяются или сжимаются по-разному. По этой причине необходимо учитывать зазоры, зазоры, усиления, коэффициент перегрузки или любой конкретный проектный ресурс в соединении между разнородными частями. Из-за различных коэффициентов теплового расширения, одна часть может иметь увеличенные или уменьшенные размеры в большей степени, чем другая, что приводит к смещению между отверстиями и крепежными элементами. Крепеж должен иметь некоторую степень свободы, чтобы избежать перенапряжения и окончательного разрушения соединения, или эти перегрузки должны быть должным образом учтены при анализе напряжений и проектировании соединяемых деталей. Более того, крепежные детали, вероятно, должны быть слишком большими по соображениям безопасности, имея усиленные размеры, что иногда не является желательным решением из-за увеличения веса компонентов.

*Соппротивление ползучести:* Ползучесть — это свойство материала, которое приводит к его постоянной деформации из-за приложения упругой нагрузки при определенной температуре в течение определенного периода времени. Деформация ползучести прямо пропорциональна нагрузке, времени и температуре, которым подвергается материал. Как только материал восприимчив к механизму ползучести, он ослабит натяжение во время процесса ползучести, и его первоначальная форма не может быть восстановлена, что приведет к его постоянной деформации. В качестве правила большого пальца можно сказать, что нормальные температуры ползучести находятся в диапазоне от 0,4 до 0,7 от температуры плавления материала (для металлов). Характерным случаем является ухудшение ползучести лопастей ротора в авиационных двигателях. Из-за экстремальных сил, вызванных большим вращением двигателя и экстремальных температур, поступающих из камер сгорания, эти детали сильно подвержены ползучести. Нетрудно понять высокую важность этих частей и их отношение к структурной целостности. Поскольку это критическая проблема, была предпринята некоторая большая эволюция для смягчения разрушения при ползучести, такая как развитие нового сопротивления ползучести.

*Жесткость.* Жесткость — это особое и очень важное свойство компонента, которое зависит не только от свойств материала. Он включает в себя прочность, необходимую для предотвращения высокой деформации и деформации детали. Это зависит от геометрии детали и свойств материала. В этом разделе требуется отличная возможность проектирования, чтобы максимально использовать преимущества компонента, то есть баланс минимизации поперечного сечения компонента и

максимизации его прочности. Жесткость является важным свойством при рассмотрении аэродинамических нагрузок; следовательно, хорошая конструкция должна учитывать критерии аэроупругости, чтобы предотвратить трепетание компонента (аэроупругая неустойчивость).

*Коррозионная стойкость:* это способность материала выдерживать потерю массы во время химической реакции с окружающей средой. Некоторые параметры, такие как окружающая среда, материал, защита, состояние материала (термообработка, элементы содержимого, состав, теплопроводность и т. д.), среди прочего, могут влиять на восприимчивость материала к коррозии. Обычно металлы встречаются в форме руд в природе, в стабильном энергетическом состоянии. Их переработка в формы металлических сплавов представляет собой перегруппировку его компонентов и микроструктуры таким образом, что увеличивает его восприимчивость к реакции с другими элементами из-за их повышенного энергетического состояния, поэтому металл имеет тенденцию возвращаться в почти рудную форму (такую как оксиды) или соли, с более стабильным энергетическим балансом. Неметаллические материалы (полимеры и керамика) также подвержены коррозии, но в этом контексте их чаще называют термином деградация. Полимеры, армированные углеродным волокном, в отличие от металлов, могут ускорять коррозию в результате гальванической (контактной) коррозионной реакции. Это объясняется высокой электропроводностью арматуры из углеродного волокна, которая будет поддерживать ионный поток, ускоряя процесс гальванической коррозии. Необходимо применять специальную защиту для скрепленных соединений полимеров CFRP из разнородных металлов. Примерами являются использование герметиков в области контакта внахлест.

Существуют и другие свойства материала, но они не столь актуальны в данный момент для механически скрепленного соединения. Поэтому они не будут обсуждаться здесь. С другой стороны, коррозия является важным аспектом, который необходимо тщательно учитывать при проектировании соединений для деталей самолетов. Коррозия и защита будут рассмотрены более подробно в следующем разделе.

## 6.6.2 Коррозия и защита

Существует несколько типов коррозии и связанных с ней аспектов, которые очень важны для проектирования самолета и должны учитываться при выборе материала и проектировании соединения. Они могут включать в себя следующее:

*Общая коррозия:* или равномерная коррозия, является наиболее распространенным видом коррозии и появляется на обширных участках, легко распознаваемых, вызывая утонение детали. Это происходит только тогда, когда материал подвергается воздействию электролита (например, влаги из конденсированных водяных паров).

*Гальваническая коррозия:* Это тип коррозии, который возникает, когда разнородные материалы находятся достаточно близко, чтобы заменить частицы, где более благородный материал (катод) корродирует медленнее, а менее благородный материал (анод) корродирует быстрее, чем он будет в случае отдельной экспозиции к электролиту. Гальваническая коррозия прямо пропорциональна разности электрических (электрохимических) потенциалов материала; это происходит в присутствии электролита, где электрический ток течет между металлами, пока их потенциалы не будут равны.

*Гальваническая серия (смотрите Таблицу 6.2):* состоит из практического упорядоченного списка материалов с потенциалами, близкими друг к другу, согласно их близости в списке. Чем ближе они находятся в списке, тем менее коррозионным становится совпадение, тогда как верно и обратное. Подсказка для практического конструирования заключается в выборе плотных материалов для соединений, а также крепежных деталей, сводящих к минимуму влияние гальванической коррозии, когда это возможно. Кроме того, следует соблюдать осторожность при защите от коррозии. Существует ряд правил проектирования для выбора материалов и их защиты в соединяемых конструкциях, чтобы избежать и защитить от гальванической коррозии. Некоторые вопросы, касающиеся защиты поверхности, будут обсуждаться в следующем параграфе. Хорошей практикой защиты материалов от гальванического соответствия

является анодная защита, то есть крепление должно быть восстановлено с помощью металлического покрытия из металлического материала в гальваническом ряду, рядом с материалом детали, который менее активен в гальваническом соответствии.

*Коррозионная трещина (SCC):* это особое и сложное состояние коррозии, связанное с напряжением, приложенным к материалу. SCC возникает из-за сочетания приложения напряжения, состояния окружающей среды (например, электролита) и восприимчивости материала к коррозии.

**Таблица 6.2** Примеры серии гальванических материалов для уменьшения гальванической коррозии.

|          |                               |
|----------|-------------------------------|
| Анодный  | Магний                        |
|          | Цинк                          |
|          | Чистый алюминий               |
|          | Алюминий серий 5xxx серий     |
|          | Кадмия                        |
|          | Алюминий серий 2xxx           |
|          | Алюминий серий 7xxx           |
|          | Легированная сталь серии 8740 |
|          | Нержавеющая сталь (активная)  |
|          | Никель (активный)             |
|          | Никель (пассивный)            |
| Катодный | Нержавеющая сталь (пассивная) |

Некоторые термообработываемые алюминиевые сплавы очень восприимчивы к SCC, такие как серии AA7XXX, например сплав AA7475-T6. В большинстве случаев, SCC в алюминиевых сплавах преимущественно межгранулярный. Согласно электрохимической теории, этот тип коррозии требует условия вдоль границ зерен, где они становятся анодными для остальной части микроструктуры, так что коррозия избирательно распространяется вдоль частиц. Межгранулярная (или межкристаллитная) коррозия избирательно воздействует на границы частиц или в близлежащих областях, не принимая во внимание воздействие самих частиц.

*Точечная коррозия:* это вид коррозии, очень хорошо характеризующийся наличием небольших отверстий, глубже, чем большие, возникающих случайным образом. Точечная коррозия обычно происходит из-за химического разрушения защиты поверхности, вызванного царапинами или зазубринами, или другими недостатками защитной поверхности; коррозия распространяется в отверстиях по толщине.

*Коррозионная усталость:* вид коррозии, определяемый циклическими нагрузками и агрессивной средой. Коррозионная усталость вызывает разрушение материала из-за значительно меньших напряжений, чем прочность материала. Циклические нагрузки всегда обновляют раскрытие трещин, в то время как агрессивная среда влияет на зарождение новых трещин или увеличивает скорость роста существующих трещин.

*Межкристаллитная коррозия:* Металлические материалы расположены в гранулированные структуры. Гранула — это металлургическое единство кристаллической структуры. Гранулы разделены определенной фазой, границей зерна. Гранулированная коррозия — это коррозия, вызванная различными фазами материалов с высоким потенциалом между гранулами и границей гранулы. Как было показано ранее, межкристаллитная коррозия обычно поражает границы гранул или окружающую среду. Например, когда определенные материалы подвергаются определенному термическому процессу, они становятся более восприимчивыми к межкристаллитной коррозии. Это можно рассматривать как хороший пример в некоторых сплавах из нержавеющей стали, где «сенсibiliзирующий» материал вызывает выпадение стали и оксида хрома на границах гранул.

*Щелевая коррозия:* Она вызвана ограничением агрессивного электролита, состоящего из ионов, таких как хлориды. Реакция коррозии происходит и очень похожа на точечную

коррозию. Определенная сборка и компоненты, которые могут ограничивать электролит, такие как прокладки, крепежные детали, шайбы, винты и другие плотно прилегающие крепления, оказываются благоприятными для возникновения такого рода коррозии.

*Нитевидная коррозия:* это очень специфический и специфический вид коррозии, который появляется на поверхности, защищенной органическим пленочным покрытием. Когда защита повреждена, вызывая дефект поверхности и локальный сбой защиты, реакция коррозии начинается и превращается в нитевидные структуры под покрытием. Некоторые условия, включая влажность и кислотность, должны присутствовать на месте, чтобы начать реакцию. Это приводит к деградации покрытия и может расширяться от первоначального места коррозии. Аспект продуктов коррозии очень характерен, он выглядит как тонкие нити, и его основным недостатком является не ослабление материала, а появление поверхности и разрушение покрытия.

*Фреттинг-коррозия:* также известная как фрикционная коррозия, окисление при износе, среди прочих терминов, этот вид коррозии также очень своеобразен. Фреттинг-коррозия обычно вызывается сочетанием трибологического процесса и коррозии. Эти явления характеризуются относительным движением между вовлеченными частями с небольшими смещениями, порождающими небольшое относительное движение или вибрацию. Поэтому происходит удаление материала с подложки. Правильная смазка деталей и контроль амплитуды движения деталей — это некоторые меры, позволяющие избежать или контролировать фреттинг-коррозию.

Существуют и другие, менее распространенные типы коррозии, такие как эрозионная коррозия и коррозия бетона, но они не имеют отношения к конструкции самолета и механическому креплению.

Учитывая требования к коррозии и учитывая, что срок службы воздушного судна может варьироваться от 10 до 30 лет, установленная стратегия заключается в применении наилучшей системы защиты, чтобы избежать будущих повреждений компонентов. В скрепленном соединении детали должны быть индивидуально защищены первичной защитой (анодирование или другое покрытие, такое как серная, хромовая или борно-хромовая адонизация, химическое превращение, кадмирование, облицовка, алюминиевое покрытие (осажденный ионный пар (IVD)) пассивирование, герметизация и т. д.), вторичная защита (например, эпоксидные грунтовки), а иногда и верхнее покрытие (система окраски полиуретанов) и непосредственно перед соединением, в области сопряжения между деталями, межслойный герметик (на основе хрома или др.) может применяться для предотвращения загрязнения и попадания электролита. После того, как крепеж будет установлен, по всему периметру области сопряжения будет нанесен угловой герметик. Позже, на этапах сборки, применяются ингибиторы коррозии. Каждый крепеж также защищен при необходимости с помощью межслойного герметика перед установкой. Эти покрытия обеспечивают улучшенную защиту от коррозии и адгезию краски. Alodine охватывает технологии хрома, нехрома и анодирования и обслуживает многочисленные рынки, включая индустрию напитков, архитектуру, автомобилестроение, аэрокосмическую промышленность, электронику и другие.

### 6.6.3 Выбор материалов

Принимая во внимание все эти свойства и требования, мы можем перечислить ряд материалов, подходящих для применения в конструкциях гражданских самолетов, включая механически закрепленные соединения.

В основном это алюминиевые сплавы для конструкционных деталей, таких как фюзеляж, крыльев и опор, а также армирующие элементы для таких конструктивных деталей, такие как ребра жесткости, лонжероны, ребра, опоры и фитинги в целом. Они могут быть изготовлены путем формовки рулонных листов, плит и прессованных деталей, обработки и, в меньшем количестве случаев, путем литья.

**Таблица 6.3** Серия из алюминиевого сплава и соответствующие элементы из сплава.

| Серия<br>алюминиевого<br>сплава | из<br>Основной<br>сплава<br>элемент |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| 1XXX                            | Чистый алюминий <sup>а)</sup>       |
| 2XXX                            | Медь                                |
| 3XXX                            | Марганец                            |
| 4XXX                            | Кремний                             |
| 5XXX                            | Магний                              |
| 6XXX                            | Магний и кремний                    |
| 7XXX                            | Цинк                                |
| 8XXX                            | Другие элементы                     |
| 9XXX                            | НЕ используется                     |

а) Для серий 1000, последние две цифры означают сотые доли 1% выше обозначенного 99% (AA1100: 99% чистый алюминий; AA1130: 99.30 чистый алюминий и т.д.) [21].

Основными сериями алюминиевых сплавов, используемых в авиационной промышленности, являются серии AA1XXX, серии AA9XXX. В Таблице 6.3 приведены основные серии алюминиевых сплавов и их основные легирующие элементы.

Наиболее широко используемые алюминиевые сплавы в авиационной промышленности — это серии AA2XXX и AA7XXX, за которыми следуют серии AA6XXX и AA5XXX. Серия сплавов AA2XXX широко используется в элементах обшивки и усилении ребра жесткости, демонстрируя хорошую прочность и хорошую ударную вязкость, с хорошими характеристиками там, где требуется распространение трещин, а серия сплавов AA7XXX обычно используется для применений с высоким сопротивлением, таких как фитинги, лонжероны ребра жесткости, демонстрирующие хорошую статическую прочность. Основным содержанием в сплавах серии AA2XXX является медный элемент (Cu), который в сочетании с алюминием является основой образования и остаточного огрубления в динамике старения. Для сплавов серии AA7XXX основным содержанием является цинковый элемент (Zn), который в сочетании с алюминием является основой образования и остаточного огрубления в динамике старения.

Staley и Hunt [24] сделали краткий обзор использования алюминия в двадцатом веке, а также сделал некоторые выводы в нынешнюю эпоху и наблюдения за будущими тенденциями для авиационной промышленности. Во главе с уменьшающимися потребностями в затратах будущее алюминия рассматривает изделия из лучших деформируемых и кованных материалов, высокотемпературных материалов, подверженных старению, сверхпластичных материалов, отливок, новых сплавов, таких как алюминий-литий третьего поколения и алюминий-магний третьего поколения, и сплавы скандия.

Сталь также очень часто используется в особых случаях при конструировании самолета, где ни один другой сплав не может соответствовать установленным требованиям, включая прочность, температуру, коррозию и т. д., а таким же соотношением выгод с точки зрения стоимости, работоспособности, доступности и допустимости. Использование стали в конструкции самолета каким-то образом предотвращается из-за высокой плотности этого материала, поэтому его использование должно быть оправдано балансом требований и потребностей.

Для авиационного применения эту группу можно разделить на еще несколько подгрупп, как, например, сплавы углеродистой стали (обычный углерод), легированная сталь и нержавеющая сталь.

Сплавы из углеродистой стали (или просто обычные углеродистые сплавы) используются для некоторых мелких деталей или оборудования, где прочность и

стоимость являются основными требованиями, без ущерба для конечного веса всего самолета.

Легированная сталь используется в критических конструктивных деталях с высокими требованиями, такими как, например, болты в соединениях крыла и фюзеляжа, с высокой прочностью. Содержание хрома в легированной стали улучшает их прочность. Хром и никель являются базовыми элементами для нержавеющей стали, которые показывают высокую коррозионную стойкость. Ванадий и молибден, связанные с хромом и высоким содержанием углерода, могут повысить прочность, ударную вязкость, износ и усталость.

Сплавы из нержавеющей стали очень часто используются для специальных применений, где присутствуют высокие температуры или коррозионная восприимчивость, или и то, и другое. Основным содержанием являются хромовые и никелевые элементы, как упоминалось ранее. Одно из типичных применений этого вида стали в самолетах - в выхлопных коллекторах двигателя, другое - в конструкциях пилона. Наиболее используемыми сплавами нержавеющей стали являются серии PH, такие как 13-8, 15-5, 17-7, 18-8, нержавеющая сталь (CRES - серия из нержавеющей стали специально для высокотемпературных применений), например A-286.

Титановые сплавы также широко используются в авиастроении, для фюзеляжа и обшивки крыльев, противопожарных перегородок, рам, фитингов и так далее. Они также широко используются для производства крепежа (болты, такие как хай-локс и стопорные болты) и для деталей, обрабатываемых военными самолетами, где затраты могут быть уменьшены и оправданы из-за количества произведенных самолетов и из-за требуемых высоких механических свойств. Среди металлических материалов титан - это материал с наилучшим соотношением прочности и веса, и он выглядит очень похожим на нержавеющую сталь по внешнему виду, с хорошей стойкостью к коррозии под напряжением и коррозионной стойкостью, аналогичной 18-8. нержавеющей стали. Существует три основных типа титана, и их можно классифицировать как альфа, бета и их комбинацию в зависимости от их микроструктуры и свойств.

Другие сплавы цветных металлов, такие как магниевые сплавы, медные сплавы, высоконикелевые сплавы, не так важны при рассмотрении их использования с точки зрения количества в конструкции самолета. Кроме того, магний показал значительное улучшение в последние несколько лет. Некоторое увеличение механических свойств может превратить его в реальную возможность применения в авиации в ближайшие годы. Магниевые сплавы могут быть перспективным материалом для применения в авиации из-за их самой низкой плотности среди конструкционных металлов. Несколько приложений без структурной ответственности в настоящее время уже используются в самолетах.

Использование полимерных композитов возросло в последних поколениях гражданских самолетов, таких как Аэробус 350 и Боинг 787. Основными классами термореактивных композиционных материалов в конструкциях самолетов являются стекло, углерод и арамидные волокна, армированные в основном эпоксидными и полиэфирными смолами. и некоторые другие не очень обычные полимерные смолы, такие как фенольные (не обычные). Другими недавними примерами новой полимерной матрицы являются полиэфиримид, полифениленсульфид и полиамид 6. Это термопластичные матрицы, которые представляют собой свариваемые композиты, поэтому допускают ремонт. Благодаря своим свойствам плавления и повторного уплотнения эти композиты пригодны для вторичной переработки, что повышает устойчивость компонентов. Композитные материалы имеют более широкое применение в авиационных деталях благодаря своим превосходным механическим свойствам по сравнению с металлическими материалами: прочность, аэроупругость, низкая плотность, меньшая подверженность динамическим повреждениям и усталости.

Комбинируя металл с композитами, мы можем упомянуть FMLs, такие как Glare™ и Arall™, которые изготовлены из определенного количества алюминиевых листов, чередующихся с другими слоями стекловолокна, пропитанными полимерными смолами. FMLs обычно имеют более высокую устойчивость к повреждениям, чем отдельные базовые материалы; однако они обычно немного слабее, чем композитный ламинат с такой же толщиной.

Выбор материала и сплава относительно их свойств принимает во внимание баланс свойств, чтобы удовлетворить совместные требования. Независимо от того, есть ли

улучшение некоторых свойств, обычно это происходит с уменьшением совпадения других. Примерами являются высокая прочность и низкая пластичность, что делает правильный выбор материала сложной задачей.

Выбор материала должен включать обширные знания об окончательном применении, а также рассмотрение связанных с этим факторов, таких как температура, вибрация, помимо коррозии, защита, механические свойства, нагрузка, вес и другие. Таким образом, это не простая задача, чтобы рассмотреть все эти элементы для правильного выбора материала и крепежа.

## 6.7 Крепежные детали

«Крепежная деталь» может быть описана как особый тип механического элемента для выполнения механического соединения деталей. В качестве примера мы можем перечислить следующие: заклепки, болты, винты, штыри, шпильки, гайки, хомуты, шайбы, гайки, как общие крепежные элементы. В этих группах есть несколько специальных крепежных элементов, которые включают серию системы штыря / хомута, серию стопорных болтов, заклепки (сплошные и глухие заклепки), глухие болты, которые объединяют характеристики болтов и глухих заклепок, среди прочих.

Из-за своего небольшого размера важность механического оборудования обычно недооценивают, несмотря на его отношение к безопасности и эффективности эксплуатации самолета.

Механическое крепление — это процесс, в котором используется технология соединения элементов с использованием крепежа, и его финансовая выполнимость увеличивается, когда достигается автоматизированный процесс. Автоматизация установки крепежа, в частности сверления и клепки, делает процесс очень конкурентоспособным по сравнению с другими процессами, такими как сварка. Более того, никакая другая технология не является очень эффективной, когда необходима быстрая разборка (неразрушающая), например, для ремонта.

Крепеж может быть описан и выбран в соответствии с несколькими дополнительными критериями. Важно собрать и установить как можно больше подробностей о требованиях к соединению, поэтому для таких применений можно получить надлежащую спецификацию крепежа. «Правильный выбор и применение крепежа — это первый шаг к созданию надежного оборудования; поэтому стандартный утвержденный список деталей, состоящий из ограниченного числа типов и стилей, обеспечит оптимальную производительность, надежность, ремонтпригодность и экономию» [25]. Как обсуждалось в материале, раздел выбора этой главы для соединяемых деталей, то же самое можно применять для выбора крепежа. Одновременно следует учитывать важные аспекты, включая материал крепежа, характер и уровень нагрузки, аспекты коррозии, а затем защитную отделку, рабочую температуру, механические свойства, молнию, более конкретно, аспекты усталости, приложение крутящего момента, рабочую вибрацию, вес, доступность, установка и т. д.

Несмотря на внутреннюю проблему, важно упомянуть, что правильная размерная спецификация соединения приведет к правильному выбору и спецификации крепежа. Толщина и допуски на отверстия могут быть оценены, чтобы гарантировать надлежащую спецификацию крепления. Уплотнение раздела и приложение крутящего момента (усилие зажима) должны быть приняты во внимание при определении крепежных деталей.

Первая классификация крепежных изделий основана на характере применения, касающемся непрерывности или постоянства установки крепежных элементов, то есть для постоянных или временных соединений. Для постоянных соединений крепежные элементы могут быть установлены один раз, и поэтому для их снятия должен применяться механический процесс, такой как сверление, вызывающий их разрушение. С другой стороны, для временных соединений мы можем использовать съемные крепежные элементы, которые можно снять, а в некоторых случаях переустановить.

Доступность является еще одним очень важным критерием, который необходимо учитывать. Там, где к отверстию можно получить доступ с обеих сторон, могут быть установлены «головка» и «наконечник», сплошные заклепки или болты. Когда имеется только односторонний доступ, можно выбрать слепой доступ, глухие заклепки или глухие болты; или если существует необходимость в создании двустороннего доступа, можно



указать двери, соответствующие требованиям к конструкции и конструкции, такие как смотровые двери на крыльях самолета. Использование пластин с гайками - это опция, позволяющая использовать винты в глухих отверстиях для доступа, так как есть требования к конструкции. Предпочтение при клепке отмечается, когда необходимо изготовить постоянные соединения с большим количеством заклепок, что делает процесс менее трудоемким, чем с любым другим крепежом.

Другой важный вопрос, который следует учитывать при выборе крепежа, - это характер нагрузки, прикладываемой к соединению. По существу, соединение должно переносить сдвиговые или растягивающие нагрузки или даже комбинацию обоих. Этот правильный анализ и спецификация должны быть сделаны, чтобы позволить правильное определение крепежа. В зависимости от характера нагрузки классификация крепежа будет определять тип головки крепежа, ее материал, общие размеры, среди прочих особенностей, таких как размеры, которые могут отличаться от сдвига к натяжному крепежу.

Выбор материала для крепежа зависит не только от критериев проектирования, упомянутых ранее (характер и уровень нагрузки, а также механические свойства, молния, усталостные требования, вес и т. д.), но также зависит от вида применения. Для применения с высокой конструкционной прочностью, такого как критическое соединение крыла с фюзеляжем, должны быть выбраны высокопрочные болты. Другие аспекты, такие как коррозия и температура, должны учитываться при выборе материала крепежа. В Таблице 6.4 представлена сводная информация о материалах крепежа, связанных с ним чистовой обработке или нанесении покрытия, рабочей температуре, прочности и некоторая основная информация. Это дает другие подклассификации для крепежных элементов в зависимости от их материала (например, алюминиевые крепежные элементы, титановые крепежные элементы, стальные крепежные элементы и т. д.), защитного покрытия и покрытия (крепежные элементы с поверхностной обработкой, такие как электрохимическая пассивация, крепежные элементы с покрытием IVD и т. д.), рабочая температура (высокотемпературные крепежи, низкотемпературные крепежи, с некоторыми конкретными температурными диапазонами), среди прочего.

Покрытие и покрытие должны рассматриваться одновременно с выбором материала. Это зависит от материалов соединяемых деталей, а также от материалов крепежа, помимо температуры и рабочей среды. Очень часто используемым покрытием является кадмирование для авиационных алюминиевых деталей. Покрытие кадмием осуществляется электролитическим процессом, который может привести к нежелательному охрупчиванию крепежных деталей водородным загрязнением. Чтобы избежать этого эффекта, детали должны быть подвергнуты термообработке в течение 23 часов при 375 ° F (190 ° C), в течение 2 часов после нанесения покрытия [26]. Настоятельно рекомендуется избегать употребления кадмия из-за его последствий для здоровья. Существуют и другие альтернативные покрытия на основе цинка, никеля, хрома, серебра, фосфатные покрытия, эпоксидные покрытия, IVD алюминиевые покрытия и другие.

В таблице 6.5 представлены характеристики стандартных покрытий и покрытий, используемых для крепежа, а также некоторых фирменных покрытий, таких как Stalgard®, Sermatel W®, and SermaGard®.

С точки зрения защиты от коррозии, некоторые драйверы могут рассматриваться в простой и логичной последовательности [27]:

Материал крепежа предпочтительно должен быть гальванически подобен материалу соединяемых деталей.

Крепеж должен быть изолирован пассивированным покрытием (или титановым крепежным материалом).

**Таблица 6.4** Краткое описание материалов для крепежных элементов.

| Материал                    | Обработка поверхности                             | Предел Полезной расчетной температуры (F) | Предел прочности при комнатной температуре (ksi) | Примечания                                          |
|-----------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Алюминий <sup>а)</sup>      | Анодирование, кадмирование, электролитический ОЧН | -85 до +200                               | до 65                                            | нет сведений                                        |
| Углеродистая сталь          | Цинковая плита                                    | -65 до 250                                | 55 и выше                                        | нет сведений                                        |
| Легированная сталь          | Пластины кадмия, никеля, цинка или хрома          | -65 до предельной температуры обшивки     | до 300                                           | Некоторые из них могут быть использованы при 900° F |
| A-286 нержавеющая           | Пассивированная(MIL-S-5002)                       | -423 до 1200                              | до 220                                           | нет сведений                                        |
| 17-4 PH нержавеющая         | Нет                                               | -300 до 600                               | до 220                                           | нет сведений                                        |
| 17-7 PH нержавеющая         | Пассивированная                                   | -200 до 600                               | до 220                                           | нет сведений                                        |
| 300 серий нержавеющая       | Печь окисленная                                   | -423 до 800                               | 70-140                                           | Окисление уменьшает истирание                       |
| 410, 416, и 430 нержавеющая | Пассивированная                                   | -250 до 1200                              | до 180                                           | 47 ksi при 1200°F; будет слегка разъедать           |
| U-212 нержавеющая           | Очищенная и Пассивированная(MIL-S-5002)           | 1200                                      | 185                                              | 140 ksi при 1200° F                                 |
| Inconel 718 нержавеющая     | Кадмиевая плита или Пассивированная (QQ-P-35)     | -423 до 900 или предел кадмиевой плиты    | до 220                                           | нет сведений                                        |
| Inconel X-750 нержавеющая   | нет                                               | -320 до 1200                              | до 180                                           | 136 ksi при 1200°F                                  |
| Waspalloy нержавеющая       | нет                                               | -423 до 1600                              | 150                                              | нет сведений                                        |
| Титан                       | нет                                               | -350 до 500                               | до 160                                           | нет сведений                                        |

а) Экспериментально определено

Источник: Барет 1990 [26]. Воспроизводится с любезного разрешения NASA.

Выберите крепеж с аналогичным металлическим покрытием (крепежные материалы с кадмиевым покрытием или из легированной стали, установленные в алюминиевой конструкции).

В завершении, используйте герметик для выполнения крепления прилегающей поверхности и уплотнения углов.

Смазка крепежных деталей (резьба и ручка) также заслуживает особого внимания, и следующие параграфы по этой теме основаны на «Руководстве по проектированию крепежных деталей» от [26].

Наиболее распространенными смазками для крепежных изделий являются масло, смазка или воск, графит и дисульфид молибдена. Масло и смазка являются наиболее распространенными типами смазок для резьбы, и рабочая температура зависит от температуры плавления масла или смазки, так как при этом они могут испариться. Кроме того, они хороши для применения с защитой от коррозии.

Графит иногда называют «сухим графитом», но на самом деле он не сухой. Это мелкий углеродный порошок, который нуждается в скоплении влаги (обычно водой или маслом), чтобы стать смазкой. В противном случае он превратится в абразивную среду. Следовательно, рабочая температура смазанного графитом шва должна быть в пределах температуры плавления масла, поэтому следует избегать попадания графита в болтовые соединения, если эти ограничения не соблюдаются.

Дисульфид молибдена является одним из самых популярных сухих смазок. Он может использоваться в вакуумной среде, и предельная температура составляет около 750 ° F (399 ° C), когда он превращается в трисульфид молибдена, который является абразивным, а не смазочным материалом.

**Таблица 6.5.** Краткое описание нанесения покрытий.

| Тип покрытия                                  | Предел полезной расчетной температуры (F) | Примечания                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Кадмий                                        | 450                                       | Наиболее распространенный для аэрокосмического крепежа                                                                                                                                             |
| Цинк                                          | 140-250                                   | Самовосстанавливающийся и дешевле, чем кадмий                                                                                                                                                      |
| Фосфаты:<br>Марганец                          | 225                                       |                                                                                                                                                                                                    |
| Цинк                                          | 225-375                                   | Мягко устойчивый к коррозии, но основное применение - для обработки поверхности перед покраской. Другое применение с маслом или воском для предотвращения коррозии                                 |
| Железо                                        | 400                                       |                                                                                                                                                                                                    |
| Хром                                          | 800-1200                                  | Слишком дорого для большинства                                                                                                                                                                     |
| Серебро                                       | 1600                                      | Самое дорогое покрытие                                                                                                                                                                             |
| Черный оксид (и масло)                        | 300 <sup>1</sup>                          | Неэффективен в предотвращении коррозии                                                                                                                                                             |
| Только крепежи для предварительного окисления | 1200                                      | Предотвращает замерзание нитей CRES                                                                                                                                                                |
| Никель                                        | 1100                                      | Дороже, чем кадмий и цинк                                                                                                                                                                          |
| SemaGard и                                    | 450-1000                                  | Частицы дисперсного алюминия с хроматами в                                                                                                                                                         |
| Sermatel W                                    |                                           | керамическом базовом покрытии на водной основе                                                                                                                                                     |
| Stalgard                                      | 475                                       | Запатентованное органическое и / или органо-неорганическое соединение, используемое для коррозионной стойкости и смазки (в некоторых случаях)                                                      |
| Растворенный                                  | 900                                       | Дорого и требует тщательного контроля,                                                                                                                                                             |
| Никель-кадмий                                 |                                           | чтобы избежать повреждения водородом                                                                                                                                                               |
| Химическое Преобразование <sup>б)</sup>       | 200                                       | Одно из самых простых технологических приложений и один из менее дорогих процессов. Он широко используется для 2000 листов из алюминиевых сплавов, в том числе для листов, плакированных алюминием |
| Анодирующий <sup>б)</sup>                     | 200                                       | Как правило, широко применимо для 7000 алюминиевых сплавов                                                                                                                                         |

а) Температура кипения масла.

б) Экспериментально определено.

Источник: Барет 1990 [26]. Воспроизводится с любезного разрешения NASA.

### 6.7.1 Проектные критерии

В этом разделе представлено краткое описание проектных рекомендаций и правил, касающихся механического крепления:

*Простые правила:*

Для целей снижения веса основное правило - хранить как можно меньше крепежных элементов в конструкции. Чтобы выполнить конструктивные требования, они должны достичь максимального расстояния между рядами крепежа (меньшая склонность к катастрофическому разрушению).

В целях снижения веса используйте лучшее соотношение прочности и веса, учитывая удельный вес следующих материалов: алюминий (2,70), титан (4,75), и сталь (7,18), в г/см<sup>3</sup>.

Заклепки, стержни и стопорные болты имеют диаметр 32 дюйма (1/32"). Болты обозначены в шестнадцатом дюймом диаметра (1/16"). Все они определены в 16 дюймов (1/16") длины.

*Простая рекомендация:*

Не используйте болты меньше чем V4" диаметром на структурном крепежном соединении.

По возможности используйте один и тот же крепежный элемент с одинаковым диаметром, рукояткой и длиной в одном соединении, чтобы минимизировать вероятность несовпадения зажима и соединителя, а также несовпадения крепежа (замена стержня и буртика или болта и гайки).

Головка болта может быть установлена вверх, поэтому в случае ослабления гайки, это сводит к минимуму ослабление крепежа или некоторого F.O.D. (повреждение посторонних предметов) в конструкции и системах самолета.

Расположение крепежа должно быть в точке, которая облегчает визуализацию и обслуживание.

В целях минимизации молниеносных искр наконечник головки крепежа предварительно прокачивается во влажной зоне (топливный бак) вместо наконечника гайки; так как меньше деталей соприкасается, это уменьшает вероятность возникновения искр.

Заклепочный материал должен иметь меньшую прочность на сдвиг, чем соединение материала. Головка в форме заклепки (опущенная головка) должна быть установлена против самого толстого или самого твердого материала в соединении.

Для соединений из алюминиевого литья и композитных материалов может быть установлена подходящая шайба на стороне головки с заклепками, чтобы избежать повреждения соединения.

Некоторые традиционные группы производителей и поставщиков крепежа для авиационной продукции: Воздушно-космические крепежные материалы в виде монограммы, Воздушно-космический LISI, Корпорация Hi-Shear, Система крепления Alcoa (AFS), Bristol Индастриз, Объединенная компания Allfast, Cherry® Воздушно-космический, и Технологии SPS, среди многих важных других. Он не предназначен для предоставления и обсуждения деталей различных имеющихся в продаже крепежных элементов в этой главе, поскольку существует множество продуктов для множества применений.

## 6.8 Краткие выводы и заключительные примечания

В этой вводной главе по механическому креплению мы пересмотрели основные концепции и теории, касающиеся механически закрепленных соединений в конструкциях самолетов. Используя типичную терминологию, принятую в сообществе проектировщиков конструкций самолетов, мы описали общие соображения по проектированию конструкций. Эта глава предлагает инженерам и студентам инженерных специальностей обзор основных типов соединений, встречающихся в основных конструкциях самолетов: сдвиговые и натяжные соединения. Основное внимание уделялось распределению напряжений и геометрическому влиянию крепежа, геометрии элементов и структуры. Было проведено краткое сравнение механического поведения и распределения остаточных напряжений в

клеевых и сварных соединениях по сравнению с механически скрепленными соединениями, показывая ограничения и преимущества каждого метода. Кроме того, были рассмотрены допуски и вопросы сборки механически скрепленных соединений, в результате чего были предложены передовые методы проектирования для снижения остаточных напряжений, связанных со сборкой. В заключении, мы рассмотрели материалы и типы крепежа и обсудили основные рекомендации и методы при выполнении механически скрепляемых соединений для конструкций самолетов.

Эта глава в первую очередь предназначена для предоставления обзора физики процесса и механических характеристик механически закрепленных соединений в конструкциях самолетов. Выдвигаемые теории, как правило, в определенной степени действительны для соединений однородных и разнородных материалов. Читателям, желающим углубить свои знания в области механического крепления, рекомендуется обратиться к учебникам, цитируемым в этой главе.

## Литература

- 1 De Rijck, J.J.M. (2005) Stress Analysis of Fatigue Cracks in Mechanically Fastened Joints. MsC thesis. Delft University.
- 2 DOT/FAA/AR-MMPDS-01 (2003) Mcoавtoplic Materials Properties Development and Standardization, Office of Aviation Research Washington, D.C. 20591.
- 3 Niu, M.C. (1989) Aircraft Structural Design, 2nd edn, Conmilit Press.
- 4 Niu, M.C. (1999) Aircraft Structural Analysis and Sizing, 2nd edn, Conmilit Press.
- 5 Bucalem, M.L. and Bathe, K.-J. (2011) The Mechanics of Solids and Structures – Hierarchical Modeling and the Finite Element Solution, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- 6 Tate, M.B. and Rosenfeld, S.J. (1946) Preliminary Investigation of the Loads Carried by Individual Bolts in Bolted Joints, NACA TN 1051.
- 7 De Rijck, J.J.M. and Fawaz, A. (2001) Simplified approach for stress analysis of mechanically fastened joints. 4th DoD/FAA/NASA Conference on Aging Aircraft.
- 8 Rooke, D.P. and Cartwright, D.J. (1976) Compendium of Stress Intensity Factors, Stationery Office.
- 9 Southwest Research Institute (2012) NASGRO Crack Propagation Analysis Software, [www.nasgro.com](http://www.nasgro.com) (accessed 11 August 2017)
- 10 Swift, T. (1971) Development of the fail-safe design feature of the DC-10, damage tolerance in aircraft structures, ASTM STP 486. Am. Soc. Test. Mater., 164–214.
- 11 Schijve, J. (2004) Fatigue of Structures and Materials, 1st edn, Kluwer Academic Publishers.
- 12 Schijve, J. (1972) Some Elementary Calculations on Secondary Bending in Simple Lap Joints. National Aerospace Laboratory NLR, Report TR 69116, National Aerospace Laboratory (NLR) Reports Repository, Amsterdam.
- 13 Schijve, J., Campoli, G., and Monaco, A. (2009) Fatigue of structures and secondary bending in structural elements. Int. J. Fatigue, 31, 1111–1123.
- 14 Wanhill, R.J.H. (2002) Milestone Case Histories in Aircraft Structural Integrity, NLR-TP-2002-521, National Aerospace Laboratory NLR.
- 15 Swift, T. (1992) Damage tolerance capability. Proceeding of Specialists Conference on Fatigue of Aircraft Materials 63, Delft University of Technology, October 1992.
- 16 Møller, R.P.G. (1995) An experimental and analytical investigation of the fatigue behaviour of fuselage riveted lap joints. The significance of the rivet squeeze force, and a comparison of 2024-T3 and glare 3, Doctor Thesis, Delft University of Technology.
- 17 ESDU 85021 (2005) Analysis of Pretensioned Bolted Joints Subject to Tensile (Separating) Forces.
- 18 Roetscher, F. (1927) Die Maschinenelemente, Erster Band, Julius Springer, Berlin.
- 19 2006) Shigley's Mechanical Engineering Design, 8th edn, McGraw-Hill.
- 20 Vlot, A. and Gunnink, J.W. (2001) Fibre Mcoавtop Laminates – An Introduction, Kluwer Academic Publishers, Delft, Netherlands.
- 21 FAA Chapter 5: Aircraft Materials, Processes & Hardware, [http://www.faa.gov/library/manuals/aircraft/amt\\_handbook/media/FAA-8083-30\\_Ch05.pdf](http://www.faa.gov/library/manuals/aircraft/amt_handbook/media/FAA-8083-30_Ch05.pdf), (accessed 14 August 2017).
- 22 Ashby, M.F. (1999) Materials Selection in Mechanical Design, Butterworth-Heinemann.

- 23 Joshi, A. Lithium Aluminium Alloys – The New Generation Aerospace Alloys, Indian Institute of Technology, Bombay, <http://www.mcoabtopwebnews.com/howto/alloys/alloys.pdf>, (accessed December 2012)
- 24 Hunt, W. H., Staley, J. T., High strength aluminum alloys for aerospace application, Light-weight Alloys for Aerospace Applications, Las Vegas, NV, March 1989, 111–120.
- 25 NASA (1993) Fastener Standardization and Selection Considerations, Guideline no. GD-ED-2201, National Aeronautics and Space Administration.
- 26 Barret, R.T. (1990) Fastener Design Manual; Reference Publication 1228, National Aeronautics and Space Administration, NASA.
- 27 Mohaghegh, M. (2008) Aircraft Structures Design and Analysis, University of Washington, UW Continuum College.



## 7 Механическое крепление композитных и металлокомпозитных материалов

*Pedro P. Camanho u Giuseppe Catalanotti*

*Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal*

### 7.1 Введение

Конкуренция между металлами и полимерными композитами как основного материала для первичных структурных применений в авиационной и автомобильной промышленности требует оптимальных конструкций, которые в полной мере используют возможности каждого материала. Одним из ограничений полимерных композиционных материалов является их относительно низкая эффективность соединения [1], которая определяется как соотношение между надрезом соединения и прочностью без надреза. Такая низкая эффективность является результатом ограниченной способности полимерных композитов уменьшать концентрации напряжений, возникающие в болтовой области соединения.

Несмотря на то, что недавно были предложены оригинальные решения для повышения эффективности соединений, такие как использование гибридных металлокомпозитных локальных армирующих элементов [2, 3], существует необходимость в решении проблемы как перепроектирования композитных болтовых соединений, возникающего в результате использование чрезмерно упрощенных методов анализа и чрезмерной стоимости экспериментально обоснованной конструкции композитных болтовых соединений. Ясно, что моделирование сложных механизмов разрушения, которые возникают в полимерных композитах, далеко не простая задача. Механизмы разрушения полимерных композитов включают разделение между слоями (расслоение), разрушение волокна при растяжении, излом волокна и растрескивание поперечной матрицы. Кроме того, полимерные композиционные материалы представляют собой фрикционные материалы [4], реакция которых при определенных условиях нагружения зависит от скорости деформации [5].

Разрушение составных болтовых соединений происходит в результате накопления различных подкритических механизмов разрушения, а конкретный режим разрушения, который может быть подшипником, натяжением сетки, сдвигом или расщеплением (рис. 7.1), зависит от геометрии соединения и использованный набор [1]. Малые отношения между шириной образца ( $w$ ) и диаметром отверстия ( $d$ ) приводят к разрушению натяжения сетки, а небольшие отношения между конечным расстоянием ( $e$ ) и диаметром отверстия способствуют отказу при сдвиге.



**Рис. 7.1** Типовые виды разрушений композитных болтовых соединений

Были предложены различные методы для прогнозирования нагрузки при разрушении и режима разрушения композитных болтовых соединений. Использование критериев сбой целесообразно для прогнозирования возникновения механизмов сбой и определения типа сбой; однако одни только критерии отказа не могут предсказать окончательный отказ составного болтового соединения, который является результатом распространения различных механизмов отказа до критического размера. Поэтому наиболее широко используемые методы прогнозирования нагрузки разрушения и режима разрушения композитных болтовых соединений основаны на применении критерия разрушения на характерном расстоянии от границы отверстия. Такие методы являются модификациями

моделей точечного и среднего напряжения, предложенных Whitney и Nuismer [6,7]. Идентификация режима совместного отказа основана на месте, где выполняется критерий отказа.

В качестве альтернативы используются нелинейные методы конечных элементов с соответствующими моделями материалов, которые моделируют возникновение и распространение различных режимов разрушения [8-10]. Несмотря на то, что существующие методы обеспечивают достаточно точные прогнозы нагрузки при отказе и режима составных болтовых соединений, существуют некоторые трудности, которые необходимо устранить. Первый заключается в том, что методы, основанные на моделях точечного и среднего напряжения, требуют эмпирической калибровки характерного расстояния, используемого в критерии отказа. Измерение этого регулирующего параметра требуется для различных режимов отказа, геометрии и компоновки. Вторая трудность заключается в том, что, как правило, нелинейные методы конечных элементов не учитывают взаимодействие различных механизмов разрушения и зависимый от давления отклик композитного материала. В результате модель, основанная на одном наборе свойств материала, может дать хорошие прогнозы для одной конфигурации соединения, но не для других конфигураций, где изменяются некоторые параметры конструкции соединения, например, давление зажима.

На основе предыдущих наблюдений, целью этой главы является представление новых аналитических моделей для составных болтовых соединений. Представлены две модели анализа с различными уровнями сложности, принимая во внимание, что проектирование сложной составной структуры основано на различных этапах, которые включают предварительный проект и оптимизацию, и детальный анализ.

Первый, основанный на механике конечного разрушения (FFMs) [11-13], предоставляет решения, основанные на независимо измеренных свойствах материала за несколько секунд. Поэтому модель FFM вполне подходит для предварительного проектирования и оптимизации композитных конструкций.

Второй метод, представленный в этой главе, основан на недавно разработанной трехмерной модели пластического разрушения для полимерных композитов, реализованной в нелинейном коде конечных элементов (FE) [14]. Оба представленных метода применимы как к гибридным соединениям композит-композит, так и гибриду композит-металл.

## 7.2 Полуаналитический метод для проектирования композитных соединений

Подход FFM для прогнозирования отказа основано на предположении, что распространение трещины требует одновременного выполнения критериев, основанных на напряжении и энергии [11-13]. В общем, критерий FFM представлен как [13]:

$$\begin{cases} \frac{1}{l} \int_R^{R+1} \sigma(x) dx = X_I^T \\ \frac{1}{l} \int_R^{R+1} K^2(a) da = K_C^2(\Delta a) \end{cases} \quad (7.1)$$

где  $l$ , это расширение трещины при разрушении,  $R$  это радиус отверстия, а это длина трещины,  $X_I^T$  это прочность слоя без надреза,  $\sigma(x)$  представляет распределение напряжений вдоль плоскости разрушения,  $K$  является фактором интенсивности напряжения и  $K < C(Aa)$  это вязкость разрушения слоя, которая может быть функцией увеличения длины трещины ( $Aa$ ). Принимая во внимание, что применение критерия FFM основано на распространении доминирующей макротрещины этот критерий подходит для прогнозирования режимов разрушения сети или срыва. Однако, модель МКР не применимо для прогнозирования вида отказа при смещении отверстия (рис. 7.1). Этот режим некатастрофического разрушения характеризуется постоянной деформацией отверстия, которая является результатом накопления различных механизмов разрушения в нескольких слоях композитного ламината. Следовательно, невозможно четко определить макротрещину, которая определяет окончательный отказ соединения.

### 7.2.1 Прогнозирование разрыва при растяжении

Рис. 7.2 показывает геометрию композитного слоя, подвергнутого болтовой нагрузке, которая представлена синусоидальным распределением давления,  $p(\theta)$ . Критерий FFMs критерий требует решения для распределения напряжений вдоль

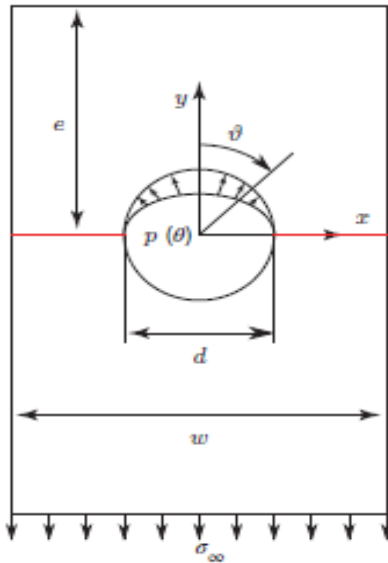


Рис. 7.2 Геометрия и нагрузка композитного наложения.

плоскости натяжения и для коэффициента интенсивности напряжений двух симметричных трещин, которые исходят от границы отверстия вдоль плоскости разрушения натяжения сетки. Введение безразмерных переменных  $\xi = \frac{2}{w-d} \left( x - \frac{d}{2} \right)$  и  $\xi^* = \frac{2}{w-d} \left( a - \frac{d}{2} \right)$  можно переписать уравнение 7.1 как:

$$\begin{cases} \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_{yy}(\xi) d\xi = X_I^T \\ \frac{1}{l} \int_0^l K_1^2(\xi^*) d\xi = K_{IC}^2(\Delta \xi^*) \end{cases} \quad (7.2)$$

Решение для коэффициента интенсивности напряжений для типичных ламинатов требует численного приближения, хотя для прогнозирования распределения напряжений существуют полуаналитические методы.

Предлагаемая процедура состоит из численного расчета функций  $\sigma_{yy}(\xi)$  и  $K_I(\xi)$  с использованием линейных упругих моделей FE. Суперпозиция поля напряжений используется для расчета распределения напряжений вдоль плоскости натяжения сетки. Рассматривая  $\phi(\xi, \omega)$  в качестве безразмерной функции масштабирования распределения напряжений для единицы удаленной нагрузки, приложенной к композитному болтовому соединению с диаметром единичного отверстия и толщиной единицы, распределение напряжений для общей выносной нагрузки и диаметра считывает:

$$\sigma_{yy}(\xi, \omega) = \sigma_b \phi(\xi, \omega) \quad (7.3)$$

где  $\sigma_b$  напряжение смещенного отверстия определяется как  $\sigma_b = \frac{P}{d}$ , и  $\omega$  это безразмерный параметр, определяемый как соотношение между шириной образца и диаметром отверстия,  $\omega = w/d$ .

Безразмерная функция  $\phi(\xi, \omega)$  определяется с помощью параметрических линейно-упругих моделей FE составных болтовых соединений, имеющих толщину единицы и диаметр отверстия единицы, подвергнутых унитарной дистанционной нагрузке. ABAQUS [15] CPS8 элементы используются в параметрических моделях FE для прогнозирования распределения напряжений вдоль плоскости натяжения сетки. На основе FE результатов,  $\phi(\xi, \omega)$  округляется полиномом вида  $\phi(\xi, \omega) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \Phi_{ij} \xi^{i-1} \omega^{j-1}$ . Компоненты матрицы приведены в [16].

Аналогичная процедура используется для определения функции  $K_1^2(\xi^*)$ . Линейно-упругие модели FE представляют две симметричные трещины, которые исходят от

границы отверстия, и соответствующий коэффициент интенсивности напряжений вычисляется для различных длин трещины из интеграла  $J$  рассчитанного используя ABAQUS [15].

Рассматривая  $\psi(\xi, \varpi)$  в качестве безразмерной функции масштабирования коэффициента интенсивности напряжений для единичной удаленной нагрузки, приложенной к композитному болтовому соединению с единичным диаметром и толщиной отверстия и с двумя симметричными трещинами вдоль плоскости

$$K_1(\xi^1, \varpi) = \sqrt{d} \sigma_b \psi(\xi^*, \varpi) \quad (7.4)$$

натяжения сетки,  $\psi(\xi, \varpi)$  коэффициент интенсивности напряжений для общей удаленной нагрузки и диаметр считает:

На основе FE результатов округляется полиномом в виде

$$\psi(\xi^*, \varpi) = \frac{\sqrt{\xi^*}}{1 - \xi^*} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \Psi_{ij} \xi^{i-1} \varpi^{j-1}$$

Компоненты матрицы  $\Psi_{ij}$  представлены в [16].

используя (7.3) и (7.4) в (7.2), результирующая система нелинейных уравнений может быть решена для прочности крепежного соединения и для длины трещины при разрушении.

Модель, представленная в предыдущих пунктах, проверяется путем сравнения ее прогнозов с тестами, выполненными с использованием Hexcel's IM7/8552 углерод-эпоксидные слои. Используется [90/0/+45/-45]<sub>3S</sub> стяжка с номинальной толщиной 3 мм. Эластичные свойства слоя IM7/8552 показаны в Таблице 7.1.

$E_1$  и  $E_2$  соответственно слой продольный и поперечный модуля Юнга,  $G_{12}$  это модуль сдвига слоя, и  $\nu_{12}$  является коэффициентом Пуассона.

Ламинат без надреза имеет прочность  $X^T_L = 845$  МПа [14], и вязкость разрушения ламината приближается следующей функцией Гомперца [17]:

$$K_{IC}(\Delta\alpha) = K_{IC}^p e^{\log(K_{IC}^l/K_{IC}^p)} e^{-b\Delta\alpha} \quad (7.5)$$

**Таблица 7.1** Эластичные свойства слоя.

| $E_1$ (GPa) | $E_2$ (GPa) | $G_{12}$ (GPa) | $\nu_{12}$ (-) |
|-------------|-------------|----------------|----------------|
| 171         | 9.1         | 5.3            | 0.32           |

где  $K_{IC}^l$  это вязкость при начале разрушения,  $K_{IC}^p$  вязкость разрушения, соответствующая стационарному распространению трещины, и  $b$  коэффициент формы, рассчитанный по R-кривой. Кривая R для материала и конструкции, использованных здесь, получается следующим образом: испытания компактного натяжения (СТ) выполняются ламинатом с перекрестными слоями [90/0]<sub>8S</sub> для измерения кривой R 0° слои для трещин, которые распространяются перпендикулярно направлению волокон [18]. Измерив кривую R для слоев 0°, кривая R исследуемое расположение рассчитывается с использованием механической модели, чья вязкость разрушения слоя 0° к многонаправленному слою [19], при условии, что длина зоны процесса разрушения одинакова. На основании этой процедуры остальные свойства материала, необходимые для модели, получаются как:  $K_{IC}^l = 36.7$  МПа $\cdot$ мм<sup>-1/2</sup>,  $K_{IC}^p = 42.8$  МПа $\cdot$ мм<sup>-1/2</sup>, и  $b = 1.27$  мм<sup>-1</sup>.

Экспериментальные испытания проводятся в соответствии со стандартом Американским обществом испытаний и материалов ASTM D-5961 standard [20]. Используются три разных соотношения ширины к диаметру:  $m = 1.5, 1.75$ , и  $2.0$ . Диаметр отверстия равен 6 мм для всех испытаний, и крутящий момент 2.2 Н м применяется к шайбам для обозначения герметичных болтовых соединений.

Рисунок 7.3 показывает образцы, соответствующие трем различным геометриям, использованным после загрузки до отказа. Режим отказа натяжения сетки наблюдается во всех испытанных образцах. Это означает, что модель FFMs применима для прогнозирования прочности испытываемых образцов.

Таблица 7.2 сравнивает предсказания модели с экспериментальными результатами.

Получено отличное согласование прогноза модели и экспериментальных результатов. Однако следует отметить, что модель должна дополняться прогнозом перехода между режимами натяжения сетки и разрушения крепежного соединения. Прогноз может быть выполнен с использованием соответствующих модификаций традиционных моделей точечного или среднего напряжения, или с помощью более сложных численных моделей, которые будут описаны в следующем разделе.



**Рис. 7.3** Разрушение соединений при разных соотношениях  $w/d$ .

**Таблица 7.2** Экспериментальные и прогнозируемые сильные стороны соединений.

| Образец | Прочность<br>(МПа) | Прочность<br>(МПа) | Ошибка (%) |
|---------|--------------------|--------------------|------------|
| NT1     | 322                | 310                | -4         |
| NT2     | 466                | 435                | -7         |
| NT3     | 527                | 550                | +4         |

### 7.3 Численный метод проектирования композитных соединений

Было предложено большое количество численных моделей для моделирования возникновения различных механизмов разрушения, которые возникают в составных болтовых соединениях, а также их распространения до критического размера, соответствующего структурному разрушению соединения. Первоначально были разработаны модели, в которых для представления механизмов разрушения слоев были использованы простые редукции некоторых свойств эластичности слоя [9]. Эти модели дали разумные прогнозы, но размер элемента должен быть откалиброван для обеспечения того, чтобы расчетное рассеивание энергии соответствовало фактической энергии, рассеиваемой в результате распространения различных механизмов отказа. Кроме того, большинство моделей, разработанных для имитации разрушения в составных болтовых соединениях, не учитывали механизм разрушения расслоения. Хотя пренебрежение расслоением допустимо для болтовых соединений с давлением на всю толщину, приложенным шайбой, это не относится к штифтовым соединениям, которые имеют тенденцию расслаиваться.

Предложенная здесь методика моделирования разрушения в составных болтовых соединениях в общих условиях нагрузки состоит в использовании связующих элементов [21, 22] на границах между слоями для моделирования расслоения и недавно предложенной трехмерной модели размытой трещины для моделирования механизмов разрушения слоев [14], смотрите Рис. 7.4.

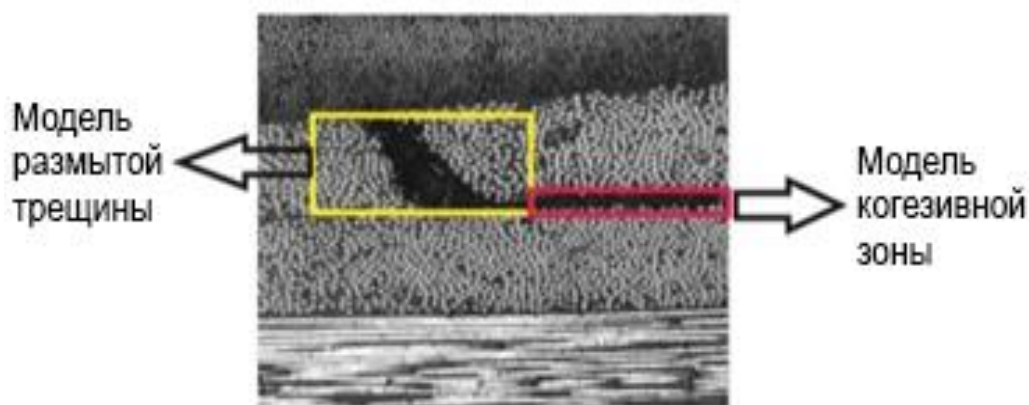


**Рис. 7.4** Стратегия моделирования

Концепция модели размытой трещины легко объясняется на одномерном примере. Рассмотрим распространение поперечной трещины под чистым поперечным натяжением (режим I нагрузки), как показано на рисунке 7.5.

Под чистым поперечным натяжением плоскость трещины перпендикулярна приложенному напряжению, и она перекрывается неразрывными связками матрицы. Такие мостиковые механизмы наблюдались экспериментально, см. [23]. По мере того как раскрытие трещины, определяемое как  $\omega$ , увеличивает тягу, передаваемую поверхностями трещины,  $t$  уменьшается до тех пор, пока не образуется трещина без тяги. Эта связь между растяжением и раскрытием трещины может быть представлена простым линейным законом размягчения, как показано на рисунке 7.6.

Линейный закон смягчения задается как:

$$t(\omega) = Y_T \left(1 - \frac{\omega}{\omega_f}\right) \quad (7.6)$$

где  $Y_T$  это поперечная прочность на растяжение, и  $\omega_f$  является раскрытием трещины, соответствующей полностью сформированной трещине. Площадь под отношением раскрытия тяги и трещины является вязкостью разрушения,  $G_c$ , что подразумевает, что раскрытие трещины

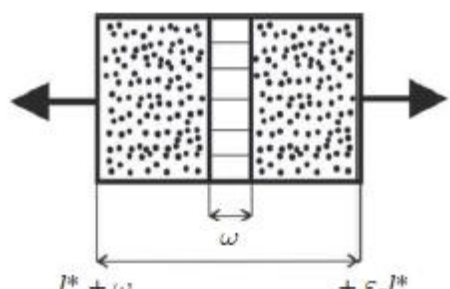


**Рис. 7.5** Схематическое изображение мостовой поперечной трещины

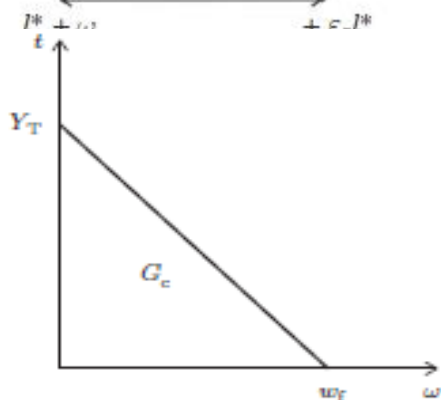


**Рис. 7.6** Линейная зависимость тяги-перемещения.

соответствующая полностью сформированной трещине задается как:

$$\omega_f = \frac{2G_c}{Y_T} \quad (7.7)$$

Общая деформация репрезентативного элемента объема, показанного на рисунке 7.5:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \frac{\omega}{l^*} = \varepsilon_e + \varepsilon_c \quad (7.8)$$

где  $\varepsilon_e$  — упругая деформация неповрежденного материала,  $\varepsilon_c$  — это растрескивание, и  $l^*$  — это исходный размер типичного элемента объема в направлении, перпендикулярном плоскости

$$\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon_c) = t(\omega) \quad (7.9)$$

трещины. Применяя уравнение равновесия (смотрите Рис. 7.7):

Используя (7.7) и (7.8) в (7.9), результирующее уравнение может быть решено для скачка смещения:

$$\omega = \frac{2(E\varepsilon - Y_T)l^*G_c}{2EG_c - Y_T^2l^*} \quad (7.10)$$

Определив  $\omega$ , исходя из приложенной деформации, вычисление напряжения тривиально выполняется с использованием закона сцепления, показанного в (7.6).

Интересно связать модель размазанной трещины с предыдущими подходами, в которых механизмы разрушения композитных ламинатов были представлены в результате разрушения некоторых компонентов матрицы жесткости в духе механики непрерывного повреждения. Для простого случая, представленного ранее, эффект поперечной матричной трещины представлен использованием уменьшенного модуля Юнга ( $E_d$ ) как:  $\sigma = E_d\varepsilon$ , смотрите Рис. 7.8.

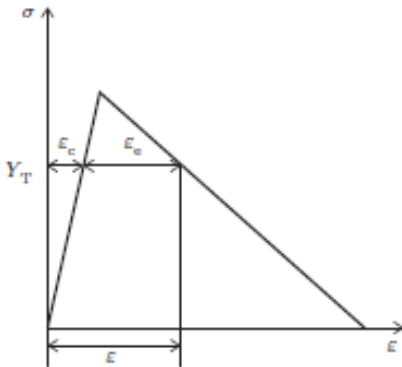


**Рис. 7.7** Общая деформация, упругая деформация и растрескивание.

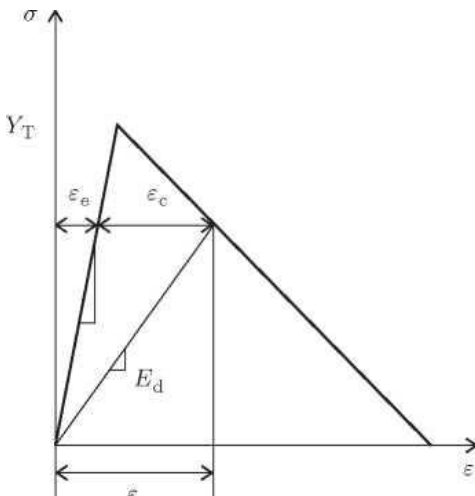


**Рис. 7.8** Поврежденный модуль упругости

Связь между моделью размытой трещины и моделью повреждения континуума определяется как:

$$\sigma = E_d \varepsilon = E(\varepsilon - \varepsilon_c) \quad (7.11)$$



Используя (7.8) и (7.10) в (7.11):

$$E_d = \frac{Y_T(2G_c - \varepsilon Y_T l^*)}{(2EG_c - Y_T^2 l^*)\varepsilon} E \quad (7.12)$$

Уравнение (7.12) определяет коэффициент деградации поперечного модуля Юнга. Следует подчеркнуть, что фактор деградации больше не является эмпирическим, но теперь он определяется как:  $\frac{Y_T(2G_c - \varepsilon Y_T l^*)}{(2EG_c - Y_T^2 l^*)\varepsilon}$ .

Предыдущее упражнение также определяет критическую длину для  $l^*$ , что соответствует максимально допустимому размеру элемента в модели КЭ:  $E_d$  должно быть больше или равно нулю; наложение этого условия на уравнение 7.12 приводит к следующему ограничению на размер элемента  $l^* \leq 2EG_c/Y_T^2$ .

Альтернативная интерпретация этого условия заключается в том, что общая деформация должна быть равна или превышать деформацию при растрескивании (см. Уравнение 7.11), что означает, что не допускается возвратная связь отношения размягчения и деформации, показанного на рисунке 7.8.

В составных болтовых соединениях плоскость трещины может иметь разные ориентации, и она может подвергаться нагрузкам смешанного режима. Поэтому необходимо обобщить предыдущую одномерную модель для общих условий нагружения. Мы предлагаем полностью трехмерную модель размытой трещины, основанную на следующих строительных блоках [14]:

- Полностью трехмерные, зависящие от давления критерии разрушения, которые предсказывают начало разрушения и ориентацию плоскости трещины [24]. После определения ориентации плоскости трещины и связанной с ней системы координат (рамки трещины) они остаются фиксированными, и все вычисления выполняются в системе трещин.
- Закон сцепления смешанного режима, который учитывает зависимость вязкости разрушения от соотношения мод и условий загрузки/разгрузки. Используются соответствующие модификации связного закона смешанного режима, который был разработан для имитации расслаивания [21, 22].

Полные детали трехмерной модели размытой трещины, используемой для моделирования механизмов разрушения слоя, описаны в [14]. Моделирование расслаивания выполняется с использованием связующих элементов [21, 22], размещенных на границах раздела между слоями. Как модель размазанной трещины, так и связная модель осуществляются в Заклучении ABAQUS [15] с помощью пользовательских моделей материалов, закодированных в подпрограммах VUMAT [15].

Модели FE используйте один объемный трехмерный элемент на толщину слоя (ABAQUS C3D8R элементы с пониженной интеграцией [15]) и связующие элементы вдоль всех границ раздела композитного ламината. Стальная шайба и стальной болт также моделируются с использованием элементы C3D8R.

Были использованы две различные плотности сетки, см. Рис. 7.9: в непосредственной близости от отверстия, переработанная сетка, где используется типичный размер FE -  $0.5 \times 0.5 \times 0.125 \text{ мм}^3$ . В упругой области, где нет повреждений, используется грубая сетка. Связь между двумя несоответствующими сетками устанавливается с помощью многоточечных ограничений.

Нагрузка, налагаемая на модель, состоит из первого шага, когда к шайбе прикладывается давление зажима 22 МПа. Соединение тогда нагружено в напряжении, применяя скорость к одному концу ламината, удерживая болт фиксированным.

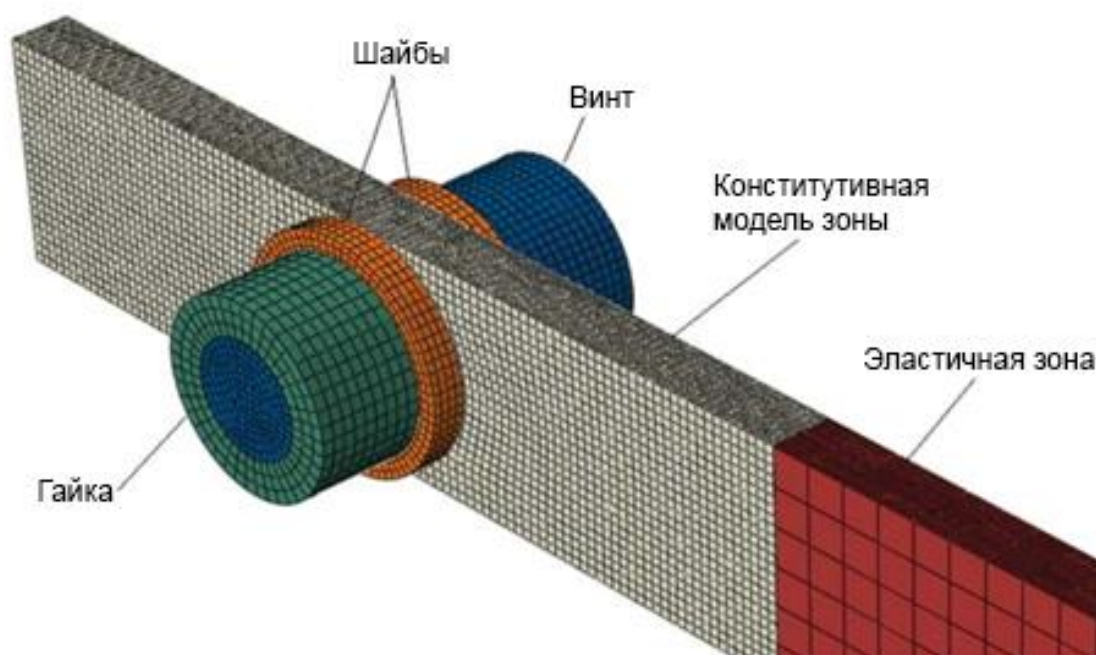


**Рис. 7.9** Сетка болтового соединения

**Таблица 7.3** Прочность слоев и вязкость межслойного разрушения.

| $X_T$ (МПа) | $X_C$ (МПа) | $G_{Ic}$ (кДж/м <sup>2</sup> ) | $G_{IIc}$ (кДж/м <sup>2</sup> ) | $\eta$ (–) |
|-------------|-------------|--------------------------------|---------------------------------|------------|
| 2806        | 1200        | 0.277                          | 0.788                           | 1.6        |

**Таблица 7.4** Предел трансламинарной вязкости разрушения.

| $G_{1+}^i$ (кДж/м <sup>2</sup> ) | $G_{1+}^{ss}$ (кДж/м <sup>2</sup> ) | $l_{fpz}$ (мм) | $G_{1-}^i$ (кДж/м <sup>2</sup> ) |
|----------------------------------|-------------------------------------|----------------|----------------------------------|
| 94.1                             | 134.7                               | 3.4            | 47.5                             |

Используемая геометрия и свойства материала соответствуют свойствам NT3 образца натяжения сетки, показанный в таблице 7.2. Дополнительные свойства материала, необходимые для модели FE, представлены в таблицах 7.3 и 7.4.

$X_T$  и  $X_C$  соответственно растяжимость и продольная прочность на сжатие.  $G_{Ic}$  и  $G_{IIc}$  соответственно режим I и режим II межслойной вязкости разрушения, и  $\eta$  это параметр смешанного режима взаимодействия [21, 22].  $G_{1+}^i$  и  $G_{1+}^{ss}$  соответственно значения инициирования и установившегося распространения вязкости при растяжении трансламинарного разрушения,  $l_{fpz}$  это длина соответствующей области протекания процесса разрушения, и  $G_{1-}^i$  это вязкость при трансламинарном разрушении.

Рис. 7.10 представляет переменную повреждения, связанную с разрушением волокна после окончательного разрушения образца. Наблюдаются повреждения вдоль плоскости натяжения и повреждения из-за нагрузки на болт.

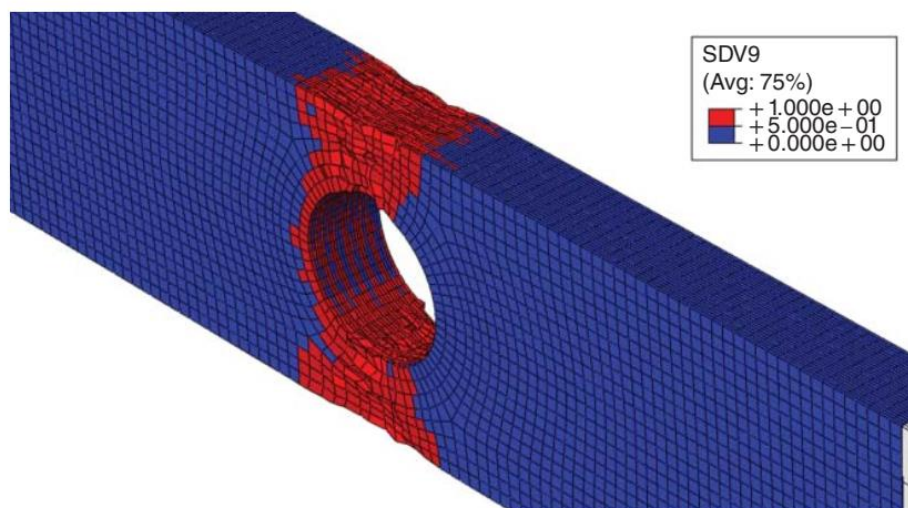


**Рис. 7.10** Переменная повреждения для полностью поврежденного соединения

Прогнозируемое пиковое значение напряжения опоры в 519 МПа это значение хорошо коррелирует с экспериментальными результатами (среднее значение 531 МПа). Соответствующая ошибка -2.4% улучшение прогнозов, полученных с использованием модели FFMs (ошибка 4.3%).

## 7.4 Выводы

Модели, представленные в этой главе, показывают, что в настоящее время возможно выполнить точные прогнозы прочности композитных болтовых соединений с различными уровнями детализации и стоимости.

Простые модели, основанные на FFMs, дают достаточно точные прогнозы для предварительного проектирования композитных структур. Абсолютное значение максимальной ошибки, полученной с использованием модели FFMs составляет 7%, что весьма примечательно, учитывая, что модель основана на независимо измеренных свойствах материала, определенных на уровне слоя. Модель FFMs дает прогноз за несколько секунд, что означает, что эта модель подходит для оптимизации крупномасштабных структур. Стоимость использования FFMs очень низкая - необходимы только свойства материала: R-кривая слоя и его прочность; а также, для запуска модели не требуются опытные пользователи или большие вычислительные мощности.

Однако модель FFMs применима только в том случае, когда макротрещина доминирует в процессе разрушения. Это означает, что он подходит для прогнозирования режимов разрушения сети и разрушения, а не режима разрушения опоры, который характеризуется постоянной деформацией отверстия в результате накопления механизмов докритического разрушения. Прогнозирование прочности болтовых соединений, которые разрушаются на крепежном соединении, требует соответствующих модификаций моделей точечного или среднего напряжения, нелинейных моделей FE.

Стратегия моделирования, основанная на трехмерных моделях конечных элементов, в которых используются связующие элементы вдоль границ раздела между слоями для имитации расслоения, и модели размазанных трещин для имитации разрушения слоя - альтернативный метод прогнозирования прочности составных болтовых соединений.

Модель размазанной трещины учитывает направленность трещин и их распространение в общих условиях смешанной нагрузки. Кроме того, модель размазанной трещины обеспечивает четкое физическое значение коэффициентов уменьшения, использованных в предыдущих моделях повреждений: компоненты тензора жесткости, на которые воздействует повреждение, и соответствующий коэффициент уменьшения являются функцией ориентации трещины, приложенной деформации, свойств материала и

характеристической длины элемента. Верхняя граница для размера FE, которая может быть использована, также определяется из формулировки модели размазанной трещины.

Точность прогнозирования нагрузки на разрыв при натяжении с использованием нелинейной модели конечных элементов выше, чем у аналитической модели. Кроме того, нелинейная модель конечных элементов позволяет прогнозировать остаточную прочность и идентифицировать несколько механизмов докритического разрушения. Тем не менее, эти усовершенствования сопровождаются большими затратами времени на вычисления и большим количеством экспериментальных испытаний для измерения требуемых свойств материала, которые определяются на уровне слоев.

Оба метода, представленные здесь, также применимы к гибридным соединениям композит-металл, поэтому очень полезны в связи с возрастающей тенденцией в разработке высокоэффективных гибридных структур.

## Благодарность

Авторы благодарят за поддержку AIRBUS по проекту iComp - Интегрированный метод для структурного проектирования композитных компонентов.

Джузеппе Каталанти хотел бы выразить признательность за поддержку Fundacao para a Ciencia e a Tecnologia по гранту FCT-DFRH-SFRH-BPD- 78104-2011.

## Литература

- 1 Camanho, P.P. and Matthews, F.L. (1997) Stress analysis and strength prediction in FRP joints: a review. *Composites Part A*, 28, 529–547.
- 2 Camanho, P.P., Fink, A., Obst, A., and Pimenta, S. (2009) Hybrid titanium-CFRP laminates for high-performance bolted joints. *Composites Part A*, 40, 1826–1837.
- 3 Fink, A., Camanho, P.P., Andr s, J.M. et al. (2010) Hybrid CFRP/titanium bolted joints: performance assessment and application to a spacecraft payload adaptor. *Compos. Sci. Technol.*, 70, 305–317.
- 4 Vogler, M., Rolfes, R., and Camanho, P.P. (2013) Modeling the inelastic deformation and fracture of polymer composites – Part I: Plasticity model. *Mech. Mater.*, 59, 50–64. doi: 10.1016/j.mechmat.2012.12.002
- 5 Koerber, H., Xavier, J.C., and Camanho, P.P. (2010) High strain rate characterization of unidirectional carbon-epoxy IM7-8552 in transverse compression and in-plane shear using digital image correlation. *Mech. Mater.*, 42, 1002–1019.
- 6 Whitney, J.M. and Nuismer, R.J. (1974) Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations. *J. Compos. Mater.*, 8, 253–265.
- 7 Nuismer, R.J. and Labor, J.D. (1979) Applications of the average stress failure criterion: Part I — Tension. *J. Compos. Mater.*, 12, 238–249.
- 8 Frizzell, R.M., McCarthy, C.T., and McCarthy, M.A. (2011) Simulating damage and delamination in fibre mcoавтор laminate joints using a three-dimensional damage model with cohesive elements and damage regularisation. *Compos. Sci. Technol.*, 71, 1225–1235.
- 9 Chang, F.K. and Chang, K.Y. (1987) A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations. *J. Compos. Mater.*, 21, 834–855.
- 10 Camanho, P.P. and Matthews, F.L. (1999) A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates. *J. Compos. Mater.*, 33, 2248–2280.
- 11 Leguillon, D. (2002) Strength or toughness? A criterion for crack onset at a notch. *Eur. J. Mech. A. Solids*, 21, 61–72.
- 12 Cornetti, P., Pugno, N., Carpinteri, A., and Taylor, D. (2006) Finite fracture mechanics: a coupled stress and energy failure criterion. *Eng. Fract. Mech.*, 73, 2021–2033.
- 13 Camanho, P.P., Erzin, G.H., Catalanotti, G. et al. (2012) A finite fracture mechanics model for the prediction of the open-hole strength of composite laminates. *Composites Part A*, 43, 1219–1225.

- 14 Camanho, P.P., Bessa, M.A., Catalanotti, G. et al. (2013) Modeling the inelastic deformation and fracture of polymer composites – Part II: Smeared crack model. *Mech. Mater.*, 59, 36–49. doi: 10.1016/j.mechmat.2012.12.001
- 15 Dassault Systèmes (2011) Abaqus 6.8 Users Manual, Dassault Systèmes.
- 16 Catalanotti, G. and Camanho, P.P. (2013) A semi-analytical method to predict net-tension failure of mechanically fastened joints in composite laminates. *Compos. Sci. Technol.*, 76, 69–76.
- 17 Seber, G.A.F. and Wild, C.J. (1989) *Nonlinear Regression*, John Wiley & Sons, Inc..
- 18 Catalanotti, G., Camanho, P.P., Xavier, J.C. et al. (2010) Measurement of resistance curves in the longitudinal failure of composites using digital image correlation. *Compos. Sci. Technol.*, 70, 1986–1993.
- 19 Camanho, P.P. and Catalanotti, G. (2011) On the relation between the composite laminate fracture toughness and that of the 0: analytical model and experimental validation. *Eng. Fract. Mech.*, 78, 2535–2546.
- 20 ASTM D5961/D5961M-10 (2010) Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates, American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA.
- 21 Camanho, P.P., Dóvila, C.G., and Moura, M. (2003) Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite materials. *J. Compos. Mater.*, 37, 1415–1438.
- 22 Turon, A., Camanho, P.P., Costa, J., and Dóvila, C.G. (2006) A damage model for the simulation of delamination in advanced composites under variable-mode loading. *Mech. Mater.*, 38, 1072–1089.
- 23 Hobbiebrunken, T., Hojo, M., Adachi, T. et al. (2006) Evaluation of interfacial strength in CF/epoxies using FEM and in-situ experiments. *Composites Part A*, 37, 2248–2256.
- 24 Catalanotti, G., Camanho, P.P., and Marques, A.T. (2013) Three-dimensional failure criteria for fiber reinforced laminates. *Compos. Struct.*, 95, 63–79.

## 8 Фрикционное заклепывание металлополимерных мультикомпозиционных конструкций

*Sergio T. Amancio-Filho<sup>1,2</sup> и Lucian-Attila Blaga<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Институт материаловедения, механики материалов, процессов соединения твердого тела, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Centre for Materials and Coastal Research, Geesthacht, Germany*

<sup>2</sup>*Текущее место работы: Институт материаловедения, соединения и формирования, Грацкий технический университет, Грац, Австрия*

### 8.1 Введение

В последние годы использование гибридных металлополимерных конструкций в промышленности возросло, главным образом, из-за улучшенных характеристик и снижения веса. Области применения варьируются от автомобильного, аэрокосмического, судостроительного, железнодорожного и гражданского строительства. Объединение полимерных металлических материалов по-прежнему является новой темой исследований, и доступной информации мало. Messler Jr [1, 2] сообщил, что методы соединения, используемые для многослойных конструкций, включают механическое крепление, клеевое соединение и несколько сварочных процессов (последний только для аналогичных соединений внутри конструкции). Кроме того, в настоящее время исследуются другие методы, такие как гибридные методы соединения (клеевое соединение в сочетании с механическим креплением или сваркой), стяжка полимера и литье пластмасс под давлением в перфорированных металлических деталях [3,4].

Фрикционное заклепывание было разработано и запатентовано Гельмгольц-Центр Гестахт (ГЦГ) в Германии в 2007 году как способ соединения гибридных металлополимерных структур [5, 6]. Этот метод основан на принципах механического крепления и сварки трением, когда цилиндрическая заклепка используется для соединения металлических или термопластичных деталей посредством нагрева при трении. По сравнению с другими технологиями производства, используемыми для гибридных соединений, таких как адгезионное соединение, клепка при трении не требует сложной подготовки поверхности или отвердителей и требует более короткого времени обработки. Что касается использования заклепок, этот метод исключает необходимость предварительного сверления, сокращает количество этапов процесса и снижает концентрацию напряжений из-за наличия эффекта надреза, связанного со сквозными отверстиями. Этот метод позволяет изготавливать соединения с высокими механическими характеристиками [7].

Фрикционное заклепывание обладает потенциалом для удовлетворения технологических и рыночных потребностей полимерных металлических структур. Эта техника недавно привлекла внимание международного НИИ сообщества и получила различные инженерные и научные награды (см. Список наград за достижения в конце главы). Технология фрикционного заклепывания — это новый альтернативный процесс точечного соединения, разработанный для полимер-полимерных и металлополимерных многокомпонентных структур. Теплота трения во время процесса в основном генерируется трением между наконечником вращающейся заклепки и полимерной (или композитной) подложкой в зоне трения. В базовой конфигурации этого метода цилиндрическая металлическая заклепка используется для соединения одного или нескольких термопластичных, или термореактивных компонентов посредством пластификации и деформации наконечника вращающейся заклепки посредством фрикционного нагрева. Преимуществами этого нового метода являются короткие циклы соединения, минимальная подготовка образца и отсутствие выбросов в окружающую среду. Соединения с фрикционной клепкой обладают улучшенными механическими характеристиками. Возможность применения фрикционного заклепывания была продемонстрирована на нескольких комбинациях материалов: от неармированных полимеров до композитов, армированных углеродом и стекловолокном, с алюминием или титаном, как показано в таблице 8.1:

**Таблица 8.1** Изучены комбинации материалов для Фрикционного Заклепывания (по состоянию на декабрь, 2017).

| Комбинация материала                                                       | AA2024-T351 | AA 6056- T6 | Ti gr. 2 | Ti gr. 3 | Ti6Al4V | Нержавеющая сталь S321 |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|----------|----------|---------|------------------------|
| Полиэфиримид (PEI)                                                         |             |             |          |          |         |                        |
| Поликарбонат (PC)                                                          |             |             |          |          |         |                        |
| 40% короткий армированный стекловолокном полиэфирэфиркетон (40CF-PEEK)     |             |             |          |          |         |                        |
| 30% короткий армированный стекловолокном полиамид 6 (30GF-PA6)             |             |             |          |          |         |                        |
| Армированный стекловолокном полиэфиримид (GF-PEI)                          |             |             |          |          |         |                        |
| Армированный углеродным волокном полиэфирэфиркетон (CF-PEEK)               |             |             |          |          |         |                        |
| Пултрузионный термореактивный полиэфир, армированный стекловолокном (GF-P) |             |             |          |          |         |                        |

Серые ячейки соответствуют проверенным возможным комбинациям материалов

## 8.2 Фрикционное заклепывание: принцип метода

Концепция фрикционного заклепывания основана на принципах механического крепления и фрикционной сварки, когда энергия объединения приобретает вид теплового трения, которое обеспечивается вращательным движением одного из соединяющихся компонентов (обычно цилиндрической заклепки). Фрикционное заклепывание может быть выполнено для различных конфигураций соединений, таких как соединения наложением с использованием металлической заклепки или металлических вставок в полимерных



деталях. Принципы этого процесса могут быть лучше поняты при изготовлении металлических вставок в термопластиках. Первоначально, подсоединяемые части закреплены на оборудовании по опорной раме. Следующим этапом является этап раннего соединения, на котором заклепка поворачивается и прижимается к поверхности полимерного компонента (рис. 8.1 (а)); высокое вращение и приложенное осевое усилие нагревают полимер за счет трения, в результате чего вокруг краев заклепки образуется тонкий расплавленный или размягченный слой (рис. 8.1 (б)). Когда заклепка проникает в термопластичную матрицу, расплавленный или размягченный термопластик вытесняется в виде выплавки за пределы области соединения. Из-за высокой температуры и низкой теплопроводности термопластика местная температура на конце заклепки значительно повышается, приближаясь к температуре пластификации металла (между 60% и 95% температуры плавления). В это время скорость вращения заклепки (RS) уменьшается, а осевая сила увеличивается - применяется так называемое ковочное усилие; заклепка выталкивает оставшийся размягченный материал в направлении выплавки, сталкиваясь с сопротивлением холодной массы термопластика. Таким образом, пластифицированный край заклепки деформируется, принимая диаметр, больший, чем первоначальный диаметр (рис. 8.1 (с) и (d)).

После охлаждения под давлением соединение уплотняется (рис. 8.1 (е)). Увеличение осевой силы может быть пропущено в зависимости от выбора параметров соединения, контролирующих выработку тепла. Другими словами, можно избежать фазыковки во Фрикционном Заклепывании, если подвод тепла достаточно высок, чтобы обеспечить пластификацию наконечника заклепки. Это может быть выгодно, например, для использования соединительного оборудования с меньшими нагрузками [7].

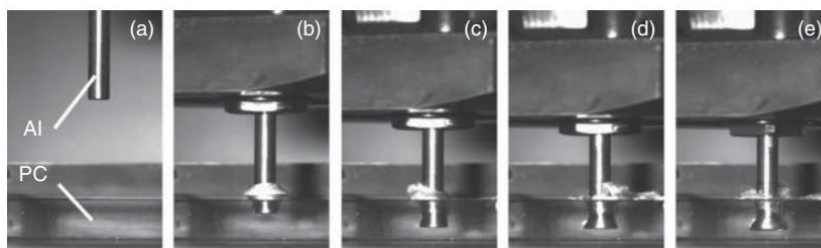


**Рис. 8.1** Схема процесса клепки при трении, показанная для соединений «точка на плите». (а) Расположение и закрепление присоединяющихся партнеров. (б) Ротационная вставка заклепки в основание из полимера. (с) Вращательный разрыв с последующим (d) ковкой для заклепок. (е) Совместная консолидация (Источник: Rodrigues соавтор. 2014 [8]. Воспроизводится с разрешением Elsevier).

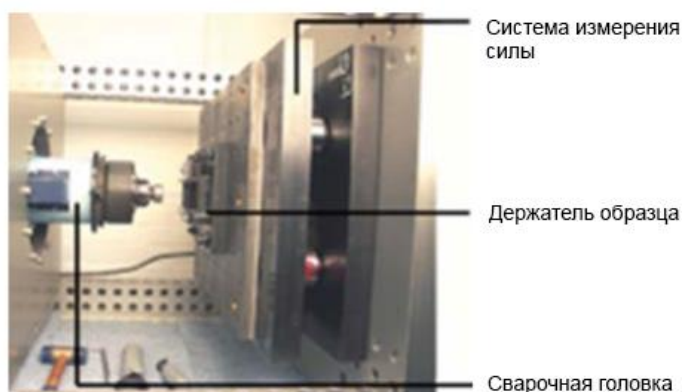


**Рис. 8.2** Схема соединительного оборудования RSM 400 используемый для Фрикционной заклепки.

### 8.2.1 Оборудование и ход выполнения соединения

По существу, любое оборудование, используемое для выполнения соединений, способное обеспечить вращение и перемещение шпинделя (то есть, CNC и фрезерные и фрикционные сварочные аппараты) может быть адаптировано под фрикционное заклепывание. Соединительное оборудование, используемое в разработке процесса фрикционного заклепывания, состоит из коммерчески доступных аппаратов для фрикционной сварки (RSM 400, Harms & Wende, Germany) с системой измерения сопряженной силы для измерения крутящего момента (Kistler GmbH, Germany). На рис. 8.2 показано соединительное оборудование, описанное выше [7].

Совсем недавно новый исследовательский аппарат для фрикционной заклепывания - RNA (H. Loitz-Robotik, Германия) – разработан в Гельмгольц-Центр Гестахт. Новый порталный станок состоит из имеющейся в продаже высокоскоростной системы фрикционной сварки (RSM 410, Harms & Wende GmbH, Германия) собран на автоматизированной порталной системе. RNA оснащен трехосными датчиками силы, датчиками крутящего момента и встроенным датчиком положения (рис. 8.3). Основные различия между оборудованием RNA и его предшественником RSM 400 состоят в следующем: процесс может контролироваться или сочетанием времени, силы, смещения, скорости вращения и угла, тогда как в предыдущем соединительном оборудовании процесс контролировался только временем. Новое оборудование позволяет разделить процесс на пять контролируемых этапов настройки (первые три относятся к трению, четвертый - промежуточная фаза, пятый - фазаковки), а в предыдущем - настройка параметров соединения происходит в два контролируемых по времени шага (трение иковка) [9]. Новая порталная система также позволяет изготавливать компоненты примерно до одного кубического метра.

### 8.3 Фрикционное заклепывание: технологические параметры и переменные величины процесса

Параметры и переменные величины фрикционного заклепывания аналогичны тем, которые встречаются в составе фрикционной сварки [10] и спининговой сварке трением [11], за счет идентичности процессов



Рис. 8.3 Оборудование RNA для фрикционного заклепывания.

Параметр можно понимать, как контролируемые входные данные, а переменные - как результат процесса. Основными параметрами процесса, которые влияют на тепловые,

механические и микроструктурные свойства соединений, изготовленных фрикционным соединением, являются: скорость вращения (RS), время соединения (JT), и давление соединения (JP). Эффективное сочетание этих параметров со свойствами соединяемых материалов (в частности, теплопроводностью, тепловым расширением и вязкостью расплава) определяет качество стяжки металлической заклепки после деформации в термопластичной матрице и, следовательно, механические характеристики соединений [12]. Основными переменными процесса являются время нагрева, время выгорания, скорость выгорания, температура и момент трения. Переменные и параметры процесса будут описаны в следующих разделах.

### 8.3.1 Технологические параметры

**Скорость вращения (RS)** это угловая скорость вращающейся цилиндрической заклепки. Это важно для развития температуры и связанных с ней явлений (контроль вязкости расплавленного полимера, образование термических дефектов и т. д.), способствующих образованию фрикционного нагрева. Время соединения (JT) содержит сумму времени трения ( $t_0$  - FT сегмент в диаграмме Рисунка 8.4) и время ковки (FT - FoT сегмент в диаграмме Рисунка 8.4). Время фрикции и время ковки (FoT) устанавливаются оператором. Помимо контроля скорости соединения, JT влияет на уровень объемных дефектов в полимерной детали, связанных с термомеханической обработкой, контролируя количество тепловой энергии поставляемую с расплавленной полимерной пленкой.

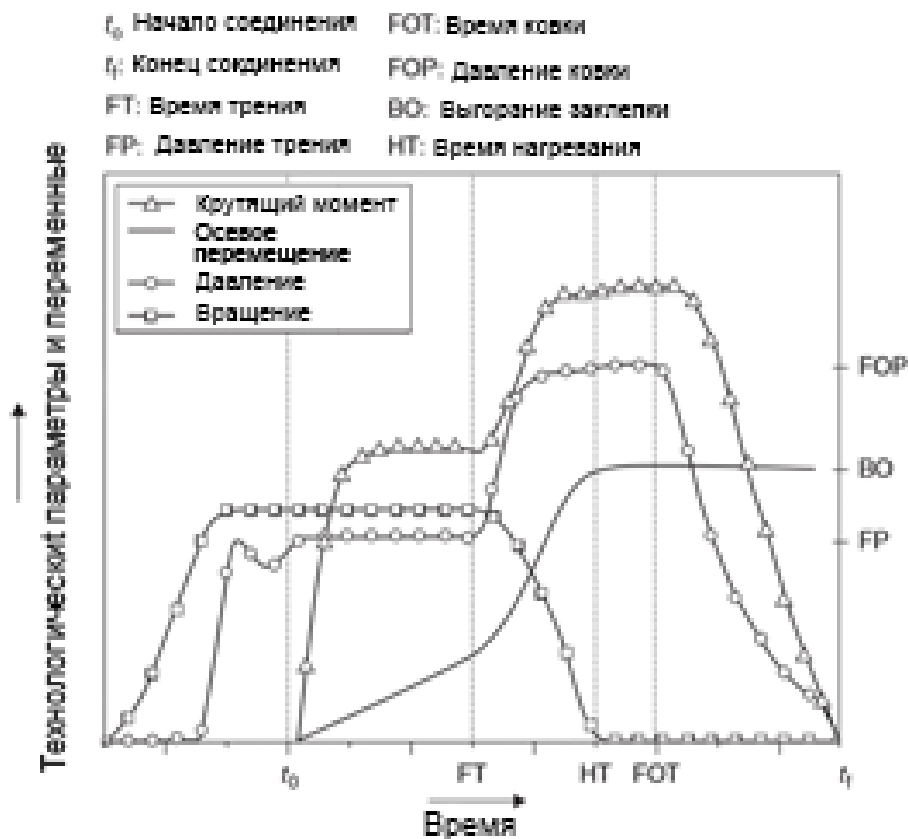


**Рис. 8.4** Схема экспериментального мониторинга с основными технологическими параметрами и переменными Фрикционной заклепки (например, для вида процесса контролируемого временем)

Давление соединения (JP) это сложение давления трения ( $t_1$  – сегмент FP в схеме Рисунка 8.4) и давление ковки (FP – сегмент FoP в схеме Рисунка 8.4). FP and FoP также устанавливается оператором. ДС относится к распределению нормального давления на резиновых поверхностях. Сходство с RS и JT, он также способствует нагреву трущихся поверхностей и контролю скорости соединения, хотя его основная роль заключается в контроле фаз ковки и уплотнения заклепок [7]. Последнее оборудование RNA использует силу вместо давления, поэтому параметр будет аналогично назван Сила соединения.

### 8.3.2 Переменные величины процесса

**Время нагревания** интервал, связанный с начальным контактом между заклепкой и базовым элементом (касание), и момент, когда RS становится безрезультатным ( $t_0$  - НТ сегмент в схеме Рисунка 8.4). Эта переменная представляет режим ввода тепла и обеспечивает хорошую оценку уровня пластификации материала и показывает количество структурных изменений, вызванных термическим воздействием материала (например, разрушение полимера, физическое старение и явления отжига металла). Выгорание — это переменная, связанная с уровнем вставки заклепки в базовые компоненты и его потребляемой (деформированной) длиной. Он получается из кривой контроля осевого смещения от касания заклепки до конца соединительного курса (сегмент  $t_f$  - ВО на диаграмме рисунка 8.4). Наряду со временем нагрева эта переменная обеспечивает хорошую оценку уровня пластификации заклепки, достигнутого во время соединения. Скорость выгорания может рассматриваться как средняя скорость соединения во время Фрикционного Заклепывания. Он рассчитывается из отношения между скоростью выгорания и временем нагрева, обеспечивая среднее приближение к реальной скорости соединения.

**Средняя технологическая температура** обеспечивает оценку изменений вязкости размягченного/расплавленного полимера, который вместе со скоростью деформации напрямую связан с условиями трения и выделением тепла. Это ключевая переменная при объяснении микроструктуры и изменений свойств в области сустава. Момент трения является не только инструментом для оценки реологического поведения расплавленного полимера и пластификации заклепочного материала, но также и способом выявления технологических аномалий и дефектов, связанных с неисправностью оборудования и плохой чистотой поверхности (например, оставшиеся чистящие жидкости, изменяющие условия трения) соединения компоненты до присоединения [7].

### 8.4 Фрикционное заклепывание: фазы процесса и выработка тепла

Фрикционное заклепывание можно проанализировать с точки зрения фаз процесса, связанных с различными стадиями тепловыделения и осевого смещения заклепки над JT. Эта аналогия обычно применяется в других методах соединения, основанных на трении, таких как сварка пластиком методом центрифугирования [13]. Процесс можно разделить на пять основных этапов, как показано на рисунке 8.4. В Фазе-I, Coulomb Friction (твердое трение) это обязательный нагревательный механизм; трение Coulomb также находится на начальных этапах других методов соединения трения [14]. Твердое трение во Фрикционном заклепывании считается, что это полимер-полимерный тип, где более твердые неровности металла проникают в более мягкий полимер, а не смазываются. Обычно коэффициент динамического трения уменьшается с вращением и временем из-за переноса полимерной пленки на металлическую поверхность (обычно для пластичных полимеров) или из-за крошечных расщепленных полимерных частиц, которые действуют как смазка [15] (в основном для стеклообразных полимеров). Во время этой очень короткой фазы осевое смещение заклепки практически равно нулю (смотрите P-I, Рис. 8.5).

Режим трения изменяется от твердого к расплавленному состоянию, когда фрикционный нагрев достаточно высок, чтобы размягчить/расплавить полимер на прилегающих поверхностях. Это отметит начало нестационарной вязкой диссипации или фазы-II (смотрите P-II, Рис. 8.5). В ходе этой фазы нагрев трением происходит главным образом из-за внутреннего сдвига в расплавленном полимере вследствие распутывания цепи [16].

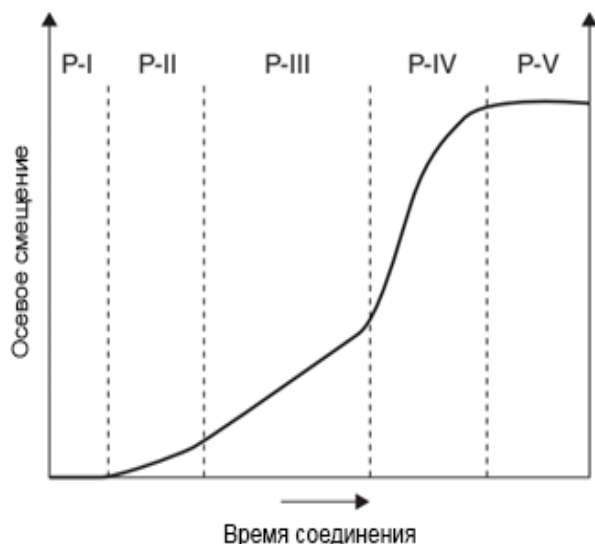


**Рис. 8.5** Фазы фрикционного заклепывании: P-I: Coulomb Friction (твердое трение). P-II: нестационарная вязкая диссипация. P-III: Установившееся вязкая диссипация. P-IV: Фаза заклепки. P-V: Фаза консолидации

На этом этапе заклепка начинает проникать через полимерную опорную плиту, в результате чего осевое смещение нелинейно увеличивается со временем.

В Фазе-III, или в фазе стационарной вязкой диссипации, существует баланс между скоростью плавления полимера под вращающимся концом заклепки и скоростями вытекания расплавленного материала (выходящего в виде выплавки). Следовательно, осевое смещение линейно возрастает со временем. К концу этой фазы достигается желаемый уровень пластификации в наконечнике заклепки, и процесс готов к фазековки [17].

В фазе заклепки или в IV Фазе, вращение замедляется (торможение двигателя), а осевое давление (давлениековки) увеличивается. В результате толщина расплавленного полимерного слоя сильно уменьшается ниже кончика заклепки. Увеличение объема выплавки связано с дополнительным количеством сжатого материала. Обратите внимание, что материал выплавки может быть извлечен после соединения или размещен во входах, размещенных в шляпке стяга. Таким образом, резкое увеличение скорости осевого смещения (см. Изменение наклона кривой участка P-IV, Рис. 8.5). Затем пластифицированный конец заклепки деформируется, что приводит к параболическому рисунку [17].

В Фазе консолидации или в Фазе-V, соединение застывает под постоянным давлением. Смещение достигает максимума, становится постоянным (см. P-V, Рис. 8.5). Расплавленный полимер консолидируется вокруг заклепки, создавая связанную линию раздела [17].

На основании описания тепловыделения на разных этапах процесса, Аманцио-Фильхо дос Сантос [18] предложили аналитическую модель для подвода тепла в неармированные соединения с клепкой:

$$Q_{\text{итог}} = \left[ \left( \frac{2}{3} * \mu * P(r) \right) + \frac{\eta * V_{\text{max}}}{H} \right] * V_{\text{max}} \quad (8.1)$$

где  $\mu$  это коэффициент кинематического трения,  $P(r)$  нормальное распределение давления по зоне трения,  $\eta$  вязкость расплавленного полимера,  $V_{\text{max}}$  максимальная тангенциальная скорость заклепки, полученная из угловой скорости ( $\omega$ ) и радиуса недеформированной заклепки ( $R$ ):  $\omega = V_{\text{max}}/R$ , и  $H$  средняя ширина консолидированного полимерного слоя [18].

Эта модель коррелирует параметры процесса соединения с твердотельными и реологическими свойствами термомеханически обработанного термопластичного полимера. Однако эта аналитическая модель не учитывает сложное поведение тепловыделения в термореактивных полимерах и тканых волокнистых композитах. В этом случае сильное трение происходит в течение всего процесса соединения и зависит от типа матрицы и усиления (для композитов).

Подвод механической энергии часто используется для оценки тепловыделения во время процессов сварки на основе трения для термопластов [13, 19] и металлов [20-23]. Учитывая сходство процессов для клепки, этот подход может быть использован во Фрикционном заклепывании. Ввод механической энергии — это энергия, вводимая в соединение в результате процесса Фрикционной заклепки в соответствии с уравнением 8.2 [20, 21], состоящий из двух условий. Первое условие соответствует энергии, накопленной за счет крутящего момента ( $M$ ) и угловая скорость ( $\omega$ ) - то есть из-за вращения заклепки - и второе условие соответствует энергии из-за осевой силы ( $F$ ) и осевое смещение ( $x$ ) - то есть вставка заклепки. Первые два условия могут быть упрощены, потому что условие 2 (частью поступательной энергии) обычно можно пренебречь, так как ее вклад в механическую энергию обычно примерно в 20 раз меньше, чем вклад условия 1 [24]. Ввод механической энергии был рассчитан в соответствии с упрощенной формулой уравнения 8.2 [24]. Учитывая, что  $M$  является результатом изменений материала - то есть отражает изменения фрикционных свойств - во время процесса это уравнение может также применяться для оценки зависящего от процесса выделения тепла для композитных деталей на основе термореактивных и армированных материалов.

$$E_{mech} = \int M * \omega dt + \int F * (x_0 - x_1) dt \sim \int M * \omega dt \quad (8.2)$$

## 8.5 Изменение температуры во времени

Термическая предыстория (изменение температуры во времени) во фрикционном заклепывании зависит от теплопередачи и массообмена, так как расплавленный полимер выдавливается. Другими словами, тепловая предыстория является результатом баланса между подводом тепла и оттоком тепла. Таким образом, не только теплопроводность, но также и реологические свойства расплавленного полимера, такие как вязкость расплава, плюс уровень нагревания при трении, поддерживаемый RS, JT и JP будет влиять на температуру процесса.

Эволюция температуры во время фрикционного заклепывания оценена для различных комбинаций основного материала (BM). Температуру обычно измеряют на выплавлении только что вытесненного полимера с помощью инфракрасной (IR) камеры. Для других методов сварки, использующих силу трения [25] хорошо известно, что прямое измерение реальной температуры в области трения очень сложно из-за относительного движения обеих матированных поверхностей. Учитывая короткие фазы нагрева, присутствующие во фрикционном заклепывании и из-за низкой проводимости полимера вполне приемлемо предположить, что температура в материале выплавки примерно такая же, как в области трения. Таким образом, средние пиковые температуры, измеренные ИК-термографией, можно рассматривать как средние температуры в области трения.

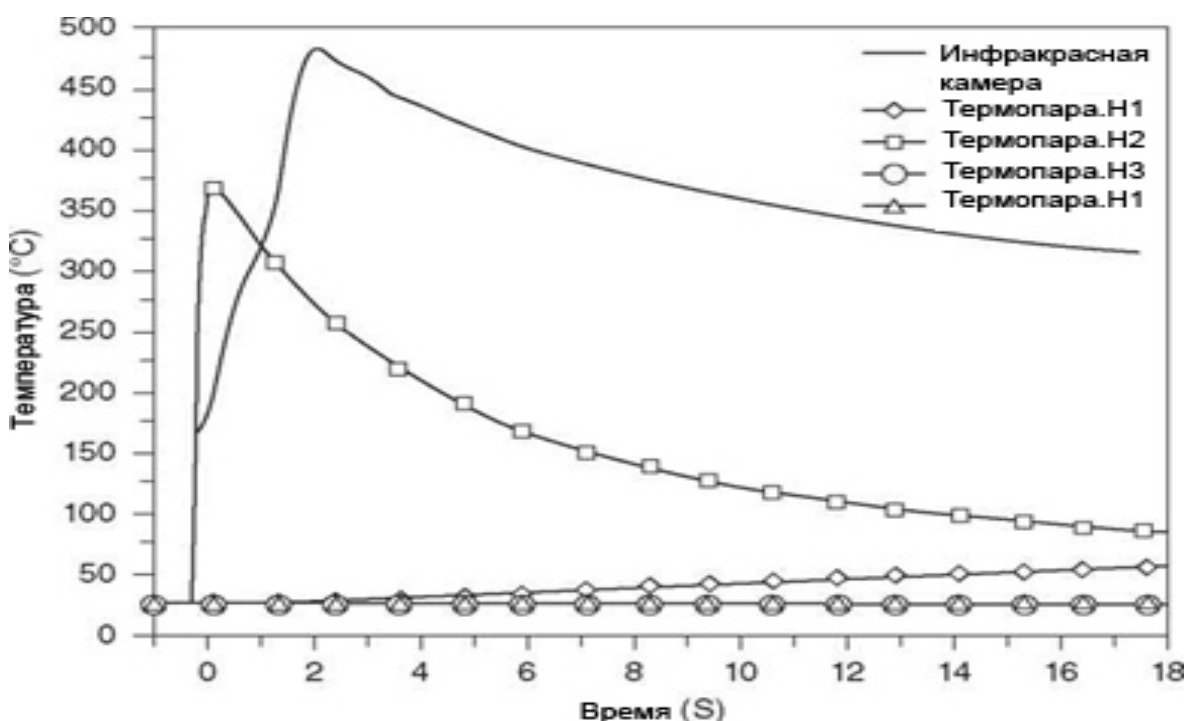
Для соединений AA2024-T351/PEI, средние пиковые температуры, измеренные с помощью термопар и IR-термографии, находились в пределах 300-500 °C. Рис. 8.6 отображает схематические термометрические и термографические измерительные системы, используемые для контроля температуры процесса для PEI-Алюминиевого соединения 2024 произведенного в 21,000 об/мин., 3 с, и 11 bar [7]. Рис. 8.6 показывает, что средние пиковые температуры термопары были в пределах приблизительного диапазона 30-65 °C для H1, H3, и H4 и 350 °C для H2. Самые высокие измеренные температуры наблюдались для термопар H2 и H3, ближайшие точки измерения к центру заклепки и области протирки. Это указывает на то, что температура имеет тенденцию повышаться при приближении к основной области тепловыделения источника, к поверхности прилегания, как и ожидалось [7].

Аналогичные тенденции также рассматривались для других термопластичных-металлических соединений: Поликарбонат (PC) Алюминий 2024 (Рис. 8.7(а) [8]), 40% Полиэфиркетон короткоармированный углеродным волокном (PEEK-40CF)/Ti Уровень 3 (Рис. 8.8(b) [24]), 30% Полиамид короткоармированный стекловолокном 6 (PA 6-30GF)-Алюминий 6056-T6 (Рис. 8.9 [9]), полиэфиримид армированный тканым стекловолокном (GF-PEI) - Ti Уровень 2 (Рис. 8.10 [26]).

Измеренный экспериментальный температурный диапазон составляет приблизительно 60-95% от температуры плавления металлической заклепки и обычно находится в пределах диапазона температурных изменений термопластичной детали. Таким образом,

ожидаются как сложные структурные металлургические изменения в заклепке, так и макромолекулярные изменения в полимере. Последнее, однако, обычно имеет меньшее удлинение, так как воздействие на расплавленную матрицу температур разложения очень короткое [12].

В случае полимеров на основе термореактивных материалов и композитов, армированных тканым волокном, выделение тепла является более сложным. Учитывая, что термореактивная матрица не плавится из-за ее сшитой структуры, согласно современным теориям, тепло за счет вязкой диссипации считается отсутствующим. Высокая температура — это главным образом результат твердого трения твердого тела (Coulomb friction) между металлической заклепкой и матрицей и армированным волокном у термореактивных композитов. Например, Борба и соавт. [27] наблюдал максимальные температуры процесса в вытесненном материале выплавки, варьирующиеся от 400 до 700 °C для соединений (GF-P) - Ti-6Al-4V с одноосноориентированным термореактивным полиэфиром, армированного стекловолокном. В этом случае термическое разложение матрицы присутствовало в тонком объеме вокруг заклепки, поскольку измеренные температуры были значительно выше диапазона термического разложения для полиэфирной матрицы (390°C) [27, 28].





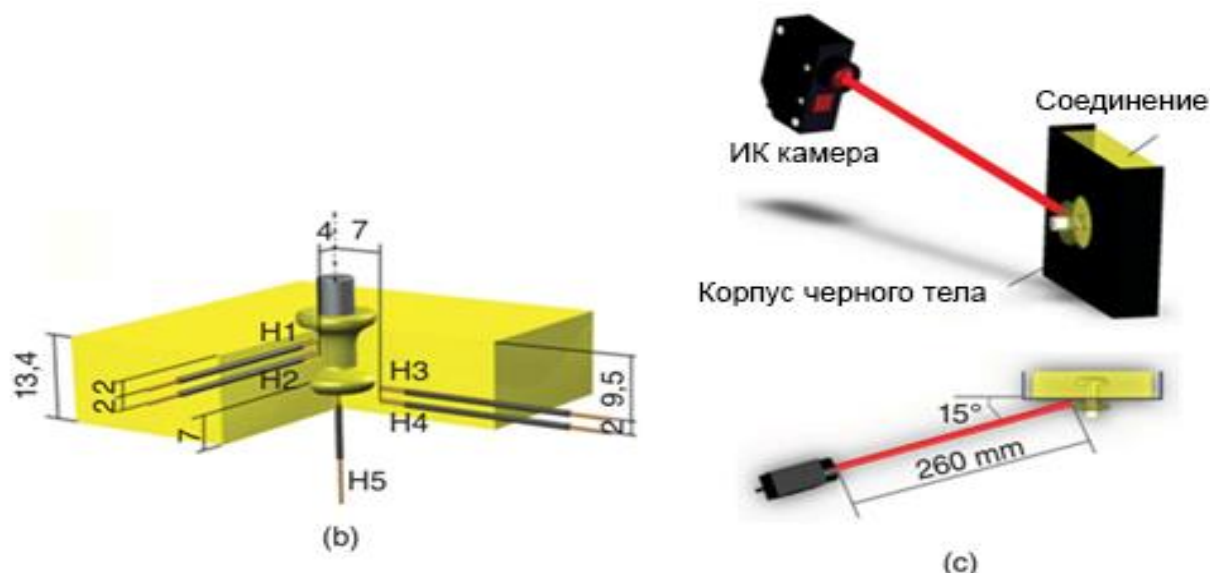


**Рис. 8.5** Фазы фрикционного заклепывании: P-I: Coulomb Friction (твердое трение). P-II: нестационарная вязкая диссипация. P-III: Установившееся вязкая диссипация. P-IV: Фаза заклепки. P-V: Фаза консолидации (а) Средние экспериментальные пиковые температуры, полученные для 21,000 об/мин, 3 с, 1.1 МПа Al 2024-T351/PEI клепаное соединение, (б) Схема расположения термопар, (с) позиционирование ИК-камеры.

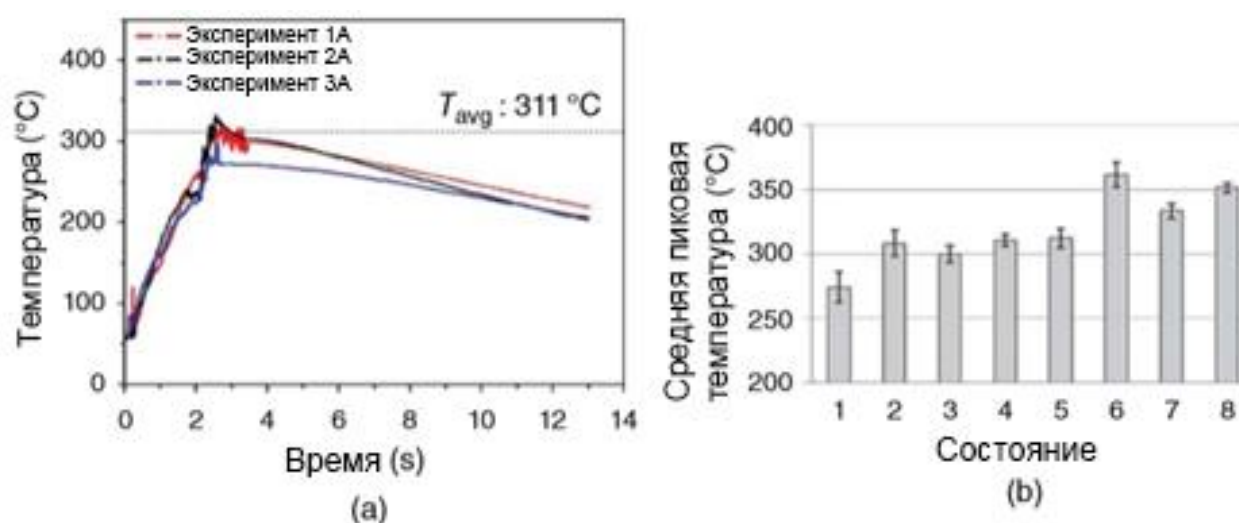


**Рис. 8.7** (а) Пример истории температуры процесса соединения фрикционного заклепывания измеренного в полимерном флеш-материале для трех образцов, изготовленных с 18,000 об/мин., 3 с, и 1.10 МПа. (б) Средние пиковые температуры для соединений PC/AA2024-T351 (Источник: Rodrigues соавтор. 2014 [8]. Воспроизводится с разрешения Elsevier).

## 8.6 Микроструктура

В предыдущих разделах было показано, что температура процесса вызывает металлургические и физико-химические изменения в соединяемых деталях. Неразрушающие методы (NDT) в сочетании с деструктивными аналитическими методами, такими как оптическая микроскопия, обычно используются для оценки изменений микроструктуры соединений.

Использование рентгенографии является обычным инструментом неразрушающего контроля для наблюдения за макроскопическими дефектами и выявления геометрических изменений на торце пластически деформированной заклепки. Альтмейер и соавт. [24] выполнили рентгенографию образца фрикционного заклепывания из коротко-волоконного

углеродного композита PEEK и титана 3 класса, перед проведением механических испытаний. Они измерили глубину проникновения заклепки (Т) и расширение торца заклепки (w), помимо поиска объемных дефектов, для обеспечения качества стыка. Рентгенографические измерения выявили точные измерения зоны крепления в центре соединений. Пример рентгенографического сканирования, используемого для проведения измерений, показан на рис. 8.11. Добавление этого этапа неразрушающего контроля может предоставить информацию относительно взаимосвязи между формой и размером элемента крепления и механическими характеристиками [24]. Часть упомянутой работы представлена в главе 12.

Синхротронная компьютерная микротомография ( $\mu$ СТ) показала, что позволяет точную неразрушающую оценку 3D объемных микроструктурных особенностей соединений PEI/Al 2024 [7].

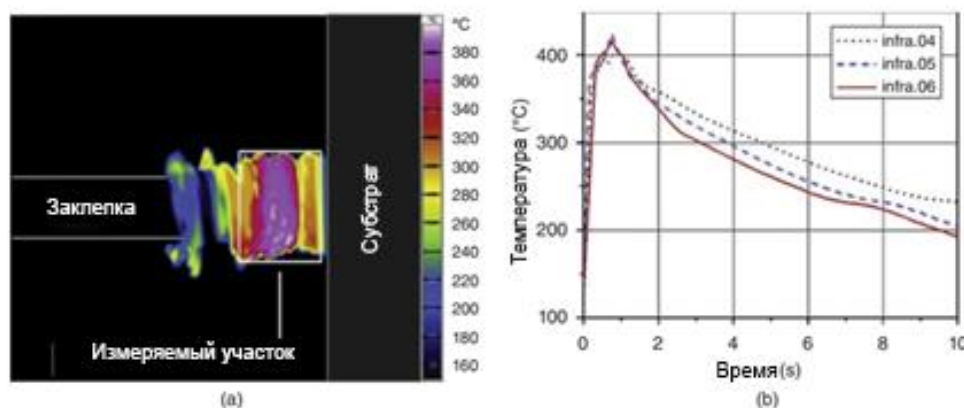


Рис. 8.12 показывает внутреннюю 3D структуру соединения.

**Рис. 8.8** (а) Термограмма (IR снимок) показывая распределение температуры флеш-материала размягченного композита PEEK выталкиваются из зоны соединения и выталкиваются на поверхность и в место измерения. (b) Пример изменения температуры процесса при фрикционном заклепывании металлической вставке CF-PEEK/Ti gr. 3joint (Источник: Алтмейер соавтор. 2014 [24]. Воспроизводится с разрешения Elsevier).

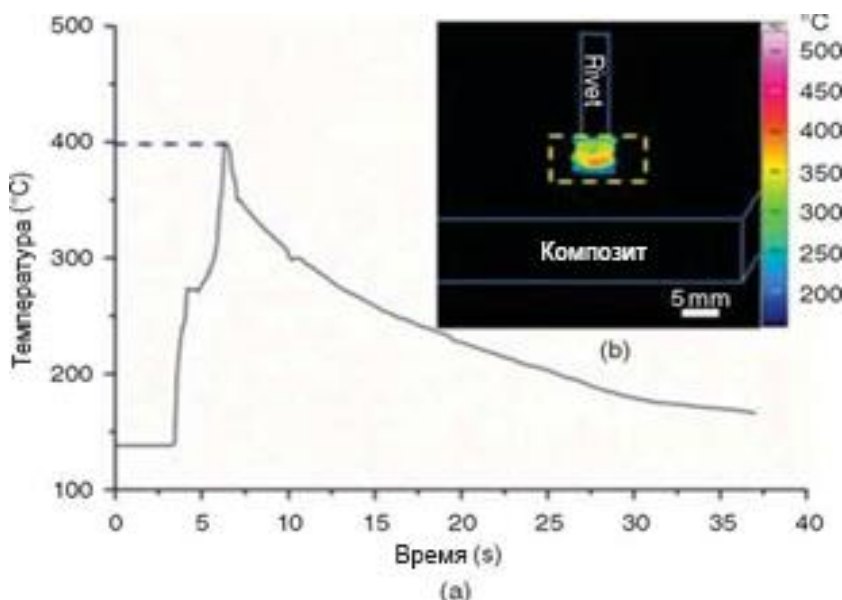


**Рис. 8.9** (а) Эволюция максимальной температуры в процессе измерения инфракрасной термографией. (b) термограмма, показывающая максимальную температуру размягченного композитного вспыхивающего материала, выталкиваемого из композитной пластины, прямоугольник с прорезанной полосой представляет собой область измерения для клепаных соединений GF-PA6/AA6056-T6 (источник: Proensa соавтор. 2015 [9]. Воспроизводится с разрешения Общества инженеров пластической промышленности).

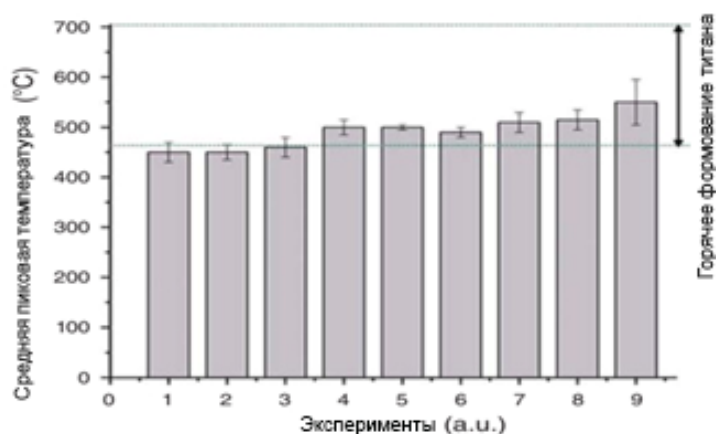


**Рис. 8.10** Контролируемая средняя пиковая ИК температура клепаных соединений GF-PEI/Ti gr. 2 (Источник: Vlada соавтор. 2015 [26]. Воспроизводится с разрешения Elsevier).

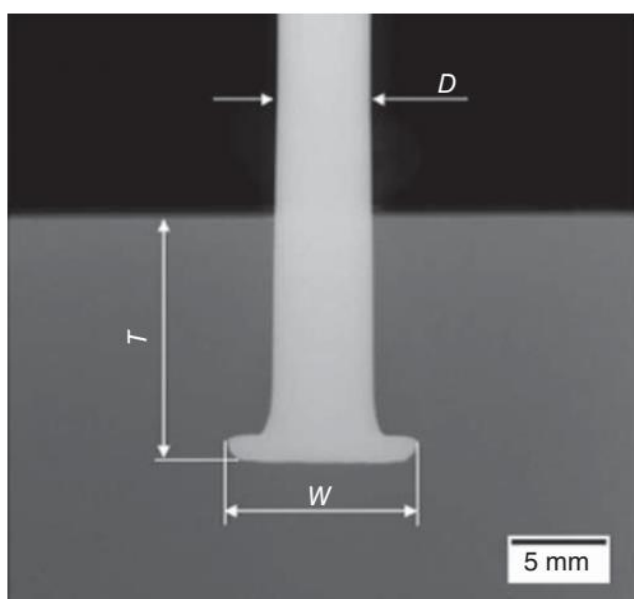


**Рис. 8.11** Рентгенографическое изображение соединения металлической вставки (Источник: Алтмейер соавтор. 2014 [24]. Воспроизводится с разрешения Elsevier).

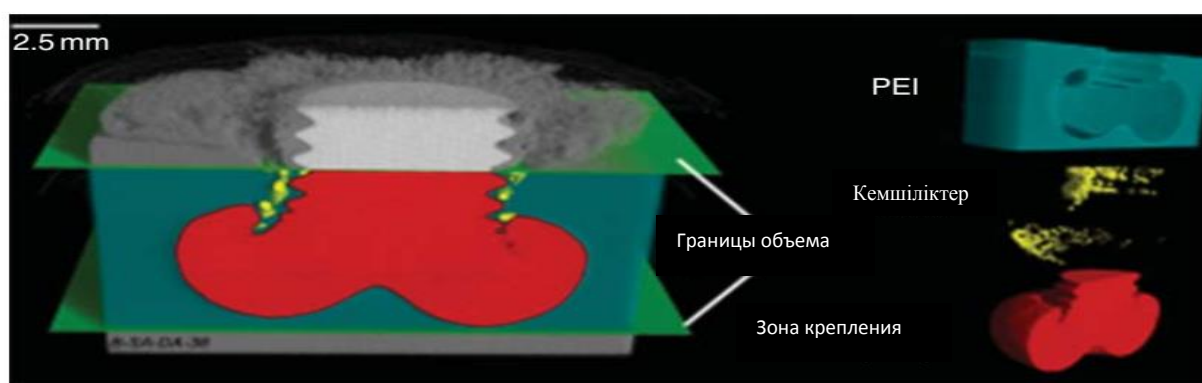


**Рис. 8.12**  $\mu$ CT результаты, показывающие тип соединения с металлической вставкой в PEI/Al 2024. Три разных сегментированных тома представлены справа сверху и внизу рисунка: необработанный объем PEI, объем PEI содержащий термомеханически обработанный полимер и деформированный наконечник заклепки Al 2024-T351 (анкерная зона) (Источник: Amancio-Filho 2007 [7]. Воспроизводится с разрешения SAGE Publications).

Три визуализированных сегмента объема могут быть разделены с помощью компьютерного анализа изображений. Неизменный объем PEI (смотрите Рис. 8.12) отображается наибольшая громкость; второй том с промежуточным размером содержит

деформированный конец заклепки (также называемый зоной крепления). Третий очень маленький объем, содержащий термомеханические недостатки (пустоты, связанные со слегка термодеградирующим материалом, летучим выделением и заточенным воздухом) наблюдался в объеме PEI в основном вокруг недеформированного заклепочного вала.

В пределах этих трех 3D объемов, для термопластичных полимеров существуют четыре типовые микроструктурные зоны: зона термического воздействия на полимер (PMAZ), зона термомеханического воздействия полимера (PTMAZ), зона термического влияния металла (MMAZ), и зона термомеханического воздействия металла (MTMAZ) находится в зоне крепления заклепок (AZ).

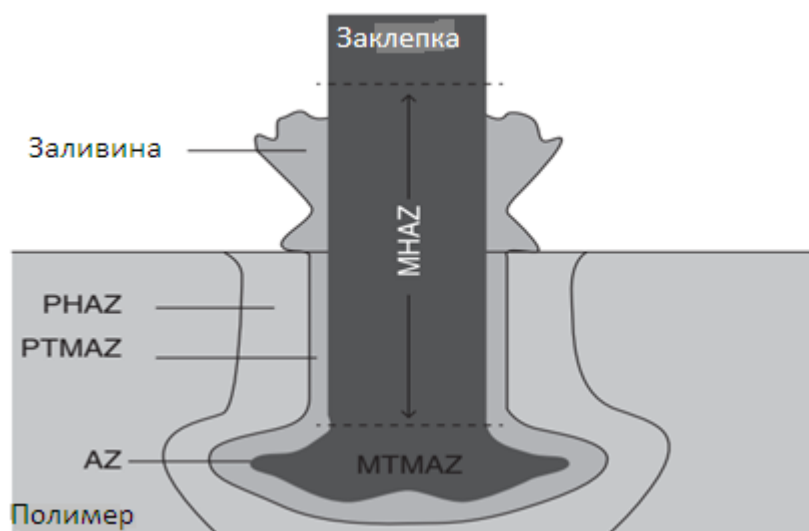


**Рис. 8.13** Схематическое изображение типичных микроструктурных зон, обнаруженных во фрикционной заклепке (Источник: взято из Аманцио-Фильхо 2007 [7] и Аманцио-Фильхо 2011 [29]).

AZ связано с объемом, где находится деформированный наконечник заклепки. Из-за сильной пластической деформации он обычно принимает параболический характер (см. Рисунки 8.13 и 8.14(a)) чей внешний диаметр больше исходного диаметра заклепки. Эта область в основном несет наложенную нагрузку посредством механического воздействия (стяжки) на полимерный базовый элемент. Нагрева трением может быть недостаточно для сплавов, имеющих более высокие температуры плавления, чтобы вызвать полную пластификацию наконечника заклепки и сформировать хорошо выраженную AZ. В этом случае элементы или выступающие элементы, добавленные к заклепке, будут способствовать увеличению крепления заклепки. Рис. 8.13 показывает иллюстративную схему микроструктурных зон в соединении фрикционной заклепки [7, 29].

Микроструктурные зоны во фрикционном заклепывании может быть лучше понято под микроскопом. Рис. 8.14 представляет материалаграфическое сечение соединения, изготовленного с 21,000 об/мин., 3с, и 1.1 МПа. Первым наблюдением является идентификация двух различных границ раздела: металл-полимер и полимер-полимер (см. Пунктирные линии, схематизированные на рисунке 8.14(d)). В то время как поверхность раздела металл-полимер состоит из MTMAZ в зоне крепления и PTMAZ, граница раздела полимер-полимер определяется образованием линии сварки между PMAZ и консолидированным полимером PTMAZ. Из предыдущей работы [7] предполагается, что границы раздела в основном, удерживаются силами сцепления. Проводятся исследования для дальнейшего понимания этих механизмов связи.

В MMAZ, металлическая структура заклепки только термообработана. В этой зоне могут иметь место различные явления отжига, например, статическое восстановление, статическая рекристаллизация и перерасход, а также некоторые механизмы упрочнения, такие как старение и повторное осаждение, в зависимости от типа сплава, времени нагрева и максимальной температуры процесса. Микроструктура не может визуально измениться, хотя структура довольно изменена.



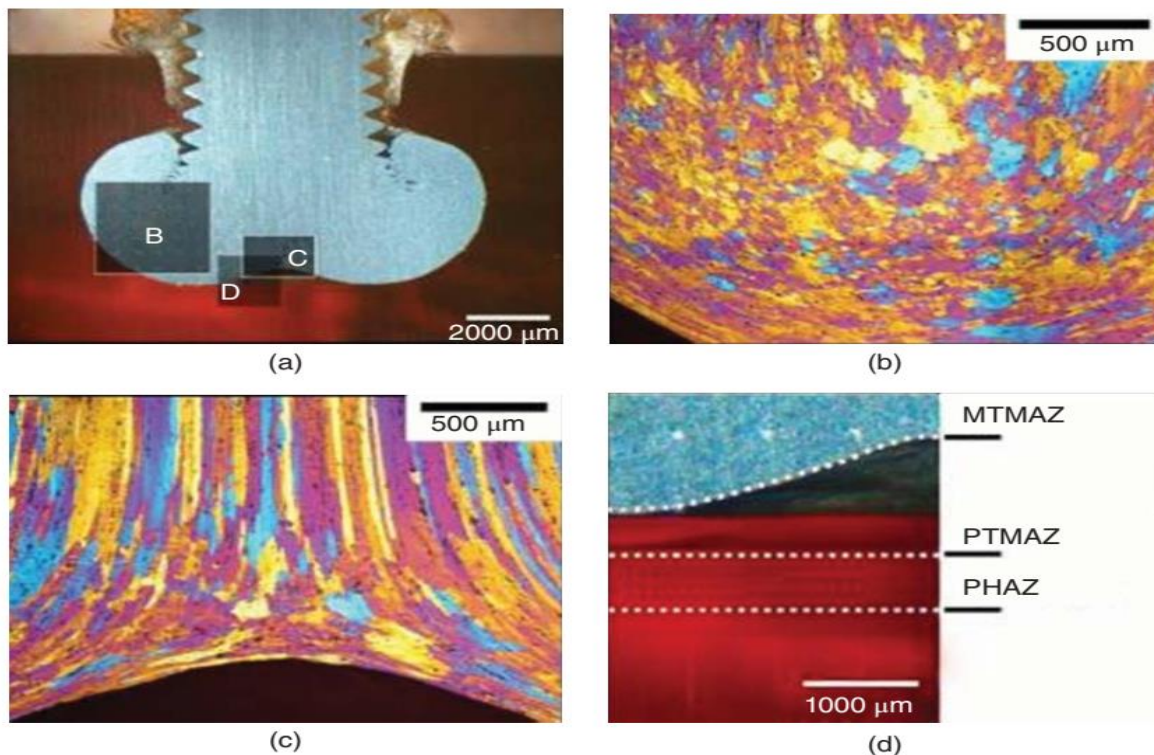


**Рис. 8.14** Микроструктурные особенности поперечного сечения металлографического вставного соединения типа заклепки PEI/Al 2024-T351 (21,000 об/мин., 3 с, и 1.1 МПа): (а) нетравированный полированный макрофотография LOM; (b) детальное фото зоны В в (а) показывая частично динамически рекристаллизованное распределение гранул в МТНАЗ (электролитическое травление раствором Баркера - 200 мл дистиллированной воды, 5 г фтороводородной кислоты 35%); (с) увеличенный вид на зоны С в (а) показывает выравнивание гранул основного материала по направлению потока материала в ковеной пластифицированной заклепке; (d) детальная микрофотография отмеченных D в (а). Переходные зоны (линии раздела) для МТНАЗ, РТНАЗ, и РНАЗ обозначены пунктирными линиями (Источник: Взято из Аманцио-Фильхо 2007 [7] и Аманцио-Фильхо 2011 [29]).

С другой стороны, микроструктура МТНАЗ изменяется в результате нагрева и сильной пластической деформации. В этой зоне пластифицированный заклепочный материал может подвергаться динамическому восстановлению или перекристаллизации (или даже переосаждению в твердосплавных сплавах) в зависимости от того, достигнуты ли критические температуры и деформация в течение данного периода. Крупномасштабного плавления обычно не наблюдается, хотя на поверхностях соприкосновения может произойти начальное плавление. В алюминиевых сплавах микроструктура, исследованная с помощью оптической микроскопии, обычно характеризуется частичным измельчением гранул, характерным для динамической рекристаллизации и восстановления (рис. 8.14(b)), и ВМ выравнивание гранул по направлению потока ковеного пластифицированного материала (рис. 8.14(c)) [7, 29].

В РНАЗ (Рис. 8.14(d)), температура процесса не достигла температуры размягчения полимера (температура стеклования полимера,  $T_g$ , или точка плавления,  $T_m$ ). Как правило, этот участок не может быть визуально идентифицирован с помощью микроскопии для аморфных полимеров, таких как PEI. Тем не менее, структура полимера в значительной степени зависит от тепла и, следовательно, от местных механических свойств. Примерами этих возможных изменений являются: индуцированная кристаллизация / рост кристаллитов в случае полукристаллических полимеров и физическое старение для аморфных полимеров.

РТНАЗ образуется как следствие деформации сдвига и нагрева. Он содержит тонкий слой расплавленного полимера, закрепленный вокруг заклепки. Так как РТНАЗ образует линию сварки с РНАЗ, это обычно можно визуализировать с помощью микроскопии (см. рис. 8.14(d)). В этой зоне температура значительно выше  $T_g$  или  $T_m$ , часто достигают температуры термомеханического разложения полимера [7, 29].

Наличие пустот и дефектов, связанных с высокими температурами и деформацией в PTMAZ (смотрите Рис. 8.16) может происходить из летучего образования, такого как поглощенная или структурная вода, из захваченного воздуха, из-за высокой вязкости расплава некоторых полимеров, из-за усадки при охлаждении, связанной с различиями в линейном коэффициенте теплового расширения, и из-за термического разложения. Эти недостатки могут быть вредными для механической прочности и должны быть уменьшены путем оптимизации параметров процесса. Для большинства термопластов, хотя недостатки в PTMAZ склонны к существованию, они не сильно влияют на общие механические характеристики сустава (как показано в [7]). Кроме того, местные механические свойства в PTMAZ может зависеть от предпочтительной ориентации полимерной цепи и термических остаточных напряжений.

В некоторых случаях могут быть обнаружены дополнительные микроструктурные особенности. Altmeier et al. [30] проанализировали микроструктуру из армированного короткими волокнами PEEK/Ti соединений уровня 3. Они идентифицировали три разные микроструктурные зоны в заклепке: две разные металлические зоны, подвергнутые термомеханическому воздействию (MTMAZ 1 и MTMAZ 2) and зона трения металла (MFZ). Также были определены четыре разные зоны в составном партнере, а именно композитный базовый материал (CBM), составная зона термического влияния (CHAZ), составная термомеханически пораженная зона (CTMAZ), и композитная зона перемешивания (CSZ) (смотрите Рисунки 8.15 и 8.16).

Диаметр заклепки внутри композита увеличивается от исходного диаметра D 5 мм до D1 5.4 мм, который также известен как "бочкообразный" [31]. Такое деформационное поведение, скорее всего, объясняется как результат приложения осевой силы к заклепке во время фрикционной заклепки [30].

### 8.6.1 MTMAZ 1 (зона термо-механического воздействия металла)

Из-за увеличения фракции малоугловых границ (LAB) (или уменьшение фракции границ высокого угла (HAB) в зонах "a" и "b" по сравнению с фракцией LAB (или фракций HAB) в ВМ (5-29%) (смотрите [30]), образование 85° 1210 двойных границ (близость натяжения) и ориентация оси с (то есть приблизительно параллельно направлениюковки), делается вывод, что зоны "a" и "b" были термомеханически подвержены сжатию в направленииковки во время процесса (рис. 8.17 и 8.18). Таким образом, зоны "a" и "b" были классифицированы как зона термомеханического воздействия металла 1 (MTMAZ 1).

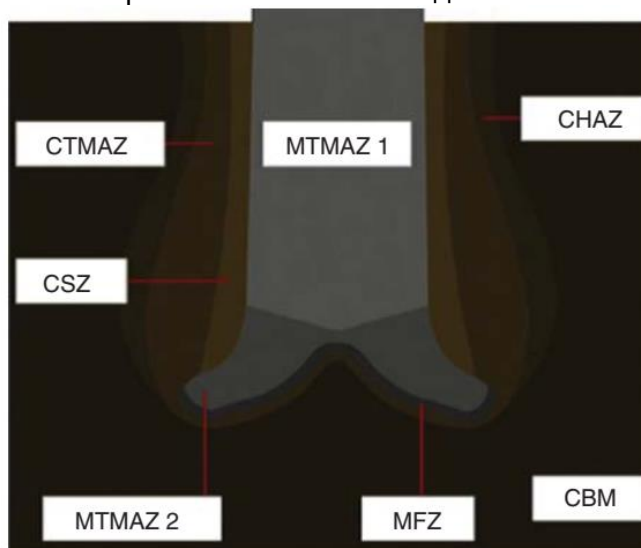


**Рис. 8.15** Схематическое изображение микроструктурных зон в фрикционно-клепаных соединениях металл-вставка. Композитный базовый материал (CBM), составная зона термического влияния (CHAZ), составная термомеханически пораженная зона (CTMAZ), композитная зона перемешивания (CSZ), зона термического влияния металла 1 (MTMAZ 1), зона термо механического воздействия металла 2 (MTMAZ 2), и зона трения металла (MFZ) (Источник: Алтмейер соавтор. 2015 [30]. Воспроизводится с разрешения Elsevier).

**Рис. 8.16** Макрофотографии CF-PEEK/TI gr. 3 металлическое соединение с указанием областей интереса (a, b, c, и d в металлической части соединения и e, f, и g в составной части), где были получены подробные данные о микроструктуре. (TD, ED, и FD поперечное направление, направление экструзии иковки, соответственно) (Источник: Алтмейер et al. 2015 [30]. Воспроизводится с разрешения Elsevier).

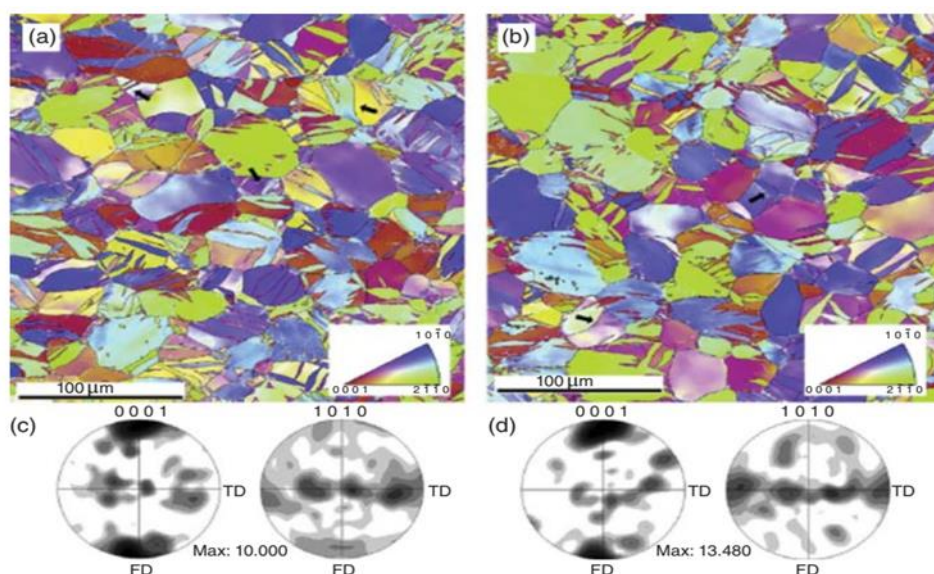
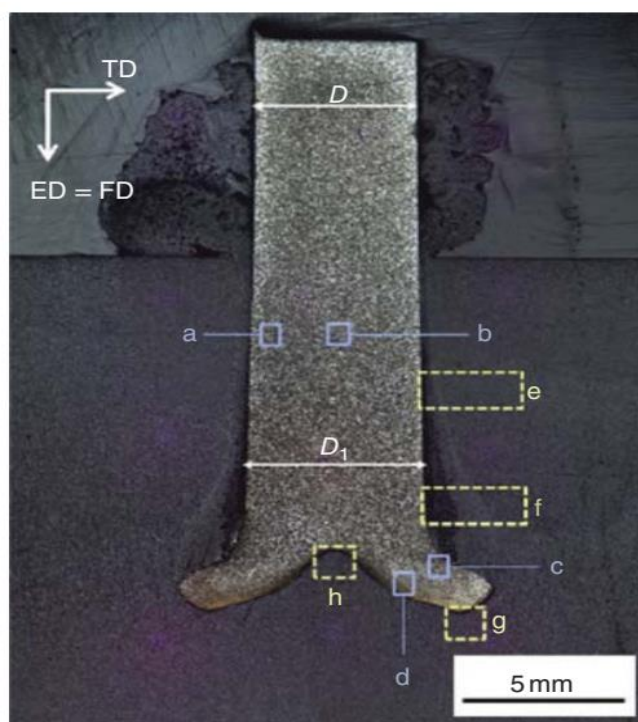


**Рис. 8.17** Карты EBSD показ микроструктуры зон a (a) и b (b), и {0001} и {1010} полюсные фигуры извлечены из a (c) и b (d) (Источник. Алтмейер и соавт. 2015 [30]. Воспроизводится с разрешения Elsevier).

## 8.6.2 MTMAZ 2 (зона термо-механического воздействия металла)

Отсутствие двойных границ  $85^\circ 1210$  указывает на то, что эта зона испытала существенно высокие деформации и температуры [31, 32]. Кроме того, размер гранул в этой зоне был уменьшен до 4.7  $\mu\text{m}$ . Эти данные свидетельствуют о том, что регион испытывал пластическую деформацию из-за геометрического эффекта деформации и подвергался воздействию повышенных температур в течение процесса фрикционной заклепки. Анализ этой зоны приводит к выводу, что зона является MTMAZ (MTMAZ 2), что согласуется с результатами предыдущих исследований [7, 29].



По наблюдениям из рис. 8.16, 8.19, и 8.20, Альтмейер и соавт. [30] выявил три разные микроструктурные зоны в полимерной связи: CHAZ, CTMAZ, и CSZ. Тогда как в CHAZ, единственное отличие от BM было наличие пор, CTMAZ и CSZ также представлена переориентация волокна в определенных направлениях, что указывает на пластификацию материала.

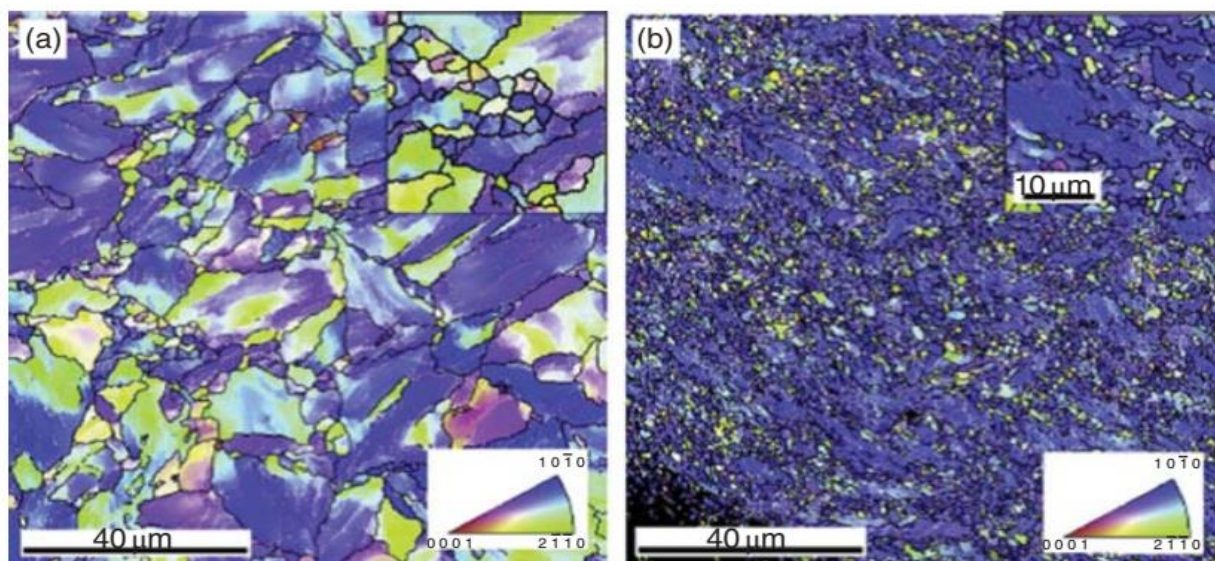


**Рис. 8.18** Карты EBSD показывают микроструктуры зон с (a) и d (b) (Источник. Альтмейер соавтор. 2015 [30]. Воспроизводится с разрешения Elsevier).

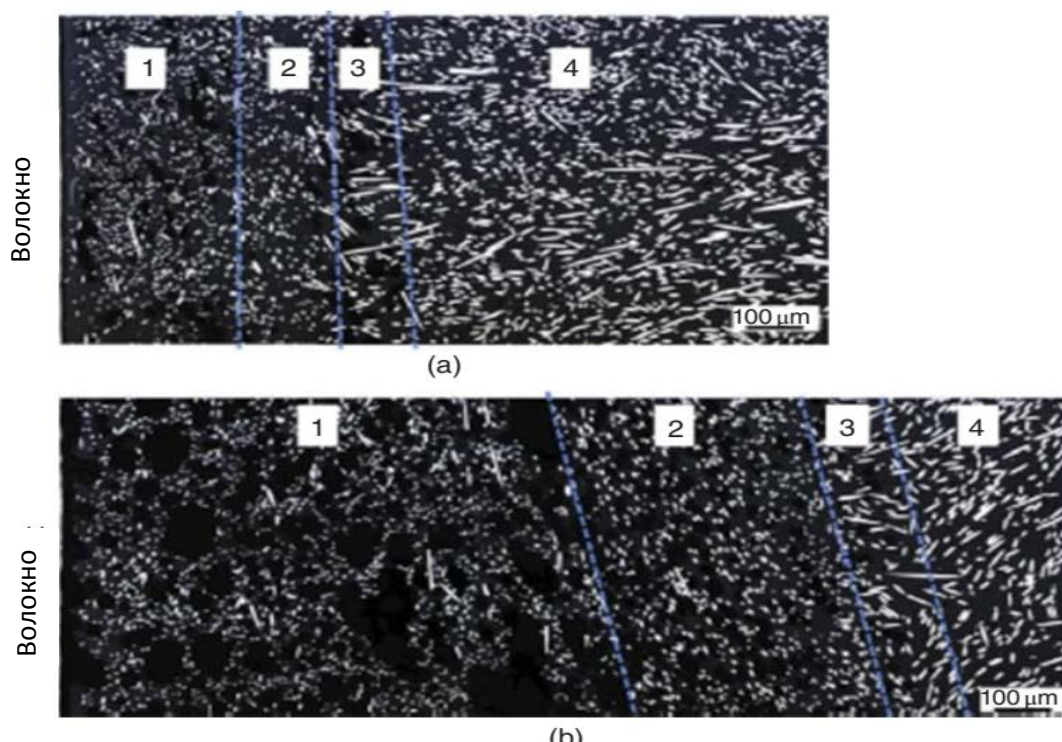


**Рис. 8.19** Микрофотография с большим увеличением (a) зона e и (b) зона f (смотрите Рис. 8.16 для точного положения).

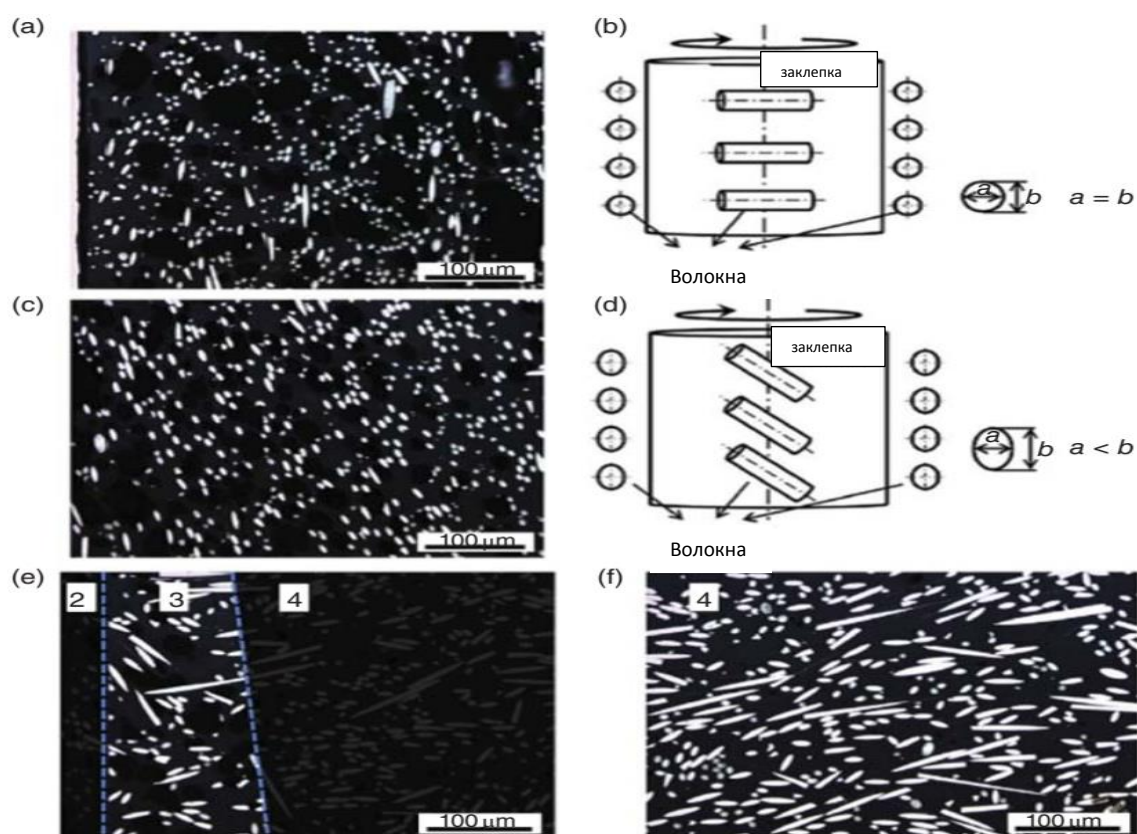


**Рис. 8.20** Композитная зона перемешивания (CSZ): (а) увеличенное изображение Зоны 1 определены на рисунке 8.19; (б) схема ориентации волокна в этом регионе; составная термомеханически пораженная зона (CTMAZ): (с) увеличенное изображение Зоны 2 на Рисунке 8.19 and (d) схема ориентации волокна в этой зоне; (е) увеличенное изображение Зоны 3; (f) увеличенное изображение Зоны 4. Источник: Алтмейер соавтор. 2015 [30]. Воспроизводится с разрешения Elsevier).

Несмотря на то, что волокна перестроены в двух связях: CTMAZ и CSZ, направление волокон не одинаково в каждой области. В то время как в CSZ, большинство волокон имеют вид круговых точек, что указывает на то, что они ориентированы в направлении, перпендикулярном плоскости наблюдения, в CTMAZ, они ориентированы в другом направлении. Это указывает на то, что в CSZ, материал циркулировал круговым движением вокруг заклепки (перемешивание), в результате чего волокна выравнивались параллельно заклепке при ее вращении, как показано ниже на рисунке 8.20(b).

Четыре зоны PEEK с различными морфологиями представлены на рисунке 8.19, которая представляет увеличенную карту зон e (Рис. 8.19(a)) и f (Рис. 8.19(b)).

Как можно наблюдать, сравнивая пористость на рисунке 8.20(a), (c), (e), и (f), пористость уменьшается с увеличением расстояния от заклепки. В дополнение к этому изменению пористости можно заметить, что ориентация волокон в этих областях различна. В то время как Зоны 3 и 4 не показывают преимущественную ориентацию волокон (рис. 8.20(e) и (f)), волокна выровнены в Зонах 1 и 2, Рис. 8.20(a) и (c).

Рис. 8.20(b) представляет ориентацию волокна вокруг заклепки, обнаруженной в Зоне 1. Эта ориентация указывает на то, что материал протекал круговыми движениями вокруг заклепки (перемешивание). Таким образом, эта область была названа композитной зоной перемешивания (CSZ). Ориентация волокна в Зоне 2 немного отличается от представленного в Зоне 1. Спиральная перестройка могла появиться из-за двух факторов: вращение заклепки и движение вверх смягченного композита, подавляемого заклепкой. Следовательно, Зона 2 была классифицирована как CTMAZ. В Зоне 3, хотя перераспределения волокон не наблюдалось, доля пористости выше, чем в BM, смотрите Рис. 8.20(e). Поэтому, Зона 3 была классифицирован как CHAZ. Зона 4 представила



одинаковые доли пористости/плотности и ориентации волокон ВМ (Рис. 8.20(f)), классифицируется как ВМ.

Микроструктура армированных длинными волокнами полимерных композитов следует той же тенденции, что и для неармированных и армированных короткими волокнами полимеров. Влага соавтор. [33] с помощью световой оптической микроскопии и лазерной сканирующей конфокальной микроскопии видно, что фрикционные клепанные соединения на тканой арматуре PEI/титан соединения уровня 2 Отсутствие термического повреждения, но переориентация срезанных волокон композитного материала. Армированная стекловолокном ткань была смещена вверх от своей первоначальной плоскости примерно на  $45^\circ$ , то же направление потока полимерного материала (рис. 8.21(c)).

Недавно, Vorba et al. [27] продемонстрировал возможность применения фрикционного заклепывания в термореактивных композитах. Они исследовали соединения термореактивный полиэфир, армированный стекловолокном/Ti-6Al-4V и наблюдал важную роль, которую играет RS в механической прочности соединений с клепанным клеем. Микроструктурные зоны как в металле, так и в композите были предварительно изучены в [28] и станут предметом более глубоких исследований в будущих публикациях автора.

## 8.7 Физико-химические изменения в полимерных материалах

Хотя процесс фрикционного заклепывания характеризуется коротким временем нагрева (обычно от 0.5 до 10 с), достигаются высокие температуры процесса, которые обычно находятся в диапазоне разложения полимерной связи.

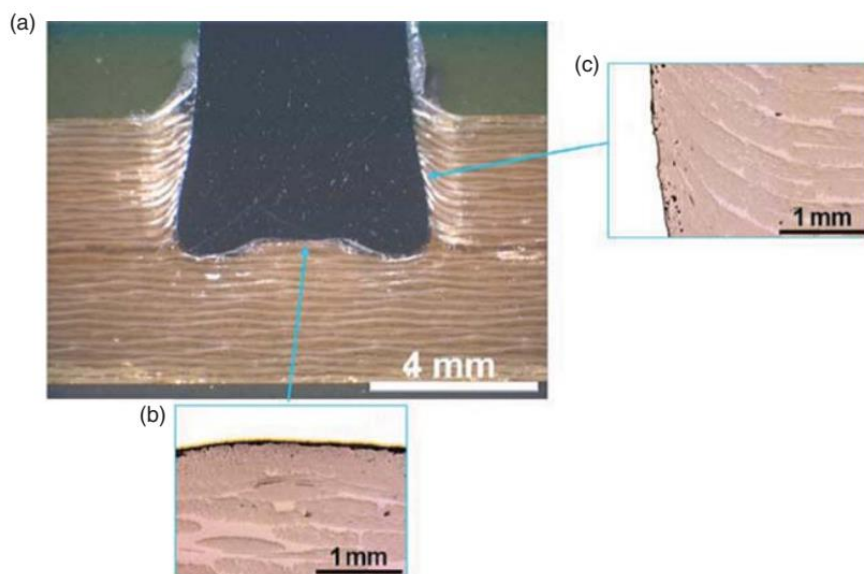


**Рис. 8.21** (a) Пример поперечного сечения с заклепками с трением соединения PEI-GF/Ti gr.2; (b) и (c) детали объемных тепловых дефектов вокруг заклепки (Источник: Влага соавтор. 2013 [33]. Воспроизводится с разрешения Elsevier).

Учитывая то, что термическое разрушение напрямую связано с механическими характеристиками в пластике, этого следует избегать или сводить к минимуму, чтобы гарантировать механическую целостность соединения во Фрикционном заклепывании[12]. Аманцио-Фильхо о соавт. [12] изучал влияние СВ по термическому разложению PEI. Они продемонстрировали, что, несмотря на то, что RS plays an important role in controlling the temperature change, heating rate, and время нагрева, оно оказывает слабое влияние на термическую деградацию технических термопластов, трения которых заклепаны алюминиевыми заклепками. Анализ  $\mu$ СТ также помогло подтвердить, что RS имеет только ограниченное влияние на термически разлагаемое образование материала (как правило,

<1% объемных дефектов в соединениях) в исследуемом диапазоне параметров для данной комбинации материалов. Такое поведение может быть связано с более коротким измеренным временем нагрева ( $t < 3$  s), хотя хорошая стабильность термопласта PEI безусловно, способствует низкому уровню термической деградации.

Средняя пиковая температура процесса, оцененная с помощью IR термографии, представлена на рисунке 8.22. Рис. 8.22(a) показывает резкое повышение температуры выплавки в течение первых 3 секунд (установка JT для этих образцов) показывая высокие скорости нагрева. Более медленные скорости охлаждения для этих соединений связаны с естественным охлаждением при комнатной температуре. Рис. 8.22(b) представляет пиковые температуры, извлеченные из кривых зависимости температуры от времени на рисунке 8.22(a). Четкая тенденция повышения температуры со RS может наблюдаться в результате преобразования энергии трения в тепло и низкая теплопроводность полимера.

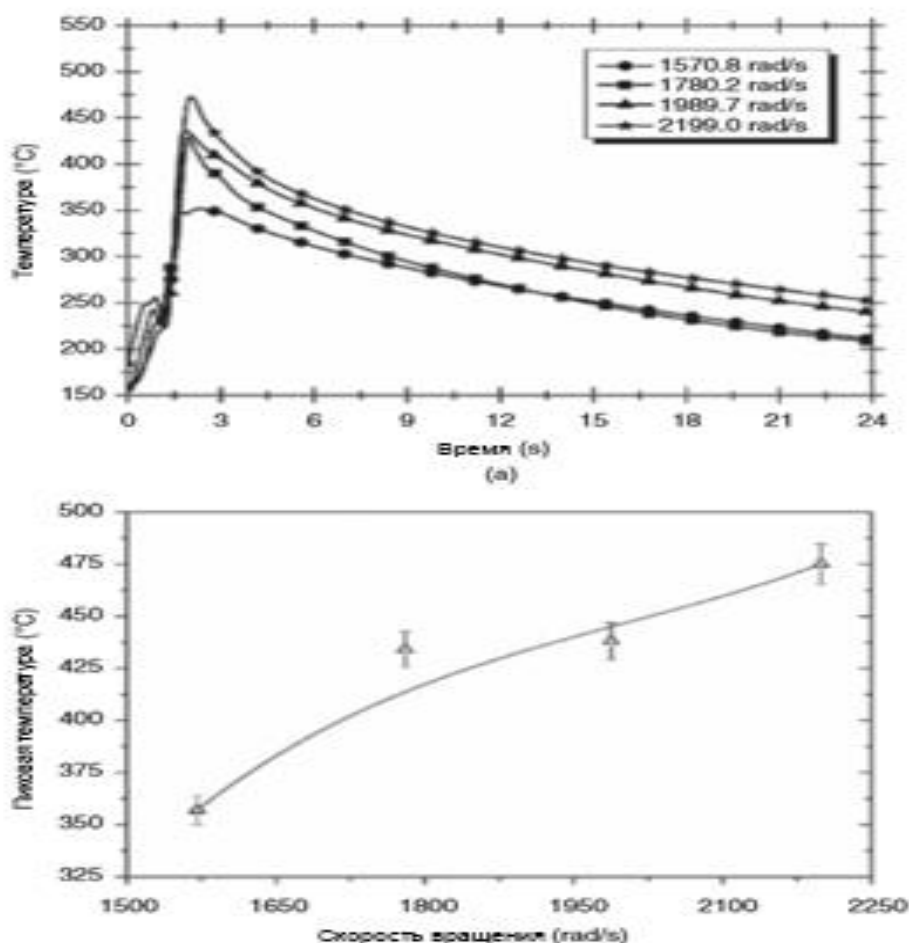


**Рис. 8.22** (a) Инфракрасная температура измеряется во время фрикционной заклепки для исследуемых соединений. (b) Участок с пиковыми температурами извлечен из (a), в зависимости от скорости вращения (Источник: Аманцио-Фильхо и соавт. 2008 [12]. Воспроизводится с разрешения Elsevier).

Пиковые температуры для испытанных скоростей вращения были значительно выше средней температуры стеклования полимера PEI (221°C) примерно варьируется в диапазоне 350-475°C, который находится в пределах начального диапазона термического разложения при расщеплении цепи для исследуемого полимера [12, 34-36].

Измерения молекулярной массы (ММ) с помощью вью эксклюзионной хроматографии (ЭХ) показали, что основным механизмом термического разложения является разрыв цепи с незначительным уменьшением ММ (10% для  $M_n$  и 5% для  $M_w$  при  $RS=2199$  рад/с), считается несущественным для механических характеристик суставов. Этот механизм термического разложения (разрыва цепи) ожидался из-за измеренных пиковых температур (около 350-475 °C), которые находятся выше диапазона режима термического разложения цепей для полимера PEI [12, 34-36].

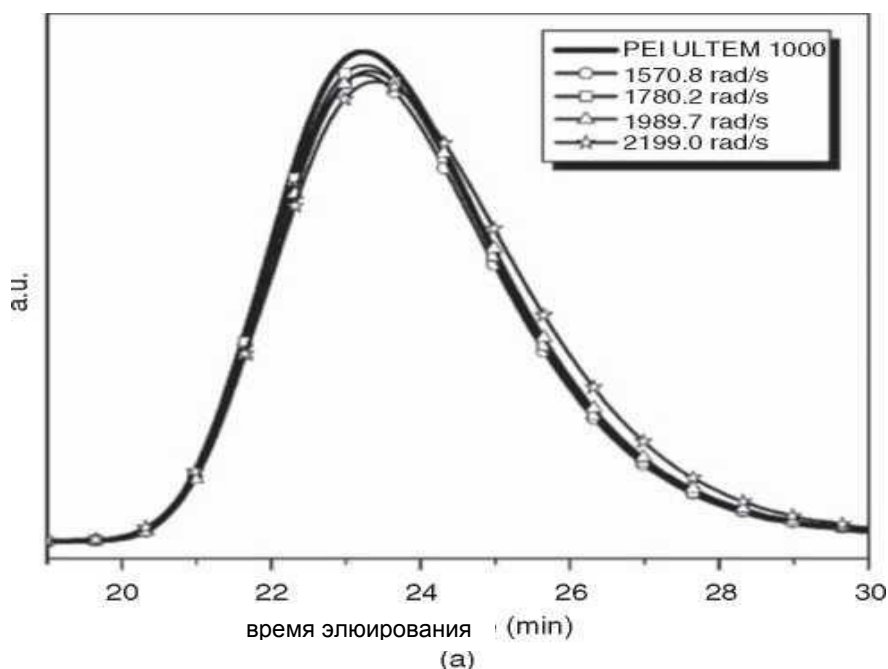
Чтобы определить природу механизмов термической деградации, возникающих при соединении, были проанализированы распределения MW образца (Рис. 8.23(a)) и полидисперсность (Рис. 8.23(b)). Только немного более широкая кривая была измерена после обработки, с немного более высоким содержанием полимера с низкой молекулярной массой, при увеличении RS (Рис. 8.23(a)). Принимая во внимание это наблюдение и температуру процесса, можно сделать вывод, что основным механизмом термического разложения, происходящим во время соединения, является разрыв цепи вместо поперечной сшивки. Сшитая структура преимущественно приведет к увеличению MW [37]. Это поведение также может быть подтверждено увеличением полидисперсности с RS (Рис. 8.23(b)), вероятно, из-за присутствия меньших отделенных объектов [38].

Саннер и соавт. [39] изучал влияние разных MW на механические свойства PEI. Для молекулярного диапазона, варьирующегося от  $M_n$  = от 15,660 до 22,820 г/мол и  $M_w$  = от 36,640 до 52,300 г/мол, предел прочности при температуре в диапазоне от 23 до 140 °C не были сильно изменены. Учитывая, что необработанные PEI, использованные в этой работе, имели средние значения MWs, подобные тем, которые изучались этими авторами ( $M_n$  = 26 300 и  $M_w$  = 52 200 г/мол), уменьшение около 10% для  $M_n$  и 5% для  $M_w$  ( $M_n$  = 22 250 и  $M_w$  = 49 650 г/мол) в средней MW измеряемый эксклюзионной хроматографией может рассматриваться как не относящийся к общей прочности на растяжение. Экспериментальные значения MW для исследуемых образцов лежат либо выше, либо в пределах диапазона PEI, где предел прочности независим от этого свойства [12]. Нерелевантность уменьшения MW в поведении глобальной механической прочности для исследуемых соединений была продемонстрирована в другом месте [7].

## 8.8. Механические характеристики

### 8.8.1 Локальные механические характеристики соединения

Распределение микротвердости в клепаных соединениях обусловлено структурными изменениями, связанными с термической и механической обработкой, как обсуждалось в предыдущем разделе.



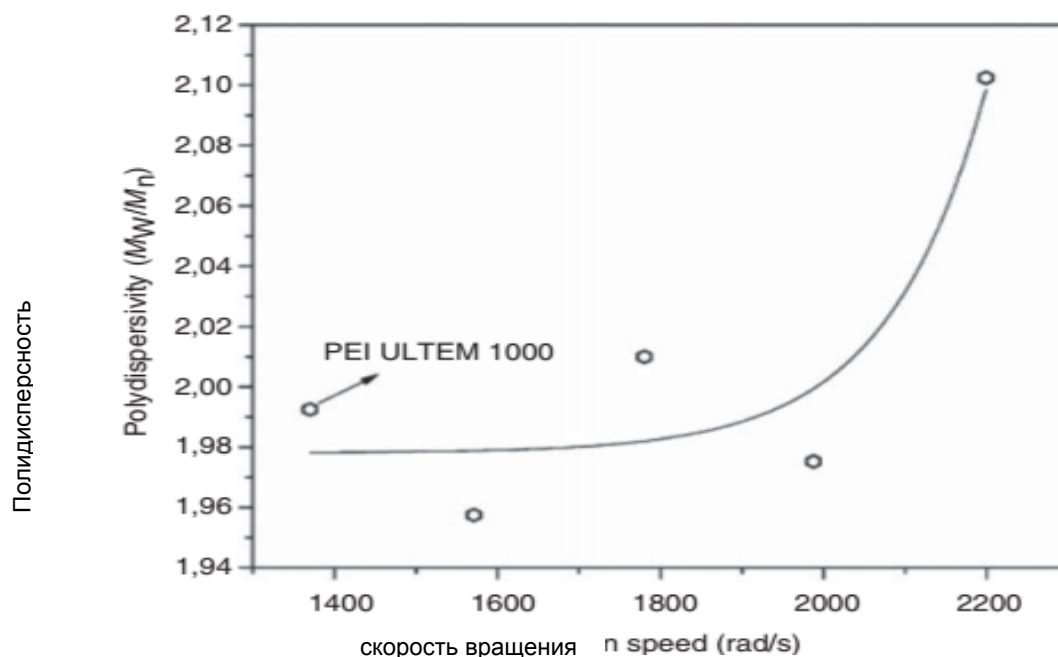


**Рис. 8.23 (а)** Эксклюзионная хроматография (SEC) молекулярно-массовые распределения для исследованных образцов скорости вращения. (b) Влияние скорости вращения на полидисперсность SEC исследуемых образцов (Источник: Amancio-Filho соавтор. 2008 [12]. Воспроизводится с разрешения Elsevier).

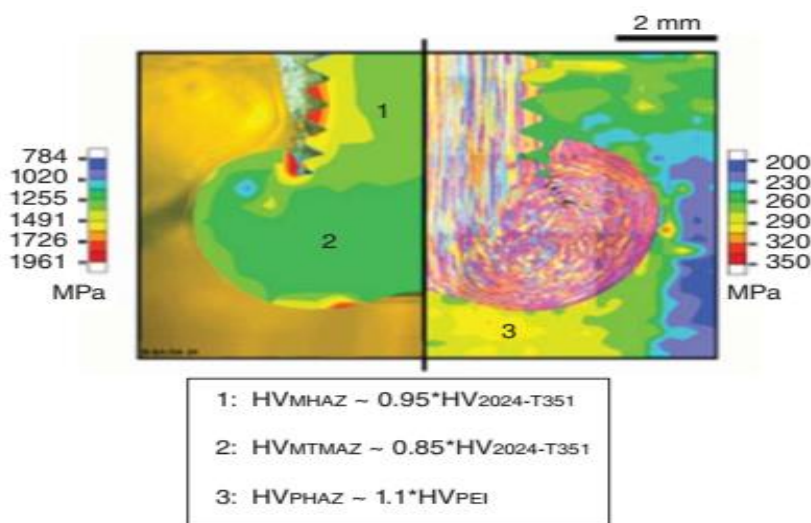


**Рис. 8.24** Схематическое представление распределения микротвердости соединения фрикционной заклепки PEI/Al 2024 (Источник: Аманцио-Фильхо 2007 [7]. Воспроизводится с разрешения SAGE Publications).

Рис. 8.24 представляет схематическое наложение экспериментальных результатов по картированию микротвердости шарнирного соединения фрикционной заклепки на PEI 13.4 мм экструдированных плитах /Al2024-T351 М5- заклепки с резьбой.

По существу, общее уменьшение микротвердости по сравнению с ВМ можно наблюдать в частях металлической заклепки, вставленных в полимер, и общее увеличение объема полимера вокруг заклепки. Снижение микротвердости на МНАЗ обычно меньше, чем у МТМАЗ (HVMHAZ «95% и HVMTMAZ «85% среднего значения твердости ВМ АА 2024-

T351), как показано на левой карте микротвердости на рисунке 8.24, пункты 1 и 2. Если в MHAZ не видно визуальных изменений в микроструктуре, то в MTMAZ есть некоторое измельчение гранул, или динамически рекристаллизованные зерна, как показано в [7,17]. Это поддерживает более низкие значения микротвердости, когда отжиг был более интенсивным в областях заклепки рядом с прилегающими поверхностями (то есть с наконечником заклепки в зоне стяжки)).

Тем не менее, в зависимости от сплава, используемого для заклепки, также может произойти чрезмерное совпадение в распределении микротвердости. Борба и соавт. [27, 40] продемонстрировал для терморективного полиэфира, армированного стекловолокном и соединений Ti-6Al-4V, что локальная механическая прочность может увеличиться из-за термомеханической обработки. Зона анкерования, которая подвергается воздействию высоких температур и скоростей сдвига, может иметь значения твердости выше, чем у BM [27, 40]. В этих регионах из-за воздействия тепла иковки материал испытывает микроструктурные и морфологические изменения, которые могут привести к наблюдаемому увеличению твердости. Эти изменения происходят из-за температурных уровней, которые достигаются во время процесса (около уровня бета-перехода), и высокой скорости охлаждения, которые создают условия для формирования игольчатых структур диффузионным (Widmanstätten) или без диффузии (метастабильный  $\alpha'$  мартенситные) превращения [27, 28, 40] приводящие к упрочнению местного механического сопротивления. В упомянутом исследовании сравнивались два разных условия соединения с двумя разными скоростями вращения (CB 9000 и 10,000 об/мин, с постоянными параметрами FT 1.2 s, FoT 1.2 s, FP 0.6 МПа, FoP 1.0 МПа), как показано на рисунке 8.25, где можно наблюдать различия в микротвердости из-за изменений микроструктуры, связанных с термомеханическим процессом.

## 8.8.2 Общие механические характеристики соединения

### 8.8.2.1 Прочность при растяжении

Объемное соотношение (VR) [33], было продемонстрировано, что упрощенная аналитическая модель, описывающая эффективность крепления заклепки, прямо пропорциональна прочности соединения на растяжение и, следовательно, адекватная аналитическая модель для описания механических характеристик соединения. VR учитывает на упрощенной геометрической основе соотношение объема смещенного полимерного материала, объема деформированной металлической заклепки и объема оставшегося полимерного резистивного материала по отношению к деформированной форме заклепки [41, 42]. Рис. 8.26 A1-A3 показывает макрофотографии поперечного сечения для образцов, проанализированных в тематическом исследовании PEI-GF/Ti gr. 2; Рисунки 8.26 B1 и B2 показать геометрические упрощения и 3D изображение объема взаимодействия полимера, используемого для расчета VR, где W максимальный диаметр деформированной заклепки, H глубина вставки металлической заклепки в CBM, (H — B) высота оставшегося композитного материала над деформированной заклепкой, B высота анкерной зоны, а D - недеформированный диаметр заклепки.

VR представляет эффективность стяжки заклепок в соединениях с клепкой и может быть аналитически выражена моделью, показанной в Уравнении 8.3. ОС варьируется от 0 до 1 и безразмерно:

$$VR = \frac{(H - B)(W^2 - D^2)}{W^2 \cdot H} \quad (8.3)$$

Подобные тенденции в эффективности анкерования и механических характеристиках при растягивающей нагрузке наблюдались Rodrigues et al. [8] для поликарбоната (PC)/алюминиевого 2024-T351 сплава и Proenca et al. [9] для коротковолокнистого полиамида, армированного стекловолокном (GF30-PA6)/алюминия 6056-T6 металлические вставки из алюминиевого сплава. Изменения ОС и связанные с ними общие предельные силы растяжения (ПСР) для двух тематических исследований (комбинации материалов) представлены в Таблице 8.2:



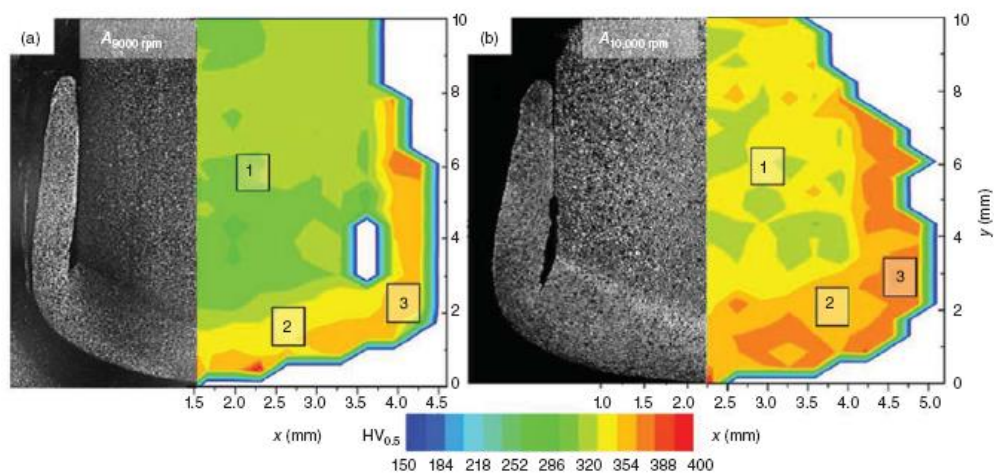


**Рис. 8.25** Типичная карта твердости супер наложена на макрофотографию поперечного сечения соединений Ti-6Al-4V/P-FV заклепки включились в условия с RS 9000 об/мин (a) и RS 10,000 об/мин (b) (микроструктурные зоны, описанные в [28]: Зона 1 - MHAZ, Зона 2 - MTMAZ, Зона 3 - MTMAZ 2) (Источник: Vorba 2015 [28]. Воспроизводится с разрешения UFSCar).

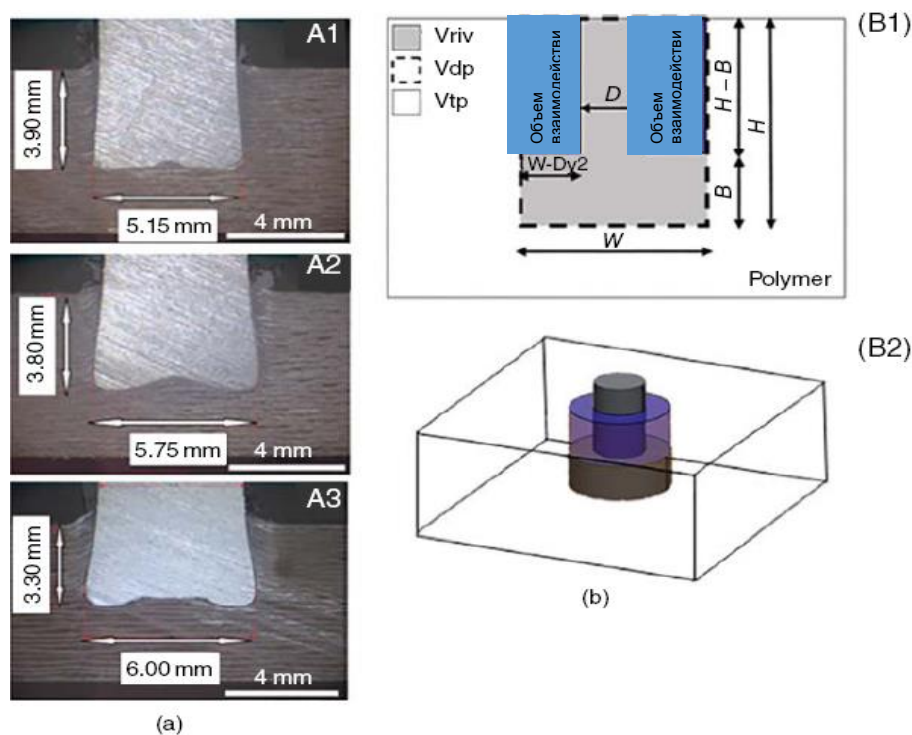


**Рис. 8.26** (a) Виды поперечного сечения выбранных соединений PEI-GF/Ti gr. 2 (Образцы A1, A2, и A3); (b) геометрические упрощения якорной зоны (B1) и упрощенная 3D модель (B2) с изображением полимерного объема взаимодействия (Источник: Blaga соавтор. 2013 [33]. Воспроизводится с разрешения Elsevier)

**Таблица 8.2** Примеры эффективности стяжки для выбранных изученных комбинаций материалов для Фрикционной заклепки).

| Комбинация материалов/условие соединения | Объемное соотношение (VR) (-) | Предельная сила растяжения (UTF) (Н) |
|------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| AA2024-T351/PC                           | $0.49 \pm 0.02$               | $6659 \pm 62$                        |
| AA2024-T351/PC                           | $0.59 \pm 0.03$               | $8040 \pm 195$                       |
| AA2024-T351/PC                           | $0.68 \pm 0.01$               | $8540 \pm 182$                       |
| AA 6056-T6/GF30-PA6                      | $0.50 \pm 0.05$               | $3500 \pm 250$                       |
| AA 6056-T6/GF30-PA6                      | $0.72 \pm 0.02$               | $4900 \pm 150$                       |

а) Условия присоединения и расчеты можно найти в [8] и [9].

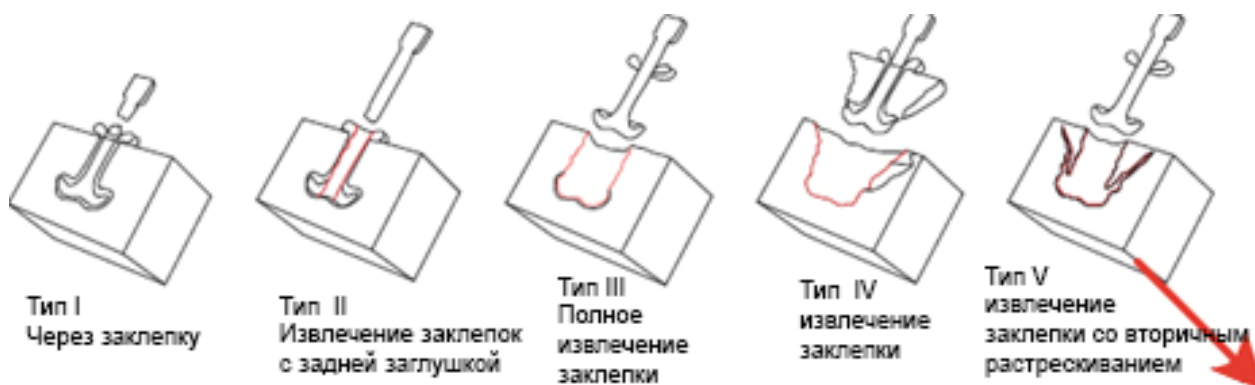


**Рис. 8.27** Текущее описание режимов разрушения при растягивающей нагрузке в Фрикционной заклепке. (Источник: Amancio-Filho соавтор. 2008 [43]. Воспроизводится с разрешения Elsevier).

Аманцио-Фильхо и соавт. [43] сообщил о пяти видах отказов во время испытаний на растяжение, как показано на рис. 8.27:

*Через заклепку (Тип I):* пластичное разрушение, происходящее в металлической заклепке снаружи соединения. Максимальная прочность на разрыв соединения эквивалентна прочности металлической заклепки.

*Извлечение заклепок с задней заглушкой (Тип II):* перелом, при котором трещина возникает на деформированном конце заклепки в анкерной зоне. Позже заклепка вытягивается из полимера, оставляя встроенную часть анкерной зоны («задняя заглушка»). Прочность на растяжение обычно хорошая, но ниже, чем у металлической заклепки.

*Полное извлечение заклепки (Тип III):* разрушение обычно наблюдается в соединениях с высокой пластичностью (например, из поликарбоната) или в тех случаях, когда кончик заклепки был лишь слегка деформирован (низкая механическая фиксация) во время процессаковки. При этом типе разрушения трещина начинается вокруг зоны крепления полимера, и заклепка полностью удаляется, оставляя отверстие диаметром, аналогичным диаметру деформированного конца заклепки. Механическая прочность соединений, проявляющих этот тип разрушения, как правило, меньше, чем прочность соединений типа I и II.

*Извлечение заклепки (Тип IV):* тип разрушения, наблюдаемый в соединениях с большими деформациями на конце заклепки, но с малой глубиной вставки, оставляя зону анкерования близко к поверхности полимера. В этом типе трещина также зарождается в полимере вокруг вершины якорной зоны и распространяется к задней поверхности полимера. Вокруг зоны крепления заклепки, оторванной от соединения, образуется конус полимера.

*Извлечение заклепки со вторичным растрескиванием (Тип V):* более сложный тип разрушения при растяжении, которое еще недостаточно изучено. При таком типе разрушения зародышеобразование наблюдается в нескольких местах полимера вокруг зоны стяжки. На ранних стадиях распространения трещина, похоже, проявляет то же, что и отказ Типа IV, но заклепка вытаскивается из соединения, как указано в отказе Типа III. Как с образцами, повреждаемыми по типу IV, образцы повреждаемые по Типу V имеют прочность на разрыв от средней до низкой.

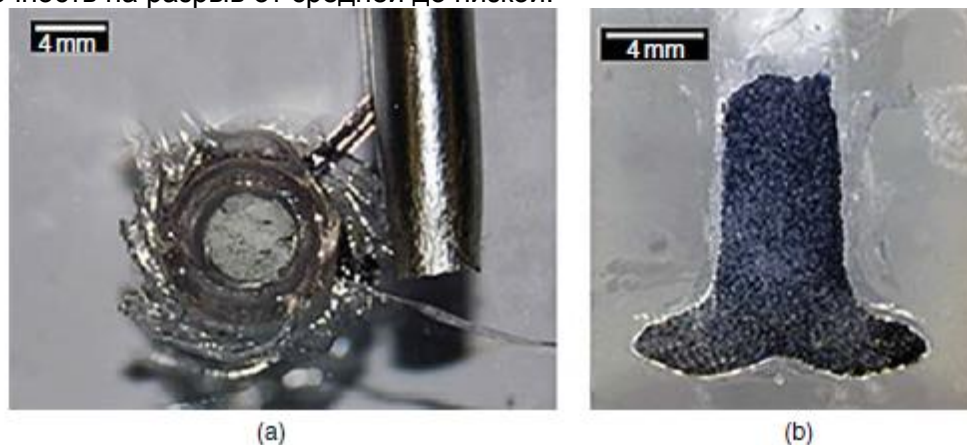


**Рис. 8.28** Перелом типа I наблюдается в состоянии соединения 8. (a) Образец после испытания Т-извлечение. (b) Вид поперечного сечения образца с трещинами (для подробного описания условий соединения и режимов отказа, пожалуйста см. [8]).

Пример вида повреждения 1-о типа приведен на рис. 8.28 для AA2024-T351/поликарбонатное фрикционно-клепаное соединение (параметры соединения: RS 21,000 об/мин, JT 3 с, JP 1.1МПа) [8]:

В соединениях, выполненных в выбранном состоянии, развились переломы типа I с высокими средними значениями UTF ( $8540 \pm 182$  Н). Этот тип разрушения желателен для клепаных соединений и конструкций, так как он представляет собой окончательный разрыв пластичного типа (чашка/конус), происходящий снаружи от полимерной матрицы внутри металлической заклепки. [8].

Рис. 8.29 иллюстрирует два примера видов отказа 1-о и 3-о типа для фрикционно-клепанных соединений [9]:

### 8.8.2.2 Прочность соединения наложением при сдвиге

На Рисунке 8.30, наблюдается средняя кривая растяжения-натяжения для неармированных пластин PEI и кривая усреднения на сдвиг в поперечном сечении для одноклепанных образцов (5 мм PEI пластинок одинарной заклепки @5mm Al2024-T351). Проникновение заклепки в нижнюю пластину составляло в среднем около 2 мм, а ширина деформированного торца заклепки составляла около 9.5 мм [7].

Испытания на сдвиг внахлест проводились на стыках внахлест для оценки прочности на сдвиг внахлест в соответствии со стандартом ASTM D 596. Опорные напряжения (напряжения сдвига внахлест) были рассчитаны с использованием уравнения 8.4 [44]:

$$\sigma_i = \frac{P_i}{(k \times D \times h)} \quad (8.4)$$

где  $\sigma_i$  – напряжение подшипника в мегапаскалях в данной точке данных,  $P_i$  – нагрузка в ньютонах в данной точке данных,  $k$  – фактор силы на отверстие (1.0 для одноклепанных систем),  $D$  – диаметр отверстия в миллиметрах в полимерных пластинах (в данном исследовании было выбрано среднее номинальное значение 6 мм), а  $h$  – толщина соединяемой пластины в миллиметрах

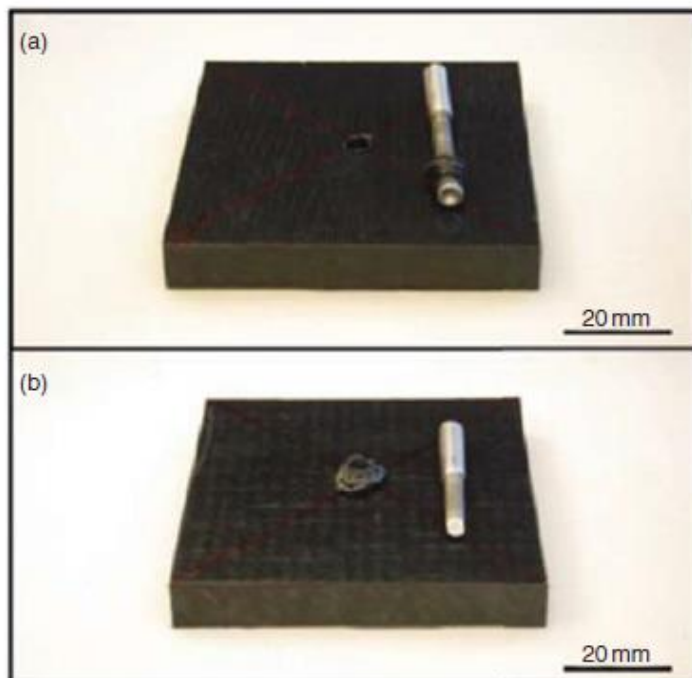


**Рис. 8.29** (а) вид отказа извлеченной заклепки и (b) через вид отказа металлической заклепки [9] (для подробного описания условий соединения и видов отказа см. [9]).

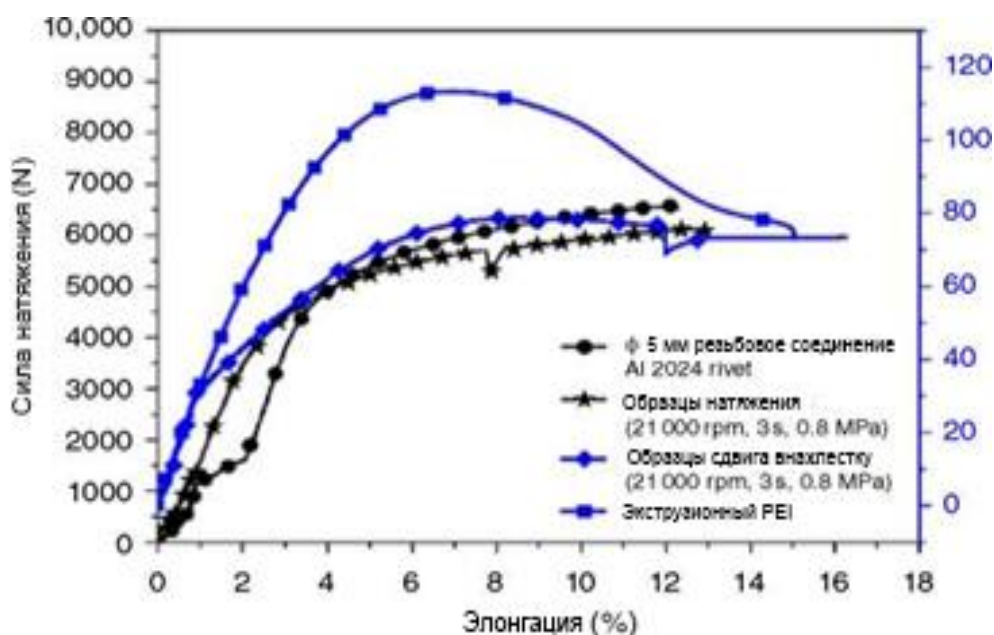


**Рис. 8.30** Средние результаты пяти испытанных образцов для испытаний на растяжение и поперечные сдвиги соединений с прямым трением на заклепках Al 2024-T351/PEI (соединен при 21,000 об/мин, 3 с, 0.8 МПа). Средние кривые для первичных экструдированных блешек PEI и для M5-заклепок приведены для сравнения (Источник: Amancio-Filho 2007 [7]. Воспроизводится с разрешения SAGE Publications).



Деформация испытываемых соединений измерялась по изменению длины на единицу первоначальной длины с использованием экстензометра [44].

Как нетронутые PEI, так и пластины из PEI с клепанными клепками ломались хрупким образом. На рис. 8.31 (а) показан сломанный плоский образец растяжения нового PEI, в котором сужения почти не наблюдалось. Это признак хрупкости материала.

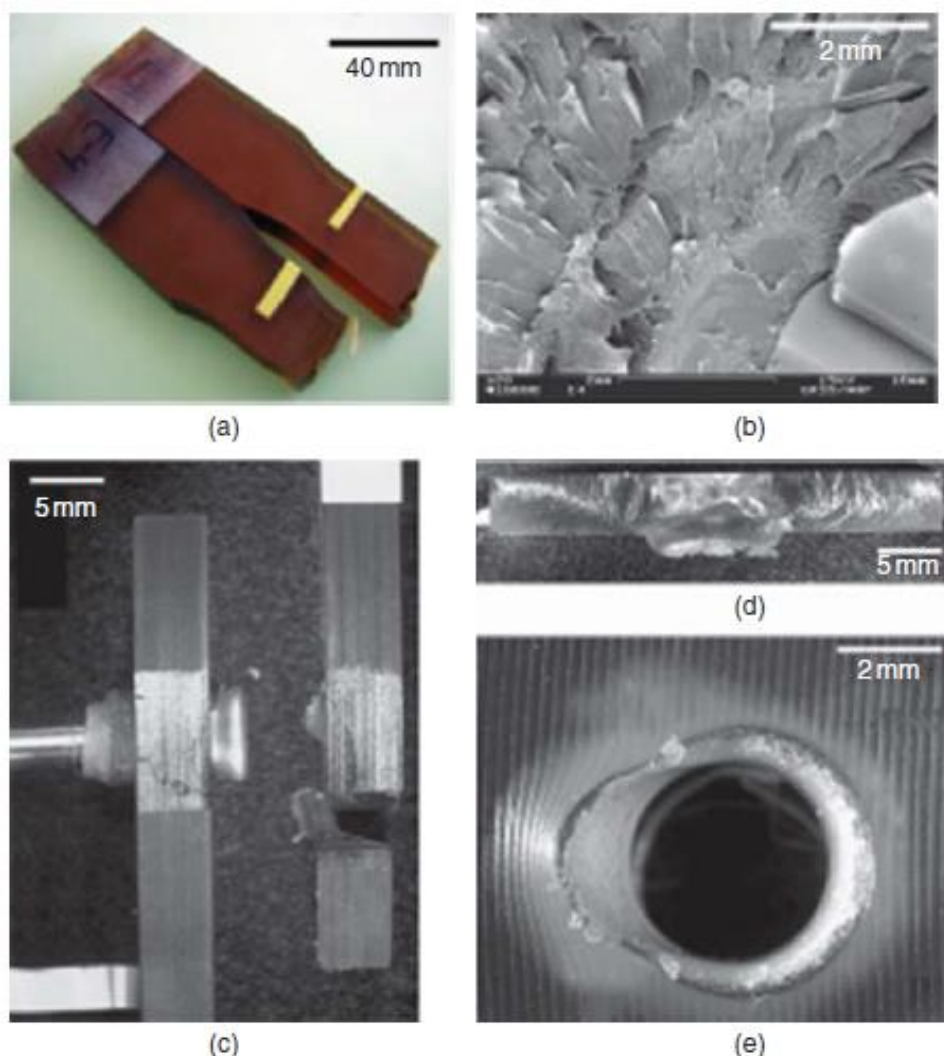


**Рис. 8.31** (а) Разрушенные образцы на растяжение новых PEI пластин. (б) Поверхность разрушения образцов в (а). Множественные схемы образования трещин в разрушенном образце в (а), указывающие на механизмы хрупкого разрушения. (с) Обзор, показывающий сломанный образец сдвига на PEI/Al 2024. (д) Детальный вид нижней пластины в (с). (е) Пластическая деформация (опора) локально происходит в полимерном объеме вокруг заклепки (не показано на фото). Соединение изготовлено со СВ: 21,000 об/мин, ВС:3 с, и ДС:0.8 МПа (Источник: Аманцио-Фильхо 2007 [7]. Воспроизводится с разрешения SAGE Publications).

Кроме того, как показано на рисунке 8.31 (b), множественные схемы растрескивания (микротрещины, обычно встречающиеся в хрупких полимерах) подтверждают предположение о хрупком разрушении.

Также было обнаружено, что хрупкий окончательный сбой произошел в нижней пластине PEI (рис. 8.31 (с) и (д)). Хотя первичный отказ был вызван подшипником (локальная пластическая деформация) вокруг заклепки в обеих пластинах PEI (рис. 8.31 (е)), окончательное растрескивание произошло из-за чистого напряжения (катастрофическое разрушение хрупкого состояния) в нижней пластине PEI. Основной

отказ подшипника — это удовлетворительный механизм отказа, требуемый для клепаных пластиковых соединений, учитывая, что окончательного разрушения из-за натяжения сетки можно избежать путем регулярных проверок соединений [7].

Средняя предельная прочность соединения внахлестку при сдвиге достигла значений  $77 \pm 0.1$  МПа, соответствующая приблизительно 70% прочности одной пластины PEI ( $111.7 \pm 1.9$  МПа). Это довольно хороший результат, учитывая, что PEI является очень чувствительным к надрезу, и отверстие, созданное заклепкой в полимерной пластине, действует как концентратор напряжений [7].

В недавнем исследовании Алтмейер [45], усиленные углеродным волокном PEEK-ламинат / титановые классы трения с односторонним креплением класса 3 сравнивались с современными механически закрепленными эталонными соединениями (соединениями на болтах), производимыми и предоставляемыми Аэробус, Германия. До этого соединения с заклепками с трением были оптимизированы посредством планирования экспериментов (работа приведена в главе 12). Кроме того, были предложены рекомендации по проектированию однополотных соединений. Так как замки на болтах, предоставленные Аэробус, состояли из титана Ti-6Al-4V (сплав примерно в четыре раза прочнее титана 3), сравнение с фрикционной заклепкой была сосредоточена на совместной эффективности. Эффективность соединения — это соотношение между пределом прочности на сдвиг внахлестку и пределом прочности при растяжении. Приклеенный трением соединения Ti gr. 3/ CF-PEEK таким образом совместная эффективность примерно на 20% выше, чем у стопорных болтов Ti-6Al-4V. Общий обзор сравниваемых соединений и результаты этого исследования показаны на рисунке 8.32.

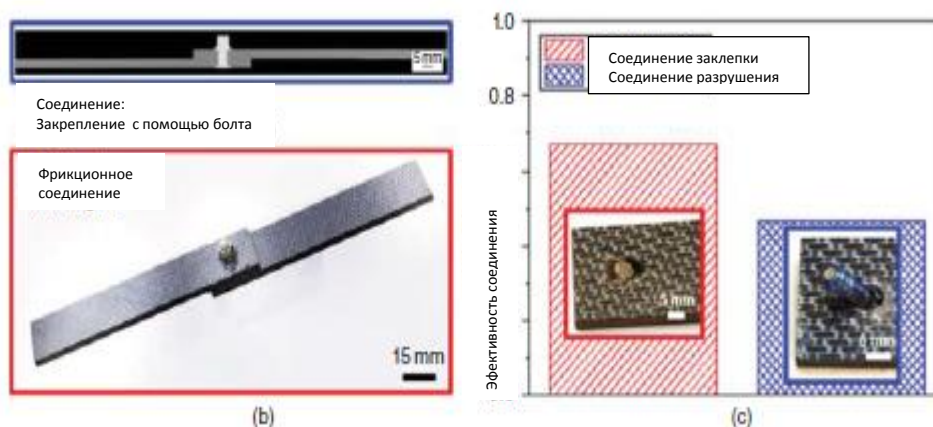


**Рис. 8.32** (а) Рентгенографическая томография клепаных соединений Ti-6Al-4V на болтах, (b) CF-PEEK вид поверхности клепаных швов, (c) Сравнение эффективности соединений и режима разрушения стопорных болтов и клепаных соединений (Источник: Алтмейер 2015 [45]. Воспроизводится с разрешения ГЦГ/Кристиан Шмид).

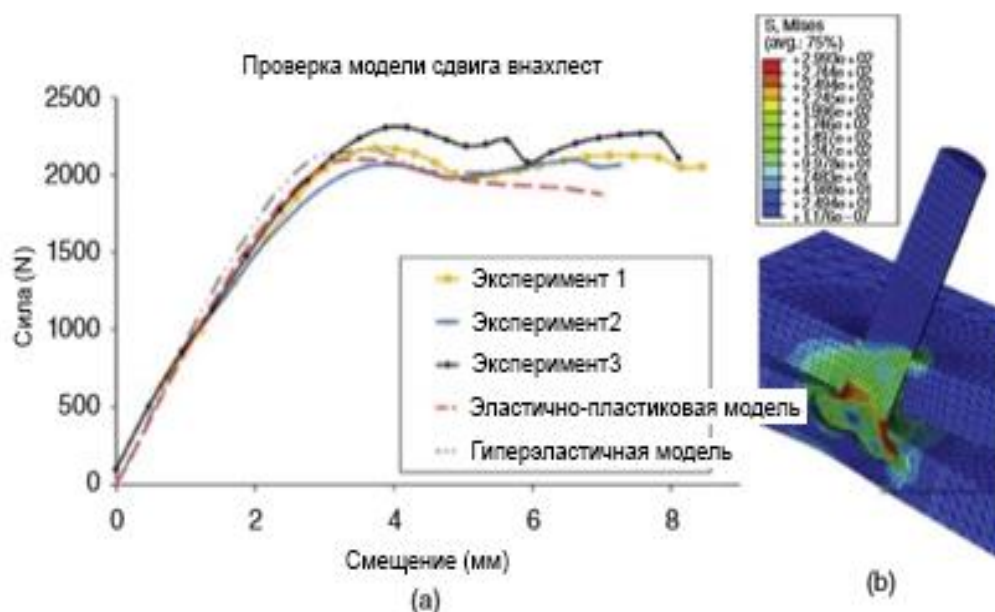


**Рис. 8.33** Экспериментальные и смоделированные результаты испытаний на сдвиг внахлестку. (a) Диаграммы смещения силы и (b) анализ методом конечных элементов, показывающий распределение напряжений в моделируемом кольцевом сдвиговом соединении.

Боргз и соавт. [46] получил хорошие результаты при моделировании механического поведения PEI/AA2024-T351 сдвигов внахлестку алюминиевого сплава, произведенного фрикционной заклепкой. Эти результаты были получены благодаря МКЭ используя упруго-пластические и гиперэластичные модели для PEI и модели гибрида упругопластика/Johnson-Cook для алюминиевого сплава. Хотя материалы модели выбраны для PEI не принимайте во внимание вязкоупругий компонент (релаксация цепи), типичный для пластмасс при механической нагрузке, они были в состоянии представить механическое поведение соединений в пределах предела отклонения 10% (рис. 8.33). По мнению авторов, эти модели могут быть использованы для оптимизации геометрии заклепки. Кроме того, модели могут быть улучшены для более глубокого понимания формирования и характеристик соединения с помощью таких входных данных, как коэффициенты трения, самоконтакты и распределения контактов [46].

Блага и соавт. [26] исследовал соединение наложением с заклепыванием композита PEI (GF-PEI)/Ti класса 2, армированный стекловолокном и провел сравнение с современными болтовыми соединениями аналогичной геометрии (рис. 8.34). Перекрывающаяся соединительная часть состояла из алюминиевой пластины AA2198 толщиной 3.2 мм. Узел перекрытия был закреплен болтами с гайками и шайбами как для клепаных, так и для болтовых соединений. Соединения с фрикционной клепкой (в следующих диапазонах параметров: СВ 6000-20,000 об/мин, ВС 1.9-4.2s, и ДС 0.6-1.0 МПа) представили сопоставимые или даже более высокие прочности для болтовых соединений. При оптимизированных условиях (эксперимент 7), фрикционные клепки могут достигать прочности подшипников до 20% (Конечные силы сдвига внахлестку  $5000 \pm 750$  Н) выше, чем у болтовых соединений, как показано на рисунке 8.34. Оба соединения с заклепками трения и болтовые соединения вышли из строя через сдвиг металлической заклепки.



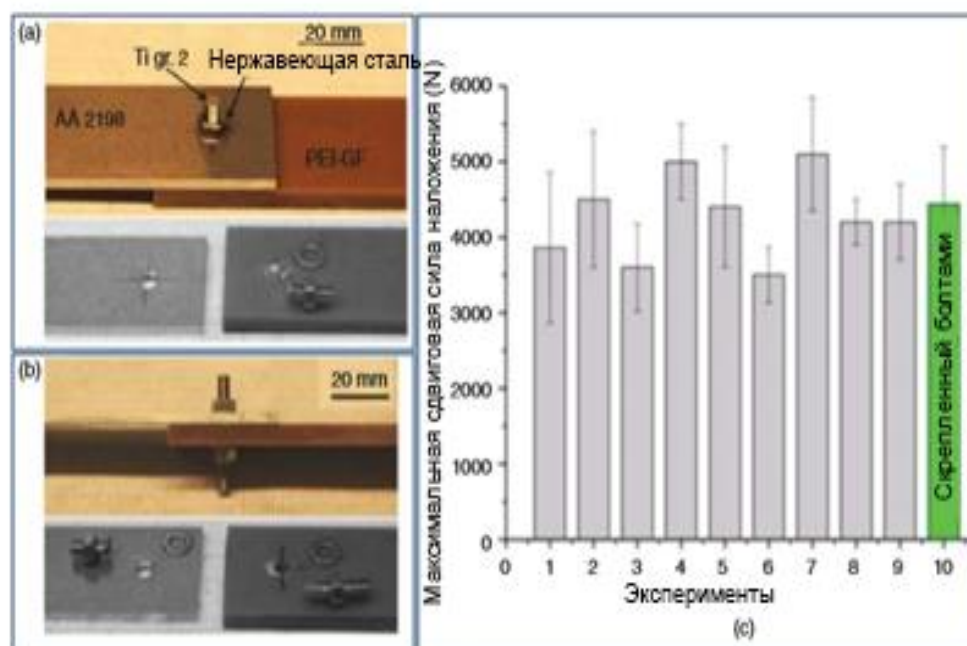


**Рис. 8.34** (а) Детальный вид узла с заклепками с трением и отказ клепочного сдвига; (б) Конфигурация среза на болтах и отказ клепочного сдвига; (с) средние предельные результаты поперечной силы на поперечном сечении в плановых экспериментах и болтовых соединениях (Источник: Блага и соавт. 2015 [26]. Воспроизводится с разрешения Elsevier.

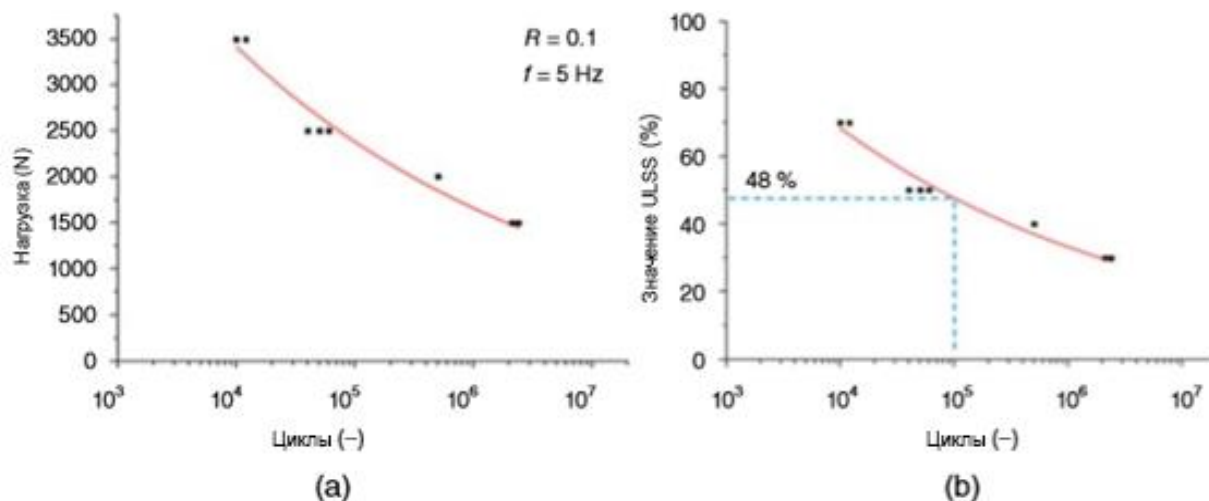


**Рис. 8.35** (а) S-N кривая для выбранной клепки тренияTi gr. 2/GF-PEI и AA2198 соединение внахлестку; (б) усталостная прочность после 105 циклов.

Предполагаемое применение, предложенное в этой работе, заключалось в использовании клепаных соединений для легких конструкций аварийных мостов. [26].

Динамические механические характеристики соединений, исследованных в [26], были рассмотрены в предварительном исследовании, которое будет опубликовано в отдельной рукописи. На рисунке 8.35 (а) показана кривая S-N для одного выбранного условия соединения с клепкой (соответствует оптимизированному соединению из [26]) с усталостной прочностью при 105 циклах, определенной на рисунке 8.35 (б).

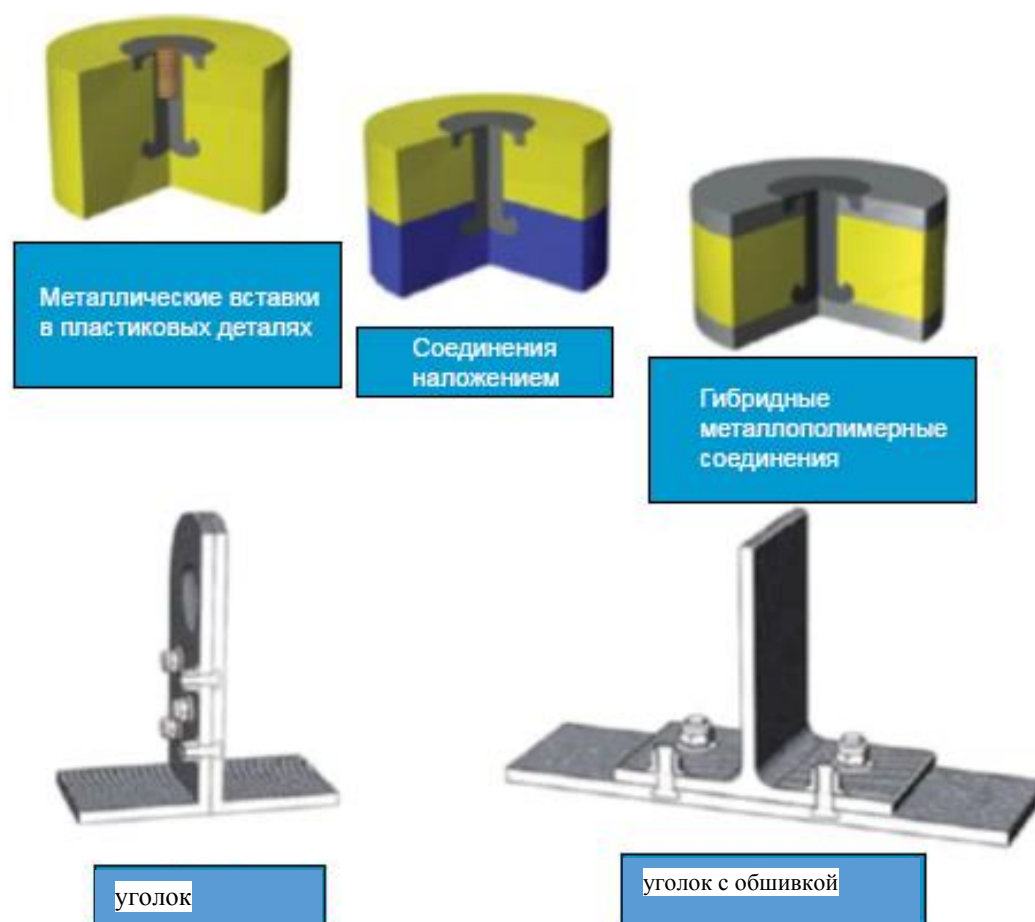


**Рис. 8.36** Возможная геометрия и применение фрикционных клепанных соединений (Предоставлено S.T. Amancio-Filho and N. Z. Borba, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Германия).

Авиастроение рекомендует усталостную прочность 30-40% от предела нагрузки для ввода в эксплуатацию новых методов механического крепления для будущих конструкций в циклах 10<sup>5</sup> [47], в котором предварительные клеевые соединения в этом предварительном исследовании находятся выше этих средних рекомендуемых уровней, что показывает высокий потенциал для будущих применений.

## 8.9 Предусмотренные варианты применения

Благодаря проверенной возможности применения большого разнообразия комбинаций материалов и достигнутых высоких механических характеристик, Фрикционное заклепывание демонстрирует большой потенциал для применения во множестве инженерных сооружений, от автомобильной, авиационной до гражданской. Несколько возможных геометрий соединения для структурных применений предложены на рисунке 8.36.

## 8.10 Выводы

Фрикционное Заклепывание — это инновационная технология соединения гибридных структур металлополимерных и металлокомпозитных материалов. Возможность технологии была продемонстрирована для

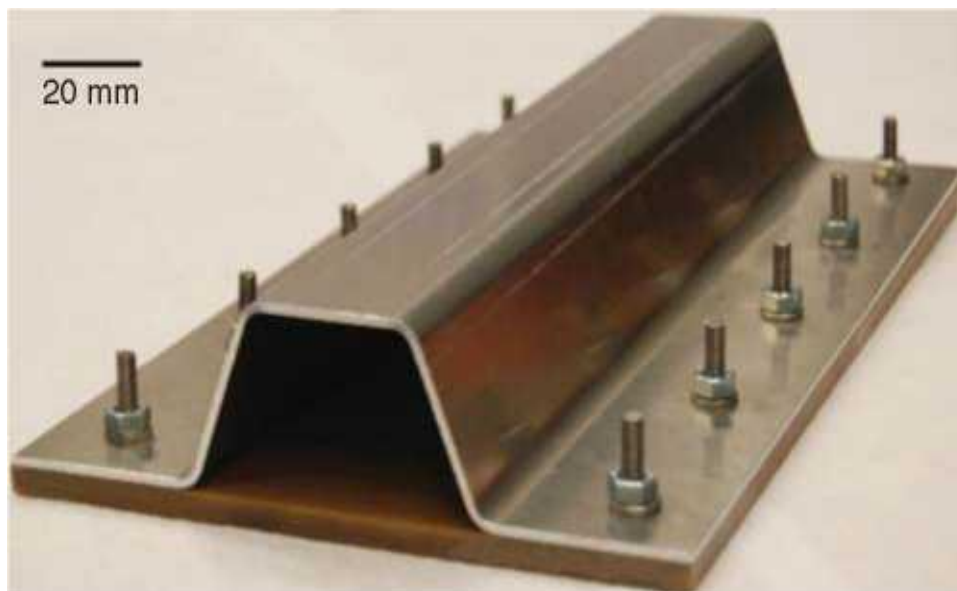


**Рис. 8.37** Прикрепленный трением клеящий компонент для стрингера (алюминиевый омега-стрингер и тканый материал) GF-PEI композитная обшивка).

несколько комбинаций материалов, включая неармированные и армированные волокнами полимерные аналогичные и разнородные металлокомпозитные соединения. Путем тщательного изучения термической истории процесса, микроструктурных изменений, физико-химических изменений, локальных и глобальных механических свойств, процесс был описан и охарактеризован для всех изученных комбинаций материалов. Были достигнуты прочные соединения с хорошими квазистатическими механическими характеристиками (растяжение и сдвиг наложения) и циклические (сдвиг наложения), похожие на лучшие по сравнению с современными технологиями соединения, такими как болтовое соединение. Никакие значительные термические дефекты не были обнаружены ни в полимерах, ни в полимерной матрице композитов. Текущие усилия НИИ (научно исследовательского института) сосредоточены на применении передового плана экспериментов и конечно-элементного моделирования, чтобы лучше понять влияние параметров соединения на формирование соединения, тепловыделение и механические характеристики. Оптимизация процесса также является центральной темой, благодаря которой появляются новые варианты процессов, такие как управление силой с переменным и множественным подфазам RS исследуются в тесном сотрудничестве с промышленностью, например, чтобы позволить прямое фрикционное заклепывание металлов в композиты (то есть, без предварительного сверления металлической детали до присоединения). Кроме того, расширение масштабов является предметом важности во фрикционном заклепывании; Текущие исследования показали, что технология фрикционного заклепывания может быть использована для изготовления компонентов для зачистки корпуса для будущих применений самолетов (рис. 8.37). Эти захватывающие результаты и полученные знания будут опубликованы в ближайшее время. Это поможет повысить уровень технологической готовности фрикционного заклепывания, помогая ускорить его передачу в отрасль.

## Благодарность

Авторы хотели бы поблагодарить всех отдельных авторов и признать финансовую поддержку Ассоциацию Гельмгольца через Группу молодых исследователей, "Усовершенствованные полиметаллические гибридные конструкции" (Грант №. VH-NG-626). Эта глава книги была разработана и написана с частичным воспроизведением следующих статей (с разрешения переизданием от соответствующих издателей):

- Rodrigues, C.F., Blaga, L.A., dos Santos, J.F., Canto, L.B., Hage, E. Jr., and Amancio-Filho, S.T. (2014) FricRiveting of aluminum 2024-T351 and polycarbonate: temperature evolution, microstructure and mechanical performance. *J. Mater. Process. Technol.*, 214, 2029–2039, 10//2014 (Elsevier).
- Amancio-Filho, S.T., Roeder, J., Nunes, S.P., dos Santos, J.F., and Beckmann, F. (2008) Thermal degradation of polyetherimide joined by friction riveting (FricRiveting). Part I: Influence of rotation speed. *Polym. Degrad. Stab.*, 93, 1529–1538, Aug 2008 (Elsevier).
- Blaga, L., Bancila, R., dos Santos, J.F., and Amancio, S.T. (2013) Friction riveting of glass-fiber-reinforced polyetherimide composite and titanium grade 2 hybrid joints. *Mater. Des.*, 50, 825–829, Sep 2013 (Elsevier).
- Алтмейер, J., Suhuddin, U.F.H., dos Santos, J.F., and Amancio-Filho, S.T. (2015) Microstructure and mechanical performance of mcoавтор-composite hybrid joints produced by FricRiveting. *Compos. Part B: Eng.*, 81, 130–140, Nov 2015 (Elsevier).
- Blaga, L., dos Santos, J.F., Bancila, R., and Amancio, S.T. (2015) Friction riveting (FricRiveting) as a new joining technique in GFRP lightweight bridge construction. *Constr. Build. Mater.*, 80, 167–179, Apr 1 2015 (Elsevier).
- Proenca, B.C., Blaga, L., dos Santos, J.F., Canto, L.B., and Amancio-Filho, S.T. (2015) Force controlled friction riveting of glass fiber reinforced polyamide 6 and aluminum alloy 6056 hybrid joints. presented at the ANTEC, Orlando, 2015.
- Borba, N.Z., Blaga, L., dos Santos, J.F., Canto, L.B., and Amancio-Filho, S.T. (2015) Influence of rotational speed on the microstructure and mechanical performance of friction-riveted thermosetting composite joints. presented at the XLI Consolda – Congresso Nacional de Soldagem, Salvador - BA, 2015.
- Алтмейер, J., dos Santos, J.F., and Amancio, S.T. (2014) Effect of the friction riveting process parameters on the joint formation and performance of Ti alloy/short-fiber reinforced polyether ether ketone joints. *Mater. Des.*, 60, 164–176, Aug 2014 (Elsevier).

## Литература

- 1 Messler, R.W. (2000) Trends in key joining technologies for the twenty-first century. *Assembly Autom.*, 20, 118–128.
- 2 Messler, R.W. (2004) Joining composite materials and structures: some thought-provoking possibilities. *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 17, 51–75.
- 3 Rink, M. (1999) Device for producing bonded parts. US Patent 005940949:1999.
- 4 Kweon, J.H., Jung, J.W., Kim, T.H. et al. (2006) Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding. *Compos. Struct.*, 75 (1–4), 192–198.
- 5 Amancio-Filho, S.T., Beyer, M., and dos Santos, J.F. (2011) Verfahren zum Verbinden eines mcoавторлического Болzens mit einem Kunststoff-Werkstück. EP 1 790 462 B1.
- 6 Amancio-Filho, S.T., Beyer, M., and dos Santos, J.F. (2009) Method of connecting a mcoавторlic bolt to a plastic workpiece. US Patent 7575149 B2.
- 7 Amancio-Filho, S.T. (2007) Friction Riveting: Development and Analysis of a New Joining Technique for Polymer-Mcoавтор Multi-Materials Structures, Technische Universität Hamburg-Harburg.

- 8 Rodrigues, C.F., Blaga, L.A., dos Santos, J.F. et al. (2014) Friction riveting of aluminum 2024-T351 and polycarbonate: temperature evolution, microstructure and mechanical performance. *J. Mater. Process. Technol.*, 214, 2029–2039.
- 9 Proenca, B.C., Blaga, L.-A., dos Santos, J.F., Canto, L.B., and Amancio-Filho, S.T. (2015) Force controlled friction riveting of glass fiber reinforced polyamide 6 and aluminum alloy 6056 hybrid joints. *Proceedings of ANTEC 2015*, Orlando.
- 10 EN ISO 15620:1999 (1999) Welding – friction welding of mcoавтоpic materials (Schweißen – Reibschweißen von mcoавтоpicischen Werkstoffen, Comit  Européen de Normalisation, Belgium).
- 11 ASM International. Handbook Committee (1994) *ASM Handbook Volume 6: Welding, Brazing and Soldering*, ASM International.
- 12 Amancio-Filho, S.T., Roeder, J., Nunes, S.P. et al. (2008) Thermal degradation of polyetherimide joined by friction riveting (FricRiveting). Part I: Influence of rotation speed. *Polym. Degrad. Stab.*, 93, 1529–1538.
- 13 Stokes, V.K. (1988) Analysis of the friction (spin)-welding process for thermoplastics. *J. Mater. Sci.*, 23, 2772–2785.
- 14 Vill, V.I. (1962) *Friction Welding of Mcoавtops*, American Welding Society; trade distributor Reinhold Pub. Co., New York.
- 15 Bijwe, J., Tewari, U.S., and Vasudevan, P. (1990) Friction and wear studies of bulk polyetherimide. *J. Mater. Sci.*, 25, 548–556.
- 16 Billmeyer, F.W. Jr., (1984) *Textbook of Polymer Science*, 2nd edn, Wiley-Interscience, New York.
- 17 Amancio-Filho, S.T. (2013) Henry Granjon Prize Competition 2009 Winner Category A: “Joining and Fabrication Technology” friction riveting: development and analysis of a new joining technique for polymer-mcoавtop multi-material structures. *Weld. World*, 55 (1–2), 13–24.
- 18 Amancio-Filho, S.T. and dos Santos, J.F. (2016) Preliminary analytical modeling of heat input in friction. *Proceedings of ANTEC 2016*, 1361–1368.
- 19 Crawford, R.J. and Tam, Y. (1981) Friction welding of plastics. *J. Mater. Sci.*, 16, 3275–3282.
- 20 Crossland, B. (1971) Friction welding. *Contemp. Phys.*, 12, 559–574.
- 21 Grote, K.-H. and Feldhusen, J. (2014) *Dubbel – Taschenbuch f r den Maschinenbau*, Springer-Verlag.
- 22 Vairis, A. and Frost, M. (2000) Modelling the linear friction welding of titanium blocks. *Mater. Sci. Eng., A Struct. Mater. Prop. Microstruct. Process.*, 292, 8–17.
- 23 Ma, T.J., Li, W., and Yang, S.Y. (2009) Impact toughness and fracture analysis of linear friction welded Ti–6Al–4V alloy joints. *Mater. Des.*, 30 (6), 2128–2132.
- 24 Алтмейер, J., dos Santos, J.F., and Amancio-Filho, S.T. (2014) Effect of the friction riveting process parameters on the joint formation and performance of Ti alloy/short-fibre reinforced polyether ether ketone joints. *Mater. Des.*, 60, 164–176.
- 25 Meyer, A. (2003) *Friction Hydro Pillar Processing: Bonding Mechanism and Properties* – Axel Meyer – Google Books, Technical University Carolo-Wilhellmina, Braunschweig.
- 26 Blaga, L., dos Santos, J.F., Bancila, R., and Amancio-Filho, S.T. (2015) Friction riveting (FricRiveting) as a new joining technique in GFRP lightweight bridge construction. *Constr. Build. Mater.*, 80, 167–179.
- 27 Borba, N.Z., Blaga, L., Fernandez, J., Canto, L.B., and Amancio-Filho, S.D.T. (2016) Influência da Velocidade de Rota o do Rebite na Microestrutura e no Desempenho Mecânico de Juntas de Compósito Termofixo Rebitadaspor Fric o, vol. 21 (1), 30–43.
- 28 Borba, N.Z. (2015) *Friction Riveting of TI-6AL-4V and Pultruded Glass Fiber Reinforced Thermoset Polyester Hybrid Joints*, Federal University of São Carlos, Brasil.
- 29 Amancio-Filho, S.T. (2011) Friction riveting (FricRiveting). Development of a new joining technique for polymer-mcoавtop hybrid joints. Part I: Process and microstructure. *Soldag. Inspe o*, 16, 387–395.
- 30 Алтмейер, J., Suhuddin, U.F.H., dos Santos, J.F., and Amancio-Filho, S.T. (2015) Microstructure and mechanical performance of mcoавtop-composite hybrid joints produced by FricRiveting. *Compos. Part B: Eng.*, 81, 130–140.
- 31 Zeng, Z., Jonsson, S., and Roven, H.J. (2009) The effects of deformation conditions on microstructure and texture of commercially pure Ti. *Acta Mater.*, 57 (19), 5822–5833.

- 32 Williams, J.C., Baggerly, R.G., and Paton, N.E. (2002) Deformation behavior of HCP Ti-Al alloy single crystals. *Материал. Транс. А*, 33, 837–850.
- 33 Blaga, L., Bancilă, R., dos Santos, J.F., and Amancio-Filho, S.T. (2013) Friction riveting of glass–fibre-reinforced polyetherimide composite and titanium grade 2 hybrid joints. *Mater. Des.*, 50, 825–829.
- 34 Kuroda, S.-I., Terauchi, K., Nogami, K., and Mita, I. (1989) Degradation of aromatic polymers – I. Rates of crosslinking and chain scission during thermal degradation of several soluble aromatic polymers. *Eur. Polym. J.*, 25 (1), 1–7.
- 35 Torrecillas, R., Baudry, A., Dufay, J., and Mortaigne, B. (1996) Thermal degradation of high-performance polymers – influence of structure on polyimide thermostability. *Polym. Degrad. Stab.*, 54, 267–274.
- 36 Caroccio, S., Puglisi, C., and Montaudo, G. (1999) Thermal degradation mechanisms of polyetherimide investigated by direct pyrolysis mass spectroscopy. *Macromol. Chem. Phys.*, 200, 2345–2355.
- 37 Augh, L., Gillespie, J.W. Jr., and Fink, B.K. (2001) Degradation of continuous carbon-fiber reinforced polyetherimide composites during induction heating. *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 14, 96–115.
- 38 ISO 11357-1 (1997) *Plastics – Differential Scanning Calorimetry (DSC) – Part 1: General Principles*, ISO.
- 39 Sanner, M.A., Haralur, G., and May, A. (2004) Effect of molecular weight on brittle-to-ductile transition temperature of polyetherimide. *J. Appl. Polym. Sci.*, 92, 1666–1671.
- 40 Borba, N.Z., Blaga, L., dos Santos, J.F., Canto, L.B., and Amancio-Filho, S.T. (2014) Friction riveting of pultruded thermoset glass fiber reinforced polyester composite and Ti6Al4V hybrid joints. *SPE ANTEC 2014*, 1768–1774.
- 41 Blaga, L.-A. (2012) *Innovating Materials in Bridge Construction. Contribution to Construction with Composite Fiber-Reinforced Materials*, Technical University “Politehnica” of Timisoara, Romania.
- 42 Blaga, L.-A., Amancio-Filho, S.T., dos Santos, J.F., and Bancila, R. (2012) Friction riveting of civil engineering composite laminates for bridge construction. *Annual Technical Conference Proceedings ANTEC 2012*.
- 43 Amancio-Filho, S.T., dos Santos, J.F., and Ventzke, V. (2008) Determination of fracture mechanism under tensile loading in commercial available engineering thermoplastic material joined by Friction Riveting. *5th International Conference on Fracture of Polymer, Composites and Adhesives*, 7–11 September 2008.
- 44 ASTM D 5961/D 5961 M-05 (2005) *Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates*, ASTM International.
- 45 Алтмейер, J. (2015) *Fundamental Characteristics of Friction Riveted Multi-Material Joints*, Technische Universität Hamburg-Harburg.
- 46 Borges, M.F., Amancio-Filho, S.T., dos Santos, J.F. et al. (2012) Development of computational models to predict the mechanical behavior of Friction riveting joints. *Comput. Mater. Sci.*, 54, 7–15.
- 47 Schmidt, H.J. and Schmidt, B. (2012) *Fatigue & Damage Tolerance and Composite Training*, Helmholtz-Zentrum Geesthacht.

## Награды за достижения в сфере публикаций о методе фрикционного заклепывания

- **Награда за лучшую статью** «Специальная группа по соединению полимеров и композитов» для доклада: «Предварительное аналитическое моделирование тепловыделения при фрикционном заклепывании» в ANTEC 2016 - Ежегодная техническая конференция Общества инженеров по работе с пластмассами (SPE), 23.05.2016, Индианаполис, США
- **«Восходящая звезда, категория: Методы соединения»**, Международный автомобильный цикл, Automotive Engineering Expo 2015, Nürnberg, 09.06.2015, Германия
- **Победитель «Конкурс ранних исследователей 2013»** (Победитель: Dr-Ing. Lucian-A. Blaga, advised PhD студент) для работы «Фрикционная клепка Аварийных мостов из стекловолокна, Усовершенствованные композиты в строительстве ACIC 2013, Сетевая группа по композитам в строительстве (NGCC)," 10th-12th сентября 2013, Белфаст, Великобритания
- **«День Аэробуса PhD 2012s награда докладчика»** (Участник: Ms Julie Алтмейер, руководимый PhD студент) для работы «Основные характеристики многокомпонентных соединений с клепкой: влияние параметров процесса на формирование и характеристики соединений», 22ое октября 2012, Getafe, Испания
- **Granjon Приз 2009 Международного института сварки, категория А:** Технология соединения и изготовления, Сингапур
- **Награда за лучшую студенческую презентацию «Соединение пластмасс и композитов: специальная группа по направлениям»** за статью: «Фрикционное заклепывание это новая методика соединения термопластов для легких сплавов» о моей PhD работе, в ANTEC 2008 - Ежегодная техническая конференция Общества инженеров пластмасс (SPE), Milwaukee, США, 3 Мая 2008
- **«NORDMCOABTOPL-Stiftung "Preis der Mcoавтоpl- und Elektroindustrie 2008": лучшая PhD работа 2007 года, Гамбург, Германия.**



## 9 Стяжка металлополимерных гибридных конструкций

André B. Abibe<sup>1</sup> и Sergio T. Amancio-Filho<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт материаловедения, механики материалов, твердотельных процессов соединения, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Центр материаловедения и прибрежных исследований, Гестхахт, Германия

<sup>2</sup>Действующее отделение: Институт материаловедения, соединения и формирования, Грацкий университет технологий, Грац, Австрия

### 9.1 Введение

Механическое взаимодействие между двумя материалами было одним из наиболее используемых методов сборки. Классический механический процесс соединения происходит с использованием дополнительных компонентов соединения, таких как крепеж. Механическое крепление — это хорошо понятный метод, широко применяемый практически во всех конструкциях. Несмотря на то, что крепеж очень гибкий, его можно заменить другими механизмами помех; эти процессы механического крепления выполняются с использованием блокировки и могут быть классифицированы как жесткие (например, ласточкин хвост и кромки), эластичный (например, замковые соединения) или пластиковый (например, заклепка, соединение) [1].

Особенно широко распространен метод механического соединения разнородных компонентов. Стяжка представляет собой механическое соединение между двумя соединяющимися частями путем использования пластической деформации одной из них. Он используется с 1950-х годов, но только в 1980-х годах он развился до современного технологического уровня [2]. Его основная конфигурация показана на рисунке 9.1 (а). Соединительные детали состоят из термопластичной заготовки со встроенным выступающим штифтом и второй заготовки со сквозным отверстием, в которое вставляется штырь. Вторая заготовка может быть изготовлена из любого материала, но эта глава посвящена металлополимеру соединений. На рисунке 9.1 (b) показано действие формующего инструмента, формирующего стержня в стяг, который захватывает две части вместе, как показано на рисунке 9.1 (c). Это простой метод, который может соединять термопластичные полимеры с другими материалами, такими как металлы, печатные платы и другие химически несовместимые полимеры.

Стяжка широко применяется для неструктурных соединений в автомобильной промышленности, таких как накладки, обтекатели, кузовные работы и печатные платы электронных компонентов [2, 3]. В связи с необходимостью встроенных стержней на термопластичную заготовку, обычно выполняется разбивка на детали, отливаемые под давлением, в которых эти геометрии легко достигаются и мало увеличивают затраты на инструмент.

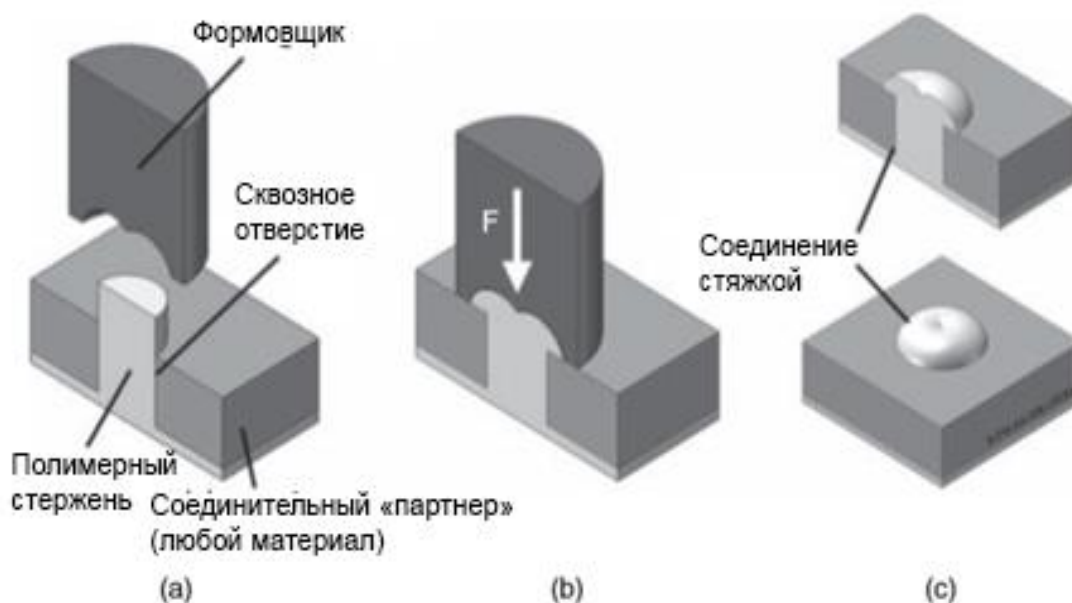


**Рис. 9.1** Основные конфигурации соединительных деталей для процессов стяжки.

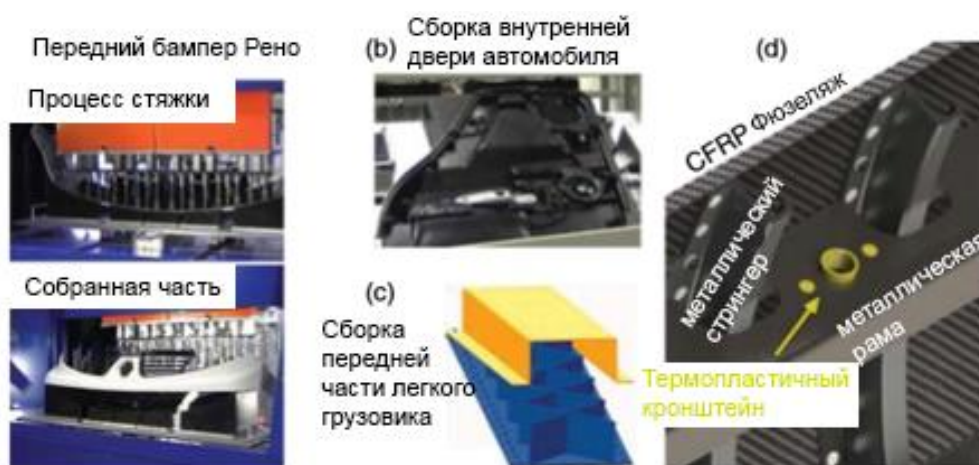


**Рис. 9.2** Применение процессов стяжки: (а) Сборка передней части легкого грузовика (Воспроизводится с разрешения PHASA [12]); (б) Сборка внутренней двери автомобиля (Воспроизводится с разрешения PHASA [13]), оба в исполнении PHASA Лимитед ([www.phasa.co.uk](http://www.phasa.co.uk)); (с) Сборка передней части легкого грузовика (Источник: Leaversuch 2003 [14] Воспроизводится с разрешения Журнал «Пластмассовые Технологии»); и (д) потенциальное применение для армированных волокном кронштейнов в конструкциях самолетов.

В промышленности соединения стяжкой выполняется с помощью автоматизированного оборудования, которое может объединять десятки стягов за цикл. Хотя большинство применений не нацелены на несущие конструкции, для этих сборок были нацелены новые передовые процессы на основе кольцевания, такие как соединение с помощью инъекционного зажима (ICJ) [4-6], фрикционная стяжка заклепыванием [7, 8], ультразвуковое плющение [9, 10], и термоклин [11]. Рис. 9.2 показывает примеры выполняемых и потенциальных процессов стяжки заклепыванием.

Преимущества процессов стяжки заклепыванием [15,16]: (1) соединение разнородных материалов; (2) короткие циклы соединения; (3) нет необходимости в дополнительных

деталей, снижение веса; (4) небольшие денежные вложения; (5) переработка; и (6) могут иметь слабые допуски для применений с низкой прочностью. Ограничения: (1) постоянная сборка; (2) восстановление формы от расслабления; (3) внешний вид (большие шляпки стяга); (4) более длительные циклы для термостойких материалов; а также (5) двусторонняя доступность.

Традиционно, методы разбивки представляют собой простой способ соединения разнородных материалов и не подвергаются глубокому исследованию в научном аспекте. Эта глава предназначена для ознакомления с современным уровнем техники в методах стяжки и показывает обзор наблюдаемых суставных образований и микроструктурных изменений, теоретизированных в соответствии с нашим опытом в данной области. Кроме того, введение в концепции проектирования, характеристики и механическое поведение разбитых соединений помогает читателю в определении стратегий для разработки таких методов.

## 9.2 Виды стяжек

Два основных вида процессов стяжки основаны на передаче энергии, используемой для преобразования стержня в стяг: холодная стяжка и горячая стяжка. Процессы холодной стяжки осуществляются с или без внешнего нагрева, однако всегда при температурах ниже соответствующего перехода полимерной связи - температуры стеклования ( $T_g$ ) для аморфных полимеров и температуры плавления кристаллов ( $T_m$ ) для полукристаллических полимеров. В процессе горячей стяжки используется источник тепла, чтобы смягчить или расплавить полимерный стержень над его  $T_g$  или  $T_m$ , снижение вязкости и облегчение деформации. Рис. 9.3 обобщает основные приемы каждого из этих типов.

Характеристики каждого из этих процессов будут в основном диктоваться механизмом передачи энергии, который имеет место. Во всех вариациях механическая энергия необходима для преобразования стержня в стяг. Кроме того, в процессах горячей стяжки используется источник тепла, чтобы помочь смягчить материал и уменьшить величину механической энергии при соединении. Характер каждого из механизмов передачи энергии будет по-разному влиять на свойства материала и соединения, а также на продолжительность циклов соединения. В следующих разделах приведены краткие описания каждого из перечисленных процессов и основные характеристики, влияющие на целостность соединений и материалов.

### 9.2.1 Холодная стяжка

Этот тип процесса стяжки характеризуется пластической деформацией полимера ниже температуры перехода. В нем используется инструмент для приложения формирующей силы выше предела текучести полимерного стержня, превращая его в столб с геометрией, соответствующей форме инструмента



**Рис. 9.3** Краткое описание типов процессов скрепления.

Холодное скрепление может быть выполнено с любым материалом, достаточно податливым, чтобы выдерживать высокие уровни деформации без разрушения или растрескивания; следовательно, он обычно не подходит для композитов и хрупких полимеров.

Эффекты восстановления являются актуальной проблемой при холодном скреплении. Холодная формовка оставляет остаточные напряжения в деформированном объеме. После отступления инструмента в напряженном объеме происходит зависящая от времени релаксация, изменяя конфигурацию макромолекул на низкоэнергетическое состояние. На практике это означает, что имеет место эффект «упругого возврата» [15], в результате чего стержень медленно теряет свою заданную форму и может ухудшить силу зажима шляпки стяга на присоединяющемся «партнере». Стратегия уменьшения этого эффекта состоит в том, чтобы удерживать стержень под давлением инструмента после формования, побуждая полимер восстанавливаться, пока он еще находится в желаемой форме. Необходимо учитывать рабочую температуру сборки, так как более высокие температуры ускоряют эффект восстановления для холодных пластиков. В результате проблем с восстановлением и растрескиванием при более высоких скоростях деформации время цикла для получения сильных холодных стыковых соединений может быть значительно увеличено.

Эти ограничения приводят к тому, что холодное размещение в основном применяется в неструктурных деталях или сборках с низкой нагрузкой. Поэтому холодная стяжка не является технологически столь же актуальной, как горячая стяжка, причем последняя предпочтительна для высокопроизводительных применений. Остальная часть этой главы в основном посвящена применению горячих стяжек.

## 9.2.2 Горячая стяжка

В процессе горячей стяжки используется тепловая энергия для размягчения материала перед формованием путем нагрева шпильки или во время формования с использованием нагретого инструмента. Короткие циклы соединения требуют высоких скоростей нагрева, которые при горячей укладке могут привести к термическому разложению частей соединяемого материала. Процесс должен быть оптимизирован для получения прочных соединений без значительного разрушения соединяемых деталей, даже при использовании очень высоких скоростей нагрева.

Горячая стяжка имеет некоторые преимущества перед холодной укладкой: (1) более низкие силы формования; (2) избегает эффектов восстановления за счет уменьшения / устранения остаточных напряжений; и (3) размягченный материал может лучше заполнить зазор отверстия. Несмотря на то, что в целом производительность выше, использование дополнительного отопления имеет свои недостатки: (1) более высокое потребление энергии; (2) риски термического разложения; и (3) время выдержки / охлаждения, необходимое для уплотнения. В следующих разделах кратко описаны основные типы процессов горячего нанесения. Большинство процессов выполняется, как показано на рисунке 9.1, с добавлением источника нагрева.

### 9.2.2.1 Термостяжка

Формирующий инструмент является электрически нагреваемым выше  $T_m$  или  $T$  полимеров и сжатый воздух используется для охлаждения системы перед снятием инструмента. Поскольку инструмент никогда не охлаждается, потребляется большое количество энергии, поэтому необходимо соблюдать осторожность, чтобы избежать термического разложения. Термическое нанесение лучше подходит для термопластичных армированных термостойких материалов [15].

### 9.2.2.2 Холодная стяжка горячим потоком (HACS)

Потоки горячего воздуха доставляются с помощью коллекторов или форсунок над полимерным стержнем, чтобы смягчить или расплавить его; затем охлаждаемый формовочный инструмент формирует стержень в стяг и одновременно охлаждает его. Использование очень горячего воздуха сокращает циклы, но увеличивает потребление энергии. Типичные температуры находятся в диапазоне от 150 до 400 ° C. Во время разработки процесса инженер должен контролировать скорости формования в соответствии с развитием температуры, чтобы полимер был достаточно мягким, чтобы его можно было сформировать холодным инструментом без растрескивания. Это один из наиболее часто используемых процессов укладки в автомобильной промышленности, и его можно легко автоматизировать [2].

### 9.2.2.3 Инфракрасная и лазерная стяжка

Эти процессы используют электромагнитное излучение для нагрева полимерного стержня перед формованием. Стоимость оборудования выше, чем у других технологий ставок. Устройство используется для сближения пучков фотонного излучения (инфракрасного или лазерного) в интересующую область (стержень), после чего стержень формируется в стяг [17]. Существует два варианта этого процесса в зависимости от конфигурации устройства: одинарный инструмент или двойной инструмент. Один инструмент выполняет функции сближения балки с цапфой и последующего ее формования. Стеклообразные линзы используются для схождения луча, и они также образуют верхнюю часть стяга (шляпку). Эта конфигурация обычно является более дорогой из-за чрезмерного износа линз при использовании в качестве формирующей поверхности, особенно для армированных пластиков. Двойной инструмент использует двухступенчатый инструмент, состоящий из источника луча и формирующей шляпки. В этом случае инфракрасный или лазерный источник нагревает стержень, а после этого инструмент или заготовки меняют положение, а формирующая шляпка создает часть стяга. Таким образом, можно использовать более подходящий формовочный инструмент при незначительно более длительных циклах за счет смены инструмента [17]. Из-за природы этого источника энергии инфракрасное или лазерное размещение работает только на материалах, непрозрачных для используемого излучения. С этой целью технический углерод обычно наносится в небольших количествах на пластмассу. Он должен быть равномерно распределен по всему объему шипа, чтобы избежать неравномерного нагрева шипа.

Новшеством этого процесса является «сквозное» лазерное размещение, в котором прозрачная полимерная часть располагается над непрозрачным (поглощающим)

полимерным стягом. Когда луч нагревает верхнюю часть стяга, а линза прижимает прозрачную часть к непрозрачному стрежню, то между ними образуется сварной шов, что превращает прозрачную часть в шляпку стяга. Этот процесс уменьшает износ инструмента для варианта с одинарным инструментом, благодаря использованию более мягкого материала в качестве прозрачного компонента [18].

Недавно, производный метод инфракрасной стяжки был разработан как запатентованная технология «Infrastake» [19, 20]. Infrastake использует закрытую камеру с отражающими стенками, которые применяют излучение более эффективно, чем одиночный луч на шипе. Этот процесс может достигать очень низких формующих сил, используя низкое энергопотребление (лампа 35 или 100 Вт) и короткие циклы соединения благодаря одновременному формированию и охлаждению.

#### 9.2.2.4 Ультразвуковая стяжка

Ультразвуковой источник используется для вибрации формовщика, который при контакте с полимерным стержнем размягчает или расплавляет его под воздействием тепла, создаваемого межмолекулярным и межфазным трением. Природа этого механизма создает лишь тонкий расплавленный слой на поверхности контакта; следовательно, большая часть объема шипа находится в жестком, не уступающем состоянии. Понимание и оптимизация процесса необходимы для контроля давления соединения и амплитуды колебаний, чтобы соответствовать скорости плавления пластика и избежать растрескивания шипа из-за чрезмерного давления на твердый материал [15]. Оптимизированные процессы могут быть очень быстрыми, с несколькими секундами времени соединения. Кроме того, эффект восстановления не очень интенсивен из-за небольших объемов расплава.

При использовании армированных пластиков износ инструмента может быть проблемой. Гахн и Финкелдей [21] сообщили о чрезмерном износе титановых инструментов после 100 стыков PP-40%GF. Кроме того, ультразвуковое нанесение не рекомендуется для самосмазывающихся пластиков, так как СВМП (сверхвысокомолекулярный полиэтилен) и политетрафторэтилен (ПТФЭ), поскольку фрикционный нагрев не эффективен для этих материалов. Несмотря на то, что это очень эффективный метод для одиночных стягов, крупные многозадачные конструкции могут затруднить объединение одного ультразвукового источника, поскольку необходимо учитывать расстояние и разность высот между стержнями [15, 22].

#### 9.2.3 Усовершенствованный процесс стяжки

В настоящее время разрабатываются новые инновационные технологии, основанные на стяжке, нацеленные на вторичные и третичные несущие конструкции. В следующих разделах кратко описаны основные аспекты этих методов.

##### 9.2.3.1 Нагнетательное соединение заклепыванием (ICJ)

ICJ это технология, основанная на укладке, включая принципы литья под давлением, механического крепления и укладки. Этот метод был недавно разработан для полимерно-металлических конструкций [4] с целью улучшения механических характеристик кольцевого соединения при одновременном уменьшении размера шляпки стяга. Стратегия ICJ закрепленных соединений это использовать полости внутри сквозного отверстия металлического партнера и протолкнуть (или ввести) размягченный / расплавленный полимерный материал шипа внутрь этих полостей. Это позволяет более эффективно использовать объем шипа и улучшает механическое крепление между деталями. Эта концепция может быть применена к любому методу укладки, но в настоящее время она разрабатывается в двух вариантах с использованием электрического и фрикционного нагрева. На рисунке 9.4 показан основной принцип ICJ.

Для производства оптимизированных ICJ соединений с заполненными полостями следует систематически изучать конкретный материал и используемую геометрию

полости. Для любого выбранного метода нагрева параметры процесса должны быть отрегулированы так, чтобы шип имел низкую вязкость на этапе формования; в противном случае заполнение полости будет неполным, а соединение неэффективным. Расходы от экспериментальных прогонов могут быть уменьшены с помощью вычислительной гидрогазодинамики (CFD) для определения реологических условий для успешного заполнения полости. Полости в соединяющем партнере предпочтительно подвергаются механической обработке, хотя они также могут быть отформованы, если это полимерный материал.

**Электрическое нагревание ICJ (E-ICJ)** Электронагревательная инъекционная обжимная стыковка (E-ICJ) это оригинальная концепция процесса ICJ. С предварительно собранными деталями, он использует электричество для нагрева горячего корпуса, который окружает свободную длину шипа. По истечении времени нагрева ударный поршень, соосный с горячим корпусом, оказывает давление на размягченный / расплавленный полимерный гвоздь и проталкивает его в полости соединяющего партнера, позволяя ему впоследствии остыть под давлением.

Соединения с плоской шляпкой, использующие полость с фаской и резьбой, обеспечивают улучшенные характеристики при эффективном заполнении полости [23].

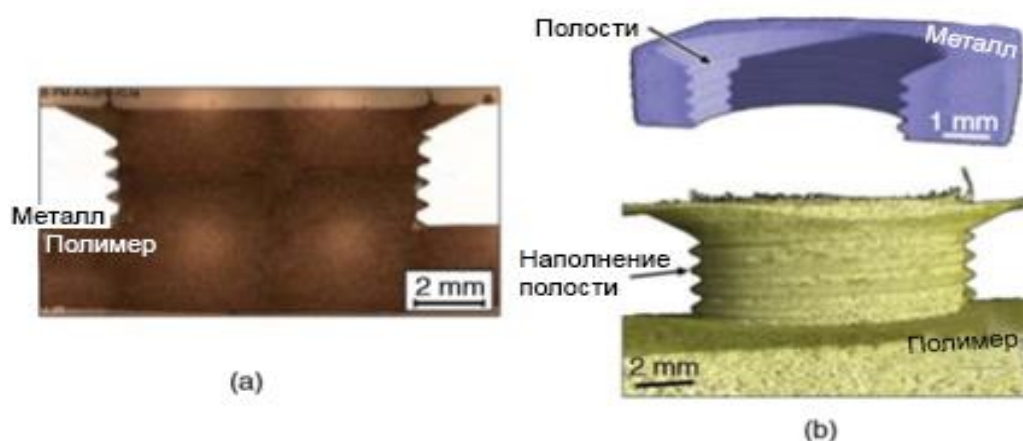


**Рис. 9.4** Принцип соединения нагнетательной клепки: (а) поперечное сечение соединения с использованием полостей в металлическом «партнере» и (b) fiCT изображение обеих частей, показывающее заполнение полости полимером.

Если позволяет применение, можно также увеличить шляпку стяга для дальнейшего улучшения прочности соединения. Текущий опыт работы с E-ICJ показывает, что для эффективного заполнения полости для конструирования термопластов могут потребоваться циклы соединения 1 мин или более [5], поскольку низкая теплопроводность полимера препятствует быстрому общему размягчению гвоздя.

**ICJ на основе трения (F-ICJ)** F-ICJ был разработан как более быстрая альтернатива E-ICJ [6, 24]. Оборудование, используемое для F-ICJ может быть приспособленным сверлильным или фрезерным станком, способным к высоким скоростям вращения и приложению управляемых осевых сил. Вращающийся не расходующийся инструмент генерирует тепло от трения, когда он касается полимерного гвоздя. Это размягчает / расплавляет верхние слои материала, и, поскольку подача инструмента продолжается, непрерывно происходит сжатие, и дальнейшие объемы гвоздя размягчаются / расплавляются. На этапе уплотнения скорость вращения уменьшается до упора, и в течение короткого времени охлаждения используется дополнительное осевое давление. Циклы соединения варьируются от 3 до 20 с в зависимости от объема шипа и профиля полости [24].

Как и в других технологиях укладки, форма инструмента для формовки будет определять окончательную форму стержня (см. Раздел 9.4). Для F-ICJ, форма инструмента



также оказывает влияние на профиль подводимой теплоты вдоль сформированного стержня. Из-за низкой теплопроводности полимеров важно, чтобы инструмент мог нагревать большой объем материала и проталкивать его в окружающие полости. Одним из способов повышения эффективности нагрева является использование инструмента с коническим штифтом, аналогичного тем, которые используются в Точечной сварке (FSW). Хотя более эффективный подвод тепла достигается при помощи инструмента стержня, он образует пустой стержень. Пустой стержень может иметь пониженные механические характеристики, но при правильной конструкции может создать прочные соединения и улучшить соотношение прочности и веса [2, 6]. Поэтому инструмент должен быть спроектирован в соответствии с теплопроводностью материала и геометрией соединения, чтобы достаточное заполнение полости могло компенсировать образование замочной скважины.

### 9.2.3.2 Фрикционная стяжка

Фрикционная стяжка - недавно разработанный процесс, использующий тот же механизм и набор из трех частей, что и процесс фрикционного соединения (FSpJ, смотрите Главу 3) [7,8]. Система и последовательность соединения показаны на Рисунке 9.5.

Штырь и ниппель движутся независимо друг от друга, а зажимное кольцо предотвращает потери на выплавку, выходящей наружу; такие функции позволяют контролировать геометрию шляпки стержня. Фрикционное закрепление может заметно улучшить подвод тепла к стержню, в то же время создавая прочную шляпку стержня, что также делает ее пригодной для конфигураций ICJ использующие полости. Крепкие соединения могут быть созданы даже с помощью небольших плоских шляпок стержня [7].

### 9.2.3.3 Ультразвуковой припуск

Для того чтобы преодолеть проблемы формирования суставов с помощью общего ультразвукового исследования, Brückner et al. [9, 10] разработано ультразвуковое расстройство. В этом методе используется сплошной гвоздь с трубчатым сечением сверху. Инструмент содержит буртик и штырь, причем штырь входит в трубчатую секцию стержня. Ультразвуковая вибрация нагревает и смягчает только выбранный объем внутри трубчатого стержня посредством действия штыря; между тем, буртик оказывает давление на стенки трубчатой стойки, деформируя размягченный полимер. В процессе достигается надежное соединение без риска повреждения соединяемых деталей в циклах 1.5-3.0 с [25].

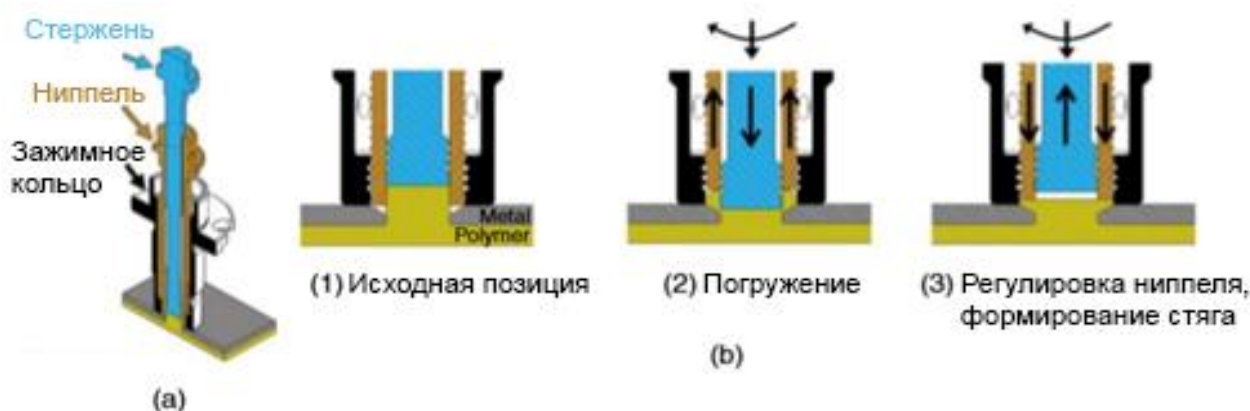


**Рис. 9.5** Фрикционное закрепление: (а) система инструментов и предварительно собранные детали и (б) последовательность соединения.

### 9.2.3.4 Термическая клепка

Традиционные методы укладки возможны с использованием формованных термопластов, армированных прерывистыми волокнами. Новая технология термообжимания [11, 26] создает замки формы, подобные полым стягам со слоистыми композитами. На композите создается выемка, выровненная со сквозным отверстием на металлическом элементе. После фазы нагрева конусообразующий инструмент проталкивает размягченный композит через отверстие, и формовочная матрица формирует материал на другой стороне в виде шляпки стяга. После нагрева цикла соединения продолжаются менее 1 с, но для эффективного уплотнения может потребоваться длительное время охлаждения.

## 9.3 Характеристики стяжных соединений

Формирование стержня в стяг в горячих или холодных условиях будет влиять на соединяемые детали, что может иметь значение для свойств соединения. Ядром эффективного процесса, который обеспечивает прочное соединение, является способность размягчать материал за короткие промежутки времени, не вызывая повреждения или деградации, и иметь возможность достигать желаемой формы стяга после охлаждения. Для этой цели необходимо понимать механизмы, которые возникают во время образования соединений, а также возникающую микроструктуру.

### 9.3.1 Формирование соединения

На рисунке 9.6 схематично показаны явления, которые обычно происходят во время процесса соединения. После нагревания предварительно собранного стержня (фаза 1) он представляет собой размягченный / расплавленный объем выше  $T_g$  или  $T_m$  (темно-серая зона),

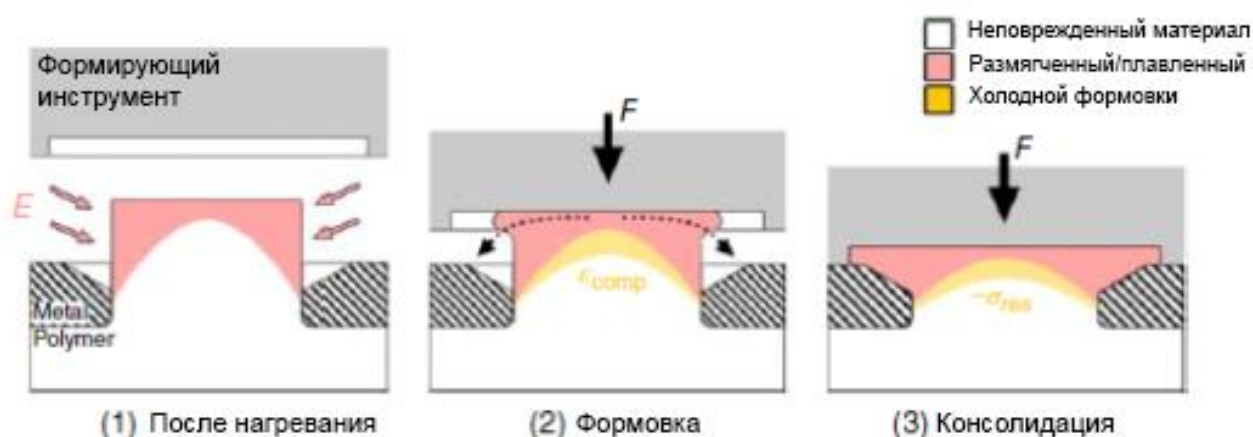


**Рис. 9.6** Стадии образования соединений в процессе горячего соединения.

а также объем, который не был значительно затронут нагреванием (белая область) и все еще тверд. Размер и точная форма размягченного/расплавленного объема зависят от метода нагрева и используемых параметров. Для большинства традиционных методов, таких как НАСС, инфракрасное и лазерное наложение, оно соответствует вогнутой форме, как показано на рисунке 9.6 [2]. Для процессов на основе ультразвука и трения размягченный/расплавленный объем может быть тоньше [15], но обычно наблюдаемые эффекты будут аналогичны описанным здесь.

После этой точки этап формования (фаза 2) выполняется с помощью инструмента для формования, который нажимает на этот размягченный / расплавленный объем, выталкивая его в окружающую среду сжатым потоком, как показано пунктирными стрелками. Форма инструмента будет определять поток материала и окончательную геометрию верхней части стяга. Гидростатическое давление на протекающий объем

передается твердому полимеру, который испытывает определенную степень деформации на сжатие ниже своих температур перехода (светло-серая область). Низкие силы соединения будут применять только упругую деформацию; однако высокие силы могут вызвать пластическую деформацию в этой области. Контроль параметров процесса имеет решающее значение для предотвращения пластической деформации в этом объеме, в этом случае он становится холоднодеформированным объемом с остаточными напряжениями сжатия.

Во время уплотнения (фаза 3) размягченный или расплавленный материал постепенно охлаждается до тех пор, пока он не станет твердым, в то время как остальная часть стяга испытывает снятие напряжения под давлением. В случае холоднодеформированного объема остаточные напряжения от пластической деформации инициируют эффекты восстановления. Это может привести к микротрещинам в полимере и потере силы зажима из-за релаксации. В более экстремальных случаях, когда приложенное усилие слишком велико, могут образоваться трещины внизу стержня, что будет проблематично во время эксплуатации. Эта проблема может возникнуть, когда скорость подачи инструмента значительно выше скорости плавления стержня [15].

Конечная структура соединения имеет большую зависимость от подводимой теплоты при соединении. Подвод тепла имеет обратную корреляцию с вязкостью полимера. Низкий подвод тепла создаст небольшой или недостаточно размягченный, или расплавленный объем, так что не будет получен значительный сжатый поток, и соединения могут быть созданы только посредством холодной штамповки с высокими усилиями соединения. С другой стороны, чрезмерный подвод тепла может привести к чрезмерному снижению вязкости расплава, что может привести к потере материала стяга соединения в виде выплавки наружу или, возможно, к ухудшению характеристик материала. Следовательно, параметры процесса должны быть отрегулированы для получения желаемой структуры, не вызывая дефектов или дополнительных производственных затрат.

Для холодного укладывания размягченная или расплавленная область, описанная на рис. 9.6, не существует, и доля в основном состоит из холодногнутого объема с высокими уровнями остаточных напряжений.

### 9.3.2 Микроструктура

Процесс, заключающийся в горячей стяжке, вызывает микроструктурные изменения в соединяемых деталях, особенно в полимерном «партнере» в результате ввода механической и тепловой энергии. Рис. 9.7(а) схематично показаны микроструктурные зоны в консолидированном соединении, состоящем из зоны термомеханического воздействия (TMAZ), зона термического влияния (HAZ), пластически деформированная зона (PDZ), и незатронутый основной материал (BM). TMAZ, HAZ и BM всегда присутствуют в горячих соединениях, тогда как PDZ наблюдается только тогда, когда осевые силы во время соединения создают пластическую деформацию и локальные остаточные напряжения.

TMAZ представляет собой объем, в котором тепло снижает вязкость, а деформация вызывает поток материала. Молекулярные цепи и подкрепления ориентированы в направлении потока, например, как видно из углеродных волокон на рисунке 9.7(b) для F-ICJ-соединенных PEI-CF.

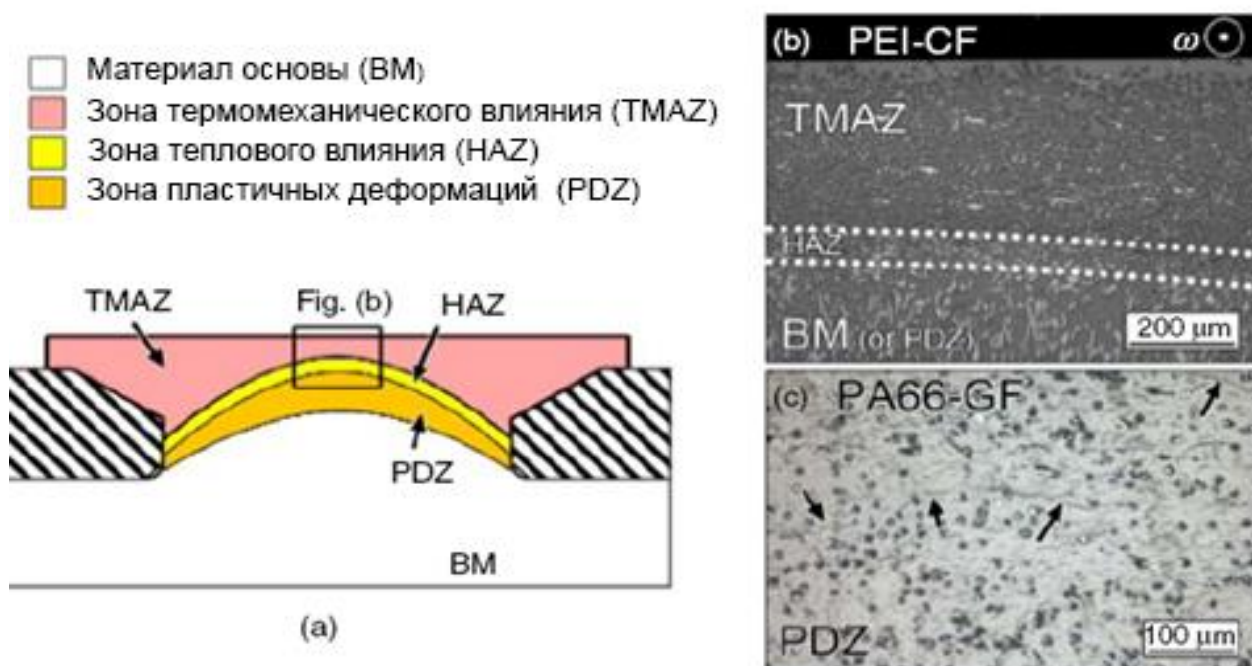


**Рис. 9.7** (а) Микроструктурные зоны соединения стяжкой; (b) пример изображения границ от TMAZ, HAZ, до BM (или PDZ) в соединении F-ICJ композита PEI, армированном углеродным волокном; и (с) пример соединения PDZ в композите E-ICJ, армированном углеродным волокном PA66. Черные стрелки - микротрещины.

В TMAZ, волокна ориентированы в направлении вращения инструмента (⊗, перпендикулярно листу), в то время как в HAZ и BM, они ориентированы в исходном направлении (на этом рисунке вертикально). Этот объем может также содержать дефекты, такие как пустоты и разрыв волокна. В аморфных полимерах микроструктура будет образована замороженным состоянием ориентированных цепей, что может привести к анизотропии свойств. Для полукристаллических полимеров создается рекристаллизованная структура с переориентацией цепи. Новая кристаллическая конфигурация будет зависеть от тепловыделения и режима охлаждения.

HAZ является переходной зоной между TMAZ и BM. Он не страдает от пластической деформации материального потока, но нагревается - все еще ниже  $T_g$  или  $T_m$  - через проводимость от TMAZ. Обычно трудно определить четкие границы HAZ. Вследствие низкой теплопроводности полимеров ожидается, что только тонкий слой материала будет испытывать определенный уровень изменения свойств от тепла, выделяемого TMAZ. Теоретически, свойства в HAZ могут быть изменены через определенные уровни физического износа [27] или структурное удаление воды, но его последствия на глобальном уровне еще предстоит понять.

Выходящий объем полимера может присутствовать при использовании высоких осевых сил, состоящий из PDZ (Рис. 9.7(с)). На макроуровне этот объем часто аналогичен основному материалу, но микротрещины и небольшая степень переориентации арматуры и полимерных цепей могут возникать из-за деформации от гидростатического давления, создаваемого инструментом. Кроме того, пластическая деформация может значительно изменить локальные свойства за счет создания свободного объема в аморфных полимерах и частичного разрушения кристаллитов в полукристаллических материалах [28, 29].

В зависимости от геометрии соединения и конструкции формовочного инструмента, как материал TMAZ проходит, так это он формирует полимер-полимерный раздел со срежнем стяга (Рис. 9.8(а)). Проходящий материал обладает высоким уровнем тепловой энергии, а

контакт между двумя поверхностями приводит к теплообмену между поверхностями. Рис. 9.8(b) показывает раздел для условий ввода низкой температуры соединения F-ICJ, с микроструктурами TMAZ и BM, которые видны по направлению волокна. Наблюдается раздел без тесного контакта между TMAZ и BM, аналогично линии остаточного сварного шва. Рис. 9.8(c) показывает соединение, произведенное с более высоким подводом тепла, где различные ориентации волокон все еще видны; однако, разрыв не наблюдается. В этом случае теплообмен между TMAZ и BM способствует взаимной диффузии полимерных цепей, оставляя бесшовную поверхность [30]. Последнее является наиболее желательным, поскольку промежутки между зонами являются выемками и могут выступать в роли инициаторов трещин и концентраторов напряжений.

На разделе между TMAZ и присоединяющимся «партнером» любые возможные значимые эффекты будут зависеть от характера другой детали. На границе раздела полимер-металл или полимер-керамика значительных термомеханических или термических эффектов не происходит. Может произойти некоторая теплопередача от TMAZ, но обычно ее недостаточно, чтобы изменить микроструктуру конструкционных металлов. Если используется другой полимер, матрица которого совместима с исходным материалом гвоздя, некоторая степень взаимной диффузии может происходить таким же образом, как и заживление линии сварки, показанное на Рисунке 9.8. Для несовместимых или термореактивных смол не ожидается соответствующего эффекта от передачи тепла.

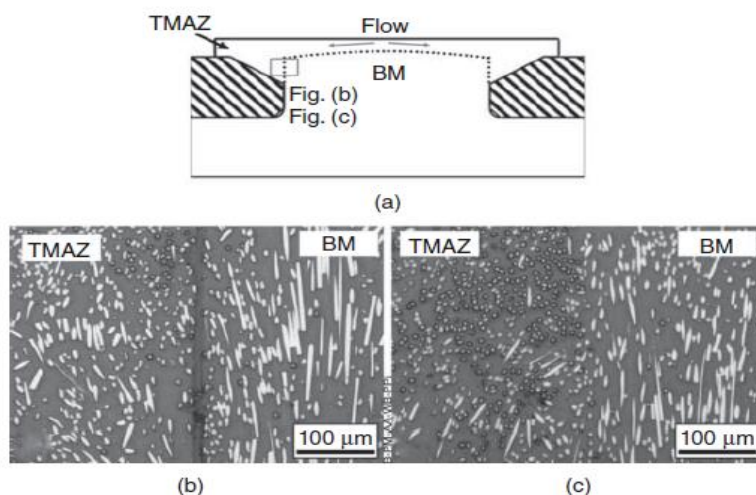


**Рис. 9.8** (a) Формирование полимер-полимерных границ; (b) видимая линия остаточного сварного шва; и (c) крустифицированный раздел.

Хотя в некоторых из этих случаев может присутствовать дополнительная микромеханическая фиксация и адгезия, от таких эффектов не ожидается значительного вклада в механические характеристики на глобальном уровне. Взаимодействие между полимерной частью и другой заготовкой предназначено только для механического воздействия между материалами. Фактически, во многих приложениях с разбивкой используется большой зазор для отверстия, чтобы снизить производственные затраты и не полагаться на какое-либо взаимодействие между соединяющимися частями, кроме механических помех. Это приводит к более слабым соединениям, обычно приемлемым для легких условий эксплуатации.

### 9.3.3 Несовершенства соединений

Несовершенства соединений, выполненных стяжкой, как правило, являются результатом чрезмерного тепловыделения во время обработки. Как правило, объемные дефекты, такие как поры, линии остаточного сварного шва и микротрещины появляются в TMAZ или его границах. Эти недостатки могут действовать как концентраторы напряжений, способствуя зарождению и росту трещин, и увеличивают восприимчивость соединения к химическим агентам. Несмотря на то, что высокий подвод тепла может способствовать заживлению



поверхности раздела полимер-полимер, он также нарушает механическую целостность: пористость, возможное тепловое разложение и потеря материала, поскольку выплавка, выходящая наружу, ухудшает механические характеристики соединения.

Изменения в присоединяющемся «партнере» обычно нежелательны в процессе стяжки. В идеале тепловой поток и эффект формирования воздействуют только на стержень, превращая его в стяг, не затрагивая присоединяющегося «партнера». Однако в некоторых случаях может произойти непреднамеренная передача тепла или деформация. У металлического партнера обычно проводящий перенос тепла от расплавленного полимера не является значительным для микроструктурных изменений, но случайный поток горячего воздуха и лазерные лучи могут создавать HAZs, а неправильная подача ультразвукового или вращающегося инструмента может вызвать термомеханическую работу на его поверхности. В зависимости от металла и степени подачи энергии, небольшие области металла могут испытывать растворение осадка, рост зерна и восстановление или перекристаллизацию. Для керамических материалов случайный нагрев от горячего воздуха или излучения обычно незначителен, но поломка инструмента может привести к ускоренному износу инструмента или локальному повреждению поверхности керамической детали. В случае других полимерных соединительных деталей эти эффекты могут быть более значительными, при этом термомеханическая работа или нагревательные эффекты вызывают те же эффекты, что описаны в разделе 9.3.2 для материала стяжки. Тем не менее, изменения в соединительной части не имеют первостепенного значения для общей производительности соединения, так как отказ в разбитых соединениях происходит в области стяга (см. Раздел 9.5).

### 9.3.4 Описание локальных свойств

Изменения в микроструктуре из-за тепловых и механических воздействий являются результатом локальных изменений свойств материала. Может быть полезно изучить изменения свойств по объему соединения, чтобы понять расширение затронутых зон, причину изменения свойств и сопоставить изменения с глобальным поведением соединения. Например, в полимерных стягах TMAZ и HAZ переориентация цепей, остаточные напряжения, дифференциальная кристалличность и разрушение / кластеризация / переориентация арматуры являются типичными эффектами. Такие микроструктурные изменения можно обнаружить с помощью локальных механических испытаний и физико-химических характеристик.

#### 9.3.4.1 Локальные механические характеристики

Механические свойства в определенной области стяга могут быть оценены с помощью испытаний на микротвердость. Небольшой размер индентора позволяет проводить испытания, чтобы получить изменение свойств вдоль микроструктурных зон и идентифицировать границы раздела полимер-полимер. Подобные исследования помогают выявить глобальное механическое поведение при объединении технологий.

Простой анализ может использовать углубления на верхушке стяга и показать разницу в стоимости по сравнению с основным материалом. Такая конфигурация показана на рисунке 9.9(a) с пятью профилями от верхней части стяга к нижней пластине для полиэфиримида алюминия (PEI) полый стяг соединения F-ICJ. Измеренные значения для линий L1-L3 отображаются на рисунке 9.9(b) по сравнению со средней микротвердостью ВМ. Понятно, что до 2000 рт ниже верхней поверхности, местная сила ниже уровня ВМ. Рис. 9.9(c) отображает контурный график, используя пять профилей из Рисунка 9.9(a); здесь может быть получено более графическое представление границ между микроструктурными зонами. Как объяснено ранее, различие в свойствах может быть связано с микроструктурными изменениями в полимере; в случае аморфных полимеров, таких как PEI, к которым присоединяется F-ICJ, это может быть связано с увеличением свободного объема в результате быстрого охлаждения, переориентацией цепи из-за действия вращения инструмента или частичной термической деградацией. Тем не менее, для каждой комбинации материалов и процесса разбивки следует исследовать новые гипотезы.

Еще более точный анализ может быть выполнен с помощью инструментальной твердости наноиндентирования. Такие испытания занимают больше времени, чем обычная микротвердость; однако, не только разрешение области может быть значительно улучшено, но также может быть получено огромное количество дополнительной информации о местных свойствах. Приведенные кривые нагрузка-глубина дают дополнительную информацию о вязкоупругом поведении анализируемой зоны.

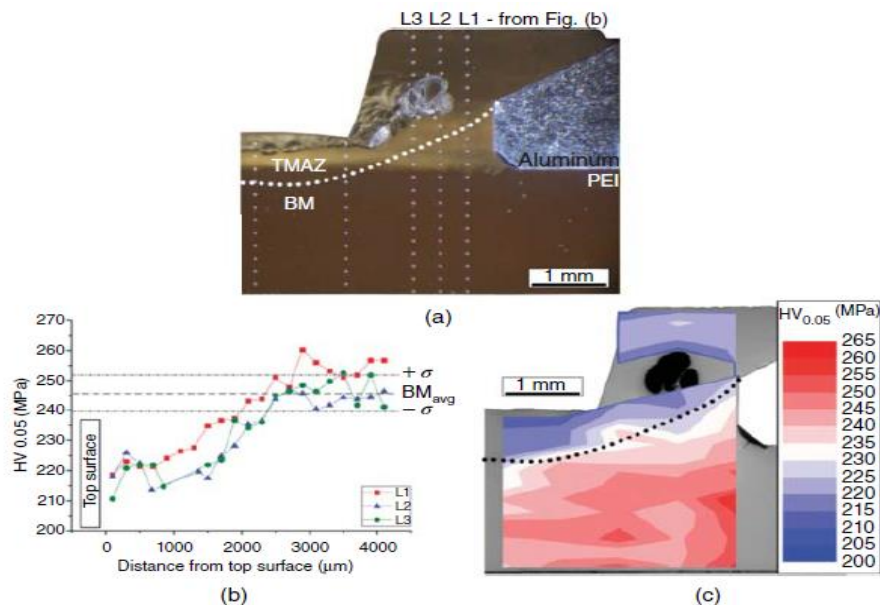


**Рис. 9.9** Локальные механические свойства стыковых соединений: (a) пример профилей вдавливания на полости ПЭ, стереомикроскопическое изображение; (b) микротвердость профилей L1—L3 от (a), в сравнении со свойствами PEI-BM; (c) контурный график пяти профилей из (a), наложенный на изображение светооптической микроскопии. Пунктирные линии в (a) и (c) показывают границу между TMAZ и BM.

### 9.3.4.2 Физикохимические и структурные свойства

Аналитические методы могут помочь исследовать причины изменения свойств микроструктурных зон. Для этих анализов небольшая проба обычно должна быть извлечена из интересующей области. Это можно нарезать с помощью скальпеля или микротомы, или измельчить до мелкого порошка. Во время процесса экстракции важно свести к минимуму любые дополнительные подводы тепла или остаточные напряжения на материале, чтобы не влиять на следующие измерения.

Изменения молекулярной массы в результате деградации могут быть непосредственно измерены с помощью эксклюзионной хроматографии (SEC). Изменения молекулярного состава, плотности и локальных напряжений можно определить с помощью спектроскопии рамановского рассеяния или Фурье-ИК-спектроскопии (FT-IR), по сравнению со спектрами отпечатков пальцев основного материала. На современном оборудовании эти методы в основном неразрушающие, они позволяют анализировать полированные поверхности поперечного сечения и отображать спектры с высоким пространственным разрешением.

Основываясь на моделях запутанных сетей, энергия для активации разложения и тепловых переходов в полимере будет уменьшаться при уменьшении молекулярной массы [29]. Методы, такие как термогравиметрический анализ (TGA) и дифференциальная сканирующая калориметрия (DSC) может помочь оценить локальные изменения, сравнивая тепловые переходы с обычными значениями основного материала. С TGA, изменения в TMAZ стяга можно оценить, сравнив кривые обрабатываемого материала с кривой отпечатка основного материала. Более низкие температуры начала разложения



являются признаком наличия более мелких цепей, что указывает на определенные уровни разложения. Тот же принцип может быть применен к испытаниям DSC, где начало пиков плавления и температуры стеклования смещено к более низким температурам по сравнению с основным материалом, если структурные изменения были значительными. Используя DSC возможно измерить кристалличности в микроструктурной зоне, которая может помочь выяснить местные механические свойства. DSC можно использовать для испытания индукции окисления (OIT), которые оценивают восприимчивость материала к термоокислительной деградации [21]. Обработанный материал с частичной деградацией и, следовательно, большим количеством свободных радикалов будет более подвержен окислению по сравнению с исходным основным материалом.

## **9.4 Проектные решения методом стяжки соединений заклепыванием**

Как и в большинстве процессов выполнения соединений, при их проектировании целесообразно использовать технический подход, основанный на инженерных решениях. Требования к конечному продукту будут определять выбор материалов и, следовательно, процесс стяжки, который наиболее подходит для того или иного материала, что придаст необходимую прочность, необходимую для конструкции. Тем не менее, затраты должны быть учтены для успешного проекта. В этом смысле допуски на размеры оказывают большое влияние как на стоимость, так и на прочность соединения. Слабые допуски экономичны, но дают более слабые стыковые соединения. Хорошо спроектированное многослойное соединение должно быть в состоянии использовать свободные допуски и при этом сохранять плотное соединение, исследуя процесс соединения, поток материала, свойства постобработки, а также сочетание геометрии шпильки, стержня и формующего инструмента.

Выбор материала для того или иного применения может ограничить процесс стяжки, который будет использоваться для сборки. Главным образом это связано с несовместимостью свойств материала и природы механизма теплообмена [15]. Например, прозрачные пластмассы неэффективны для инфракрасного или лазерного крепления, а самосмазывание PTFE и UHMWPE препятствует выделению тепла при трении.

Как сообщает Росейзер [15], некоторые критерии проектирования должны быть определены, чтобы выбрать функциональный процесс разбивки для конкретного приложения. Следует определить тип и уровень нагрузки на сборку как требования к прочности, чтобы можно было определить геометрию соединения и распределение точек разметки. Кроме того, использование поддерживающей поверхности должно быть рассмотрено для сборки в соответствии с прикладными стыковочными силами.

Как только условия критериев проектирования определены, следует выполнить оптимизацию геометрии стяга, чтобы определить уровни нагрузки, которые может выдержать один стяг. На этом этапе определяются геометрия шпилек и сквозных отверстий, а также конструкция формовочного инструмента. Метод конечных элементов (FEM) может быть использован для анализа напряженных областей в результирующей структуре до производства и, при необходимости, для изменения исходного проекта. Для конструкций с малой нагрузкой, в которых стяги не используются для обеспечения существенной нагрузки, критерии проектирования могут быть более гибкими, при необходимости добавляя больше стягов без необходимости критического анализа геометрии и распределения нагрузки.

Механическое поведение соединения будет зависеть от уровней нагрузки и окончательной геометрии стяга. Стержень, сквозное отверстие и геометрия формовочного инструмента являются основными факторами, которые контролируют геометрию стяга и, следовательно, его производительность. Поэтому проектные решения этих факторов требуют особого внимания.

### 9.4.1 Сквозная конструкция

Обработанное отверстие в присоединяющемся «партнере» должно соответствовать критериям проектирования для сборки. Это можно встретить в сочетании с конструкцией стержня и геометрией окончательного шипа. Поскольку расплавленный / размягченный полимер будет прижиматься к его поверхности, партнер по соединению также может быть спроектирован для улучшения характеристик соединения. Сквозные отверстия могут быть простыми, постоянного диаметра, что обычно требует большей верхней части стяга для достижения высокого механического сопротивления. Скошенные отверстия также обычно используются для получения более эстетически приятных, более мелких головок шипа, но их форма также может привести к концентрации напряжений и снижению прочности. Полости внутри отверстия могут быть использованы для улучшения механического крепления [4, 23]. Естественно, любые модификации простого сквозного отверстия увеличивают производственные затраты.

Хотя для металлических компонентов механическая обработка является наиболее очевидным и общеизвестным способом изготовления полостей, для специализированных применений, где допуски и сложные полости имеют первостепенное значение, литье под давлением металла (MIM) является интересной альтернативой. С такой технологией ЛМД можно достичь не только допусков, но и очень сложной и точной геометрии. Тем не менее, этот подход следует рассматривать только для очень специализированных применений, из-за высоких затрат и технологических ноу-хау. Для полимерных деталей сложные геометрические формы могут быть получены посредством процессов формования. Керамические заготовки предпочтительно спекаются в окончательной форме. Аддитивное производство металлических деталей (например, путем селективного лазерного плавления или спекания) может быть выбрано в качестве инструмента быстрого прототипирования. Такие инструменты могут помочь валидировать модели анализа FE напряжений, избегая ненужных дорогостоящих капиталовложений для изготовления литьевых форм MIM деталей.

### 9.4.2 Проектирование стержня

Стержень для пластикового соединения может быть изготовлен несколькими способами, предпочтительно литьем под давлением или компрессионным формованием, но также, возможно, путем обработки толстой пластины или изготовления добавки. Хотя некоторые из этих процессов могут иметь свои преимущества с точки зрения капиталовложений и стоимости деталей, литье под давлением и компрессионное формование являются наиболее экономически эффективными и обеспечивают наилучший контроль допуска, для чего требуются только высокие первоначальные инвестиции в пресс-формы и оборудование. Каждый производственный процесс создает определенную конфигурацию распределения арматуры, которой можно воспользоваться. Например, инжекционный затвор, расположенный на верхней поверхности шипа, будет ориентировать волокна параллельно длине шипа, улучшая прочность на растяжение в этой области в направлении длины стяга.

Литье под давлением имеет проблему следов погружения и отлитых напряжений в заклепке в результате температурных градиентов, но их можно избежать или уменьшить, используя полые штифты или ограничивая диаметр заклепки до 50% толщины пластины, при условии, что соединения все еще соответствуют требованиям прочности [15]. Чтобы обеспечить это соответствие, компенсации объема заклепки - высоты для сплошных заклепок и толщины стенок для полых - могут увеличить прочность соединения, избегая нежелательных пороков развития. Полые заклепки также позволяют снизить силы соединения, равномерный нагрев и более быстрые циклы, не ставя под угрозу прочность соединения [2].

Помимо тем сплошной или полый конструкции и объема заклепки (диаметр и высота), геометрия основания заклепки имеет большое значение для несущей способности при соединении и в процессе эксплуатации [15]. Как правило, следует избегать конструкции, показанной на рис. 9.10 (а), из-за острых углов; округлое основание заклепки является

предпочтительной конструкцией, позволяющей избежать концентрации напряжений. Использование радиуса поверхности (рис. 9.10 (б)) требует соответствующей фаски на нижней поверхности присоединяемого партнера, что увеличивает затраты. Утопленный радиус конструкции (рис. 9.10(с)) не требует никаких изменений в сквозном отверстии, но уменьшение толщины опорной пластины также создает коэффициент интенсивности напряжений для других условий нагружения.



**Рис. 9.10** (а) Конструкция без радиус; (б) конструкция с радиусом поверхности; и (с) конструкция с утопленным радиусом.

### 9.4.3 Проектирование верхней части стяга для формовочного инструмента

Окончательная форма шляпки стяга определяется геометрией сквозного отверстия и формовочного инструмента. Типовые формы верхней части стяга: розетка, купол, полый, заподлицо и с накаткой (рис. 9.11). Для улучшения прочности соединений наложением, как правило, опора формируется большой верхней частью стяга, при этом стержни «розетка» и «купол» являются простейшими конструкциями с более высокой прочностью. Преимущество «розеток» состоит в низких усилиях формования и хорошей прочности соединения, но есть проблемы с выравниванием и износом наконечника инструмента. Купольные шипы образуют большие шляпки, что обеспечивает меньшие допуски при формовании и снижает износ инструмента по сравнению с типом «розетка». Полые стяги требуют низких усилий формования и используются для формованных деталей, которые требуют больших диаметров, сохраняя хорошую прочность. В этом случае толщина стенки является важным фактором, который следует учитывать в зависимости от типа и уровня нагрузки, которую необходимо выдержать. Шляпка с накаткой обладает гибкостью выравнивания и внешнего вида, а также средней прочностью, подходит для применения в легких условиях. Конфигурация промывки имеет хороший внешний вид, но шляпка меньшего размера может иметь меньшую прочность, если не оптимизировать параметры. Другие особенности этих геометрий шляпки стяга были более подробно описаны в [15, 31].

Геометрия стрежня перед формовкой и финальной стяжкой, а также полая форма являются основными составляющими механических характеристик для сборок стяжкой. FEM может использоваться для прогнозирования поведения конструкции в процессе эксплуатации и наблюдения за различными несущими механизмами в зависимости от формы стяга. Чен и Ву [32] использовали FEM, чтобы смоделировать испытания на выдвижение шляпки стяга из полиметилметакрилата (PMMA), используя сквозное отверстие без полостей. Задача состояла в том, чтобы исследовать соотношение высоты к радиусу шляпки стяга, что позволило бы избежать повреждения шляпки, при котором происходит изгиб на стержне внутри отверстия. В их исследовании такое состояние возникало бы с отношением 0,625, так что соединению потребовался бы определенный объема шляпки стяга, чтобы сместить концентрацию напряжений от шляпки к стержню.



**Рис. 9.11** Геометрии шляпки стяга.

Если для применения требуются шляпки стяга меньшего размера, то это можно сделать, улучшив конструкцию за счет использования внутренних полостей на партнере или зазоров в тонких отверстиях.

Опора на механическое закрепление во внутренних полостях является стратегией, которая еще недостаточно изучена в технологии выполнения стяжек, но недавние исследования показали, что может быть значительно выгодна для соединений стяжкой [5, 23]. Обычным средством повышения прочности является увеличение объема шляпки стяга, что является успешным методом. Комбинация регулируемого размера шляпки стяга и спроектированных полостей для механического крепления может повысить общую производительность соединений стяжкой. Такая конструкция может быть достигнута путем понимания поведения материала во время обработки (см. Раздел 9.3.1), используя преимущества материального потока и свойства различных микроструктурных зон. На рис. 9.12 показан пример различных конфигураций соединений, объединяющих эти два фактора и их механическое поведение при нагрузке на сдвиг внахлестку.

На рис. 9.12 показаны три соединения внахлестку с одинаковыми видами разрушения, но с разными характеристиками и микроструктурой. На рис. 9.12 (а) показана шляпка стяга без заполнения полости, низкой прочности. На рис. 9.12 (b) показано соединение с частичным заполнением полости и плоской шляпкой стяга (аналогично геометрии с накаткой на рисунке 9.11), демонстрирующее улучшенную прочность. Соединение на рис. 9.12 (c), имеет небольшую плоскую небольшую заполненную шляпку, как на рис. 9.12 (a), но с полным заполнением полости и достижением высокой прочности.

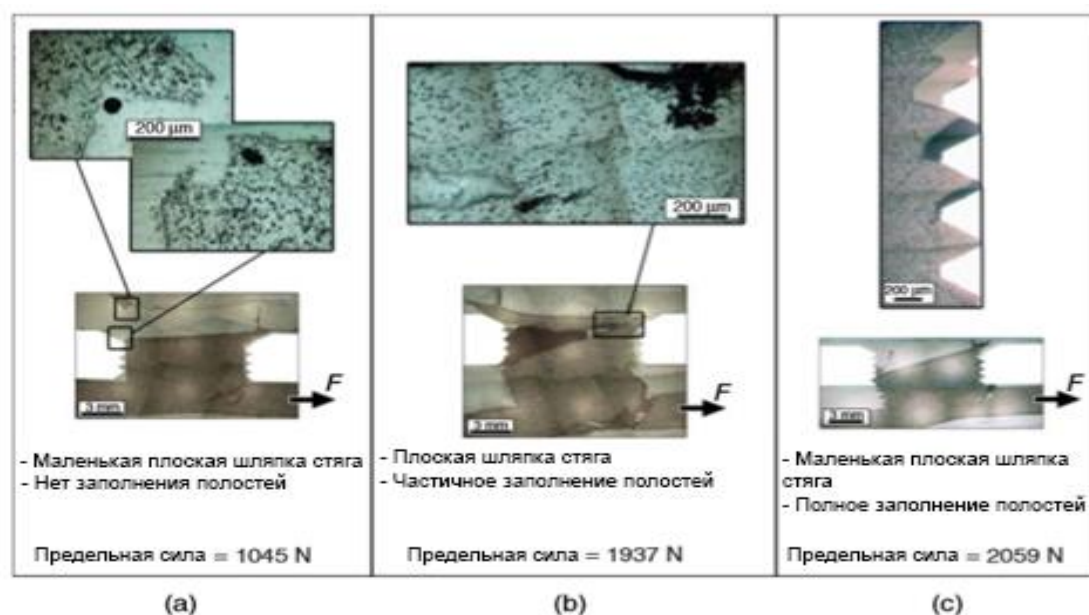


**Рис. 9.12** Конфигурации соединений с разбивкой и механическое поведение: (а) маленькая шляпка и без заполнения полости; (b) большая шляпка стяга и частичное заполнение полости; а также (с) небольшая шляпка стяга и полное заполнение полости. (Источник: Abibe 2011 [33]. Воспроизводится с разрешения UFSCar.)

Стяг с большой шляпкой, показанный на рис. 9.12 (b), более крепкий, чем на рис. 9.12 (a) за счет хода распространения трещины, показанного в деталях. Соединение, показанное на рис. 9.12 (c), имеет более высокую прочность в результате полного заполнения полости. Следовательно, при проектировании конфигурации соединения становится очевидным, что прочность соединения может быть улучшена как геометрией шляпки, так и заполнением полости [23, 33].

## 9.5 Механические свойства стяжки заклепыванием

Соединения, такие как кольцевые соединения, имеют те же цели, что и крепежные соединения, но используются в качестве экономических альтернатив в тех случаях, когда требуется экономия веса и затрат, а также уровни нагрузки, которые можно переносить кольями. Механические испытания стыковых соединений не имеют специальных стандартов международных организаций. Наиболее частые испытания, показанные в исследовательских работах, - испытания на сдвиг и сдвиг [7, 9, 20, 21, 23, 24, 32, 34]. В основном оба испытания соединения внахлестку и поперечные растяжения выполняются с использованием специальных приспособлений и геометрии для испытаний. В некоторых работах использовались стандартизированные испытания [7, 21, 24, 34], с последующим испытанием на растяжение ISO 14272 [35] (первоначально для контактной сварки металлов) и последующего испытания на сдвиг ASTM D5961 [36] (первоначально для подшипниковых соединений). Хотя эти стандарты идеализированы для других технологий соединения, они часто адаптировались для других типов процессов соединения [21, 32, 37-40]. Понимание механического поведения в этих конфигурациях полезно для улучшения конструкции соединения. Рис. 9.13 изображает силы, действующие на кольцевые соединения в соединениях внахлестку и конфигурациях поперечного растяжения. Они показаны для плоского полого шипа в соединении металл-полимер, но могут использоваться для дальнейшего понимания геометрии других колец и комбинаций материалов.

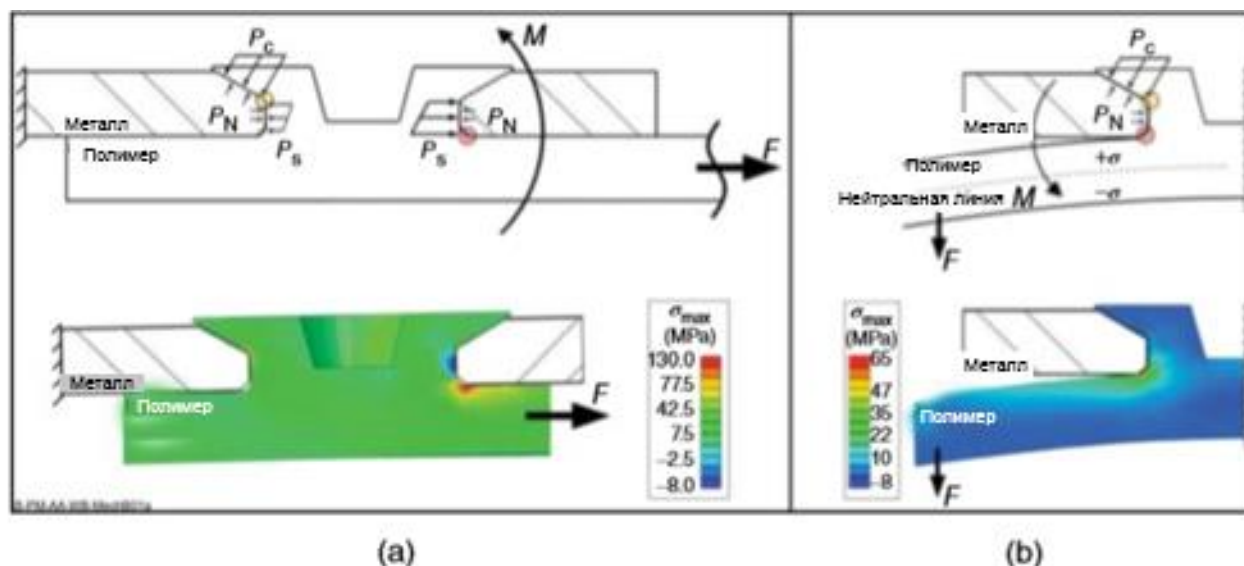


**Рис. 9.13** (а) Силы, действующие на нагрузку при соединении внахлестку, и концентрации напряжений, проанализированные с помощью FEM и (б) силы, действующие при поперечном растягивающем нагружении и концентрации напряжений, анализируемые через FEM. Темно-серые и светло-серые кружки указывают преимущественные точки зарождения трещины в каждом случае.

Рис. 9.13(а) изображает силы, действующие на нагрузку при соединении внахлестку полого шва, и максимальные главные напряжения, возникающие в результате испытания FEM. Сочетание контактных давлений стяга на стенах  $p_s$  приводит к эксцентриситету, который вызывает изгибающий момент  $M$ , ответственный за вторичный изгиб в таких случаях [41]. Эти силы в сочетании с контактным давлением на фаску  $p_s$  давление реакции  $p_N$  давая концентрации напряжений на основе кола (темно-серый диск) и шляпка стяга (светло-серый диск). Эти регионы также видны в модели FEM. Внеплановое смещение, возникающее в результате вторичного изгиба, вызывает вращение шипа и, следовательно, играет большую роль в поведении отказа. Как правило, максимальная сила испытания соединения внахлестку возникает до того, как трещина в шляпке стяга (оранжевый диск) достигает критического размера; после этого сила концентрируется на трещине основания кола (красный диск), что приводит к вытаскиванию кола или отказу вторичного изгиба. Соединения пластичных полимеров обычно разрушаются при медленном разрушении заклепки. Хрупкие материалы разбить на базовой пластине в результате вторичного изгиба. Для получения дополнительной информации о механическом поведении разбитых соединений при нагрузке соединения внахлестку [23].

В испытаниях на растяжение, одна из пластин фиксируется, а другая пластина смещается, таким образом передавая нагрузки на точечное соединение образца. Рис. 9.13(б) показывает силы, действующие на соединение при поперечном растягивающем нагружении, и концентрацию напряжений в полимерной части. Натяжение опорной плиты вниз вызывает изгибающий момент  $M$  и стержневое давление на фаску  $p_s$ , и реакционные давления  $p_N$ . Изгибающий момент также создает растяжение (+□) и сжимающие (-□) напряжения на основной пластине. Как видно из анализа МКЭ, напряжения в основном сосредоточены на базовую пластину (красный диск), что приводит к отказу от изгиба базовой пластины без повреждения шляпки стяга. Тем не менее, в реальных соединениях часто наблюдается сбой при вытягивании шляпки из-за объемных дефектов и разрывов на TMAZ кола [21,24]. Модель FEM принимающая во внимание эти аспекты, вероятно, покажет более высокие напряжения в положении шляпки стяга (оранжевый диск).

Более крупные многоточечные сборки могут испытывать гораздо более сложные стрессовые состояния, но одиночное тестирование на уровне купона помогает понять режимы отказов и возможные проблемы концентрации напряжений. Анализ, приведенный на рис. 9.13, показывает, что при увеличении размера шляпки стяга повышается прочность за счет уменьшения  $p_s$  (большая площадь); внутренние полости с механическим креплением препятствуют эффекту изгибающего момента  $M$  в соединениях внахлестку и снижают  $p_s$  в растягивающих соединениях за счет увеличения площади контакта.



## 9.6 Заключительные замечания

Технологии стяжки заклепыванием были изначально разработаны для легких нагрузок, и их возможности были изучены в рамках этой структуры. Более поздняя разработка с передовыми методами крепления, такими как ICJ, оценка трения, ультразвуковое расслоение и термоклининг дают новый взгляд на этот сценарий. В этой главе основное внимание было уделено описанию неисследованных материаловедческих и технических аспектов технологий крепления. Особенности формирования соединения и проектирования полезны для инженеров, чтобы адаптировать процесс в соответствии с применением и предельными затратами на продукт или проект.

### Список сокращений

|                 |                                                 |
|-----------------|-------------------------------------------------|
| BM              | основной материал                               |
| CFD             | вычислительная гидрогазодинамика                |
| DSC             | дифференциальная сканирующая калориметрия       |
| E-ICJ           | электрическое нагнетательное соединение клепкой |
| F-ICJ           | фрикционное нагнетательное соединение клепкой   |
| МКЭ             | метод конечного элемента                        |
| FSW             | точечная фрикционная сварка                     |
| FT-IR           | Фурье-ИК-спектроскопия                          |
| HASC            | Холодная стяжка горячим потоком                 |
| ЗТВ             | зона термического влияния                       |
| ICJ             | Нагнетательное соединение клепкой               |
| MIM             | литье под давлением металла                     |
| OIT             | время индукции окисления                        |
| PA66            | полиамид 66                                     |
| PDZ             | пластически деформированная зона                |
| PEI             | полиэфиримид                                    |
| PMMA            | полиметилметакрилат                             |
| PP              | полипропилен                                    |
| PTFE            | политетрафторэтилен                             |
| SEC             | эксклюзионная хроматография                     |
| T <sub>gg</sub> | температура стеклования                         |
| TGA             | термогравиметрический анализ                    |
| T <sub>m</sub>  | температура плавления кристаллов                |
| TMAZ            | зона термомеханического воздействия             |
| UHMWPE          | полиэтилен сверхвысокой молекулярной массы      |

## Литература

- 1 Messler, R.W. (2006) Integral Mechanical Attachment: A Resurgence of the Oldest Method of Joining, Butterworth Heinemann.
- 2 Eagles, D.W. (2000) Plastic hot air stake assembly. *Assembly Autom.*, 20 (3), 205–214.
- 3 2011 Technical Solution Presentation. HTE Engineering Services Limited.
- 4 Traglia Amancio Filho, S., Dos Santos, J.F., and Beyer, M., inventors; GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, assignee (2007) Verfahren und Vorrichtung zum Verbinden eines Kunststoff-Werkstücks mit einem weiteren Werkstück. 18.10.2007.
- 5 Abibe, A.B., Amancio-Filho, S.T., Dos Santos, J.F., and Hage, E. (2011) Development and analysis of a New joining method for polymer–mcoавтор hybrid structures. *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 24 (2), 233–249.
- 6 Abibe, A.B., Amancio-Filho, S.T., Sfnego, M., and Dos Santos, J.F., inventors; assignee. (2014) A method for joining a plastic workpiece to a further workpiece.
- 7 Abibe, A.B., Dos Santos, J.F., and Amancio-Filho, S.T. (2014) Friction staking: a novel staking joining method for hybrid structures. SPE ANTEC 2014, April 28–30, 2014, Society of Plastics Engineers, Las Vegas, NV.



- 8 Amancio-Filho, S.T., Abibe, A.B., and Dos Santos, J.F., inventors; Helmholtz-Zentrum Geesthacht Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH, assignee (2013) Method for connecting a plastic workpiece to a further workpiece. US Patent 8,518,198 B2. 27.08.2013.
- 9 Brückner, E., Friedrich, S., and Gehde, M. (2015) Ultrasonic upsetting: a new method of ultrasonic staking to join hybrid material combinations. SPE ANTEC 2015 March 23–25, 2015, Society of Plastics Engineers, Orlando, USA.
- 10 Brückner, E., Friedrich, S., Gehde, M. et al. (2013) Material and process influences during the riveting of technical plastics. *Joining Plastics – Fügen von Kunststoffen*, 2, 98–103.
- 11 Gude, M., Hufenbach, W., Vogel, C. et al. (2014) Thermoclinching—a novel joining process for lightweight structures in multi-material design. *Compos. Theor. Pract.*, 14 (3), 128–133.
- 12 (2012) Future of safety. PHASA.
- 13 (2012) Exterior automotive plastic assembly. PHASA.
- 14 Leaversuch, R.D. (2003) Plastic–mcoавtop Hybrids Make Headway On and Off the Road *Plastics Technology*.
- 15 Rotheiser, J. (1999) *Joining of Plastics: Handbook for Designers and Engineers*, Carl Hanser Verlag, Munich.
- 16 Amancio-Filho, S.T., Abibe, A.B., and Dos Santos, J.F. (2012) Joining: mechanical fastening of polymers, composites, and polymer–mcoавtop hybrid structures, in *Wiley Encyclopedia of Composites* (eds L. Nicolais and A. Borzacchiello), John Wiley & Sons, Inc.
- 17 Grewell, D.A. (2003) in *Plastics and Composites Welding Handbook* (eds D.A. Grewell, A. Benatar, and J.B. Park), Munich, Carl Hanser Verlag, 271–312.
- 18 Brunnecker, F., Geiger, R., and Pump, C. (2010) Riveting with light. *Kunststoffe International*, 10, 141–144.
- 19 Lanser, M., Miller, R., and Van Klompenberg, A., inventors; assignee (2001) Heat staking head with radiant heat source. US Patent 6,296,470 B1. 02.10.2001.
- 20 Beute, S. and Reed, B. (2008) Staking Plastic with Infrared Light, Extol, Inc.
- 21 Hahn, O. and Finkeldey, C. (2004) *Warmluftnieten von langglasfaserverstärkten Thermoplasten mit beschichteten mcoавtopischen Werkstoffen*, vol. 63, Aachen, Shaker Verlag.
- 22 Sprovieri, J. (2005) Quality at stake. *Assembly*.
- 23 Abibe, A.B., Amancio-Filho, S.T., dos Santos, J.F., and Hage, E. (2013) Mechanical and failure behaviour of hybrid polymer–mcoавtop staked joints. *Mater. Des.*, 46, 338–347.
- 24 Amancio-Filho, S.T., Abibe, A.B., and Dos Santos, J.F. (2013) Welding and joining of composites and composite-mcoавtop structures by frictional heating.
- 19 Nationalen SAMPE Deutschland Symposium, Schulte, K., TuTech Verlag: Hamburg.
- 25 Brückner, E., Friedrich, S., Gehde, M. et al. (2015) Ultrasonic upsetting – innovative process strategy to join hybrid material combinations. *Joining Plast - Fügen von Kunststoffen*, 9 (1), 40–47.
- 26 Gude, M., Hufenbach, W., Kupfer, R. et al. (2015) Development of novel form-locked joints for textile reinforced thermoplastics and mcoавtoplic components. *J. Mater. Process. Technol.*, 216, 140–145.
- 27 Amancio-Filho, S.T. (2007) Friction Riveting: development and analysis of a new joining technique for polymer–mcoавtop multi-materials structures. PhD dissertation. Technische Universität Hamburg-Harburg. Available from: Technische Universität Hamburg-Harburg.
- 28 Baltó Calleja, F.J. and Fakirov, S. (2007) *Microhardness of Polymers*, Cambridge University Press, New York.
- 29 Brown, N. (1986) in *Failure of Plastics* (eds W. Brostow and R.D. Corneliussen), Carl Hanser Verlag, Munich, 98–118.
- 30 Wool, R.P., Yuan, B.-L., and McGarel, O.J. (1989) Welding of polymer interfaces. *Polym. Eng. Sci.*, 29 (19), 1340–1367.
- 31 Potente, H. (2004) in *Fügen von Kunststoffen: Grundlagen, Verfahren, Anwendung* (ed. H. Potente), Carl Hanser Verlag, Munich.
- 32 Chen, C.-J. and Wu, C.-Y. (2012) Finite element analysis of solid stud staking design. SPE ANTEC 2012, Orlando, USA, April 2–4, 2012 : Society of Plastics Engineers.
- 33 Abibe, A.B. (2011) Desenvolvimento de união de multimateriais através de “Rebitagem por Injeção” (Injection Clinching Joining). MSc thesis. São Carlos: UFSCar. Available from: UFSCar.
- 34 Hahn, O. and Finkeldey, C. (2003) Ultrasonic riveting and hot-air-sticking of fiber-reinforced thermoplastics. *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 16 (6), 521–528.

- 35 DIN EN ISO 14272 (2002) Probenmaße und Verfahren für die Kopfzugprüfung an Widerstandspunkt- und Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln. Brussels: Deutsches Institut für Normung e.V.
- 36 (2010) D5961-10: Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 37 Mazzaferro, J.A.E., Rosendo, T.D.S., Mazzaferro, C.C.P. et al. (2009) Preliminary study on the mechanical behavior of friction spot welds. *Soldagem Inspeção*, 14, 238–247.
- 38 Алтмейер, J., dos Santos, J.F., and Amancio-Filho, S.T. (2014) Effect of the friction riveting process parameters on the joint formation and performance of Ti alloy/short-fibre reinforced polyether ether ketone joints. *Mater Des.*, 60, 164–176.
- 39 Blaga, L., Bancilă, R., dos Santos, J.F., and Amancio-Filho, S.T. (2013) Friction Riveting of glass-fibre-reinforced polyetherimide composite and titanium grade 2 hybrid joints. *Mater. Des.*, 50, 825–829.
- 40 Hippmann, S., Hein, C., and Hoffmann, H. (2008) Correlation between the adhesive tensile strength and the engagement grade of crosswise oriented nonwovens of mcoавтор hook and loop fasteners. *Prod. Eng.*, 2 (4), 395–400.
- 41 Ekh, J. (2006) Multi-fastener single-lap joints in composite structures. PhD dissertation. Stockholm: Royal Institute of Technology. Available from: Royal Institute of Technology.

## **Часть III**

### **Процессы соединения на основе методов прямой сборки**

## 10 Многослойное литье металлополимерных гибридных конструкций под давлением

Mica Grujicic

Кафедра машиностроения, Клемсонский университет, Клемсон, США

### 10.1 Основы металлополимерной гибридной технологии

В традиционной автомобильной производственной практике выбор обычно должен быть сделан между использованием металлов и пластмасс для различных структурных и неструктурных применений. Эта парадигма постепенно смещается с введением металлополимерных гибридных (РМН) конструкций, при которой металлы и полимеры объединены в единый компонент или узел. Основная мотивация, выходящая за пределы внедрения РМН технологии в автомобильную производственную практику, состоит в том, чтобы через применение системного подхода, объединить различные требования нескольких смежных компонентов в единый компонент или сборный узел (обычно состоящий из сердечника для штамповки металла и пластикового литьевого покрытия, содержащего несколько ребер) для того, чтобы предоставить клиентское решение или функцию [1-10]. Когда интеграция металлов и полимеров в единый компонент или сборный узел выполнена успешно, получаются большие преимущества на уровне системы по сравнению с теми, которые достигаются посредством простого слияния или соединения соседних частей. На самом деле, несколько запатентованных технологий проектирования или изготовления РМН уже доказали свою способность дать возможность производителям оригинального оборудования (OEMs) и поставщикам применения гибких стратегий сборки, снижения капитальных затрат и сокращения рабочей силы, необходимой для производства автомобиля.

Пример несущего компонента автомобильного РМН непокрашенного кузова (BIW) изображен на Рис. 10.1(a) и (b). Компонент, о котором идет речь, обычно называется «задней продольной балкой», который соединяется по переднему краю с порогом, в центре - с башней амортизатора, и по заднему краю - с задней поперечной балкой. Традиционный полностью стальная конструкция этого компонента показан на рис. 10.1(a) и включает в себя три подкомпонента: (1) основной U-образную швеллерную балку; (2) лист усиления; и (3) крышку. Последние два подкомпонента точно приварены к первому.

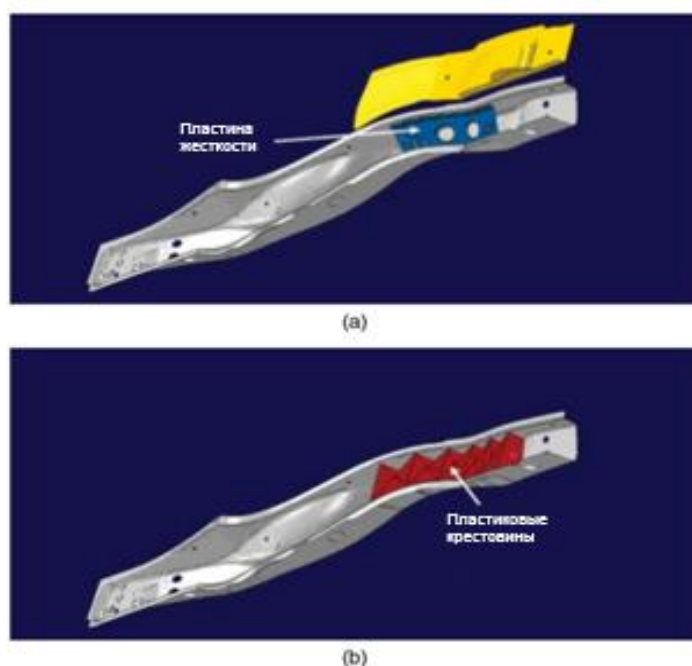


**Рис. 10.1** Пример: (a) цельнометаллический и (b) металлополимерный гибридный (РМН) несущий автомобильный компонент.

Следует отметить, что защитная пластина слегка смещена на рис. 10.1 (а), чтобы выявить расположение армирующей пластины. Представление РМН того же компонента изображено на рисунке 10.1(б). Усилительная пластина была заменена литой термопластичной ребристой подложкой, а толщина защитной пластины (не показана на рисунке) 10.1(б) для точности) уменьшается.

Основная концепция, используемая во всех технологиях РМН, показана на рис. 10.2(а) и (б). Тонкостенный листовый элемент с открытыми каналами может легко прогнуться при сжимающей нагрузке, Рис. 10.2(а). С очень небольшой боковой поддержкой, обеспеченной тонкой стенкой с ребристым пластиковым субкомпонентом, Рис. 10.2(б), сопротивление изгибу (и жесткость) компонента может быть значительно увеличено (в то время как сопутствующее увеличение веса относительно мала).

Среди многих технических и экономических выгод, связанных с использованием технологий РМН, наиболее важными являются следующие: (1) сокращение количества компонентов; (2) производство интегрированных компонентов, готовых к сборке; (3) снижение веса по сравнению с традиционными цельнометаллическими решениями; (4) дополнительная свобода дизайна и стиля;

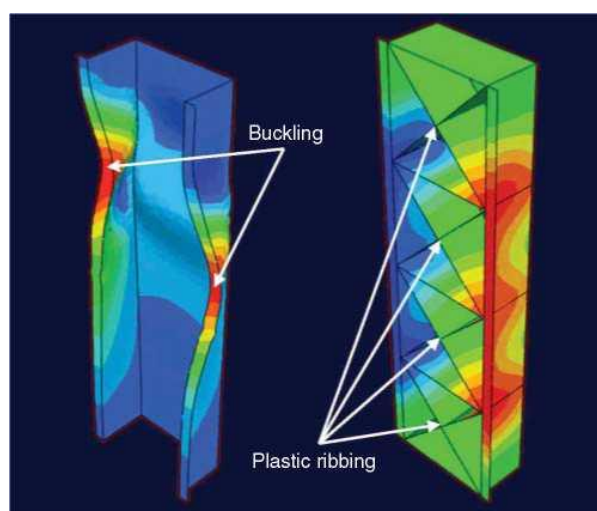


**Рис. 10.2** Основная концепция, используемая в технологиях РМН. Изгиб в цельнометаллическом компоненте с открытым каналом в (а) был предотвращен ребристой пластмассовой основой в (б), которая обеспечивает необходимую боковую опору.

(5) изготовление элементов в форме, таких как кронштейны, выступы и точки крепления; (6) повышение безопасности из-за пониженного центра тяжести транспортного средства; (7) значительное (в несколько раз) увеличение прочности на изгиб штампованных металлических профилей. Этот эффект хорошо понятен и относится к пластиковому субкомпоненту, который заставляет металл сохранять свои свойства поперечного сечения в течение всего цикла загрузки и задерживает начало разрушения из-за локализованного выпучивания; и (8) улучшенное демпфирование в акустическом диапазоне (по сравнению с их полностью стальными аналогами, часто на четыре раза ниже, чем начальное значение в децибелах, измеренное в простом испытании на удар молотком).

Первый публично зарегистрированный случай введения технологии РМН в автомобильной производственной практике является РМН передняя часть Ауди А6 [11]. Этот компонент был произведен Esia, Audincourt, Франция, путем литья под давлением штамповки из листового металла с крестообразной структурой из полиамида, модифицированного эластомером PA6-GF30 (тип: Durethan BKV 130 от Bayer). Посредством непосредственного механического испытания передней части РМН было продемонстрировано, что два составляющих материала (то есть металл и пластик) действуют синергетически, придавая механические характеристики компоненту РМН, который сам по себе не обнаружен ни в одном из двух материалов.

В последние несколько лет наблюдается тенденция к замене цельностальных конструкций в автомобильных интерфейсных модулях на РМН аналоги.

Помимо их использования в автомобильных передних частях, РМН конструкций находят все более широкое применение в других автомобильных (например, поперечинах приборной панели и бампера, дверных модулях, задних дверях и т. д.) и неавтомобильных (например, корпусах приборов, рамах велосипеда и т. д.) приложениях. В дополнение к более широкому использованию структур РМН в автомобильных и неавтомобильных применениях, новые технологии РМН разрабатываются как альтернативы классическому методу формования, впервые установленному Bayer/Ecia [11,12].

## **10.2 Классификация РМН технологий**

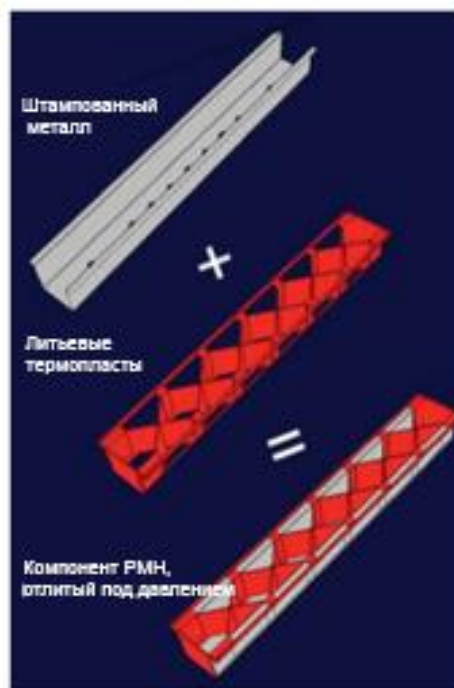
Изучение всех технологий РМН, применяемых в настоящее время в автомобильной и неавтомобильной промышленности, позволяет определить четыре основные категории: (1) технологии литья под давлением; (2) технологии формовки металла в сочетании с операциями вторичного соединения; (3) технологии РМН, включающие клеевое соединение; и (4) технологии РМН с прямой адгезией. Каждая из этих категорий технологий РМН кратко описана далее.

### **10.2.1 Многослойное литье РМН технологий под давлением**

Этот процесс был первоначально введен и запатентован Bayer [12]. Процесс включает в себя следующие этапы: (1) заготовки из листового металла штампуются для получения желаемого (обычно, U) формы металлических вставок; (2) расширяющиеся сквозные отверстия пробиваются в металлические вставки; (3) вставки затем помещаются в литевную матрицу; и (4) литье под давлением используется для переформования металлических вставок с интегрированной структурой с поперечными ребрами, выполненными из 30% короткого заполненного стекловолокном полиамида (то есть нейлона-6). В этом процессе плотное сцепление между металлической вставкой и заполненной короткими волокнами нейлоновой поперечно-ребристой структурой и достижение превосходного сочетания жесткости компонента РМН и сопротивления изгибу достигается посредством: (1) формирования заклепок из расплавленного нейлона, который проник сквозь сквозные отверстия вставки; и (2) формование U-образных вставных фланцев. Твердая модель упрощенного компонента РМН (состоящего из формованного нейлона с перекрестными ребрами и U-образной штамповки металла), полученного литьем под давлением, показана на рисунке 10.3.

В более ранних версиях этой технологии РМН, формованная структура с поперечными ребрами была ограничена (вытеснена) двумерной геометрией из-за того факта, что пресс для литья под давлением обычно открывается только в одном направлении. В более поздних версиях этой технологии РМН было добавлено боковое движение инструмента, что позволило изготавливать разнонаправленные ребристые конструкции. Было обнаружено, что эти модификации в армирующей нейлоновой структуре с поперечными ребрами значительно улучшают несущую способность компонента РМН относительно его U-образного аналога для штамповки из стали.

**Рис. 10.3** Разобранные и интегрированные виды прототипного инжекционно-формованного (упрощенного) несущего автомобильного компонента РМН «неокрашенного кузова» (BIW).



### 10.2.2 Металлоформование РМН технологий

Эта технология РМН была первоначально разработана и запатентована Rhodia [13] и используется под давлением для изготовления нейлоновой конструкции с перекрестными ребрами; и (3) наконец, во вторичной операции штамповка металла с покрытием и конструкция из нейлона с поперечными ребрами соединяются с помощью ультразвуковой сварки. Основные преимущества этой технологии РМН заключаются в следующем: (1) возможность изготовления компонентов РМН с закрытым сечением, которые из-за непрерывного характера линий соединения металл - полимер проявляют высокую несущую способность; и (2) обеспечение функциональной интеграции, такой как кабельные корпуса и воздушные или водяные каналы, благодаря полному сердечнику структуры РМН. В более поздней версии этой технологии РМН используется литье под давлением газа или воды, чтобы получить более жесткое, более тонкое покрытие для повышения несущей способности и повышенной функциональной интеграции.

Другим недорогим вариантом этой технологии является так называемый процесс сборки пластмассы и металла, также разработанный и запатентованный компанией Rhodia [14]. Процесс состоит из трех основных этапов: (1) на первом этапе отдельно изготавливают штамповку из U-образной стали с перфорированными отверстиями и литой нейлоновой компонент, который содержит колонны или тепловые стержни, которые могут фиксироваться в штамповочных отверстиях; (2) затем два подкомпонента приводятся в контакт, обеспечивая при этом проникновение нейлоновых колонн в штампованные отверстия; и (2) наконец, два подкомпонента соединяются с помощью ультразвуковой сварки или термообработки, чтобы сформировать фиксирующие заклепки на концах пластиковых колонн.

### 10.2.3 Адгезионное связывание металлополимерных гибридных конструкций

Этот тип РМН технологии разработан и запатентован компанией Dow Automotive [15] и представлен в 2003 году в виде прототипа внешнего модуля Volkswagen. Процесс включает в себя три основных этапа: (1) отдельное изготовление металлической штамповки и литевой конструкции с поперечными ребрами, изготовленной из полипропилена с коротким стекловолокном; (2) применение запатентованного



низкоэнергетического поверхностного клея (LESA) Dow's к подкомпонентам, соединяемым с помощью высокоскоростных роботов; и (3) отверждение полученного клеевого соединения. Часто, чтобы помочь выровнять субкомпоненты во время отверждения клея, в подкомпоненты встроены защелкивающиеся элементы.

Основные дополнительные преимущества этой технологии РМН заключаются в следующем: акрилово-эпоксидный клей LESA не требует очистки или других видов предварительной обработки полипропилена с низкой поверхностной энергией; (2) клеевое соединение создает непрерывные линии связи, минимизирует концентрации напряжений и действует как механический буфер, который поглощает и делокализует контактные напряжения между металлическими и полимерными компонентами; (3) приклеенные РМН позволяют создавать конструкции с закрытым сечением, которые обеспечивают высокую несущую способность и обеспечивают расширенные функциональные возможности (например, прямой монтаж подушек безопасности в балках панели приборов или включение внутренних дверных модулей для циркуляции воздуха или воды); а также (4) путем правильного выбора уровня LESA, адгезивно склеенные РМН конструкций могут быть оптимизированы с точки зрения их жесткости, сопротивления изгибу, прочности, адгезионной прочности и времени отверждения.

#### 10.2.4 РМН технология прямым склеиванием

Данная технология РМН в настоящее время разрабатывается [16, 17] и направлен на устранение некоторых основных ограничений вышеупомянутых трех технологий РМН. Среди ряда ограничений/недостатков современных технологий РМН наиболее заслуживают внимания следующие: (1) процесс литья под давлением требует наличия сквозных отверстий в штамповке металла для формирования заклепок с блокировкой. Тем не менее, наличие этих отверстий может поставить под угрозу функциональность и/или механические характеристики (или даже структурную целостность несущей критическую нагрузку) компонентов РМН; (2) процесс литья под давлением также требует переформования фланцев для штамповки металла для эффективного сцепления металла с полимером. Поскольку эти фланцы часто необходимы для точечной сварки, их формование может быть запрещено; а также (3) в случае адгезивно склеенных РМН конструкций, высокая стоимость клея, относительно длительное время отверждения и ограниченная способность клея противостоять агрессивным химическим и термическим средам, встречающимся в лакокрасочном цехе во время предварительной обработки непокрашенного кузова и электростатическая окраска может рассматриваться как потенциальные ограничения.

В рамках технологии прямой адгезии РМН соединение между металлическим и термопластичным субкомпонентами достигается посредством прямой адгезии отлитой под давлением термопластичной поперечно-ребристой структуры к металлу без использования зацепляющих заклепок, переформованных кромок или конструкционных клеев [1]. В рамках этой РМН технологии для достижения желаемого уровня прочности сцепления полимера с металлом используются преимущества различных механических, физических и химических явлений и процессов. Как сообщается в Обзор большинства его работ [2], технологии прямого сцепления полимера с металлом можно классифицировать как:

- а Технологии, основанные на явлениях механической блокировки полимер/металл по шкале длины шероховатости поверхности (например, [18-20]). Несмотря на то, что механизм механического сцепления по-прежнему носит механический характер, то в случае этих технологий прямой адгезии РМН механизм соединения пластика с металлом отличается от того, который обнаруживается в стандартном процессе формования со вставкой, который основан на явлении усадки и специальной подрезке. геометрические особенности для хорошей передачи нагрузки от полимера к металлу. В случае РМН технологий с прямой адгезией, основанных на явлениях механической блокировки полимера/металла, взаимная блокировка полимера/металла происходит путем инфильтрации в металлическую подложку микроноватых элементов шероховатости и после затвердевания образования механических частиц. блокировки микронного размера. Хорошо установлено [18-20], что для успешного соединения полимер/металл предварительный нагрев

- металлического подкомпонента крайне важен. В [2] было предложено, что предварительный нагрев металлического подкомпонента может быть эффективно достигнут путем интеграции индукционного нагревателя в литьевую форму;
- b Технологии, использующие металлическое грунтование в рулонах или штампованных деталях с промоторами адгезии (например, [21, 22]). Наиболее часто используемым праймером является силан, который благодаря своим амино- и винильным функциональным группам действует как «связующий агент», которая способствует адгезии между неорганическими (в данном случае металлическими) и органическими (в данном случае полимерными) материалами. Чтобы силан действовал как усилитель адгезии, его органореактивные фрагменты должны контактировать с полимером и металлом, что достигается путем покрытия металлической подложки силаном непосредственно перед литьевым формованием полимера [23]. Обычно считается, что реакции силанового сочетания происходят в следующей последовательности: (1) гидролиз алкоксигруппы, который приводит к образованию водорода; (2) образование водородных связей на границе раздела полимер/металл; (3) межфазная конденсация функциональных групп; и, наконец, (4) межфазные химические реакции с полимером и металлом, приводящие к образованию межфазных связей [24];
- c Технологии, основанные на химических модификациях термопластичного материала для литья под давлением для улучшения адгезии к металлу (например, [25, 26]). В открытой литературе сообщалось об усилиях, связанных с модификацией либо полимеризованного термопластичного материала (посредством образования полимерных смесей, [25]), либо на уровне мономеров (посредством прямых изменений в химии мономеров). В работе сообщается в работе. [10], полиамид был химически модифицирован путем смешивания его с самоупорядочивающимся полиэфир-амидным блок-сополимером (термопластичным адгезивным материалом). Было обнаружено, что полученная полимерная смесь демонстрирует исключительно высокую адгезионную прочность ( $> 20$  МПа) даже в тех случаях, когда металлические поверхности не были предварительно очищены и оставлены покрытыми составом/маслом для вытяжки перед литьем под давлением.
- Пример химической модификации термопластичной смолы для улучшения адгезии полимер/металл был описан в работе. [26]. В этой работе было исследовано влияние прямого добавления стиролсилана в стирольную (мономерную) смолу различных концентраций на способность смолы непосредственно связываться с алюминием при полимеризации. Было обнаружено, что концентрация стиролсилана в стирольной смоле влияет на следующее: (1) толщину поверхности соединения полимера с металлом; (2) адгезионная прочность полимер/металл; и (3) чувствительность к прочности связи в присутствии влаги. Кроме того, результаты показали, что подготовка поверхности металла с помощью травления хромовой серной кислотой или анодирования фосфорной кислоты является чрезвычайно важной для достижения хорошей адгезии полимера к металлу. Это наблюдение было объяснено ролью обработки поверхности травлением в обеспечении достаточной плотности сайтов связывания для обеспечения прививки или стяжки межфазного слоя полимера на поверхности металла.
- Было обнаружено, что толщина межфазного слоя, которая контролируется концентрацией силана в стирольных мономерах, оказывает доминирующее влияние на адгезионную прочность. В частности, когда толщина полимерного межфазного слоя становится сравнимой со средним расстоянием между точками запутывания полимерной цепи, прочность сцепления полимера с металлом достигает своего максимального значения;
- d Технология РМН, так называемая запрессованная блокировка [8], который использует некоторые идеи из процесса точечной механической фиксации/соединения листового металла. В частности, штамповка используется для производства мелкого миллиметра как хвост ласточки оттки / углубления в металлический подкомпонент/штамповка. Эти оттки гарантируют, что последующий инжекционно-формованный термопластичный подкомпонент надежно прикреплен к металлическому подкомпоненту. Соединение обеспечивает эффективное

соединение металл/полимер по меньшей мере двумя различными механизмами: (1) механическая блокировка и улучшенная адгезия благодаря увеличенной площади контакта металла/полимера; а также

- е Другие подходы, направленные на повышение прямой адгезии полимера к металлу посредством физических и химических модификаций поверхности металлического субкомпонента [27-30]. Например, в Ссылке [29], Openair® плазма используется для модификации металлической поверхности подкомпонента с помощью комбинации следующих механизмов: (1) очистка поверхности, например, удаление органических загрязнителей; (2) абляция, при которой удаляется слабо связанный поверхностный слой; а также (3) потенциальная химическая модификация из-за повышенной реакционной способности поверхности и возможность возникновения поверхностных химических реакций.

### **10.3 Механизмы полимерных и металлических соединений**

Хорошо установлено (например, [1]), что структурные/функциональные характеристики компонента РМН сильно зависят от степени переноса нагрузки через границы раздела полимер/металл, что, в свою очередь, контролируется механизмом и прочностью полимера-металлическое соединение. Следовательно, важно идентифицировать и понять природу этого объединения через четыре вышеупомянутых группы РМН технологий.

#### **10.3.1 Многослойное литье под давлением РМН конструкции**

В этом случае перенос нагрузки между полимером и металлом осуществляется посредством чисто механических соединений по длине и длине соединения полимер / металл. Эти соединения зависят от действия усадочных явлений и от образования механических блокировок, обусловленных наличием специальных подрезанных геометрических элементов внутри металлического подкомпонента.

#### **10.3.2 Металлоформование РМН конструкции**

В этом случае именно поверхность раздела между покрытием и металлическим субкомпонентом играет критическую роль в переносе нагрузки, поскольку граница раздела между литьевым полимерным субкомпонентом и покрытием, например, после ультразвуковой сварки, эффективно бесшовные. Как будет обсуждаться далее, в сочетании с технологиями РМН с прямой адгезией существует ряд потенциальных (механических и химических) механизмов адгезии полимер/металл.

#### **10.3.3 Адгезионно связанные РМН конструкции**

В этом случае поверхность раздела полимер-металл заменяется тонкослойной структурной интерфазой. Из-за наличия большой плотности числа межфазных ковалентных связей, межфазный слой обычно является жестким и прочным и обеспечивает практически полную передачу нагрузки между двумя компонентами РМН.

#### **10.3.4 Прямое связывание РМН конструкции**

Как упоминалось ранее, существует несколько РМН технологий с прямой адгезией, и они основаны на различных механизмах соединения полимера и металла. Например, один класс РМН технологий с прямой адгезией основывается на формировании механических взаимоблокировок полимер и металл по длине шероховатости поверхности (например, [18-20]), которые образуются в результате инфильтрации элементов шероховатости поверхности металлической подложки и последующее затвердевание расплавленного пластика. С другой стороны, в случае РМН технологии с прямой адгезией, в которой используется грунтование поверхности металла, как в случае холоднокатаной штамповки мягкой стали, грунтованной аminosиланом и сформованной с помощью

поливинилхлоридных, PVC [21], механизм соединения полимер и металл рационализируется следующим образом: (1) комплексы гидрохлорида амина, по-видимому, образуются при протонировании аминогрупп силанов с HCl, которое было освобождено от ПВХ во время начала термического дегидрохлорирования; (2) кроме того, происходит кватернизация или нуклеофильное замещение лабильных боковых аллилхлоридных групп аминогруппами на силанах, таким образом прививая PVC на аminosиланы. Было установлено, что PVC имеющий п-хлораллильные группировки вдоль его цепей проявлялась лучшая адгезия со сталью, предварительно покрытой аminosиланами; и (3) взаимная диффузия полимерной фазы и силановой фазы также оказалась критической для получения хорошей адгезии.

## 10.4 Вычислительный инженерный анализ РМН технологий

Многие исследователи, конструкторы и инженеры-технологи использовали различные междисциплинарные вычислительные методы и инструменты (например, [1, 31]) для того, чтобы оценить потенциал РМН технологий для использования в несущих конструкционных компонентах ВІW автомобилей. Анализ охватывает следующие аспекты проектирования, изготовления, производительности и срока службы компонентов РМН:

- a Применение методов и инструментов оптимизации технического проекта к разработке РМН компонента автомобильного ВІW, который соответствует функциональным требованиям (например, связанным с жесткостью, прочностью и сопротивлением изгибу), с учетом ограничений на технологичность изготовления компонента;
- b подробное численное моделирование динамики жидкостей при численном моделировании этапов наполнения (включая вызванные потоком изменения ориентации волокна), заполнения и охлаждения в процессе литья под давлением, используемом для изготовления полимерного подкомпонента с короткими волокнами из РМН; и анизотропное термовязкоупругое вычисление термических и индуцированных давлением напряжений в пресс-форме в полимерном субкомпоненте, заполненном литьем под давлением с коротким волокном;
- c Анализ структурной механики (основанный на использовании многослойных элементов оболочки) усадки и коробления, вызванных ослаблением напряжений в пресс-форме после полимерного субкомпонента (в случае РМН на основе металлического переформования или клеевого соединения). технологии) или гибридный субкомпонент (в случае технологий литья под давлением и технологии прямой адгезии) выталкивание из литейной формы; а также
- d Структурно-механический анализ (включая влияние переноса нагрузки на основе адгезии между металлическими и полимерными субкомпонентами) жесткости и прочности компонентов РМН при нескольких простых режимах монотонной нагрузки и при ползучести.

Краткий обзор этих вычислительных анализов приведен в оставшейся части этого раздела.

### 10.4.1 Вычислительный инженерный анализ РМН технологий

Постоянная потребность в интеграции передовых методов компьютерной оптимизации в общий процесс проектирования компонентов или узлов возникла в соответствии с задачами достижения легкого веса и требованиями к сокращению сроков разработки продукта в автомобильной промышленности. Это особенно верно в случае несущей конструкции РМН непокрашенного кузова компонентов автомобиля (ВІW). В большинстве случаев конструкция несущих нагрузку компонентов РМН обусловлена не только требованиями жесткости и сопротивления изгибу, но и требованиями прочности (например, для получения требуемых характеристик при столкновениях при боковом ударе).

Структурные РМН компоненты непокрашенного кузова автомобиля обычно разрабатываются с использованием следующей двухэтапной процедуры оптимизации проектирования на основе конечных элементов: (1) сначала выполняется оптимизация

топологии, чтобы получить общее представление об оптимальной конфигурации компонента BIW под вопросом, который обеспечивает массовые пути загрузки; и (2) топология компонентов, полученная в (1), затем интерпретируется для формирования инженерного проекта, который затем оптимизируется под реальные функциональные требования с использованием нелинейных методов и инструментов, основанных на конечно-элементных деталях, детальной оптимизации размеров и формы. В рамках этих процедур оптимизации геометрические и материальные аспекты компонента PMH рассматриваются как проектные переменные, целевые функции определяются с точки зрения требований к функциональным характеристикам (как правило, определяется количественно требуемыми уровнями жесткости, прочности или устойчивости к изгибу) при ограничениях, которые обычно связаны с технологичностью изготовления компонентов, совместимостью материалов с цепочкой производственных процессов BIW, стоимостью и т. д. Примеры результатов, полученных с использованием топологии на основе прочности и процедур оптимизации детального проектирования для упрощенного PMH компонента автомобильного BIW соответственно показаны на Рисунках 10.4(a) и (b).

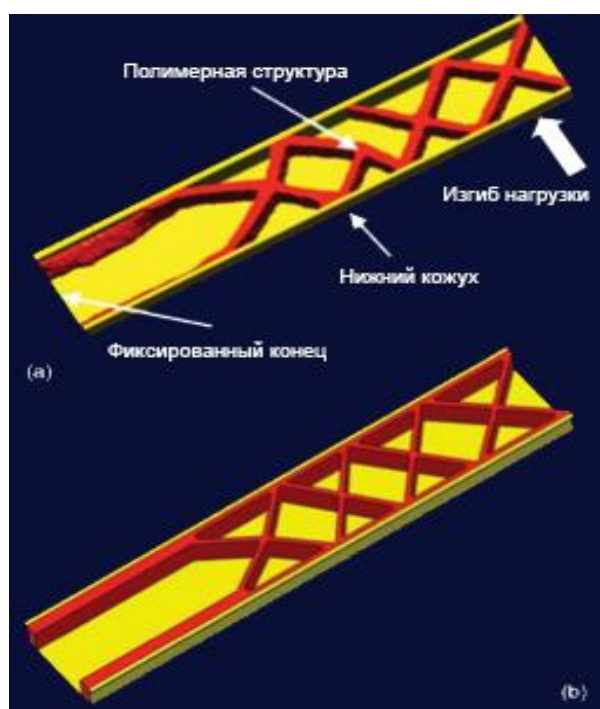


**Рис. 10.4** Результаты на основе силы:топологии; а также подробные процедуры оптимизации конструкции для упрощенного структурного PMH компонента автомобильного BIW.

### 10.4.2 Моделирование и иммитация процесса литья под давлением

Термопластиковое литье под давлением является широко используемым производственным процессом для изготовления деталей и компонентов высокой геометрической сложности. Типовой процесс литья под давлением включает четыре отдельных этапа: (1) заполнение формы расплавленным термопластиком; (2) заполнение - нагнетание дополнительного материала в форму под высоким давлением для компенсации вызванной охлаждением объемной усадки материала; (3) охлаждение, которое приводит к затвердеванию материала, находящегося в кристаллизаторе; (4) выталкивание затвердевшей детали и компонента из формы. На стадиях наполнения, заполнения и охлаждения в процессе литья под давлением материал подвергается сложной термомеханической нагрузке, что приводит к изменениям местного удельного объема (плотности), формы компонента, а также к развитию напряжения в пресс-форме внутри компонента. Другими словами, в то время как (тонкостенный) компонент находится в кристаллизаторе, он сдерживается пресс-формой, вызывая внутренние напряжения внутри компонента во время затвердевания расплава и последующего охлаждения. При выталкивании эти напряжения ослабляются, вызывая искажение или коробление и

дальнейшую усадку формованного компонента. Дальнейшее коробление и усадка компонента могут происходить во время охлаждения до комнатной температуры выталкиваемого формованного компонента.

Чтобы привлечь внимание к тому факту, что, как правило, большинство пластиковых подкомпонентов, полученных литьем под давлением, изготовлены из термопластов с коротким волокном и, следовательно, могут содержать гетерогенный неизотропный материал, обычно выполняются следующие субанализы моделирования процесса литья под давлением. out: (1) определение оптимального размещения и количества точек впрыска термопластичного расплава; (2) заполнение формы; (3) вызванные потоком расплава изменения в распределении ориентации волокон; (4) заполнение пресс-формы; и (5) напряжения в пресс-форме. Эти субанализы кратко рассматриваются в следующем.

#### **10.4.2.1 Оптимальное размещение и количество точек нагнетания**

Перед проведением моделирования процесса литья под давлением необходимо определить оптимальное расположение и количество точек впрыска (затворов). Чтобы определить оптимальное количество и расположение затворов, обычно используется ограниченный оптимизационный анализ, в пределах которого оптимальные значения целевой функции (степень сбалансированного потока, которая гарантирует, что области внутри пресс-формы, которые находятся дальше всего от ворот (-ов) заполняются примерно в одно и то же время [32]), достигается путем выбора количества и расположения точек впрыска (проектных переменных) при соблюдении ограничений, налагаемых: (1) геометрией компонента; (2) свойства термопластичного расплава; (3) указанные параметры процесса литья под давлением; и (4) осуществимость литья под давлением (т.е. успешное заполнение секций, связанных с минимальной толщиной стенки пластмассы).

#### **10.4.2.2 Анализ заполнения формы**

Предыдущие вычислительные усилия, о которых сообщалось в литературе, были в основном сфокусированы на прогнозировании распределения давления и температуры в полости пресс-формы и продвижении фронта расплава во время заполнения пресс-формы [33-38]. Более поздние вычислительные усилия, с другой стороны, также касались явлений после заполнения, таких как вызванные потоком изменения в распределении ориентации волокон и развитие напряжений в пресс-форме внутри компонента [39,40]. Кроме того, в то время как в ранних попытках использовались в основном эмпирические модели взаимодействия материала и расплава и формы (например, [40]), в более поздних вычислительных исследованиях использовались более физически обоснованные модели материала и алгоритмы контакта (например, [41]).

Три основных уравнения сохранения, то есть уравнения сохранения массы, импульса и энергии, интегрируются в пространстве и времени с использованием (обычно явной) числовой схемы в рамках анализа заполнения формы. В случае полукристаллических полимерных материалов вышеупомянутые уравнения в частных производных должны быть объединены с дополнительным (дифференциальным или алгебраическим) уравнением, определяющим скорость кристаллизации.

Следует отметить, что когда вычислительный анализ заполнения формы включает термопластики с коротким волокном, локальное поле течения расплава обычно считается независимым от распределения ориентации волокон. С другой стороны, поле течения вызывает переориентацию волокон и изменение их локального распределения ориентации. Строго говоря, исключение влияния ориентации волокон на локальное поле течения оправдано только в случае литья под давлением тонкостенных компонентов, когда волокна ориентированы почти параллельно средней плоскости пластиковой стенки и, следовательно, их взаимодействие с течением расплава ограничено [42-47]. Условия, которые должны быть выполнены для того, чтобы пренебречь влиянием функции распределения волокон на поток, можно найти в Ссылке [48].

Поскольку формование подкомпонентов ПМГ под давлением или переформование компонентов ПМГ включает в себя течение расплава через тонкие каналы полости формы, изменения давления по толщине, как правило, не учитываются, и поток расплава рассматривается как имеющий характер уравнения потока Hele-Shaw [35]. Следовательно, анализ заполнения формы упрощается и включает не прямое решение основных уравнений сохранения, а решение уравнения потока Hele-Shaw на основе давления (эллиптический частичный дифференциал) [35]. При решении уравнения потока Hele-Shaw должны быть указаны зависимости вязкости материала от скорости сдвига, давления и температуры. Обычно это делается с использованием модели Cross [41]. Кроме того, следующие граничные условия, как правило, используются в сочетании с уравнением Hele-Shaw: (1) в точках нагнетания определяются либо входной расход, либо граничные условия давления; (2) условие нулевого давления определяется на фронте поступающего потока; и (3) градиент нулевого нормального давления указан на поверхности полости формы. Хотя эти граничные условия обычно не обеспечивают условия скольжения по поверхности полости формы (и могут позволить жидкости проскальзывать), результирующие неточности в предсказаниях поля скоростей обычно оказываются незначительными [49]. Поскольку уравнение потока Hele-Shaw учитывает только поток, параллельный локальной средней плоскости, оно не учитывает фонтанный поток и может привести к неточностям в прогнозах температуры и ориентации волокон. Эти неточности, как правило, смягчаются с помощью одного из локальных приближений [37].

Одним из результатов анализа заполнения формы является определение мгновенного местоположения фронта потока. Как правило, фронт потока отслеживается путем дискретизации полости пресс-формы на большое количество контрольных объемов и путем определения состояния заполнения каждого контрольного объема. Пример результатов анализа заполнения формы, показывающий пространственное распределение локального времени заполнения для случая переднего модуля РМН транспортного средства, показан на рисунке 10.5. (Пять отверстий для впрыскивания обозначены как белые конусы.) Следует отметить, что металлические штамповки не видны, поскольку они расположены внутри полости пресс-формы.

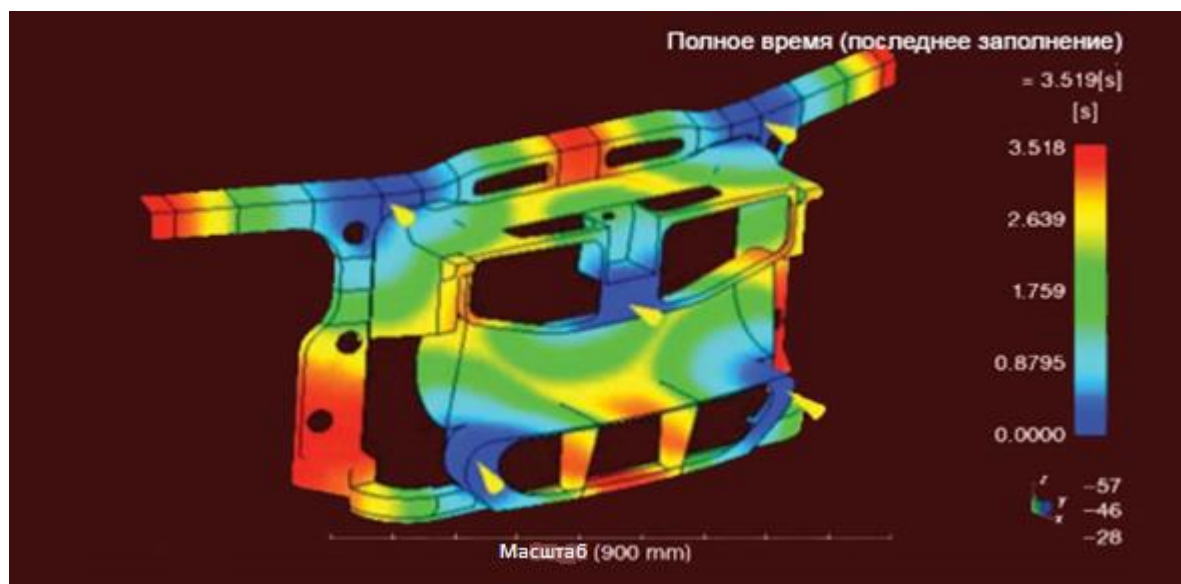


**Рис. 10.5** Пример результатов анализа заполнения формы, показывающий пространственное распределение локального времени заполнения для случая внешнего модуля ПМГ транспортного средства. (Обратите внимание, что металлические штамповки не видны, так как они находятся внутри полости пресс-формы.)

Другим результатом анализа заполнения формы является временная эволюция температурного поля. Этот результат получается путем численного решения уравнения сохранения энергии, в котором термины конвекции тепла и вязкой диссипации с предыдущего временного шага обрабатываются как исходные слагаемые в течение текущего временного шага. Кроме того, для учета высокой скорости теплопроводности



через металлический подкомпонент (в случае технологий литья под давлением и прямой адгезии РМН) или по внутренним поверхностям литевой формы (в случае формовки металла и адгезии РМН нологии), применяются зависящие от времени однородные граничные условия, основанные на температуре (определяемые с помощью отдельного анализа граничных элементов [50]). Следует отметить, что использование этого граничного условия предполагает непрерывность температуры на границах раздела полимер/металл и полимер/форма. Другими словами, пренебрегают эффектом межфазной теплопроводности.

### **10.4.2.3 Анализ распределения направления волокон под влиянием потока**

Как упоминалось ранее, поток расплава через полость пресс-формы вызывает переориентацию волокон и изменение их локального распределения направления. Для точного прогнозирования усадки и деформации формованного под давлением компонента, изготовленного из термопластов с коротким волокном, важно знать распределение ориентации волокон, вызванное потоком, по всему компоненту (например, [51-53]). Поскольку большинство коммерческих термопластов с короткими волокнами, обычно используемых для литья под давлением, могут быть охарактеризованы как полу- или высококонцентрированные суспензии, взаимодействия между волокнами и волокнами и связанные с этим пространственные ограничения для движения волокон могут значительно влиять на конечное распределение направления волокон при нагнетании. Как правило, взаимодействие волокно-волокно учитывается при вычислительном анализе процесса литья под давлением с использованием модели Folgar-Tucker [51]. В этой модели анизотропный симметричный тензор взаимодействия волокна/волокна второго порядка вводится в диффузионный член уравнения движения для изолированного слоя в ньютоновской жидкости [54]. Компоненты этого тензора взаимодействия в зависимости от начального распределения направления волокна, аспектного отношения волокна, численной плотности волокон в суспензии, свойств расплава и величины деформации сдвига оцениваются с использованием прямого численного моделирования волокна/волоконные взаимодействия в потоке простого сдвига [52]. В этих симуляциях взаимодействия на малых расстояниях количественно оцениваются с использованием модели смазки [55], в то время как взаимодействия на большие расстояния рассчитываются с использованием метода граничных элементов [55].

Как только компоненты тензора взаимодействия определены для данного расплава термопластичного полимера с коротким стекляннм заполнением, они используются по всей полости формы в анизотропном уравнении вращательной диффузии для определения локального показателя изменения функции распределения направленных волокон, которое количественно определяется тензором распределения направленных волокон второго порядка. Интеграция показателя изменения дает развитие во времени функции распределения направления волокон во время заполнения формы.

### **10.4.2.4 Анализ заполнения-формования**

Как упоминалось ранее, заполнение пресс-формы включает нагнетание дополнительного расплава в пресс-форму под высоким давлением, чтобы компенсировать вызванную охлаждением и затвердеванием объемную усадку материала. В то время как фаза уплотнения процесса литья под давлением регулируется теми же уравнениями сохранения, что и фаза наполнения, необходимо определить дополнительное уравнение, уравнение состояния, чтобы включить эффект сжимаемости расплава. Уравнение состояния, обычно используемое при анализе уплотнения пресс-формы, определяет функциональную взаимосвязь между давлением, удельным объемом, температурой и скоростью охлаждения.

Следует отметить, что наличие показателя скорости охлаждения в уравнении состояния позволяет моделировать различные фазовые превращения (такие как замораживание, кристаллизация и переход пластичного материала в стекло), сопровождающие процесс

заполнения. Кроме того, следует отметить, что различные свойства материала, такие как объемные коэффициенты теплового расширения и сжимаемость, а также их зависимости от температуры и давления, выводятся из уравнения состояния.

#### 10.4.2.5 Анализ внутриформовочного напряжения

Существует два основных источника напряжений в пресс-форме в отлитых под давлением компонентах: (1) вязкоупругие деформации термопластичного материала во время наполнения или заполнения могут приводить к развитию так называемых напряжений в пресс-форме, вызванных течением; и (2) ограничения в отношении (часто неоднородной) усадки полимера, вызванной охлаждением и затвердеванием, из-за стенок кристаллизатора и приложенного давления уплотнения могут привести к образованию так называемых температурных и индуцированных давлением напряжений в пресс-форме. Обычно предполагается, что вызванные потоком напряжения в пресс-форме относительно невелики и что они легко снимаются, пока компонент находится в пресс-форме при высоких температурах до выброса. Следовательно, они, как правило, игнорируются при анализе напряжений в пресс-форме. Что касается термических и индуцированных давлением напряжений в пресс-форме, они были тщательно исследованы в вычислительном отношении (например, [56-65]). Эти исследования ясно выявили влияние стеснений в стенке пресс-формы и свойств термопластичного материала на степень и распределение напряжений в пресс-форме.

Расчет напряжений в пресс-форме влечет за собой знание моделей материалов высокой точности (в частности, зависящей от времени части модели материала). Это связано с тем, что по мере того, как литой компонент начинает охлаждаться внутри формы, время релаксации термопластичного материала начинает увеличиваться и приближается к времени пребывания компонента в форме. Из-за небольшой величины сопутствующих деформаций в пресс-форме поведение термопластичного материала может быть удовлетворительно представлено с использованием анизотропной линейной модели термовязкоупругого материала (например, [66, 67]). Как правило, в таких моделях вязкая часть материала предполагает взаимозаменяемость между временными и температурными эффектами. Другими словами, материалы предполагаются термореологически простыми. Следует отметить, что это предположение не может быть полностью оправдано в случае полимеров с коротким волокном, используемых в структурах из РМН. Для аморфных полимеров эта временная/температурная взаимозаменяемость обычно представлена с использованием уравнения Williams-Landel-Ferry (WLF) [68]. С другой стороны, для полукристаллических материалов эта взаимозаменяемость основана на выражении типа Аррениуса (например, [1]).

Как было установлено ранее, поскольку термопластичный материал, используемый в компонентах РМН, обычно заполнен короткими волокнами, и поток вызывает отклонение функции распределения ориентации от случайной, материал локально ведет себя анизотропно. Для количественной оценки анизотропных аспектов поведения материала из знания свойств полимерного расплава и волокна, а также из знания функции распределения ориентации волокон обычно используют одну из процедур гомогенизации на основе микромеханики. Краткое обсуждение этих процедур представлено в следующем разделе.

Когда соответствующая модель материала построена, временная эволюция напряжений в пресс-форме может быть определена путем проведения зависящего от времени термовязкоупругого структурного анализа. В рамках этого анализа поле температуры импортируется из анализа наполнения и заполнения.

Чтобы упростить анализ напряжений в пресс-форме, обычно используются следующие допущения/упрощения: (1) нормальное напряжение через толщину стенки локально постоянное в направлении сквозной толщины; (2) до тех пор, пока нормальное напряжение через толщину стенки является сжимающим, вводимый полимер считается находящимся в контакте с металлическим подкомпонентом/формой; (3) локально, компонент полностью ограничен в средней плоскости, и, следовательно, единственным ненулевым компонентом

деформации является компонент в направлении сквозной толщины; и (4) металлический субкомпонент / форма считается жесткой.

Анализ напряжений в пресс-форме обычно выполняется в следующих граничных условиях на основе напряжений:

- a когда компонент находится в пресс-форме, а впрыскиваемый материал содержит как твердый внешний слой, так и жидкую сердцевину, нормальное напряжение по всей толщине устанавливается равным отрицательному давлению жидкости; или же
- b Когда компонент находится в кристаллизаторе и впрыснутый материал полностью затвердел, компонент может либо находиться в контакте с металлическим субкомпонентом/кристаллизатором, либо отделяться от него. В первом случае нормальное напряжение по толщине определяется с использованием условия, при котором средняя нормальная деформация по толщине равна нулю. В последнем случае нормальное напряжение по толщине устанавливается равным нулю.

#### **10.4.2.6 Микромеханика-эффективные свойства материала на основе отклонения**

Как установлено ранее, наполненные стеклом полимерные материалы, используемые в компонентах РМН, становятся анизотропными во время заполнения формы из-за вызванных потоком изменений в (первоначально случайном) распределении ориентации волокон. Как правило, основанные на микромеханике модели гомогенизации используются для получения (анизотропных) упругих и термоупругих свойств термопластичных материалов с волокнистым наполнением, используемых в РМН технологиях, из знания свойств составляющих волокон и материалов матрицы и известной функции распределения ориентации волокон [69]. Обычно предполагается, что отлитый под давлением материал является поперечно-изотропным, то есть его свойства одинаковы в продольном и поперечном направлениях. Следовательно, упругий отклик таких материалов определяется пятью (зависящими от температуры) упругими модулями, в то время как термоупругий отклик определяется в виде двух (продольных и поперечных) линейных коэффициентов теплового расширения.

(Гомогенизированные и изотропные) упругие и термоупругие свойства наполненных волокнами термопластов обычно оцениваются с использованием следующей двухэтапной процедуры микромеханики: (1) во-первых, свойства материала, в котором волокна идеально выровнены, оцениваются с использованием схема гомогенизации, в рамках которой рассматриваемый материал рассматривается как совокупность дискретных составляющих материалов (например, [69, 70]); и (2) затем применяется процедура усреднения ориентации, включающая влияние сопутствующего распределения ориентации волокон на эффективные свойства упругого и термоупругого материала (например, [71]).

#### **10.4.3 Анализ усадки и деформации выдавленного компонента**

Хотя литьевой материал находится в форме, он ограничен и не может деформироваться. Однако после выталкивания компонент может подвергаться усадке и деформации. С другой стороны, для выдавленного РМН компонента, термопластичный субкомпонент остается несколько ограниченным в отношении прилипания к металлическому субкомпоненту или штамповки.

Тот же самый термовязкоупругий структурно-механический анализ, используемый для определения напряжений в пресс-форме, часто используется для анализа усадки и деформации полимерного субкомпонента (в случае РМН технологий на основе металлического переформования или клеевого соединения) или гибридизированного субкомпонента (в случае литья под давлением и технологии прямой адгезии) после выталкивания из литьевой формы. Поскольку анализ усадки и деформации обычно выполняется вне анализа заполнения формы, а скорее в рамках отдельной программы конечных элементов структурной механики, пространственные (в том числе сквозные) изменения в термомеханических свойствах материала (определение модели материала) и напряжения в пресс-форме (начальные условия) должны быть импортированы из анализа

процесса литья под давлением (где они были первоначально рассчитаны). После того, как деталь извлекается из формы, на нее не воздействуют внешние нагрузки, и, следовательно, применяются следующие граничные условия: (1) шесть (три поступательных и три вращательных) степени свободы одной из точек материала выбрасываемого компонента ограничены, чтобы предотвратить неконтролируемое движение твердого тела компонента; и (2) граничные условия нулевой тяги применяются к поверхностям выбрасываемого компонента.

#### 10.4.4 Структурный анализ РМН компонента

Вытесненный (искривленный) РМН компонент после охлаждения до комнатной температуры подвергается серии структурных (квазистатических и динамических) конечно-элементных анализов с целью проверки его функциональности и оценки его массовой эффективности. Обычно это делается путем сравнения характеристик компонента РМН с характеристиками соответствующего цельнометаллического компонента, который предполагается заменить компонентом РМН. Пример результатов, полученных в таких анализах с использованием идеализированного несущего компонента [10], показан на рисунке 10.6(a)-(f).

Цельнометаллическое исполнение этого компонента (используется в качестве контроля) состоит из U-образной штамповки с фланцем и накладки (точечной сварки) по длине фланцев, рис. 10.6 (a). В рамках анализа методом конечных элементов каждый точечный сварной шов моделируется как кинематическое ограничение, распределенное по круглой области (соответствующей размеру точечного сварного шва) контактирующих поверхностей. Результирующая конфигурация закрытого бокса, как правило, обеспечивает хорошее сочетание жесткости и прочности на сжатие, изгиб и скручивание, но в случае цельностальной конструкции вес компонента является относительно высоким.

Цельнометаллическое управление модифицируется следующим образом для формирования исполнения РМН упрощенного несущего компонента BIW: (1) крышка исключена; и (2) добавлена пластиковая вставка, состоящая из накладки (сопрягаемой с внутренней частью U-образного канала) и ряда поперечных ребер.

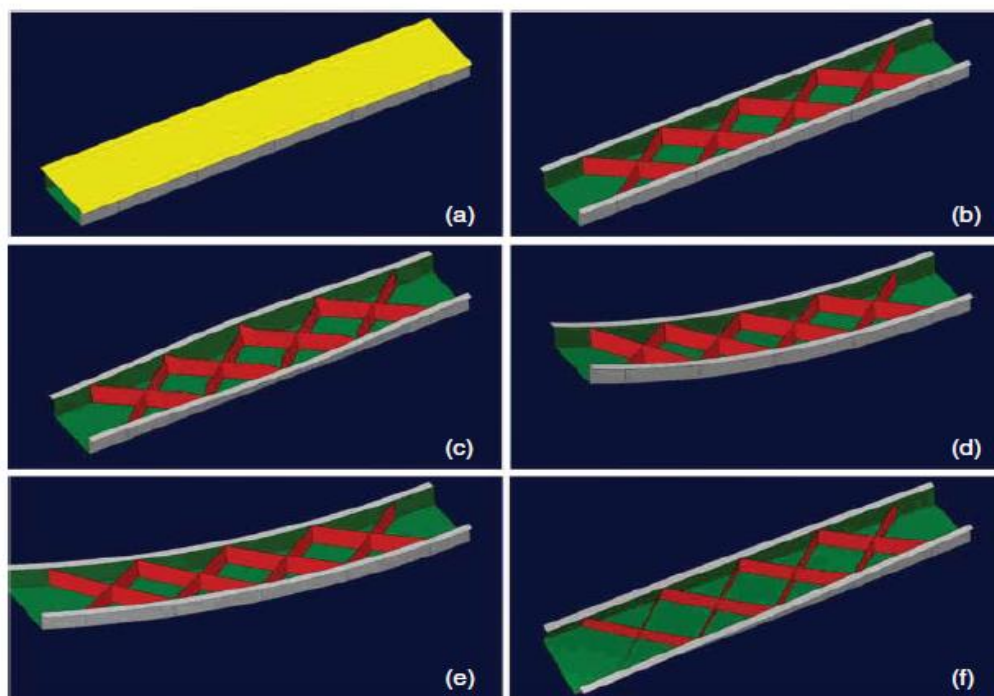


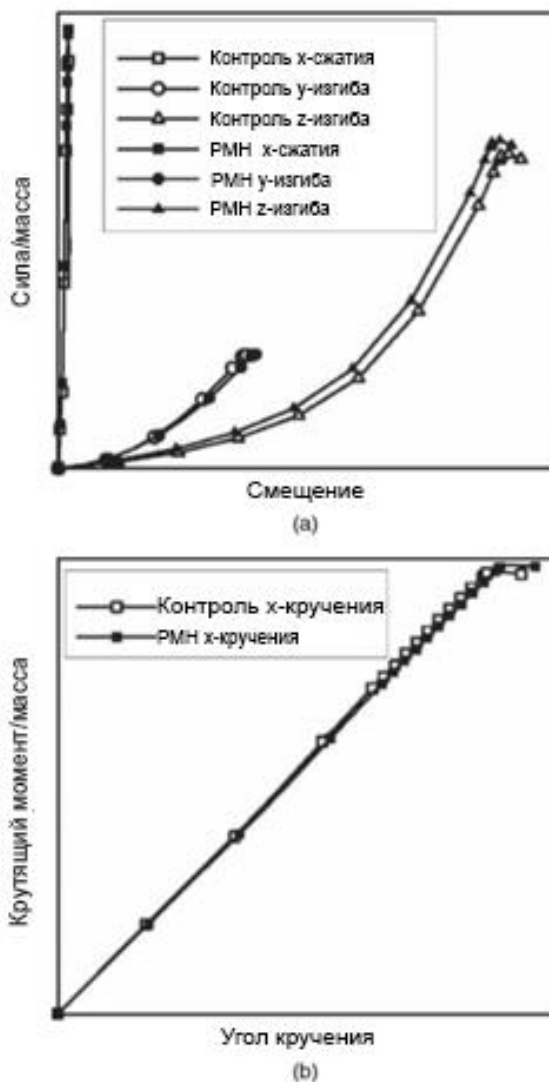
**Рис. 10.6** Структурный анализ компонента РМН: (a) цельнометаллический контроль; (b) компонент РМН; (c) осевое сжатие; (d) изгиб вокруг первого поперечного направления; (e) изгиб вокруг второго поперечного направления; и (f) скручивание вокруг продольного направления.

Чтобы гарантировать, что на пластиковую вставку не будет влиять приварка концов U-образного канала к структуре BIW, длина вставки устанавливается равной 80% от длины U-образного канала, и вставка центрируется относительно канала в продольном направлении. Результирующая конфигурация компонента PMH показана на рисунке 10.6 (б). В рамках анализа методом конечных элементов компонента PMH адгезия между металлом и полимером моделируется с использованием специализированных связных элементов, которые благодаря использованию нормальных и тангенциальных отношений тягово-разделительного характера позволяют моделировать начальную нагрузку, инициирование например, межфазного повреждения, вызванной повреждением адгезионной жесткости/снижения прочности и распространения повреждения, приводящего к возможной декогезии прилипших поверхностей, например, [1].

Для проверки функциональных характеристик компонента PMH в квазистатических условиях нагрузки каждый элемент управления и компонент PMH подвергаются четырем основным режимам нагрузки.: (1) продольный (то есть, x-осевое) сжатие, Рис. 10.6(с); (2) изгиб около первого поперечного (то есть, y-осевое) направления, Рис. 10.6(д); (3) изгиб около первого поперечного (то есть, z-осевое) направления, Рис. 10.6(е); и (4) скручивание вокруг продольного (то есть, x-осевого) направления, Рис. 10.6(ф). Следует отметить, что для краткости на Рисунке 10.6(с)-(ф) отображены четыре режима деформации только для компонента PMH. Массовая эффективность конструкции компонента PMH оценивается путем сравнения нормализованных по массе значений пиковой нагрузки и крутящего момента между элементом управления и компонентом PMH. Пример такого сравнения приведен на Рисунке 10.7(а) и (б). Результаты отображенные на Рисунке 10.7(а) и (б) предполагают, что компонент PMH превосходит свой полностью стальной аналог x-сжатию и z-изгибу с несущим сопротивлением, в то время как два находятся на одном уровне относительно их y-изгиба и x-силы кручения.

**Рис. 10.7** Типичные результаты, относящиеся к:

(а) нормализованная по массе сила против смещения; и  
(б) нормализованный по массе крутящий момент в зависимости от угла кручения для цельной стали (контрольный образец) и PMH компонент (экспериментальный образец) используется для проверки функциональности/пригодности PMH-компонента.



## 10.5 Совместимость с цепочкой BIW автомобильного технологического процесса

При выборе среди ранее рассмотренных РМН технологий для использования в различных областях автомобильного производства, внимание уделяется общему жизненному циклу (TLC) рассматриваемого компонента РМН также как TLC транспортного средства. Подход к выбору TLC технологий РМН отличается от более традиционного подхода к выбору производственного процесса (например, [7]), который в первую очередь подчеркивает вопросы, связанные с функцией и производительностью компонента. С другой стороны, подход TLC, учитывает возможные последствия и последствия, связанные с выбором РМН технологии для различных этапов производственной цепочки транспортного средства, эксплуатационных характеристик и долговечности автомобиля (в процессе эксплуатации), также как анализ различных вопросов истечения срока транспортного средства (ELV) (например, разборка, пригодность материала (ов) для измельчения и сегрегации, потенциал для экономической переработки и т. д.). Схема основных этапов в эксплуатации компонента BIW для которого выбирается РМН технология (используя подход TLC) изображен на рисунке 10.8. При рассмотрении потенциальных последствий выбора РМН технологии относительно технологической цепочки производства автомобильного BIW, одним из ключевых вопросов является совместимость выбранной РМН технологии с основными этапами производственного процесса, которые включают: (1) изготовление металлических подкомпонентов штамповкой в пресс-цехе (см. рис. 10.8); (2) компонент РМН или изготовление термопластичного подкомпонента в литьевом цехе; (3) строительство BIW различными процессами соединения в кузовном цехе; а также (4) предварительная обработка и покраска BIW в покрасочном цехе. Следует отметить, что, как указано на рисунке 10.8, закрепленные болтом (то есть, неструктурные) и несущие компоненты BIW (то есть, структурные) имеют несколько другую историю производства. Эти различия обусловлены тем, что, поскольку структурные компоненты интегрированы в раме BIW в кузовном цехе они должны пройти (и соответствовать требованиям) малярного цеха. С другой стороны, нет необходимости проходить болтовые компоненты через окрасочный цех, поскольку они могут быть непосредственно прикреплены к окрашенной раме BIW в сборочном цехе.

Можно взять случай выбора материала для полимерного подкомпонента в качестве примера требования производственной цепочки BIW для РМН технологии. В кузовном цеху основным функциональным требованием к полимерному субкомпонентному материалу является его способность выдерживать высокотемпературные воздействия, вызванные сваркой. С другой стороны, основные функциональные требования к полимерному субкомпонентному материалу относительно его совместимости с покрасочным цехом BIW имеет дело со способностью выбранного материала противостоять механическим, термическим и химическим воздействиям, не разрушающим и не загрязняющим ванны для краски.



**Рис. 10.8** Ключевые этапы жизненного цикла для типичного РМН компонента автомобильного НК.



## 10.6 Заключительные замечания

В этой главе был представлен всесторонний обзор ключевых аспектов технологий литья под давлением, используемых в автомобильных конструкциях BIW. В частности, обсуждались следующие аспекты технологий литья под давлением: (1) фундаментальные концепции, относящиеся к синергетическим взаимодействиям полимер / металл; (2) классификация технологий; (3) основы адгезии полимера / металла и переноса нагрузки; (4) применение методов и средств вычислительной инженерии для моделирования процессов и производительности продукта; и (5) совместимость различных технологий РМН литья под давлением с производственной цепочкой производства автомобильных BIW. Утверждалось, что, хотя использование РМН технологий при изготовлении автомобильного BIW может дать преимущества, связанные с меньшим весом транспортного средства, улучшенной экономией топлива и стоимостью, при выборе этих технологий необходимо учитывать проблемы с истекшим сроком службы транспортного средства. В частности, растущий акцент на устойчивом развитии, сокращении поставок материалов, повышении ответственности производителей, законодательства о возврате продуктов и маркетинге претензий о содержании переработанного материала требует рассмотрения таких вопросов, как восстановление продукта, разборка продукта, извлечение и закупка материалов, а также управление жизненным продуктом.

## Литература

- 1 Grujicic, M., Sellappan, V., Arakere, G. et al. (2008) Computational feasibility analysis of direct-adhesion polymer-to-metal hybrid technology for load-bearing body-in-white structural components. *J. Mater. Process. Technol.*, 195, 282–298.
- 2 Grujicic, M., Sellappan, V., Omar, M.A. et al. (2008) An overview of the polymer-to-metal direct-adhesion hybrid technologies for load-bearing automotive components. *J. Mater. Process. Technol.*, 197, 363–373.
- 3 Grujicic, M., Arakere, G., Pisu, P. et al. (2008) Application of topology, size and shape optimization methods in polymer metal hybrid structural lightweight engineering. *Multidisc Model Mater. Struct.*, 4, 305–330.
- 4 Grujicic, M., Sellappan, V., Mears, L. et al. (2008) Selection of the spraying technologies for over-coating of metal stampings with thermo-plastics for use in direct-adhesion polymer metal hybrid load-bearing component. *J. Mater. Process. Technol.*, 198, 300–312.
- 5 Grujicic, M., Pandurangan, B., Bell, W.C. et al. (2008) A computational analysis and suitability assessment of cold-gas dynamic spraying of glass-fiber reinforced poly-amide 6 for use in direct-adhesion polymer metal hybrid automotive components. *Appl. Surf. Sci.*, 254, 2136–2145.
- 6 Grujicic, M., Sellappan, V., Pandurangan, B. et al. (2008) Computational analysis of injection-molding residual-stress development in direct-adhesion polymer-to-metal hybrid body-in-white components. *J. Mater. Process. Technol.*, 203, 19–36.
- 7 Grujicic, M., Sellappan, V., Arakere, G. et al. (2009) The potential of a clinch-lock polymer metal hybrid technology for use in load-bearing automotive components. *J. Mater. Eng. Perform.*, 18, 893–902.
- 8 Grujicic, M., Sellappan, V., He, T. et al. (2009) Total life-cycle based materials selection for polymer metal hybrid body-in-white automotive components. *J. Mater. Eng. Perform.*, 18, 111–128.
- 9 Grujicic, M., Sellappan, V., Kotrika, S. et al. (2009) Suitability analysis of a polymer metal hybrid technology based on high-strength steels and direct polymer-to-metal adhesion for use in load-bearing automotive body-in-white applications. *J. Mater. Process. Technol.*, 209, 1877–1890.
- 10 Grujicic, M., Sellappan, V., Arakere, G. et al. (2010) Investigation of a polymer metal inter-locking technology for use in load-bearing automotive components. *Multidisc Model Mater. Struct.*, 6, 23–44.
- 11 Korson, C. and Stratton, D. (2005) An integrated automotive roof module concept: plastic-metal hybrid and polyurethane composite technology. *Proceedings of the 5th SPE Annual Automotive Composites Conference*, Troy, MI. Newport, CT, September 14–15, 2005, Society of Plastics Engineers.

- 12 Zoellner, O.J. and Evans, J.A. (2002) Plastic-mcoавtop hybrid. A new development in the injection molding technology. Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers, San Francisco, CA. Newport, CT. Society of Plastics Engineers. 1–4.
- 13 Rosato, D. (2007) Structurally Sound Plastic/Mcoавtop Hybrid Molding Emerging, <http://www.omnexus.com/resources/editorials.aspx?id=16483> (accessed 16 August 2017)
- 14 Leaversuch, R.D. (2003) Plastic-Mcoавtop Hybrids Make Headway On and Off the Road <http://www.ptonline.com/articles/plastic-mcoавtop-hybrids-makeheadway-on-and-off-the-road> (accessed 16 August 2017)
- 15 Recktenwald, D. (2005) Advanced adhesives foster hybrid structures. *Machine Design*, 77 (21), 124–126.
- 16 Awaja, F., Gilbert, M., Kelly, G. et al. (2009) Adhesion of polymers. *Prog. Polym. Sci.*, 34, 948–968.
- 17 Lucchetta, G., Marinello, F., and Bariani, P.F. (2011) Aluminum sheet surface roughness correlation with adhesion in polymer mcoавtop hybrid overmolding. *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, 60, 559–562.
- 18 Ramani, K. and Moriarty, B. (1998) Thermoplastic bonding to mcoавtops via injection molding for macro-composite manufacture. *Polym. Eng. Sci.*, 38, 870–877.
- 19 Ramani, K. and Zhao, W. (1997) The evolution of residual stresses in thermoplastic bonding to mcoавtops. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 17, 353–357.
- 20 Ramani, K. and Tagle, J. (1996) Process-induced effects in thin-film bonding of PEKEKK in mcoавtop-polymer joints. *Polym. Compos.*, 17, 879–886.
- 21 Shah, P. (2005) Adhesion of injection molded PVC to silane primed steel. MSc thesis. University of Cincinnati, Cincinnati, OH.
- 22 Sasaki, H., Kobayashi, I., Sai, S. et al. (1998) Direct adhesion of nylon resin to stainless steel plates coated with triazine thiol polymer by electropolymerization during injection-molding. *Jpn. J. Polym. Sci. Technol.*, 55, 470–476.
- 23 Erickson, P.W. and Pleuddemann, E.P. (1974) *Composite Materials 6*, Academic Press, New York.
- 24 Pleuddemann, E.P. (1991) *Silane Coupling Agents*, Plenum-Press, New York.
- 25 Salladay, J. and Stevens, J. (2006) *New Business Identification and Development*, Private Communication.
- 26 Berry, D.H. and Namkanisorn, A. (2005) Fracture toughness of a silane coupled polymer-mcoавtop interface: silane concentration effects. *J. Adhes.*, 81, 347–370.
- 27 Mikulec, M. (1997) Feasibility of automotive coatings designed for direct adhesion to TPO materials. Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers, Toronto. Newport, CT. Society of Plastics Engineers.
- 28 Kondos, C.A. and Kahle, C.F., II (1998) Basecoats with Direct Adhesion to TPO. SAE Technical Paper 980708. Published online: February 23, 1998. doi: 10.4271/980708.
- 29 Drummer, D., Schmachtenberg, E., Hylde, G., and Meister, S. (2010) MK2 – a novel assembly injection molding process for the combination of functional mcoавtop surfaces with polymer structures. *J. Mater. Process Technol.*, 210, 1852–1857.
- 30 Marcus, S.A., inventor (1984) Dow chemical company, assignee. Manufacture of draw-redraw cans using steel sheet material film laminated or extrusion coated with a high density polyethylene graft co-polymer. US patent 4, 452, 375, Jun. 5, 1984
- 31 Borges, M.F., Amancio-Filho, S.T., dos Santos, J.F. et al. (2012) Development of computational models to predict the mechanical behavior of friction riveting joints. *Comput. Mater. Sci.*, 54, 7–15.
- 32 Moldflow Corporation 2006 *Moldflow Plastics Insight*, Version 6.0, User Documentation, Framingham, MA.
- 33 Kamal, M.R. and Kenig, S. (1972) The injection molding of thermoplastics Part I. Theoretical model. *Polym. Eng. Sci.*, 12, 294–301.
- 34 Hieber, C.A. and Shen, S.F. (1980) A finite-element/finite-difference simulation of the injection-molding filling process. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 7, 1–32.
- 35 Chiang, H.H., Hieber, C.A., and Wang, K.K. (1991) A unified simulation of the filling and postfilling stages in injection molding Part 1. Formulation. *Polym. Eng. Sci.*, 31, 116–124.
- 36 Kennedy, P. (1995) *Flow Analysis of Injection Molds*, Hanser, Munich.

- 37 Crochet, M.J., Dupret, F., and Verleye, V. (1994) in *Flow and Rheology in Polymer Composites Manufacturing* (ed. S.G. Advani), Elsevier, Amsterdam, 415–461.
- 38 Kietzmann, C.V.L., Van Der Walt, J.P., and Morsi, Y.S. (1998) A free-front tracking algorithm for a control-volume Hele–Shaw method. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 41, 253–269.
- 39 Gupta, M. and Wang, K.K. (1993) Fibers orientation and mechanical properties of short-fiber-reinforced injection-molded composites: simulation and experimental results. *Polym. Compos.*, 14, 367–381.
- 40 Walsh, S.F. (1993) Shrinkage and warping prediction for injection molded components. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 12, 769–777.
- 41 Givler, R.C., Crochet, M.J., and Pipes, R.B. (1983) Numerical predictions of fibers orientation in dilute suspensions. *J. Compos. Mater.*, 17, 330–343.
- 42 Lipscomb, G.G. II, Denn, M.M., Hur, D.U., and Boger, D.V. (1988) The flow of fiber suspensions in complex geometry. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 26, 297–325.
- 43 Rosenberg, J., Denn, M.M., and Keunings, R. (1990) Simulation of non-recirculating flows of dilute fiber suspensions. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 37, 317–345.
- 44 Zheng, R. (1991) Boundary element methods for some problems in fluid mechanics and rheology. PhD thesis. University of Sydney, Sydney, Australia.
- 45 Phan-Thien, N., Zheng, R., and Graham, A.L. (1991) The flow of a model suspension fluid past a sphere. *J. Stat. Phys.*, 62, 1173–1195.
- 46 Phan-Thien, N. and Graham, A.L. (1991) A new constitutive model for fiber suspensions: flow past a sphere. *J. Rheol.*, 30, 44–57.
- 47 Altan, M.C., G  zeri, S.I., and Pipes, R.B. (1992) Anisotropic channel flow of fiber suspensions. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 42, 65–83.
- 48 Tucker, C.L. III, (1991) Flow regimes for fiber suspensions in narrow gaps. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 39, 239–268.
- 49 Guell, D. and Lovalenti, M. (1995) An examination of assumptions underlying the state of the art in injection molding modeling. Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers, Boston. Newport, CT. Society of Plastics Engineers. 728–732.
- 50 Rezayat, M. and Burton, T.E. (1990) A boundary-integral formulation for complex three-dimensional geometries. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 29, 263–273.
- 51 Folgar, F.P. and Tucker, C.L. (1984) Orientation behaviour of fibers in concentrated suspensions. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 3, 98–119.
- 52 Fan, X.J., Phan-Thien, N., and Zheng, R. (1998) A direct simulation of fiber suspensions. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 74, 113–136.
- 53 Phan-Thien, N. and Zheng, R. (1997) in *Flow-induced alignment in composite materials* (eds T.D. Papathanasiou and D.C. Guell), Woodhead, Cambridge, UK, 77–106.
- 54 Jeffery, G.B. (1922) The motion of ellipsoidal particles immersed in viscous fluid. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 102, 161–179.
- 55 Yamane, Y., Kaneda, Y., and Doi, M. (1994) Numerical simulation of semi-dilute suspensions of rodlike particles in shear flow. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 54, 405–421.
- 56 Baaijens, F.P.T. (1991) Calculation of residual stress in injection molded products. *Rheol. Acta*, 30, 284–299.
- 57 Jansen, K.M.B. (1994) Residual stresses in quenched and injection molded products. *Int. Polym. Proc.*, 9, 82–89.
- 58 Boitout, F., Agassant, J.F., and Vincent, M. (1995) Elastic calculation of residual stresses in injection molding: influence of mold deformation and pressure in the liquid. *Int. Polym. Proc.*, 10, 237–242.
- 59 Titomanlio, G. and Jansen, K.M.B. (1996) In-mold shrinkage and stress prediction in injection molding. *Polym. Eng. Sci.*, 36, 2041–2049.
- 60 Zoetelief, W.F., Douven, L.F.A., and Ingen-Housz, A.J. (1996) Residual thermal stresses in injection molded products. *Polym. Eng. Sci.*, 36, 1886–1896.
- 61 Caspers, L. (1996) Vlp, an integral approach to the simulation of injection molding. PhD thesis. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands.
- 62 Bushko, W.C. and Stokes, V.K. (1995) Solidification of thermoviscoelastic melts Part 1. Formulation of model problem. *Polym. Eng. Sci.*, 35, 351–364.

- 63 Bushko, W.C. and Stokes, V.K. (1996) Solidification of thermoviscoelastic melts Part 2. Effects of processing conditions on shrinkage and residual stresses. *Polym. Eng. Sci.*, 35, 365–383.
- 64 Bushko, W.C. and Stokes, V.K. (1996) Solidification of thermoviscoelastic melts. Part 3. Effects of mold surface temperature differences on warping and residual stresses. *Polym. Eng. Sci.*, 36, 322–335.
- 65 Bushko, W.C. and Stokes, V.K. (1996) Solidification of thermoviscoelastic melts. Part 4. Effects of boundary conditions on shrinkage and residual stresses. *Polym. Eng. Sci.*, 36, 658–675.
- 66 Bird, R.B., Armstrong, R.C., and Hassager, O. (1987) Dynamics of polymeric liquids, in *Fluid Mechanics*, 2nd edn, vol. 1, John Wiley & Sons, Inc, New York.
- 67 Tanner, R.I. (1988) *Engineering Rheology*, 2nd edn, Oxford Press, London.
- 68 Ferry, J.D. (1980) *Viscoelastic Properties of Polymers*, 3rd edn, Wiley, New York.
- 69 Papathanasiou, T.D. and Guell, D.C. (eds) (1997) *Flow-induced Alignment in Composite Materials*, Woodhead, Cambridge, UK.
- 70 Schapery, R.A. (1968) Thermal expansion coefficients of composite materials based on energy principles. *J. Compos. Mater.*, 2, 380–404.
- 71 Advani, S.G. and Tucker, C.L. III, (1987) The use of tensors to describe and predict fibers orientation in short fiber composites. *J. Rheol.*, 31, 751–784.

# 11 Ультразвуковое соединение легких легированных/фиброармированных полимерных гибридных конструкций

*Eduardo E. Feistauer<sup>1</sup> и Sergio T. Amancio-Filho<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт материаловедения, механики материалов, процессов соединения твердого тела, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Центр материаловедения и прибрежных исследований, Geesthacht, Германия

<sup>2</sup>Действующий филиал: Институт материаловедения, соединения и формирования, Технологический университет Граца, Грац, Австрия

## 11.1 Введение

Современная легкая конструкция автомобильных конструкций стал успехом для производителя оригинального оборудования (OEMs). Из-за строгой экологической политики конструкторы и инженеры вынуждены выбирать более легкие, пригодные для вторичной переработки и устойчивые материалы для снижения расхода топлива и выбросов [1, 2]. Примерами легких материалов, используемых в транспортных конструкциях, являются высокопрочные стали, магний, алюминий, титан, полимеры и армированный волокнами полимер [3,4].

В этом контексте комбинация армированных волокном полимеров с легкими сплавами для изготовления многокомпонентных или гибридных структур обеспечивает инновационный спектр материалов с превосходными механическими свойствами, физико-химической стойкостью и легким весом. Однако, соединение легких сплавов с волокнистыми полимерами (LM-FRP) усложняется из-за их физико-химического различия, приводящего к меньшей взаимной смешиваемости [5]. Таким образом, для этой цели существует открытая ниша для новых, высокопроизводительных и экономически эффективных технологий соединения [6]. Недавно были предложены новые методики соединения, такие как Фрикционное соединение [7-9] (Глава 3), Фрикционное заклепывание [10] (Глава 8), литье под давлением [11, 12] (Глава 10), и методы сварки, такие как лазер [13,14] (Глава 5), индукция [15,16] (Глава 4), и ультразвуковая сварка металла [17, 18]. Эти новые подходы направлены на уменьшение ограничений современного адгезивного склеивания (т.е. длительное время отверждения и длительная предварительная обработка поверхности) и способы механического крепления (то есть повышенная концентрация напряжений из-за сквозного отверстия и увеличение веса, связанного с крепежными элементами).

Сила соединений LM-FRP как правило, определяется типом адгезионных сил и механических устройств блокировки, обычно ограниченных тонким слоем на разделе соединения. Следовательно, в LM-FRP соединениях без заклепок, характеристики передачи нагрузки и механические свойства вне плоскости обычно ниже, чем у соответствующих базовых материалов. Чтобы преодолеть этот недостаток и полностью изучить положительные индивидуальные свойства легких сплавов и полимерных композитов в гибридной структуре, часто требуются новые методики соединения, приводящие к прочным механизмам соединения LM-FRP на границе раздела.

Недавно было применено усиление по всей толщине соединительных деталей, чтобы повысить механические характеристики и, в частности, повысить устойчивость к повреждениям соединения ЛС-ВП. Усиления обычно интегрируются на поверхности металлических деталей, в то время как композит добавляется слой за слоем в процессе совместного отверждения или вакуумной инфузии [19, 20]. Примеры технологий, о которых сообщалось, для производства свойств металлической 3D поверхности (например, булавчатые анкерные зоны) включают Surfi-Sculpt™ [20-24], Производство аддитивного слоя (ALM) [25], и методы сварки, такие как Холодный перенос металла (CMT) [19] и Дуговая ударная микросварка (APMW) [26].

Обработка Surfi-Sculpt™ основана на электронно-лучевой технологии [24], которая локально плавит металлическую поверхность, создавая отверстия и выступы, на которые ламинируется композит. Когда структурное соединение Surfi-Sculpt™ в сочетании с

композитными ламинатами, технология также известна как Comeld™ [20]. Этот подход был продемонстрирован для увеличения несущей способности соединения и поглощения энергии до отказа. Хотя вариант на основе лазера Surfi-Sculpt™ Недавно был представлен как лучшая альтернатива [23], большинство технологических знаний опирается на вариант электронного пучка. Этот вариант процесса работает в вакууме, что ограничивает размер металлической части. Кроме того, совместная сборка путем компоновки композита делает технологию Comeld™ трудоемкой. Сварочные технологии (CMT и APMW), также как ALM использует сварку плавлением, чтобы сварить или нанести слой для создания микропин на поверхности металлической детали. Следовательно, в качестве процессов на основе плавления ожидаются такие проблемы, как крекинг при затвердевании, водородное охрупчивание и испарение легирующих элементов. Другими ограничениями этих технологий структурирования поверхности металла являются, как правило, ограниченная свобода геометрии арматуры, сниженная геометрическая воспроизводимость отдельных штифтов и ограниченные производственные показатели (особенно в случае ALM).

В этой главе представлен новый подход к изготовлению будущих устойчивых к повреждениям и ударопрочным гибридным конструкциям LM-FRP. Новая технология Ультразвукового соединения [27] сочетает в себе использование ультразвуковой энергии для соединения поверхностно-структурированных металлических деталей, произведенных литья металла под давлением [28]) к армированным волокном термопластичным композитам. Соединение осуществляется посредством механической блокировки (благодаря усилению по всей толщине на металлической поверхности) и силам адгезии, создаваемым тонким слоем расплавленного полимера, уплотненным на границе раздела металл/композит. Первая часть главы описывает производственную линию структуры литья металла под давлением и принципы соединительного процесса, а также его потенциальные приложения. Во второй части, тематическое исследование по частям структуры литья металла Ti-6Al-4V под давлением соединенного к армированному стекловолокном полиэфиримиду (GF-PEI) был использован для демонстрации осуществимости U-соединения. Представлены отдельные результаты по измерению температуры, микроструктурным особенностям и механическим характеристикам гибридных соединений. Наконец, кратко обсуждаются преимущества и недостатки этой новой технологии соединения.

## **11.2 Технологический маршрут MIMStruct (инжекционное формование из металлического порошка)**

Концепция производства структуры литья под давлением основана на металлическом литье под давлением, которое позволяет производить металлические детали с поверхностной структурой с превосходным допуском размеров, чистотой поверхности и высокой воспроизводимостью [29]. Концепция структуры литья под давлением была запатентована Helmholtz-Zentrum Geesthacht в 2010 [28]. Он заключается в использовании полимерно-порошкового сырья для литья под давлением с металлической частью с поверхностной структурой, которая будет пригодна для дальнейшего соединения с полимерными и композитными материалами после процесса спекания. На Рис. 11.1 представлено схематическое изображение производственного цикла используя связку восково-полимерная комбинация.

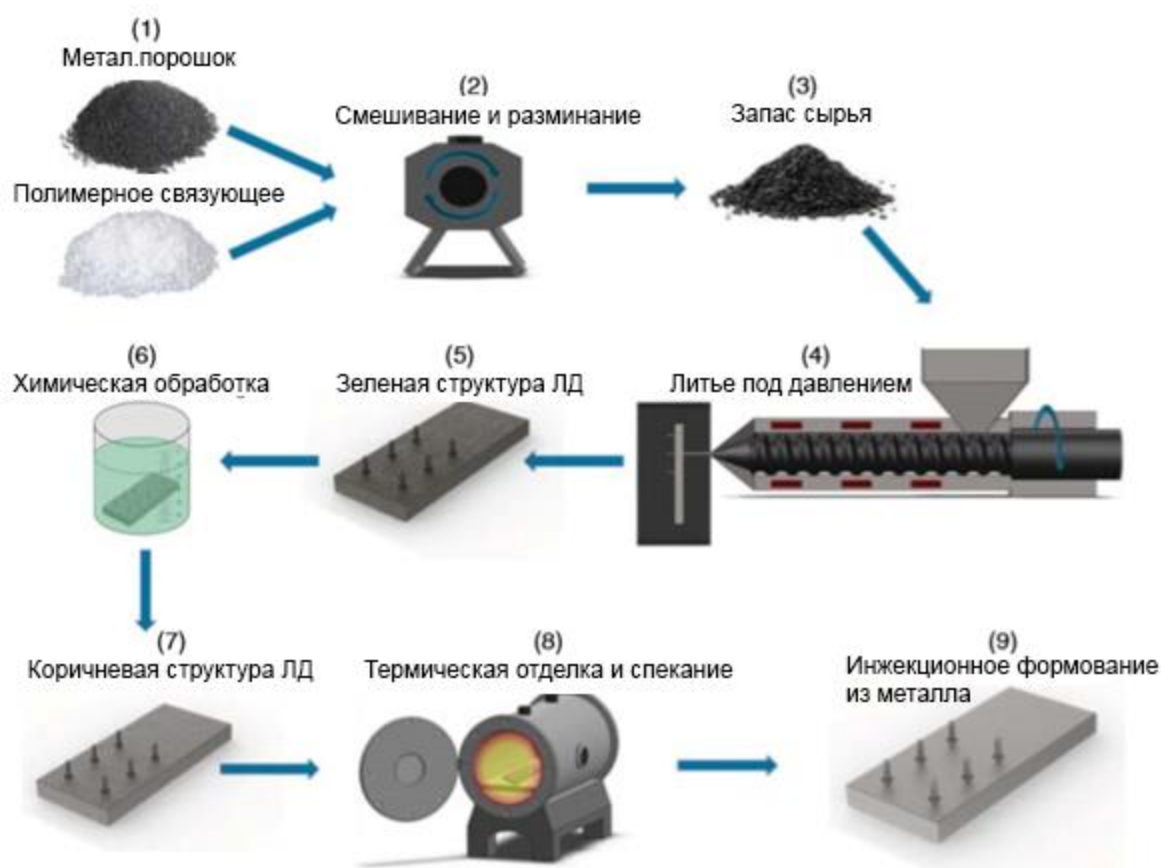


**Рис. 11.1** Маршрут MIMStruct.

В начале производственного цикла (этап 1) полимерное связующее смешивают и смешивают с металлическим порошком (этап 2) для получения исходного сырья (этап 3). Полимерное связующее действует как среда для формирования и удержания металлических частиц вместе, регулируя вязкость исходного сырья для обработки с помощью обычного литья под давлением (этап 4). Полость литейной формы имеет отрицательную увеличенную форму желаемой MIMStruct для компенсации частичной усадки при спекании [29]. После удаления из формы литая деталь называется «зеленой» (этап 5). После этого он подвергается двухстадийному процессу удаления покрытия, известному как «химическое и термическое удаление покрытия» (соответственно этапы 6 и 8).

Химическое связывание предназначено для удаления неполярного содержимого (обычно парафина или низкомолекулярных полимеров) связующей системы, ответственного за псевдопластичность сырья, через растворители. Эта стадия приводит к открытой микропористой структуре [29], удерживаемой структурно полимером с полярной цепью; после этой стадии деталь называется «коричневой» (шаг 7) и готова к термической обработке. На этой стадии, которая проводится в контролируемой инертной атмосфере, все оставшееся полимерное связующее удаляется из части MIMStruct (Шаг 8). Последняя стадия состоит в спекании (также представленном на шаге 8 для упрощения) коричневой части в атмосфере высокого вакуума и высоких температур, что приводит к готовности части MIMStruct к соединению (Шаг 9).

### 11.3 Ультразвуковое соединение: принципы процесса

Концепция ультразвукового соединения объединяет ранее описанный производственный MIM маршрут для соединения в композитную часть с ультразвуковой энергией. Эта синергетическая комбинация технологий позволяет создавать прочные гибридные



структуры новым, более быстрым и более эффективным способом. Процесс присоединения можно разделить на пять этапов, как показано на Рисунке 11.2.

Во-первых, детали фиксируются между ударником и сонотродом с помощью штифтовых элементов MIMStruct в контакте с композитной поверхностью (Рис. 11.2(1)). Во-вторых, кончик сонотрода касается верхней части MIMStruct, и статическое давление прикладывается перпендикулярно к контактным поверхностям (рис. 11.2(2)). На третьем этапе сонотрод начинает вибрировать при движении вперед-назад параллельно поверхности контакта с высокими частотами (обычно между 20 и 40 кГц), а амплитуды обычно колеблются от нескольких микрометров до 52 мкм. Взаимодействие между стержнями - приводимое в движение ультразвуковой вибрацией и композитной поверхностью - производит тепло от трения, локально увеличивая температуру на границе раздела между металлическими стержнями и композитным материалом.

Давление и механическая вибрация сонотрода поддерживаются постоянными в течение определенного времени соединения, что в сочетании с тепловым выделением при трении вызывает размягчение или плавление полимерной матрицы, расположенной прямо под стержнями. Это позволит вставить стержень в композит для запуска (Рисунки 11.2(3)).

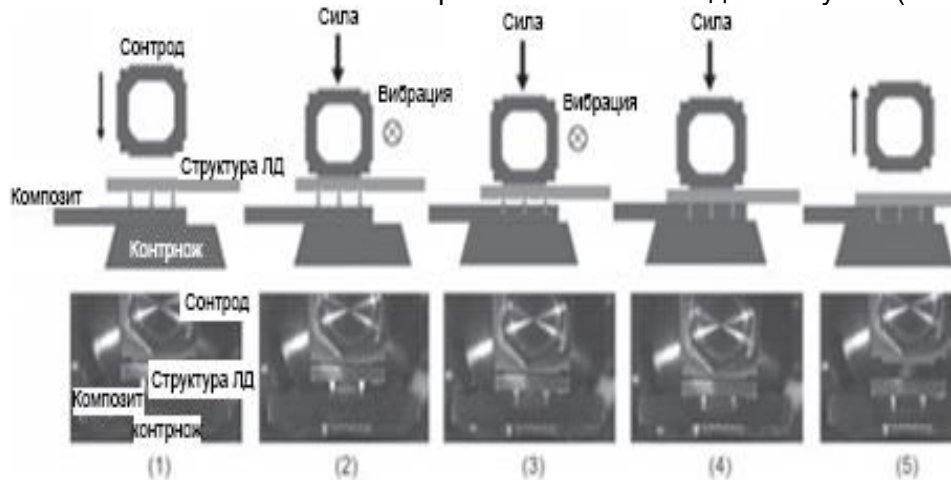


**Рис. 11.2** Схематическое представление процесса U-соединения. (1) Расположение соединяемых частей; (2) применение ультразвуковой вибрации и осевой силы; (3) размягчение полимера нагреванием от трения на границе раздела и началом введения штифта; (4) уплотнение полимеров; и (5) конец процесса и ретракция сонотрода.

Вставные штифты вытесняют некоторый объем размягченного или расплавленного полимера из области соединения. Изгнанный расплавленный полимер будет дополнительно консолидироваться на стыке линии раздела. После полной установки штырей основание пластины MIMStruct попадает на верхнюю поверхность полимерного композита. Таким образом, сжатый расплавленный полимер смачивает поверхность MIMStruct, и между материалами создаются силы адгезии (рис. 11.2 (4)). Следовательно, соединение, прочно удерживаемое комбинацией механической блокировки и сил сцепления, достигается. На последнем этапе (рис. 11.2 (5)) статическое давление снимается, а сонотрод отводится от присоединенной гибридной структуры.

Объединение механических блокирующих и адгезионных сил увеличит механические свойства соединений. Механические характеристики гибридных соединений могут быть улучшены в сложных режимах нагрузки благодаря добавлению специальных анкерных функций в выступающие стержни, такие как конические, сферические, выпуклые или похожие на стрелки головки (рис. 11.3), как сообщается в литературе [19]. Кроме того, эффект усиления по всей толщине, создаваемый штифтами над соединенным стыком по линии раздела, поможет снизить скорость распространения трещин и избежать катастрофического разрушения.

Использование ультразвуковой энергии вызывает очень эффективное преобразование механической работы в тепловую энергию помимо положительного эффекта в отношении механических свойств, [30,31] и уменьшает время соединения, поскольку время цикла соединения сборки очень короткое (обычно <2 с).

**Рис. 11.3** Вероятные формы элементов усиления.



Следовательно, можно ожидать снижения затрат на окончательную сборку по сравнению со сложными и трудоемкими современными процессами ламинирования.

### 11.3.1 Параметры процесса

Технологические параметры и виды ультразвукового соединения аналогичны описанным для ультразвуковой сварки металлов [32] и термопластов [30, 31]; они напрямую связаны с типом выбранного режима управления присоединением. Основные параметры процесса относительно просты и могут включать энергию соединения ( $E_j$ ), амплитуду колебаний соноотрода ( $A_0$ ), силу соединения ( $F$ ), силу зажима ( $CF$ ), и время соединения ( $t$ ).

Обычные режимы управления, доступные для карданного соединения, зависят от возможностей конкретного оборудования и могут включать в себя соединение по энергии, времени, коллапсу и пиковой мощности. Эти режимы управления выбираются в основном в качестве критерия для контроля длительности применяемой ультразвуковой вибрации. Доступные на рынке ультразвуковые сварочные аппараты с микропроцессорным управлением позволяют точно контролировать параметры соединения, обычно работающие в «замкнутой» системе [30]. Это позволяет параметрам обратной связи, зарегистрированным системой, регулировать параметр соединения во время процесса. Например, когда ультразвуковое соединение выполняется в режиме с регулированием энергии, ультразвуковая вибрация поддерживается постоянной до тех пор, пока не будет достигнуто предварительно установленное значение энергии, независимо от начальной настройки оставшихся параметров соединения. Аналогично, это также происходит, когда выбираются режимы времени, коллапса или пиковой мощности; ультразвуковая вибрация поддерживается постоянной до тех пор, пока во время соединения не будет достигнуто определенное предварительно установленное время, расстояния сжатия или пиковое значение мощности, соответственно.

Соединение с помощью управления энергией является предпочтительной стратегией для ультразвукового соединения, чтобы лучше контролировать выработку тепла и уменьшать деградацию полимерной матрицы. Кроме того, система соединения может легко компенсировать неровности поверхности, возникающие из тканого армированного волокна. В этом режиме управления подача энергии при объединении регулируется интегралом мощности по времени [30, 31]. Следовательно, параметр «Время соединения» является зависимой переменной, автоматически настраиваемой системой соединения для обеспечения необходимого количества энергии [32]. Подача энергии в режиме с контролем энергии может быть описана как:

$$E_i = Pxt_i \text{ (J)} \quad (11.1)$$

где  $P$  это сила и  $E_i$  это энергия поставляемая при постоянном  $t_i$ . Мощность, необходимая для запуска и поддержания вибрации соноотрода, зависит от предварительно установленной силы соединения (нормальная сила, приложенная параллельно вибрации соноотрода), амплитуды колебаний соноотрода и кинематического коэффициента трения материала. Соноотродная вибрация останавливается, когда  $E_i$  достигает указанной энергии

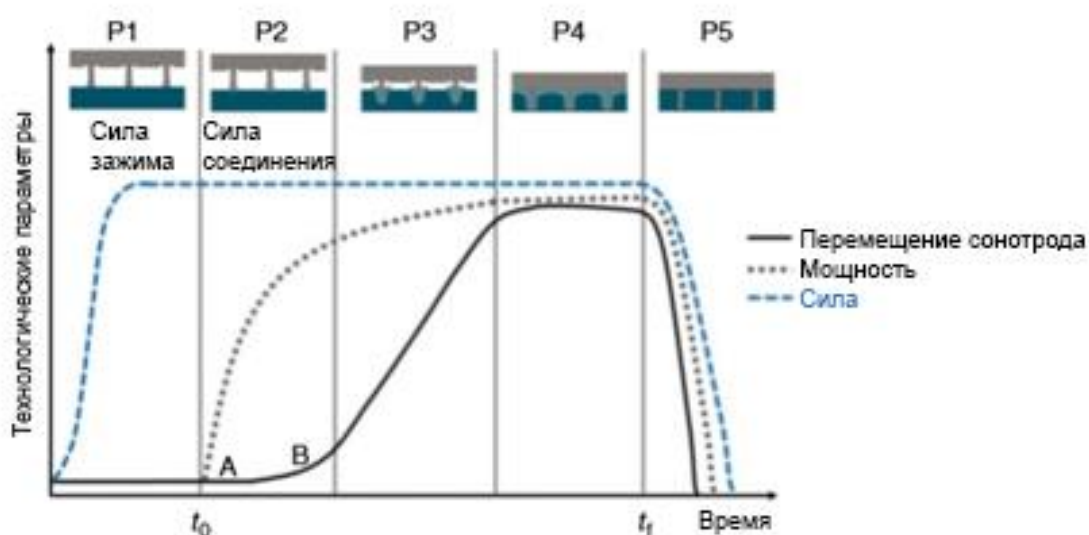
соединения ( $E_j$ ). Некоторые выводы могут быть получены из этого уравнения. Для фиксированного значения энергии соединения установки, чем выше амплитуда колебаний и сила соединения, тем выше мощность, требуемая системой, и, как следствие, короче будет время соединения. Тем не менее, комбинация параметров амплитуды ( $A_0$ ) и сила ( $F$ ) управляет мощностью, необходимой для поддержания колебаний сонотрода во время ультразвукового соединения, что влияет на потребление энергии. Кроме того, при выборе приложенного усилия необходимо учитывать жесткость и механические свойства штыревых элементов, чтобы избежать их отклонения под действием пластической деформации.

$E_j$  прямо пропорционально выделению тепла и может быть связано с такими явлениями, как изменения вязкости и объема расплавленного полимера, термическое образование дефектов (например, разрушение полимера), что наблюдается для других процессов соединения на основе трения [33, 34]. Чтобы контролировать процесс последующего соединения, современные ультразвуковые системы обычно позволяют контролировать и регистрировать смещение сонотрода и подаваемую мощность; эти контрольные данные могут быть использованы для оценки воспроизводимости процесса и качества соединения.

### 11.3.2 Этапы процесса

Ультразвуковое соединение может быть разделено на пять различных фаз процесса в соответствии с изменениями параметров процесса и выделением тепла. Типовая диаграмма фаз процесса ультразвукового соединения схематично представлена на рис. 11.4. Поскольку температуры процесса обычно значительно ниже температур отжига или фазового превращения высокопрочных и жаростойких легких металлов, таких как титановые сплавы, металлическая деталь MIMStruct, как правило, не подвергается металлургическому превращению во время процесса. Следовательно, физические и химические превращения обычно ограничиваются полимерной частью.

Рис. 11.4 фазы процесса ультразвукового соединения. P1 - Достижение контакта между стержнями MIMStruct и поверхностью композита; P2 - Кулоновское трение и нестационарное вязкое рассеяние; P3 - Установившееся вязкое рассеяние; P4 - Полная установка стержней и создание сил сцепления на стыке раздела; и P5 – консолидация соединения.



На первом этапе процесса (рис. 11.4, этап P1) кривая силы резко увеличивается из-за приложения нормальной силы, благодаря чему достигается физический контакт между поверхностью штыря и композита. В обычной процедуре соединения усилия зажима и

соединения сохраняются на одном уровне; следовательно, кривая силы остается постоянной в течение последующих фаз процесса.

Как только начинается вибрация сонотрода (фаза P2), наблюдается резкое увеличение хода кривой мощности, в то время как смещение сонотрода начинает слегка увеличиваться. На этом этапе для запуска вибрации сонотрода требуется электрическая энергия. Первоначальный тепловой механизм в этой фазе, который, как считается, длится долю секунды из-за высокой частоты вибрации, основан на кулоновском [35, 36] или явлении твердого трения (область А в P2). В этот короткий период поверхностные микроразрывы обеих частей пластически деформируются, выделяя тепло, как известно из других методов, основанных на трении [37-39], но смещение сонотрода обычно не обнаруживается. Также, энергия рассеивается через межмолекулярное трение, которое можно описать модулем потерь полимера (противофазный модуль) [40] поскольку полимерная матрица представляет собой вязкоупругий материал, подверженный синусоидальной деформации. Сочетание этих механизмов повысит температуру и локально расплавит небольшой объем полимерной матрицы прямо под штырями. Созданный небольшой объем расплавленного полимера позволит разместить и позволить стержням MIMStruct начать проникать в композит. Вследствие перехода от рассеяния тепла к твердому телу к вязкому теплообмену становится нестабильным, вследствие чего смещение сонотрода (то есть проникновение штыря) нелинейно возрастает со временем (область В в P2). Поэтому P2 обычно называют нестационарной фазой вязкой диссипации [33].

На третьем этапе (P3) выработка тепла становится стабильной, и вокруг вибрирующих штырей образуется большой объем матрицы расплавленного полимера; предполагается, что из-за баланса между плавлением полимера и скоростью вытекания расплавленного материала (создается сжатый поток расплавленного полимера), подвод тепла и отток тепла уравниваются. Соответственно, достигается стационарный режим вязкой диссипации, который приведет к линейному смещению сонотрода. Во время этой фазы тепло генерируется и поддерживается только за счет вязкого рассеяния от внутреннего синусоидального напряжения в расплавленном полимере. В случае армированных волоком полимеров штыри, скорее всего, сместят несущие волокна; однако, некоторые локальные повреждения волокна могут произойти во время этой фазы. Вибрационное движение штырей сдерживается соседним материалом по мере увеличения глубины введения штыря в композит. Чтобы компенсировать потери при движении, системе для ультразвукового соединения необходимо постоянно увеличивать электрическую мощность для поддержания постоянной вибрации сонотрода, как показано на рисунке 11.4, при P3.

К концу фазы P4 достигается полное проникновение стержней, и металлическая поверхность детали MIMStruct смачивается сжатым расплавленным полимером. Во время этой фазы охлаждение (например, принудительный воздух) может применяться или нет для консолидации расплавленного полимера, создавая силы адгезии между соединяющимися частями. На этом этапе процесс соединения заканчивается, и можно использовать удерживающее давление для компенсации усадки полимера.

На заключительном этапе (P5) сонотрод отводится от соединения, в результате чего все кривые возвращаются к нулю. Стоит подчеркнуть, что схема процесса, описанная на рис. 11.4, соответствует идеальному условию соединения; параметрами процесса, а также материалами (например, армированных и неармированных полимеров), может быть изменена форма кривых.

### 11.3.3 Переменные величины процесса

Ультразвуковое соединение впервые было продемонстрировано использование ультразвуковой точечной сварки металла в качестве источника ультразвуковой энергии. Режим параллельной вибрации сонотрода позволяет генерировать более высокую мощность и доставлять ее в зону соединения. Кроме того, как указал Wagner et al. [34] для обычной (то есть без армирования сквозной толщины) ультразвуковой сварки металлических листов алюминия в полимер, армированный углеродным волокном (CFRP), параллельное колебание позволяет создавать прямой контакт между волокнами нагрузки на подшипник и металлом без чрезмерного повреждения углеродных волокон. Когда

металлическая поверхность должна быть сохранена от проводов меток, полученных в результате контакта с соединительным инструментом, альтернативно может использоваться вариант вибрации перпендикулярного сонотрода, обычно применяемый при обычной ультразвуковой сварке полимером. В этом случае вибрацию сонотрода следует приложить к поверхности полимерной части, перпендикулярной области соединения. Это направлено на поддержку процесса преобразования ультразвуковой энергии в тепловую энергию путем внутреннего трения в полимерной части [41]. Два варианта процесса ультразвукового соединения представлены на рисунке 11.5.

### 11.3.4 Возможные варианты применения

Конструкции, предназначенные для применения в транспортном секторе, требуют высокопрочных и ударопрочных металлических и композитных соединений. Поэтому концепция ультразвукового соединения предлагает широкий спектр возможных вариантов применения. Примеры, приведенные на рис. 11.6, включают в себя применение в кузовных конструкциях автомобилей, таких как локальное усиление металлических конструкций композитными элементами для повышения ударопрочности (например, гибридные металлокомпозитные В-колонны, рис. 11.6 (а)). Другие примеры предусмотрены для основных конструкций самолетов (рис. 11.6 (b)), а также для металлических соединителей при строительстве или ремонте армированных волокном полимерных конструкций, применяемых на легких крышах и фасадах (Рис. 11.6(с)).

### 11.4 Ситуационное исследование Ti-6Al-4V/GF-PEI соединения

Выбор материала для ситуационного исследования был основан на его актуальности для применения для легких автомобильных конструкций. Четырех и шестистержневые гибридные соединения изготовили с помощью технологии ультразвукового соединения и оценены с точки зрения микроструктуры, локальных и общих механических характеристик.

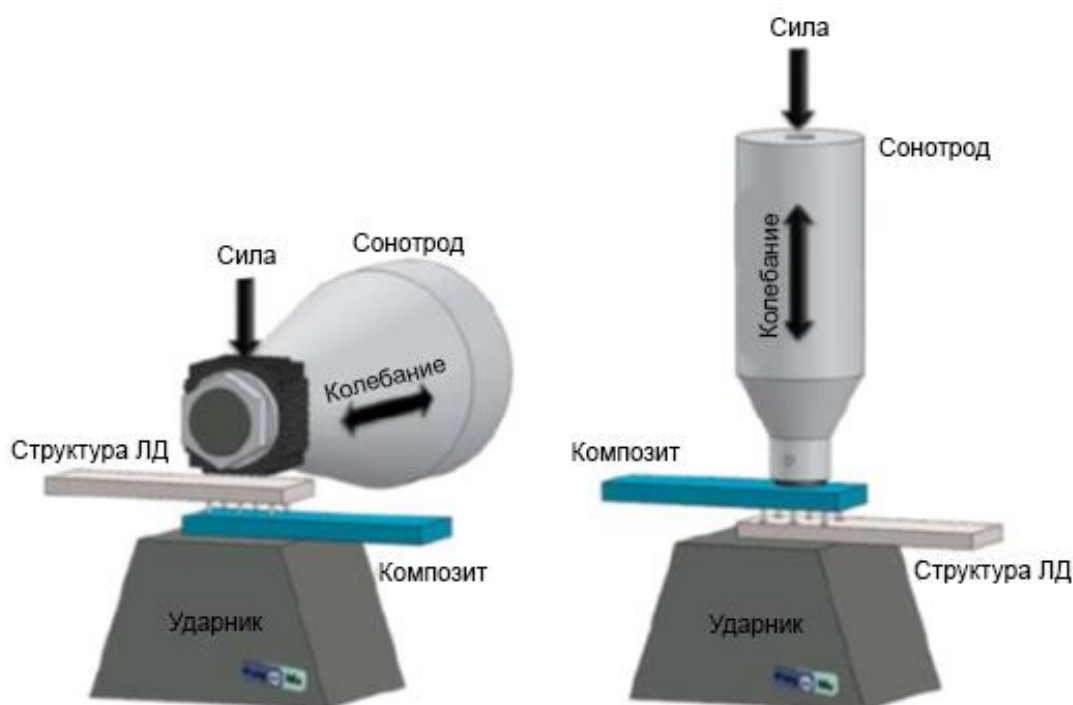


Рис. 11.5 Варианты ультразвукового соединения. Параллельные и перпендикулярные колебания сонотрода относительно зоны соединения.



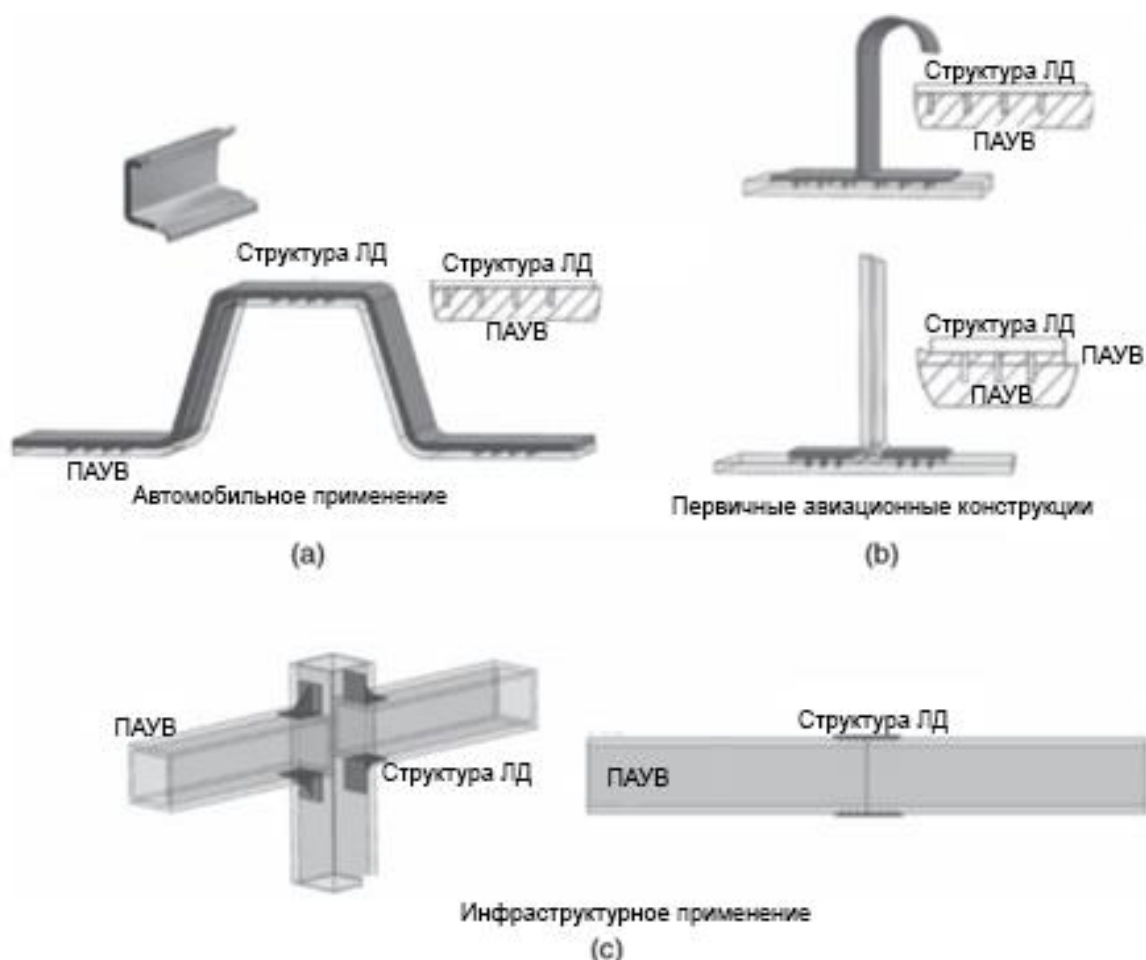


**Рис. 11.6** Примеры потенциального применения метода ультразвукового соединения в автомобильной, аэрокосмической и инфраструктурной сферах.

## 11.4.1 Материалы

### 11.4.1.1 Часть MIMStruct

Часть MIMStruct гибридных соединений состоит из сплава Ti-6Al-4V. Предварительно легированный и газораспыленный сферический порошок из TLS Technik был использован для приготовления сырья, в котором частицы порошка имели средний диаметр менее 45 мкм и класс 23 согласно ASTM B348-13 [42]. Порошок титана смешивали с системой связующих (60wt% парафин, 35wt% полиэтилен-винилацетатный сополимер, и 5wt% стеариновая кислота) в соотношении 1:9, замешивают и подвергают стадии гомогенизации, осуществляемой в одном цикле литья под давлением без заполнения формы в машине ARBURG 320-S. Основные технологические параметры MIMStruct приведены в Таблице 11.1.

Химическая очистка проводилась в системе химической очистки Lomi EBA-50 в цикле 900 мин достигая максимальной температуры 40°C. Термическое связывание и спекание проводили в одной и той же печи с холодными стенками (Xerion XVAC) при относительной температуре 600 и 1300°C. Контролируемая атмосфера аргона использовалась во время термической очистки и высокого вакуума во время спекания.

Рис. 11.7(а) иллюстрирует как спеченный четырех- и шестиконусный стержневые части MIMStruct используются в данной работе, в то время как Рис. 11.7(б) показывает подробную геометрию конических штифтов. Микроструктура производимой MIMStruct типична для α-β Ti-6Al-4V сплава изготовленного методом литья под давлением металла [43].

**Таблица 11.1** Технологические параметры инжестирования металла.

|                       | Доза                     | Расход       | Часть объема | Время<br>заполнения |
|-----------------------|--------------------------|--------------|--------------|---------------------|
| Объемные<br>параметры | 10 ксм                   | 15ксм/с      | 10.5 ксм     | 2с                  |
|                       | Давление<br>впрыскивания | Время        |              |                     |
| Параметры             | pressure                 | переключения |              |                     |
| инжестирования        | 440 бар                  | 0.5 с        |              |                     |
|                       | Время                    | Давление 1   | Время        | Давление 2          |
| Время удержания       | удержания 1              |              | удержания 1  |                     |
| и давление            | 1с                       | 200 бар      | 1с           | 50бар               |
| Температура           | Зона 1                   | Зона 2       | Зона 3       | Форсунка            |
| ствола                | 80°C                     | 100°C        | 120°C        | 120°C               |
| Температура           | Зона 1                   | Зона 2       |              |                     |
| пресс-формы           | 55°C                     | 60°C         |              |                     |

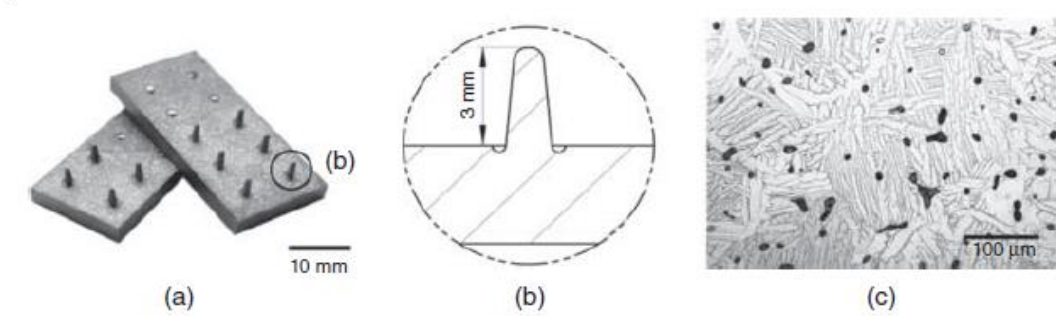


**Рис. 11.7** Часть MIMStruct в состоянии после спекания Ti-6Al-4V (а), конические стержни с круглым наконечником (b) и микроструктура Ti-6Al-4V (с).

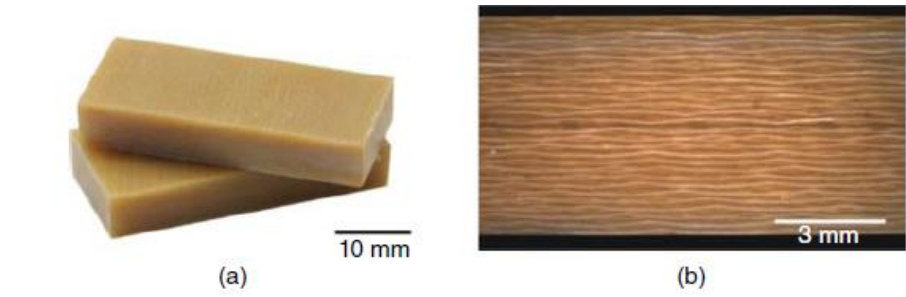


**Рис. 11.8** (а) GF-PEI композитная часть и (b) микроструктура GF-PEI композитного слоя.

Он имеет полностью пластинчатую микроструктуру  $\alpha$ -колони и  $\beta$ -фазу, распределенную по границам зерен, как показано на рисунке 11.7(с). Остаточная пористость  $4.4 \pm 0.7\%$  было измерено цифровым изображением с использованием программного обеспечения Image J.



### 11.4.1.2 Композитная часть

6.35 мм - армированный стекловолокном полиэфиримид (GF-PEI) с содержанием волокон 50 об.% и последовательностью укладки в слои [0,90]<sup>14</sup>, применимой для TENCATE. GF-PEI - аморфный полиэфиримидный термопластичный композит, сертифицированный Аэробусом и Боингом для первичных и вторичных структурных применений [44]. Измерительные листы 15 X 35 X 6.35 мм обработаны для производства соединений (Рис. 11.8(a)). Микроструктура GF-PEI представлена на рис. 11.8(b).

### 11.4.1.3 Ход выполнения соединения

Соединительные части зафиксированы в конфигурации с наложением, и ультразвуковая вибрация применена к верхней поверхности MIMStruct параллельно зоне соединения, как показано на Рис. 11.1. Соединения изготовлены в имеющемся в продаже металлическом ультразвуковом сварочном аппарате (Ultraweld L20, Branson Ultrasonics). Соединительное оборудование позволяет при работе в режиме управления энергией точно контролировать энергию соединения ( $E_j$ ), давление зажима ( $CP$ ), давление соединения ( $JP$ ) и амплитудное колебание сонотрода ( $A_0$ ). Частота колебаний сонотрода зафиксирована на 20 кГц.

**Рис. 11.9** Наконечник сонотрода (инструмент для соединения)

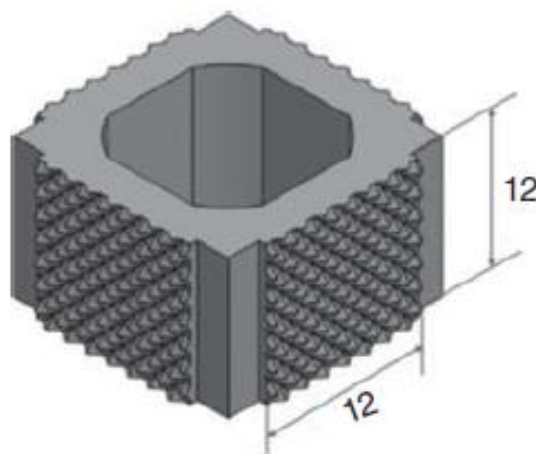


**Таблица 11.2** Параметры соединения.

| Стержни<br>N° | $E_j$ (J) | CP (бар) | JP (бар) | $A_0$ (μm) | Амплит.порог<br>[J] |
|---------------|-----------|----------|----------|------------|---------------------|
| 4             | 2200      | 1.03     | 1.03     | 32/52      | 500                 |

Инструмент для соединения состоял из стандартного стального наконечника сонотрода (Рис. 11.9) с накатанной поверхностью (12 x 12 мм). Параметры соединения, использованные в этом тематическом исследовании, были предварительно оптимизированы в диапазоне  $E_j$ : 1500-3500, CP: 0.7-1.7бар, JP: 0.7-1.7 бар,  $A_0$ :16-52 μm в отдельном проекте. Оптимизированный набор параметров соединения приведен в таблице 11.2.

Порог переключения амплитуды был 500 J, другими словами, в момент, когда присоединяющаяся система доставила это количество энергии, амплитуда увеличивается с 32 до 52 μm. Результирующие циклы объединения были  $1.42 \pm 0.03$  и  $1.21 \pm 0.28$  с соответственно для четырех-и шестиконтактных соединений.

### 11.4.2 Температура процесса

Температура процесса контролировалась с помощью высокоскоростной модели инфракрасной тепловой камеры ImageIR® 8300 hp (Infratec, Германия) в диапазоне 150-700 °С. Температура измерялась на границе присоединяющихся партнеров в участке отмеченном штриховой линией на рисунке 11.10(а). Следовательно, точка отсечки для измерения была определена полным проникновением штифта (то есть полным касанием нижней поверхности Части MIMStruct на верхней композитной поверхности). Таким образом, пиковая температура в этой области может не относиться к максимальной температуре, достигнутой в ходе процесса. На рисунке 11.10 (б) показан термографический профиль температуры, полученный с помощью описанной экспериментальной процедуры. Кривые состоят из максимальной температуры, зарегистрированной для каждой термограммы, полученной во время соединения.

Максимальная температура, измеренная для четырехконтактных соединений на границе раздела, была  $374 \pm 8^\circ\text{C}$ . Значения для шестиконтактных соединений были немного выше при  $460 \pm 63^\circ\text{C}$ .

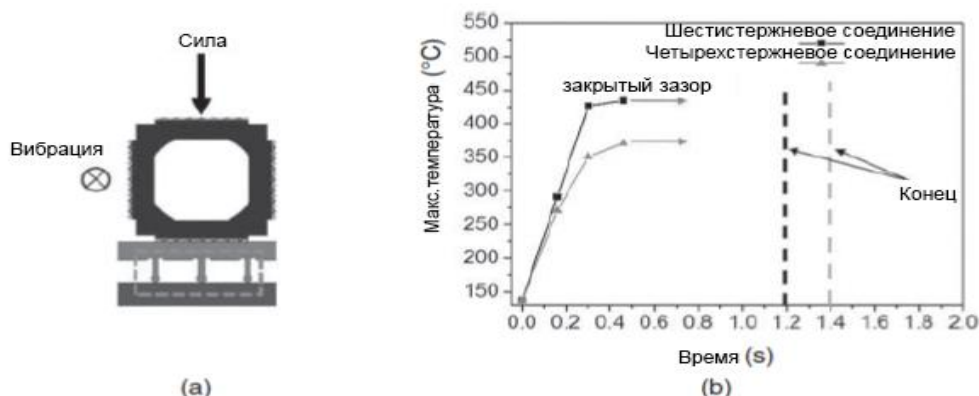


**Рис. 11.10** Зона измерения температуры, оцененная с помощью инфракрасной термографии (а) и профиля температуры (б) на границе раздела частей MIMStruct и частей АС ПЭ для четырех- и шестиконтактных соединений.

Такие температуры на границе раздела могут вызвать образование поперечных связей в матрице PEI, который, как сообщается, происходит при температуре в диапазоне от 320 до 380 °С [45-47]. Это первый и доминирующий механизм деградации PEI согласно Kuroda соавтор. [45], в то время как разрыв цепи (второй механизм) начинается при температуре выше 400 °С с максимальной скоростью разложения вокруг 510-540 °С [45, 47]. Поскольку соединения испытывают эту температуру только в течение десятых долей секунды, можно ожидать, что разрушение полимерной матрицы не будет значительным, как это наблюдается в других процессах на основе трения [47, 48]. В настоящее время проводится систематическая оценка физико-химических изменений, связанных с процессом ультразвукового соединения в полимерной матрице, о которых будет сообщено в отдельной публикации.

### 11.4.3 Микроструктура ультразвуковых соединений

Рис. 11.11 представляет вид поперечного сечения типичного соединения, показывающий полную вставку штифтов в составную часть. Скорость нагрева и деформации, связанная с подачей стержня, создают композитную зону термомеханического воздействия (TMAZ). TMAZ это тонкий слой, сформированный на стыке стыка и распределенный вокруг штифтов, геометрия которого сильно зависит от параметров соединения. Эта зона характеризуется расплавом и смесью полимерной матрицы с кусочками разорванных волокон, образовавшимися при перфорации стекловолокна, сотканного вибрирующими штырями. Кроме того, могут быть обнаружены некоторые внутренние дефекты, которые могут быть связаны с термическим разложением, захваченными пузырьками воздуха в

вязком расплавленном полимере, выделением воды из структуры и деконсолидацией волокон, как это обычно наблюдается в других процессах сварки полимеров. [49, 50].

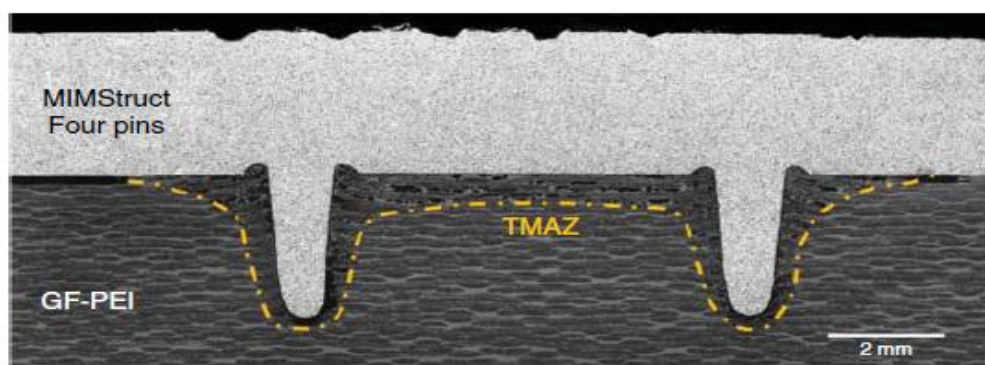


Рис. 11.11 Вид поперечного сечения типичного гибридного соединения.

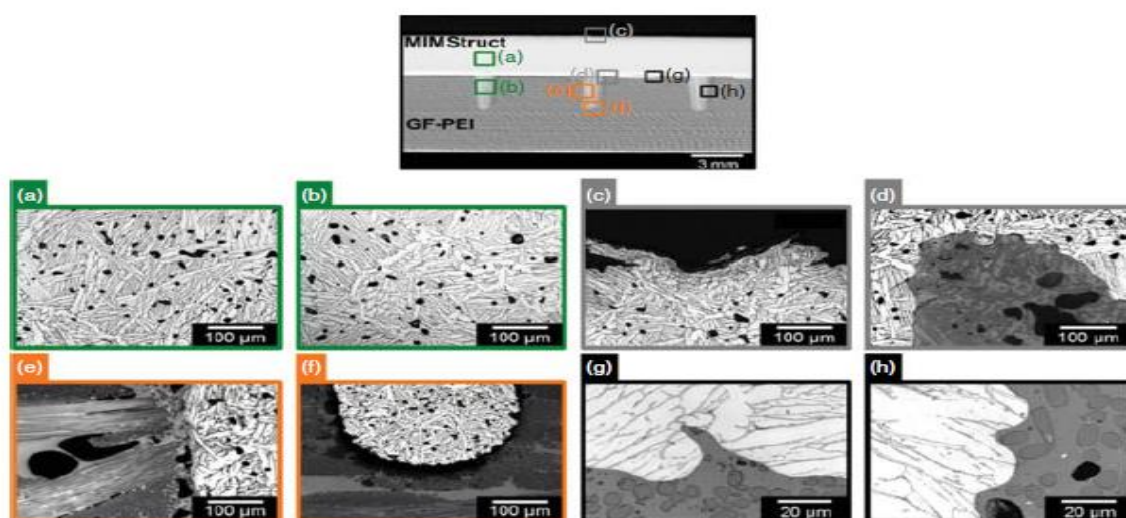


Рис. 11.12 Рентгеновская томография и детальные микрофотографии шестиконтактного гибридного соединения Ti-6Al-4V/GF-PEI соединенного ультразвуковым способом. (a) Ti-6Al-4V микроструктура MIMStruct половины толщины, (b) в зоне стержня, (c) на поверхности контакта между Структурой ЛД и кончика сонотрода, (d) деталь в подрезанной зоне, (e) раздел стержня/композиата, (f) наконечник стержня/ раздел композиата, (g) лазерная микроскопия раздела стержня/композиата и (h) нижняя поверхность MIMStruct/раздела композиата. Микроструктура Ti-6Al-4V по Kroll с реагентом травления (96 мл  $H_2O$ , 6 мл  $HNO_3$  и 2мл  $HF$ ).

Микроструктурные особенности соединений сходны для двух исследованных условий. Таким образом, для дальнейшей микроструктурной характеристики выбрано шестистержневое соединение (рис. 11.12). Поскольку температура процесса была значительно ниже температуры фазового перехода  $P$  ( $\beta \approx 995^\circ C$  [51]), Никаких тепловых изменений микроструктуры в детали Ti-6Al-4V по сравнению с основным материалом не ожидается. Это можно наблюдать в части MIMStruct (Рис. 11.12(a)) и зона стержня (Рис. 11.12(b)). Однако, очень тонкая область на поверхности MIMStruct показала пластически деформированную микроструктуру (рис. 11.12(c)), что в основном вызвано контактом между поверхностью MIMStruct и наконечника сонотрода (маркировки инструмента).

Во время фазы установившегося вязкого рассеяния стержни проникают в тканый композит, армированный стекловолокном; в результате образуется сжатый поток расплавленной полимерной матрицы и кусков разорванных волокон. Разорванные волокна, встроенные в расплавленный полимер, стекают вверх и заполняют вырез под штифтами (Рис. 11.12 (d)) у основания штифта в части MIMStruct. После полного проникновения стержней стекловолокно, сплетенное вокруг стержней, переориентируется вверх от исходной плоскости в соответствии с материальным потоком, как показано на рисунке 11.12(e).

Наличие термических дефектов также наблюдалось в композитном TMAZ, включая пустоты и расслоение волокон (рис. 11.12 (е)), которые, вероятно, связаны с дифференциальным сжатием волокон и расплавленной матрицы во время консолидации соединений. Рис. 11.12 (f) показывает линию раздела наконечника составного стрежня с окончательной глубиной вставки в пучок стекловолокна. В результате совместного уменьшения количества смолы и дифференциального сжатия между титановым штырем и стеклянными волокнами наблюдался плохой контактный контакт между материалами. Наличие и распространение этих недостатков может напрямую влиять на механические характеристики, особенно при циклическом нагружении, и может вызывать расслоение композита и преждевременное разрушение. Поэтому их следует избегать или сводить к минимуму. Как показывает опыт разработки других процессов сварки и соединения, ожидается, что текущие усилия по оптимизации подводимой теплоты в процессе ультразвукового соединения могут в конечном итоге уменьшить возникновение этих дефектов.

Несмотря на образование термических дефектов в TMAZ, очень тесный контакт между композитом и Структурой ЛД наблюдался по всей линии раздела металлокомпозита. Расплавленный полимер имеет тенденцию заполнять открытые остаточные поры, распределенные вдоль поверхности стержней (Рис. 11.12 (g)) и на разделе соединений (Рис. 11.12 (h)). Следовательно, механический механизм блокировки достигается в микромасштабе, что может положительно влиять на сопротивление склеиванию, следовательно, увеличивая механические свойства соединений в плоскости.

#### 11.4.4 Локальные механические свойства MIMStruct компонентов

Локальные механические свойства части Ti-6Al-4V оценены микротвердостью Vickers в поперечном сечении части MIMStruct (основной материал) и соединениями (Рис. 11.13). Сравнивая Рис. 11.13(a) и (b) не обнаружено никаких видимых связанных с процессом изменений в распределении твердости. Эти результаты согласуются с микроструктурным наблюдением, обсуждавшимся ранее, где визуальные микроструктурные изменения, вызванные процессом, не наблюдались в части Ti-6Al-4V.

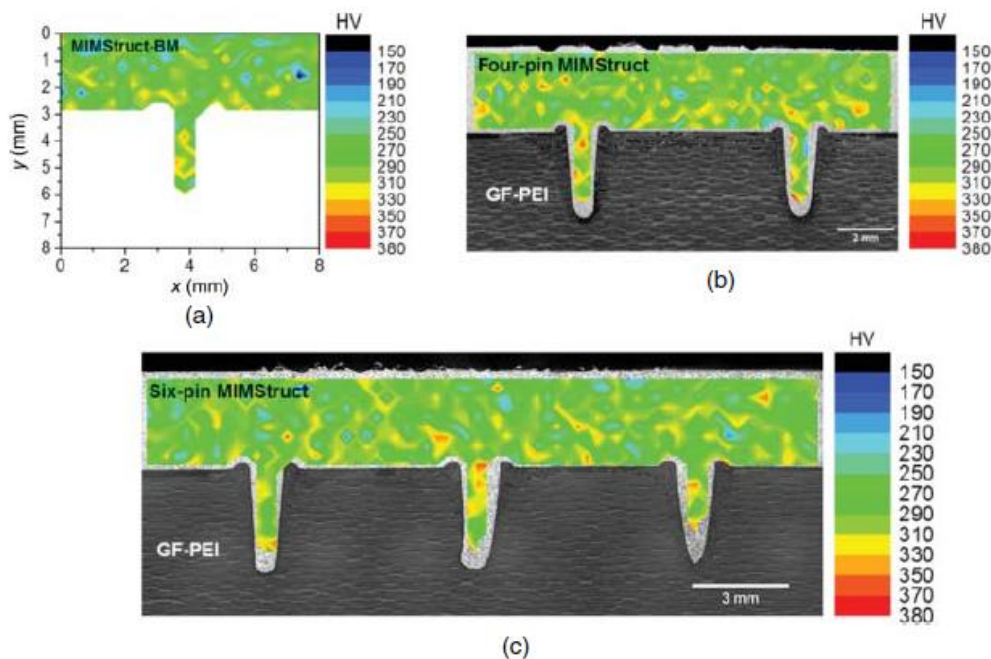


**Рис. 11.13** Карты микротвердости Виккерса основного материала MIMStruct (a), четырех - (Б) и шестиконтактных (в) деталей MIMStruct после соединения. Расстояние между углублениями установлено равным 0,3 мм в направлениях x и y, и нагрузка 0,2 кгс прилагалась в течение 10 секунд для каждого углубления.



Во всех деталях присутствуют большие вариации значений твердости, хотя в картах микротвердости не наблюдалось изменений, связанных с процессом. Эти вариации в основном связаны с остаточной пористостью. Титановые детали, изготовленные с помощью ЛД, обычно имеют остаточную пористость, варьирующую от 3% до 4% [29]. Когда на этих порах выполняются выемки, значения твердости имеют тенденцию изменяться, как видно на картах микротвердости. Остаточные поры могут быть закрыты дополнительным этапом горячего изостатического прессования (HIP) во время изготовления MIMStruct, в результате чего получается практически 100% плотный материал [29].

#### 11.4.5 Общие механические свойства ультразвуковых соединений

Общие механические свойства гибридных соединений оценивались с помощью специального испытания соединения внахлестку. Испытания проводились с использованием универсальной испытательной машины Zwick/Roell с грузоподъемностью 100 кН с постоянной скоростью ползуна 2 мм/мин при комнатной температуре. Были использованы две разные области перекрытия, в зависимости от количества штифтов. На рисунке 11.14 схематично показаны настроенные образцы кругового сдвига и соответствующие размеры в миллиметрах.

Сила соединения внахлестку в сравнении с кривой смещения для оптимизированных четырех- и шестиконтактных соединений и неармированных опорных соединений, изготовленных с одинаковыми условиями процесса и площадью перекрытия, показана на рис. 11.15.

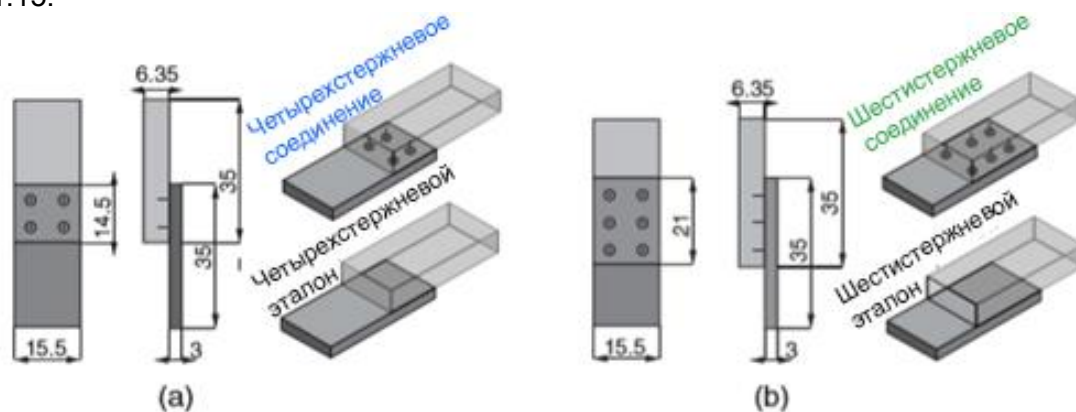


**Рис. 11.14.** Геометрия образцов сдвигового наложения: (а) четырех и шестистержневые соединения и соответствующий неармированный эталон.

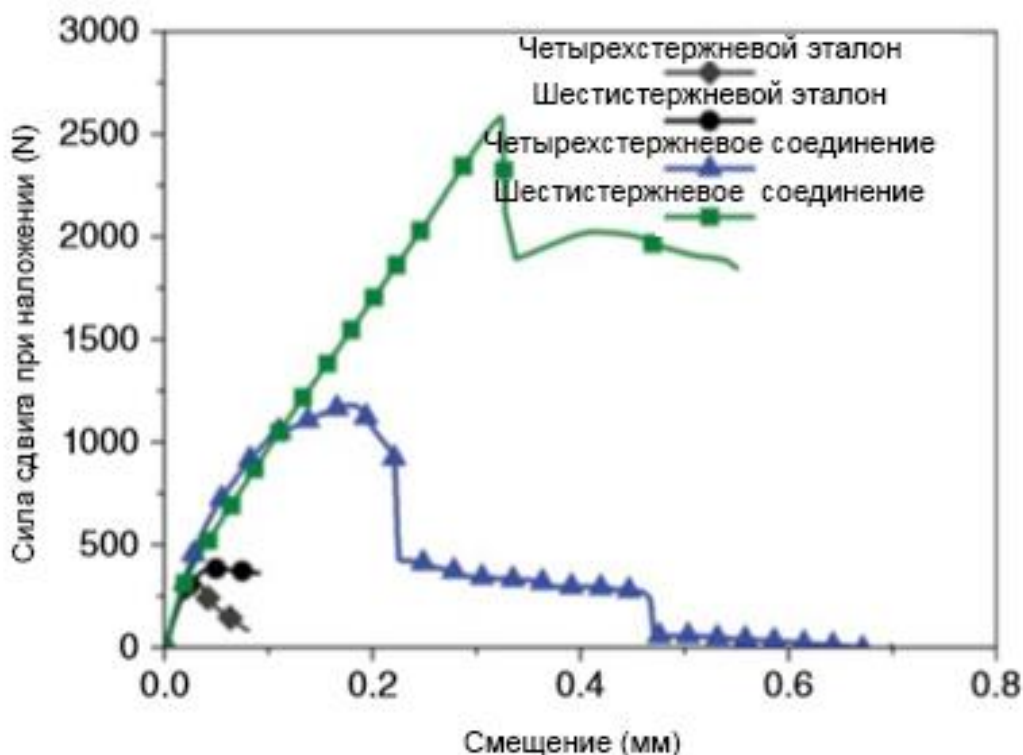


**Рис. 11.15** Сила сдвига при наложении по сравнению с кривой смещения для неармированных эталонных, четырех и шести стержневых контактных гибридных соединений. Кривые отображают копии с наибольшим ПССВ.

Как и ожидалось, усиление макромеханической блокировки значительно увеличивает прочность соединений по сравнению с неармированным эталоном. Кроме того, увеличение числа стержней также оказало положительное влияние на прочность соединений. Шестистержневое соединение выдержало максимальную предельную силу сдвига наложения (ULSF) около 5.5 раз выше (ULSF  $2011.4 \pm 530.7$  Н) чем напряжения (ULSF 368.7 Н), в то время как четырехстержневое соединение показало увеличение в 2,4 раза (ULSF  $831.7 \pm 336.2$  Н). Хотя для уменьшения довольно большого стандартного отклонения требуется дальнейшая оптимизация процесса (Таблица 11.3), положительный вклад добавления штифтов в вязкость разрушения хорошо виден на рисунке 11.15, в результате чего добавление стержней, по-видимому, увеличило устойчивость к повреждениям соединений по сравнению с эталонами.

Шестистержневое соединение (копия R1, Таблица 11.3) был выбран для изучения режима отказа во время испытаний на сдвиг внахлестку. Эта конкретная копия была выбрана после того, как она представила четко определенные переходы по жесткости (рис. 11.16) из-за повреждения соединения во время испытания. На первом этапе (этап (a)) деформация происходит в упругом режиме с обоими связующими механизмами - механической блокировкой штырей и силами адгезии - вносящими вклад в несущую нагрузку. Когда приложенная нагрузка превышает механическое сопротивление консолидированного полимерного слоя, происходит разрушение адгезива (Стадия (b)) и начинается распространение трещины.

На данный момент нагрузка в основном несет стержни. В стадии (c2), происходит сбой первого ряда стержней и наблюдается резкое снижение жесткости. Остальные стадии (Стадии c2-c6) соответствуют последовательному отказу стержней MIMStruct. Следовательно, после начала отказа стержни замедляют скорость распространения (эффект разрушения трещин), увеличивая вязкость разрушения.

Таблица 11.3 Обобщение результатов испытаний на сдвиг внахлест.

| Структура ЛД                                              | Копия | ULSF(N) | ULSF Avg $\pm$ Std |
|-----------------------------------------------------------|-------|---------|--------------------|
| Неармированный эталон<br>(зона перекрытия 14.5 X 15.5 мм) | R1    | 389.2   | 368.7              |
|                                                           | R2    | -       |                    |
|                                                           | R3    | 348.1   |                    |
| Неармированный эталон<br>(зона перекрытия 21 X 15 мм)     | R1    | 333.7   | 373.4 $\pm$ 35     |
|                                                           | R2    | 403.5   |                    |
|                                                           | R3    | 383.1   |                    |
| Четырехстержневое соединение                              | R1    | 1180.3  | 831.7 $\pm$ 336.2  |
|                                                           | R2    | 509.4   |                    |
|                                                           | R3    | 805.5   |                    |
| Шестистержневое соединение                                | R1    | 1927.7  | 2011.4 $\pm$ 530.7 |
|                                                           | R2    | 2579.0  |                    |
|                                                           | R3    | 1527.51 |                    |

ULSF, Предельная сила сдвига внахлест; среднее; и отклонение от стандарта.

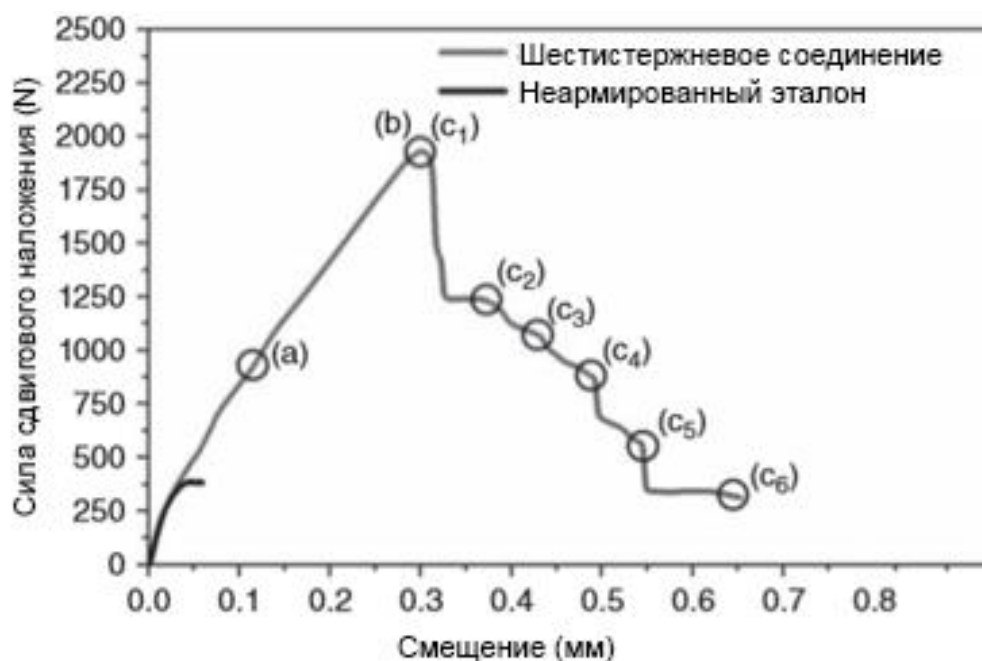


**Рис. 11.16** Характеристики несущей нагрузки шестистержневого соединения (копия R1), где (a) соответствует упругому режиму, (b) отказу адгезии, (c,) поломке первого ряда стержней, и (c2-c6) последовательному выходу из строя оставшихся стержней.



### 11.4.6 Анализ поверхности разрушения

Анализ поверхностного разрушения показал, что соединения разрушались при сложных механизмах разрушения, включая разрушение при сдвиге металлических штифтов и смешанное когезивно-адгезивное разрушение композитной детали. Обзор и детальные фрактографические изображения составных и металлических частей шестиконтактного соединения показаны на Рисунке 11.17. Сложное макроскопическое исследование показало, что штыри остаются полностью вставленными в GF-PEI после разрушения при сдвиге (Рис. 11.17 (а) и (б)); армированная стекловолокном арматура. 3D-изображения, полученные с помощью лазерной конфокальной микроскопии поверхности разрушения, показали, что трещины сдвига инициировались и распространялись в нижней части стержней, прямо над элементом подреза, как схематически показано на Рисунке 11.17 (с). По-видимому, на поверхности разрушения также имеется слой затемненной полимерной матрицы, что может быть результатом термического разрушения полимерной матрицы на границе раздела металл-композит. Из макрообследования поверхности разрушения металла (Рис. 11.17 (б)) было обнаружено, что расплавленный полимер эффективно смачивал его поверхность, подтверждая тем самым образование сил сцепления между материалами. Также были обнаружены разбитые стекловолоконные пучки, прикрепленные к поверхности разрушения металла.

Микромеханизмы разрушения были оценены сканирующей электронной микроскопией (SEM) через композит (Рис. 11.18) и Структуру ЛД (Рис. 11.19) поверхности разрушения. Рис. 11.18(а) изображает сломанный стержень фрактограммы, полученный из композитной поверхности и смежных областей, которые были пластически деформированы во время несущей нагрузки. Таким образом, это помогает подтвердить предположение о том, что силы блокировки стержней и сцепления успешно переносят нагрузку с поверхности раздела стыков по толщине композита. В этой соседней зоне было обнажено большое количество разорванных волокон (рис. 11.18 (б)). Как обсуждалось ранее, эти волокна, (раздел 11.4.3), остаются встроенными в расплавленный полимер; они растекались к подрезанию у основания штифтов во время процесса соединения.

На поверхности разлома композита были обнаружены области разрушения чистой адгезии, отмеченные белыми стрелками на Рисунке 11.18 (с), которые окружены тепловыми пустотами, созданными во время процесса соединения. Наблюдаются тянутые и неповрежденные фибриллы, соединяющие тепловые пустоты (светло-серые стрелки на Рисунке 11.18 (с)), что указывает на пластичный микроотказ.

Поверхность разлома штырей (рис. 11.19 (а)) характеризуется полностью пластичной структурой, возникающей в результате зарождения, роста и слияния микрополостей (рис. 11.19 (б)). Из-за значительного количества пористых частиц, распределенных в Структуре ЛД, которые обычно действуют как места зарождения разрушения, точный участок инициации разрушения не может быть идентифицирован. Кроме того, пучки прикрепленных волокон и композитного консолидированного слоя также были представлены на поверхности MIMStruct, как показано на изображениях SEM на Рисунке 11.19 (а) и (с), что подтверждает смешанное когезивно-адгезивный механизм микроотказа.

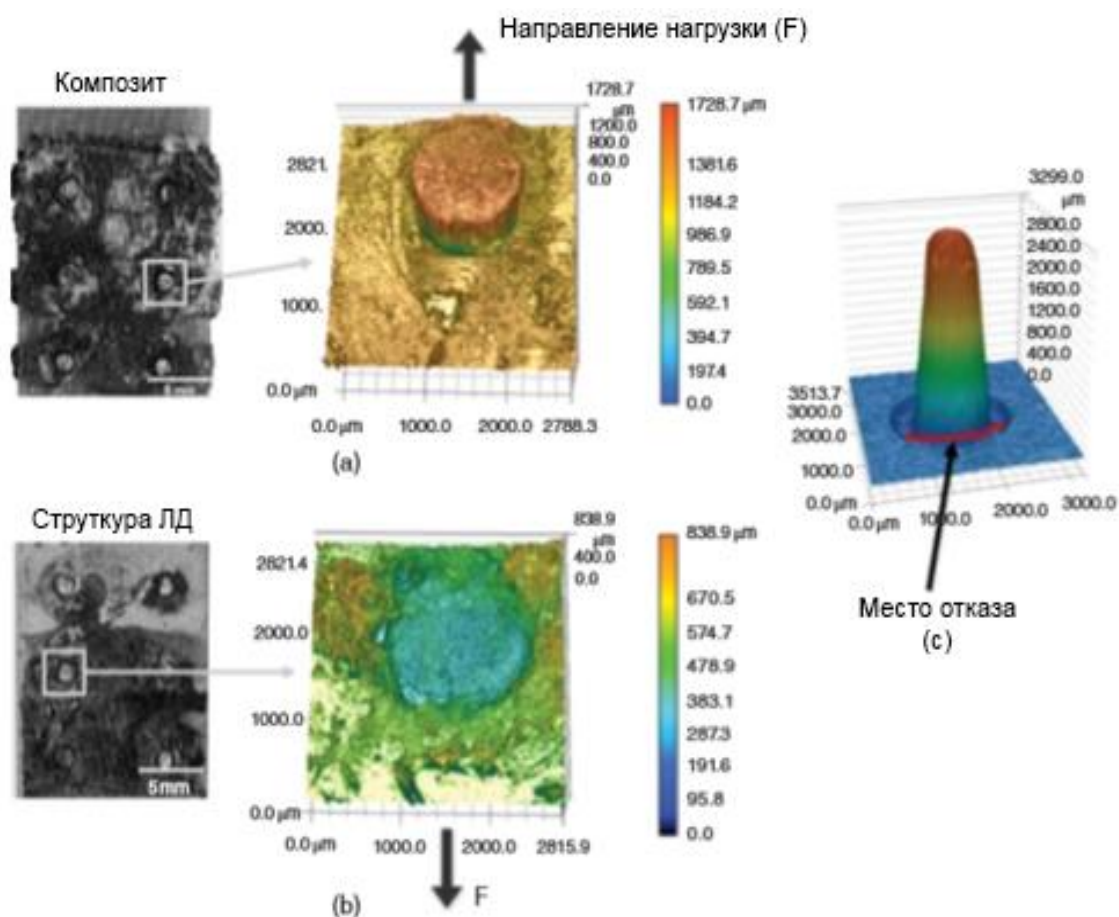


**Рис. 11.17** Фрактографический анализ соединения после испытания сдвигового наложения. Поверхность разрушения композита (а), поверхность разрушения части MIMStruct (б) и схематическое изображение участка разрушения при сдвиге по нижней части стержней (с).

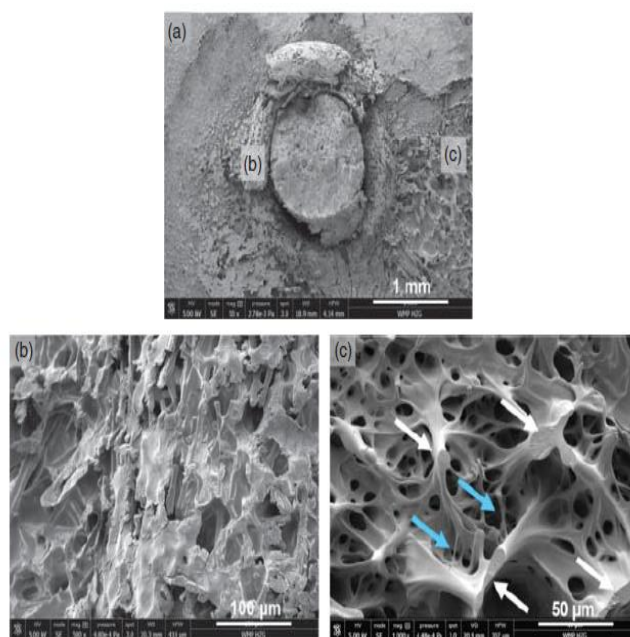


**Рис. 11.18** Анализ SEM поверхности композитного разрушения. (а) Обзор области перелома стержня, (б) область нарушения адгезии и, (с) деталь стержня прилегающей области

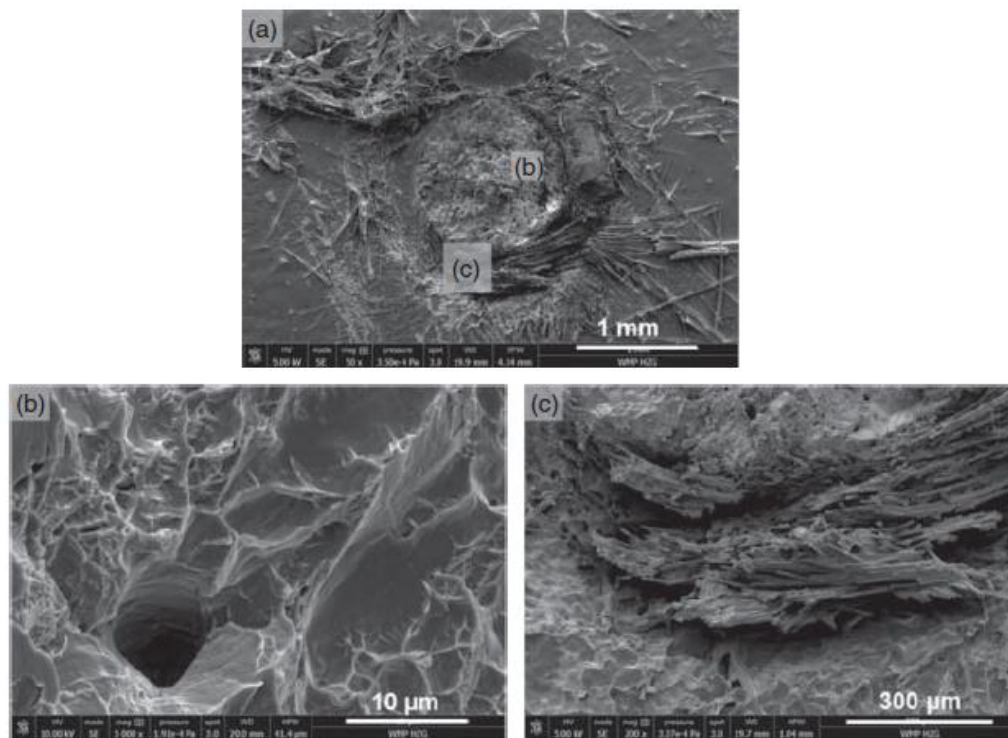


**Рис. 11.19** Анализ SEM поверхности разрушения MIMStruct. (a) Обзор зоны перелома стержня, (b) образование ямочек на поверхности излома стержня, (c) область когезионного разрушения с волокнами, прикрепленными к части Ti-Al6-4V.

### 11.4.7 Выводы

Внедрен новый подход к изготовлению устойчивых к повреждениям и ударопрочных легкосплавных гибридных конструкций. Соединения, произведенные ультразвуковым соединением, комбинировали механическую блокировку благодаря усиленным элементам, вставленным в армированный волокном полимер, и силам сцепления, создаваемым на границе раздела металл/армированный волокном полимер. Кроме того, из представленного тематического исследования можно сделать следующие выводы:

- Температура процесса, зарегистрированная на границе раздела соединений, находилась в пределах диапазона разложения полимерной матрицы. Однако время воздействия было коротким, и выделение тепла было локализовано в областях контактов.
- Связь высокочастотного колебательного движения и осевого усилия, приложенного во время ультразвукового соединения, генерирует достаточно тепла трения, чтобы смягчить полимерную матрицу и, следовательно, обеспечить полное проникновение штырей в композит.
- Микроструктурные изменения наблюдались в GF-PEI включая образование тепловых недостатков. Хотя, тепловая история не влияет на микроструктуру Ti-6Al-4V и его локальные механические свойства. Более того, наблюдалось формирование очень тесного взаимодействия между Ti-6Al-4V и GF-PEI.
- С точки зрения глобальных механических свойств, шестиконтактные гибридные соединения показали примерно в 5,5 раз больше ULSF и значительное улучшение вязкости разрушения по сравнению с неармированным эталонным соединением.
- Механизм разрушения стыков сочетает в себе сдвиг металлических штырей и смешанный когезионно-адгезивный разрыв композита.

## 11.5 Преимущества и ограничения

Основными преимуществами ультразвукового соединения являются точный контроль тепловыделения (которое обычно локализуется в области штырей), соединение чистое, безопасное (без брызг, искр или испарений) и более быстрое по сравнению с современными технологиями. Кроме того, ультразвуковые методы соединения являются чрезвычайно энергоэффективными, экологически чистыми, безопасными для оператора и способны производить гибридные соединения без использования какого-либо растворителя, клея или дополнительных материалов. После совместной консолидации, как показано в этом примере, стержни, закрепленные в композите, создают эффективные механизмы склеивания и действуют, перераспределяя механические напряжения, возникающие при нагрузке, на композитную деталь. Это имеет потенциальное влияние на устойчивость к повреждениям будущих гибридных структур.

Что касается ограничений, ультразвуковое соединение подходит только для конфигурации с перекрытием и не применимо непосредственно к композитам на основе термореактивных материалов (при этом может потребоваться использование твердой термопластичной пленки или клеевого слоя). Более того, для ультразвуковых гибридных соединений демонтаж нельзя выполнить без локального повреждения конструкции, что усложняет процесс инспекционного контроля.

## Благодарность

Авторы хотели бы выразить благодарность за финансовую поддержку, оказанную Е. Е. Feistauer от Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Бразилия) и Группой молодых исследователей Ассоциации Гельмгольца, «Усовершенствованные полимерные металлические гибридные конструкции» (Грант №. VH-NG-626). Авторы хотели бы поблагодарить Dr Thomas Ebel за описание процессов оптимизации и изготовления MIMStruct компонентов в рамках ситуационного исследования.

## Литература

- 1 Redelbach, M., Klitzke, M., and Friedrich, H.E. (2012) Impact of lightweight design on energy consumption and cost effectiveness of alternative powertrain concepts. European Electric Vehicles Conference, Brussels.
- 2 Friedrich, H.E. (2003) Challenges of materials technology for low consumption vehicle concepts. *Adv. Eng. Mater.*, 5, 105–112.
- 3 Market Spotlight (2020) Global Lightweight Materials Market to Surpass \$186 billion by 2020, ASM International, [http://www.asminternational.org/search/journal\\_content/56/10192/22857647/PUBLICATION](http://www.asminternational.org/search/journal_content/56/10192/22857647/PUBLICATION) (accessed 5 May 2015).
- 4 McKinsey & Company (2012) Lightweight, heavy impact: how carbon fiber and other lightweight materials will develop across industries and specifically in automotive. Advanced Industries, Designed by Visual Media Europe, Copyright © McKinsey & Company.
- 5 Faupel, F., Willecke, R., and Thran, A. (1998) Diffusion of microvoids in polymers. *Mater. Sci. Eng. R Rep.*, 22, 1–55.
- 6 Amancio-Filho, S.T. and dos Santos, J.F. (2009) Joining of polymers and polymer–microvoid hybrid structures: recent developments and trends. *Polym. Eng. Sci.*, 49, 1461–1476.
- 7 Amancio-Filho, S.T., Bueno, C., dos Santos, J.F. et al. (2011) On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber-reinforced polymer composite hybrid structures. *Mater. Sci. Eng., A*, 528, 3841–3848.
- 8 Esteves, J.V., Goushegir, S.M., dos Santos, J.F. et al. (2015) Friction spot joining of aluminum AA6181-T4 and carbon fiber-reinforced poly(phenylene sulfide): effects of process parameters on the microstructure and mechanical strength. *Mater. Des.*, 66, Part B, 437–445.
- 9 Goushegir, S.M., dos Santos, J.F., and Amancio-Filho, S.T. (2014) Friction Spot Joining of aluminum AA2024/carbon-fiber reinforced poly(phenylene sulfide) composite single lap joints: microstructure and mechanical performance. *Mater. Des.*, 54, 196–206.



- 10 Borba, N.Z., Blaga, L.A., dos Santos, J.F. et al. (2016) Influence of the Rotational Speed on the Microstructure and Mechanical Performance of Friction-Riveted Thermosetting Composite Joints, *Soldagem & Inspeção*.
- 11 Ye, H., Liu, X.Y., and Hong, H. (2008) Fabrication of mcoавtop matrix composites by mcoавtop injection molding—A review. *J. Mater. Process. Technol.*, 200, 12–24.
- 12 Grujicic, M. (2014) Injection over molding of polymer–mcoавtop hybrid structures. *Am. J. Sci. Technol.*, 1, 167–181.
- 13 Bergmann, J.P. and Stambke, M. (2012) Potential of laser-manufactured polymer–mcoавtop hybrid Joints. *Phys. Procedia*, 39, 84–91.
- 14 Lamberti, C., Solchenbach, T., Plapper, P., and Possart, W. (2014) Laser assisted joining of hybrid polyamide-aluminum structures. *Phys. Procedia*, 56, 845–853.
- 15 Mitschang, P., Velthuis, R., and Didi, M. (2013) Induction spot welding of mcoавtop/CFRPC hybrid joints. *Adv. Eng. Mater.*, 15, 804–813.
- 16 Mitschang, P., Velthuis, R., Emrich, S., and Kopnarski, M. (2009) Induction heated joining of aluminum and carbon fiber reinforced nylon 66. *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 22, 767–801.
- 17 Balle, F., Wagner, G., and Eifler, D. (2007) Ultrasonic spot welding of aluminum sheet/carbon fiber reinforced polymer – joints. *Materialwiss.Werkstofftech.*, 38, 934–938.
- 18 Balle, F., Wagner, G., and Eifler, D. (2009) Ultrasonic mcoавtop welding of aluminium sheets to carbon fibre reinforced thermoplastic composites. *Adv. Eng. Mater.*, 11, 35–39.
- 19 Ucsnik, S., Scheerer, M., Zaremba, S., and Pahr, D.H. (2010) Experimental investigation of a novel hybrid mcoавtop–composite joining technology. *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, 41, 369–374.
- 20 TWI COMELD – An Innovation in Composite to Mcoавtop Joining, [http:// www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/comeld-aninnovation-in-composite-to-mcoавtop-joining/](http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/comeld-aninnovation-in-composite-to-mcoавtop-joining/) (accessed 17 February 2015).
- 21 Zhang, H., Wen, W., and Cui, H. (2012) Study on the strength prediction model of Comeld composites joints. *Composites Part B*, 43, 3310–3317.
- 22 Zhang, H., Wen, W., and Cui, H. (2012) Study on the stiffness of Comeld composites joints, in *Mechanical Properties and Performance of Engineering Ceramics and Composites VII*, John Wiley & Sons, Inc., 261–271.
- 23 Blackburn, J. and Hilton, P. (2011) Producing surface features with a 200W Yb-fibre laser and the Surfi-Sculpt® process. *Phys. Procedia*, 12, Part A, 529–536.
- 24 TWI Surfi-Sculpt, [http://www.twi-global.com/services/intellectual-propertylicensing/ surfi-sculpt/](http://www.twi-global.com/services/intellectual-propertylicensing/surfi-sculpt/) (accessed 17 February 2015).
- 25 Graham, D.P., Rezai, A., Baker, D. et al. (2011) A hybrid joining scheme for high strength multi-material joints. *Proceedings of the 18th International Conference on Composite Materials*, Jeju South Korea.
- 26 Oluleke, R.J., Strong, D., Ciuca, O. et al. (2013) Mechanical and microstructural characterization of percussive Arc welded hyper-pins for titanium to composite mcoавtop joining. *Mater. Sci. Forum*, 765, 771–775.
- 27 Amancio-Filho, S.T., Feistauer, E.E., and dos Santos, J.F. (2015) Method for connecting a surface-structured workpiece and a plastic workpiece. *European Patent No. EP 3 078 480 A1*.
- 28 Ebel, T., Amancio-Filho, S.T., and dos Santos JF (2013) Method for manufacturing mcoавtop casings with structured surfaces. *European Patent No. EP 2 468 436 B1*.
- 29 Heaney, D.F. (2012) *Handbook of Mcoавtop Injection Molding*, 1st edn, Woodhead Publishing, Cambridge and Philadelphia, PA.
- 30 Rotheiser, J. (2009) *Joining of Plastics: Handbook for Designers and Engineers*, 3. Auflage, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Munich.
- 31 Grewell, D.A., Benatar, A., and Park, J.B. (2003) *Plastics and Composites Welding Handbook*, Hanser Publications, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Munich.
- 32 AWS (1991) *Welding Handbook*, 8th edn, vol. 2, American Welding Society, Maimi, FL.
- 33 Amancio-Filho, S.T. (2013) Henry Granjon Prize Competition 2009 Winner Category A: “Joining and Fabrication Technology” Friction Riveting: development and analysis of a new joining technique for polymer–mcoавtop multi-material structures. *Weld World*, 55, 13–24.
- 34 Wagner, G., Balle, F., and Eifler, D. (2013) Ultrasonic welding of aluminum alloys to fiber reinforced polymers. *Adv. Eng. Mater.*, 15, 792–803.

- 35 Menges, G. (1985) *Werkstoffkunde der kunststoffe*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Munich.
- 36 Mennig, G. (1995) *Wear in Plastics Processing: How to Understand, Protect and Avoid*, Hanser Publishers, Munich.
- 37 Vill, V.I. (1962) *Friction Welding of Mcoавtops*, American Welding Society, New York.
- 38 Potente, H. and Reinke, M. (1981) Welding parameters and properties of polyolefin parts. *Plast. Rubber Appl.*, 1, 149–160.
- 39 Stokes, V.K. (1988) Analysis of the friction (spin)-welding process for thermoplastics. *J. Mater. Sci.*, 23, 2772–2785.
- 40 Benatar, A. and Gutowski, T.G. (1989) Ultrasonic welding of PEEK graphite APC-2 composites. *Polym. Eng. Sci.*, 29, 1705–1721.
- 41 Potente, H. (2004) *Фьген von Kunststoffen. Grundlagen, Verfahren, Anwendung*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Munich.
- 42 ASTM B348-13 (2013) *Specification for Titanium and Titanium Alloy Bars and Billets*, ASTM International, USA.
- 43 Ferri, O.M., Ebel, T., and Bormann, R. (2011) The influence of a small boron addition on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by mcoавtop injection moulding. *Adv. Eng. Mater.*, 13, 436–447.
- 44 TenCate Product Datasheet Cetex® TC 1000 Premium, [http://www.tencate.com/amer/Images/Cetex\\_TC1000\\_Premium\\_DS\\_Web%2005051429-25012 .pdf](http://www.tencate.com/amer/Images/Cetex_TC1000_Premium_DS_Web%2005051429-25012.pdf) (accessed 12 August 2015).
- 45 Kuroda, S., Terauchi, K., Nogami, K., and Mita, I. (1989) Degradation of aromatic polymers-I. Rates of crosslinking and chain scission during thermal degradation of several soluble aromatic polymers. *Eur. Polym. J.*, 25, 1–7.
- 46 Augh, L., Gillespie, J.W., and Fink, B.K. (2001) Degradation of continuous carbon fiber reinforced polyetherimide composites during induction heating. *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 14, 96–115. doi: 10.1106/LNR5-QDA0-QKKC-K16R
- 47 Amancio-Filho, S.T., Roeder, J., Nunes, S.P. et al. (2008) Thermal degradation of polyetherimide joined by friction riveting (FricRiveting). Part I: Influence of rotation speed. *Polym. Degrad. Stab.*, 93, 1529–1538.
- 48 Oliveira, P.F. (2012) Analysis of joint properties and mechanical evaluation of friction spot welds of Polymethyl-methacrylate (PMMA). MSc thesis. Universidade Federal de Sro Carlos.
- 49 Ageorges, C. and Ye, L. (2002) *Fusion Bonding of Polymer Composites*, Springer-Verlag, London.
- 50 Jung, K.W., Kawahito, Y., Takahashi, M., and Katayama, S. (2013) Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to zinc-coated steel. *Mater. Des.*, 47, 179–188.
- 51 ASM International Handbook Committee (1990) *ASM Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, 10th edn, vol. 2, ASM International, Materials Park, OH.

## **Часть IV**

**Планирование экспериментов и  
статистический анализ технологии  
выполнения соединений**



## 12 Факторный план экспериментов для мтеаллополимерного соединения

*Lucian-Attila Blaga<sup>1</sup>, Gongalo P. Cipriano<sup>1</sup>, Arnaldo R. Gonzalez<sup>2</sup>, и Sergio T. Amancio-Filho<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup>*Институт материаловедения, механики материалов, процессов соединения твердого тела, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Центр материаловедения и прибрежных исследований, Geesthacht, Германия*

<sup>2</sup>*Кафедра машиностроения DEMEC - Инженерная школа, Федеральный университет Риу-Гранди-ду-Сул, Порту-Алегри, Бразилия*

<sup>3</sup>*Текущее место работы: Институт материаловедения, соединения и формирования, Грацский технологический университет, Грац, Австрия*

### 12.1 Введение

План эксперимента (DoE) это очень важный технический инструмент для разработки и оптимизации процессов. В сочетании со статистикой - например, анализ отклонений (ANOVA) - инженеры и ученые могут с высокой степенью достоверности понять и объяснить корреляцию между параметрами процесса («факторами») и свойствами продуктов, образцов или новых материалов. Недавно, DoE и ANOVA находят все более широкое применение в сварке и соединении в качестве инструмента для оптимизации сварных швов или соединений (например, для оптимизации механических характеристик). В этой главе представлены основы DoE и подчеркивает его полезность для разработки, более глубокого понимания и оптимизации технологий соединения металлов и полимеров. Факторный DoE представлен и приведены примеры на основе предыдущего опыта авторов и их сотрудников. Тематические исследования, представленные в этой главе, являются примерами исследовательских работ, проведенных в рамках Группы современных полимерно-металлических гибридных структур в Гельмгольце-Центруме, Германия, и ее проектов международного сотрудничества. Для детального понимания теорий DoE, статистического анализа и ANOVA, мы настоятельно рекомендуем учебники Montgomery [1] и другие дополнительные дополнительные тексты, такие как Taguchi [2].

### 12.2 Планирование экспериментов

В настоящее время DoE играет очень важную роль как в промышленных, так и в научных исследованиях. Он имеет представление о конкретном процессе или деятельности, контролируя входные переменные и анализируя их влияние на конечные характеристики результата в качестве основной цели.

Необходимо применять хорошо спланированную процедуру, чтобы минимизировать количество ресурсов (т. е. материалов, рабочей силы и оборудования и т. м.) используемых для этой цели для сбора максимального количества данных и статистической оценки полученных результатов. Это планирование должно быть максимально простым с учетом предполагаемой информации о результатах. Традиционный и упрощенный подход состоит в оценке влияния данного фактора, входной переменной процесса по оцениваемому вопросу, характеристику результата, раздельное исследование факторов (OFAT), поддержание постоянных факторов на постоянном уровне. Такой подход в большинстве случаев оказывается дорогостоящим из-за количества ресурсов и времени, необходимого для реализации такой процедуры. Тем не менее, OFAT может быть полезным инструментом для краткого исследования уникального влияния одного параметра в простых процессах или небольших диапазонах параметров [1,3].

Использование DoE позволяет устанавливать причинно-следственные связи между входными факторами процесса и реакциями процесса. DoE должны быть спланированы так, чтобы позволить:

- сокращение или минимизацию количества экспериментов или единиц, которые должны быть выполнены или произведены;
- все входные факторы должны быть изменены;

- четкий выбор стратегии, которая предоставляет надежные решения для данных после каждой экспериментальной последовательности.
- Потенциальные преимущества DoE для производственных и сварочных процессов включают [1,3]:
  - улучшенный выход и стабильность процесса
  - улучшенная прибыль и возврат инвестиций
  - улучшенные возможности процесса
  - уменьшенная изменчивость процесса, следовательно, лучшая производительность и согласованность продукции
  - снижение производственных затрат
  - сокращение времени проектирования и разработки
  - повышенный боевой дух рабочей силы с успехом в решении хронических проблем
  - более глубокое понимание корреляции между ключевыми входными и выходными данными процесса
  - повышение прибыльности бизнеса за счет уменьшения количества брака, количества дефектов, переделки, повторного тестирования и т. д.

Существуют различные категории факторов, которые влияют на переменные отклика, основываясь на величине влияния трех ключевых характеристик на переменные отклика, степени управляемости и измеримости (например, точность и достоверность). Эти факторы можно объяснить следующим [1, 3]:

- 1) Контрольные переменные измеримы, управляемы и считаются (очень) влиятельными.
- 2) Постоянные факторы контролируются.
- 3) Факторы вредности являются неконтролируемыми факторами (либо они не могут контролироваться, либо им разрешено варьироваться).

Основное влияние данного фактора определяется как изменение, произведенное в ответе на вопрос, в результате изменения уровня этого фактора, его значения или величины. Когда это изменение не является регулярным, учитывая, что другие факторы также различаются, необходимо проверить взаимодействие между этими факторами.

В некоторых процессах существуют факторы помех, которые нельзя контролировать, такие как собственные экспериментальные ошибки, условия окружающей среды, различия в партиях основного материала, архитектура и функциональность оборудования, и другие. Их можно рассматривать как шум и статистически рассматривать как ошибки эксперимента. Они отличаются от факторов с постоянной константой таким образом, что они не могут быть намеренно установлены на постоянный уровень для всех экспериментальных установок. Однако, если уровень может быть выбран для любой экспериментальной единицы, блокировка или рандомизация могут быть подходящими. Если уровни не могут быть выбраны (т. е. Уровни фактора непредсказуемы, возможно, непрерывны), то фактор неприятности становится ковариатным в анализе, что означает, что он не может контролироваться экспериментатором, но может наблюдаться вместе с другим контролируемым переменная) [1].

Если фактор вредности не поддается измерению и считается очень влиятельным, его также можно назвать экспериментальным фактором риска. Такие факторы могут привести к увеличению экспериментальной ошибки, что затрудняет оценку значимости контрольных переменных. Они также могут вносить смещение в результаты.

Поэтому, чтобы гарантировать, что наиболее эффективный метод применяется к данному случаю, необходимо ответить на следующие вопросы:

- Как оценить предполагаемый вопрос (например, прочность соединения на разрыв) и основные эффекты факторов (например, параметры сварки или соединения)?
- Как будут одновременно меняться факторы?
- Сколько потребуется тиражирования каждого эксперимента, произведенных единиц?
- Какой тип анализа данных должен быть выполнен?
- Какой эффект будет считаться значительным?

### 12.2.1 Факторный план экспериментов

Факториальные проекты являются основой наиболее часто используемых экспериментальных проектов. На этих конструкциях каждая возможная комбинация уровня фактора выполняется для каждого проекта. Для  $k$  - количество факторов, каждый из которых имеет  $n$  уровней, существует  $nk$  комбинаций. Из-за того, что эти конструкции могут стать дорогостоящими в зависимости от количества необходимых экспериментов, они в основном используются там, где необходимо уменьшенное количество факторов и уровней.

#### 12.2.1.1 Общее описание

Эти типы конструкций определяются набором переменных / факторов  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , которые могут принимать разные значения или уровни. Факторный план считается хорошим планом, потому что он является как ортогональным, так и сбалансированным типом. В ортогональной схеме эффекты каждого фактора могут быть определены независимо. Сбалансированный относится к тому факту, что каждая комбинация уровня фактора присутствует в плане проекта одинаковое количество раз.

Рандомизация экспериментальных прогонов, каждый из которых определяется одной конкретной комбинацией уровня фактора, способствует снижению возможных эффектов смещения путем их усреднения по уровням каждого расчетного фактора. Это достигается путем случайного присвоения каждой комбинации уровня фактора позиции последовательности экспериментальных прогонов от 1 до  $N$ .

Проект также должен включать прогоны повторения, где каждый прогон комбинации уровня факторов выполняется или наблюдается более одного раза. Из них определяется возможное стандартное отклонение, учитывающее отклонения из-за ошибок измерения или изменений в экспериментальной среде. Это позволяет хорошо оценить адекватность подобранной модели без необходимости учитывать незначительное влияние одного из факторов, поэтому его можно рассматривать как экспериментальную изменчивость. Повторные прогоны также должны быть рандомизированы.

Измеренные эффекты определяются как вариации средних ответов из-за различных комбинаций уровня фактора или условий эксперимента. Рассматривая двухуровневую конструкцию (например, минимальные и максимальные значения скорости вращения в клепке при трении), измеренные эффекты могут быть описаны как основные эффекты, двухфакторные и трехфакторные взаимодействия. Основными эффектами являются различия между средними ответами, полученными из двух уровней каждого фактора. Преимуществом этого DoE является тот факт, что результаты могут быть проанализированы с помощью регрессии.

Коэффициенты в этом проекте используются в качестве кодированных значений, то есть для двухуровневого проекта фактор будет принимать значение -1 или +1. Кодирование количественной переменной возможно путем применения

$$X_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{\frac{1}{2}\Delta x_i} \quad (12.1)$$

с  $X_i$  являющийся значением кода фактора  $i$ ,  $x_i$  это фактическое значение,  $\bar{x}_i$  это среднее значение, и  $\Delta x_i$  это диапазон фактора.

В случае, когда все факторы являются количественными, экспериментатор должен выполнить дополнительные эксперименты с центральной точкой, которые были бы закодированы 0, чтобы оценить проект на нелинейности.

#### 12.2.1.2 Вариационный анализ

Учитывая, что цель экспериментатора - лучше понять, как определенные факторы - например, объединение входных переменных процесса - влияют на данный отклик - например, механическая прочность суставов - основные эффекты этих факторов и взаимодействия между факторами должны быть оцениваются путем оценки статистически значимых различий в средних показателях между несколькими уровнями фактора или

различными группами. Широко используемый аналитический метод это ANOVA, выполняется на данных, собранных с использованием различных DoE. Этот анализ выполняется путем разделения наблюдаемой изменчивости на объяснимую изменчивость с учетом моделей данных и регрессии или необъяснимой изменчивости. Изменчивость можно объяснить как происходящую из отдельных основных эффектов или факторов взаимодействия используя тесты на сумму квадратов, [3].

ANOVA основан на трех ключевых допущениях: проверяется однородность дисперсии, свойства, также называемые гомоскедастичностью; ответ имеет нормальное распределение; и эксперименты независимы. Хотя в действительности предположение о нормальном распределении редко достижимо, анализ все же может дать экспериментатору полезную информацию с учетом отклонений распределения [1].

### 12.2.1.3 Толкование результатов и проверка правильности проекта

В двухуровневом факториальном плане собранные данные могут быть проанализированы с помощью ANOVA или регрессионного анализа. Последний считается довольно более простым, особенно из-за его свойства ортогональности [4].

Наиболее используемый метод анализа результатов ортогональных схем - это обычная регрессия наименьших квадратов (OLS), который учитывает приближенное нормальное распределение и независимые ошибки. Подтверждение статистической модели может быть достигнуто с помощью нескольких классических статистических тестов, наиболее часто используемые следующие: несоответствие, чтобы оценить адекватность модели; критерий Стьюдента, который выдает значимость отдельных модельных терминов; и тесты, основанные на внешне изученных остатках [5]. Если ни один из факторов не окажется статистически значимым, то есть они не оказывают существенного влияния на реакцию, следует внести изменения в проект, например, увеличить шаг между уровнями факторов, чтобы расширить область применения проекта.

f-испытание учитывает статистику, найденную путем деления коэффициента регрессии на его стандартное отклонение, что свидетельствует t-распределение имеющее  $n-p-1$  степени свободы,  $p$  количество параметров в модели. Значение найдено для модельных терминов с  $p$ -значением ниже, чем 0.05, при работе с доверительным интервалом 95% (условие, обычно используемое при сварке и соединении). Другими словами,  $p = 0.05$  означает, что есть 5% шанс, что экспериментатор работает с неверным предположением. Рассматривая проект с повторяющимися экспериментами, можно применить тест на несоответствие, потому что эти повторы позволяют оценить чистую ошибку. Принимая во внимание повторения в регрессионной модели, можно найти сумму квадратов несоответствия, SSLOF, используя

$$SS_{LOF} = SS_R - SS_E \quad (12.2)$$

$$SS_R = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (12.3)$$

$$SS_E = \sum_{i=1}^{n_t} (y_i - \bar{y})^2 \quad (12.4)$$

где SSR это остаточная сумма квадратов, SSE является чистой ошибкой суммы квадратов,  $\bar{y}$  среднее значение копий,  $y$  это значение, данное моделью и  $n_t$  это количество копий. Тогда статистика теста несоответствия, FLOF, можно определить как,

$$F_{LOF} = \frac{MS_{LOF}}{MS_E} \quad (12.5)$$

где MSLOF это несоответствие средних квадратов и MSE это среднеквадратичная ошибка. Если значение FLOF значительно выше, чем 1, модель считается неадекватной, что свидетельствует о недостаточной пригодности. Если значение намного меньше, чем 1, тогда это случай переподготовки.

## 12.2.2 Примеры факторного плана экспериментов в разработке процесса соединения для металлополимерных гибридных конструкций

DoE является мощным статистическим инструментом, используемым для оптимизации процессов сварки и соединения. DoE в сочетании с ANOVA, выясняет влияние процесса соединения на характеристики суставов. Параметры сварочного процесса и геометрия инструмента влияют на свойства листов из высокоплотного полиэтилена с точечной сваркой, как указано Bilici [6,7]. Эти исследователи исследовали влияние скорости вращения, глубины врезания, скорости врезания и времени выдержки инструмента на прочность сдвига внахлестку. Применяя подход «один фактор за один раз», авторы обнаружили, что скорость вращения, глубина погружения и время задержки были важны при оптимизации предельной прочности на сдвиг круга. Время выдержки и скорость вращения значительно влияли на прочность на сдвиг колена, учитывая, что увеличение времени выдержки или скорости вращения увеличивало тепло от трения и увеличивало сварные площади. Nagras et al. [8] изучали влияние параметров процесса с использованием подхода «один фактор за один раз», чтобы определить оптимизированные условия сварки для ультразвуковой сварки с поли (эфир-эфир-кетон) (PEЕК) -углеродными композитами. Dashatan et al. [9] выполнил статистический анализ в соответствии с двухуровневой полнофакторной конструкцией, а также ANOVA и отношением сигнал / шум, чтобы понять влияние скорости вращения инструмента, скорости погружения инструмента и времени задержки на точечную сварку трением с перемешиванием прочность между PMMA и ABS полимерными листами. Они пришли к выводу, что все параметры значительно влияют на прочность на сдвиг внахлестку и режимы разрушения. Исследования подобных соединений и сварных швов, очень мало исследований по соединениям металл-полимер были опубликованы, хотя количество DoE и ANOVA ограничено. Для этой цели были отобраны практические примеры из нашей научно-исследовательской работы.

### 12.2.2.1 Ситуационное исследование 1 – Полный факторный план при фрикционном заклепывании

Согласно Маерс и Монтгомери [10], полнофакторный план - это проект, в котором выполнены все возможные комбинации уровней факторов. Результат полнофакторных экспериментов был бы более надежным, но проведение полнофакторных экспериментов является дорогостоящим, а иногда и чрезмерным. Тем не менее, это DoE, часто используемое в случаях, когда количество факторов уменьшается (при сварке и соединении часто от трех до пяти факторов), и требуется более полное понимание взаимодействий факторов, превышающих 1.

Первый пример использования полнофакторного DoE в развитии процесса соединения металлов и полимеров получен из Фрикционной Заклепки [11,12]. Фрикционная заклепка - это процесс точечного соединения на основе трения, разработанный для соединения термопластичных и термопластичных композитов, а также гибридных структур из термопластичных (композитных) и легких сплавов [13-17]. Более подробную информацию о Фрикционной заклепке можно найти в главе 8 - Фрикционная заклепка. Часть содержания данного тематического исследования частично или полностью воспроизводится с разрешения Алтмейер соавтор. [15].

Более ранние исследования Фрикционной заклепки с использованием неармированного полиэфиримида (DoE) и алюминия AA2024 [18, 19] успешно продемонстрировали выполнимость соединений с металлической вставкой. В одном из наших предыдущих исследований было описано влияние отдельного параметра процесса Фрикционной заклепки, скорости вращения на микроструктуру сустава (конструкция OFAT), локальную и глобальную прочность и термическую историю [20, 21]. Тем не менее, не было найдено никаких дальнейших исследований, описывающих, как адаптировать механические характеристики или применять расширенный DoE и статистику для анализа корреляции между соответствующими параметрами процесса и совместными характеристиками во Фрикционной заклепке.

2k полный факторный DoE был выбран для исследования влияния скорости вращения, времени трения, давления трения и давленияковки на формирование соединения и механические характеристики при растяжении. Формирование соединения изучалось путем анализа эффективности стяжки заклепки (вопрос, представленный эффективностью расклепки, который представляет собой процентное увеличение диаметра наконечника заклепки после Фрикционной заклепки), глубиной проникновения заклепки и подводом механической энергии. Усилие растяжения было использовано в качестве ответа на механические характеристики исследуемых соединений металл-вставка. Заклепки из титана класса 3 толщиной 5 мм и пластины из полиэфирэфиркетона, армированного короткоуглеродистым полиэфиром (PEEK-CA30), толщиной 21 мм 30% использовались в качестве базовых материалов. Изменения геометрии заклепки были исследованы с помощью рентгеновской томографии перед любым механическим испытанием, чтобы получить размеры закрепленной заклепки внутри армированного полимера, чтобы подтвердить выяснение их корреляции с механическими характеристиками. Таким образом, статистические модели DoE могут быть использованы для настройки формирования соединений и механических характеристик для исследуемых соединений. Кроме того, набор параметров, максимизирующий характеристики растяжения, может быть определен с использованием ANOVA для оптимизации этого ответа. Следовательно, лучшее понимание этих эффектов может позволить адаптировать совместное формирование и производительность в соответствии с требованиями потенциальных инженерных приложений.

DoE и Статистический анализ для оценки совместных механических характеристик

Уровни фактора (-1, +1) из параметров соединения были установлены следующим образом: скорость вращения (RS) менялся от 18,000 до 20,000 об/мин, давление трения (FP) менялось от 0.7 до 0.9 МПа, давлениековки (FoP) менялось от 0.9 до 1.0 МПа, время трения (FT) менялось от 1.0 до 1.5 с, пока времяковки (FoT) поддерживалась постоянным в течение 10 с, чтобы обеспечить достаточное и равномерное уплотнение соединения. Эксперименты планировались согласно а 2k полнофакторный план, включая дополнительную центральную точку. Этот подход использовался для оценки влияния параметров процесса на формирование соединения и механические характеристики при растягивающей нагрузке. Таким образом, входные параметры (факторы) были параметрами процесса: RS, FT, FP и FoP. Выходными параметрами (ответами) были эффективность расклепки, глубина проникновения заклепки (H), подводимая механическая энергия и сила вытягивания (Fpull-out).

DoE 2k полная таблица факторных тестов показана в таблице 12.1, включая низкий и высокий уровни, а также конфигурацию центральной точки параметров процесса. Этот полнофакторный план содержит четыре фактора на двух уровнях, что делает количество конфигураций  $N=24=16$  с центральной точкой в промежуточном положении всех факторов (уровень фактора «0») для создания 17 различных условий соединения (Таблица 12.2). Три угловых точки были созданы для угловых точек, и шесть повторных копий были созданы для центральной точки, чтобы учитывать статистическую дисперсию.



**Таблица 12.1** Полнофакторная матрица плана, показывающая два уровня (-1, +1) исследуемых факторов и конфигурацию центральной точки (0), которая соответствует промежуточному положению всех факторов.

| Фактор            | Уровень |        |        | Ед.изм. |
|-------------------|---------|--------|--------|---------|
|                   | -1      | 0      | +1     |         |
| Скорость вращения | 18,000  | 19,000 | 20,000 | об/мин  |
| Время трения      | 1       | 1.25   | 1.5    | с       |
| Давление трения   | 0.7     | 0.8    | 0.9    | МПа     |
| Давлениековки     | 0.9     | 0.95   | 1.0    | МПа     |
| времяковки        | 10      |        |        | с       |

**Таблица 12.2** Результаты теста всех 17 конфигураций (2К полнофакторных прогонов и центральная точка с шестью репликами).

| Конфигурация |             | настройки параметров факторов процесса |          |           |
|--------------|-------------|----------------------------------------|----------|-----------|
|              | RS (об/мин) | FT(с)                                  | FP (МПа) | FoP (МПа) |
| 1            | 18,000      | 1.5                                    | 0.7      | 0.9       |
| 2            | 20,000      | 1.5                                    | 0.7      | 0.9       |
| 3            | 18,000      | 1.5                                    | 0.9      | 1.0       |
| 4            | 20,000      | 1.5                                    | 0.9      | 1.0       |
| 5            | 18,000      | 1.0                                    | 0.7      | 1.0       |
| 6            | 18,000      | 1,5                                    | 0.9      | 0.9       |
| 7            | 18,000      | 1.0                                    | 0.9      | 1.0       |
| 8            | 18,000      | 1.5                                    | 0.7      | 1.0       |
| 9            | 19,000      | 1.25                                   | 0.8      | 0.95      |
| 10           | 20,000      | 1.0                                    | 0.9      | 1.0       |
| 11           | 20,000      | 1.5                                    | 0.7      | 1.0       |
| 12           | 20,000      | 1.0                                    | 0.7      | 0.9       |
| 13           | 20,000      | 1.0                                    | 0.7      | 1.0       |

|    |        |     |     |     |
|----|--------|-----|-----|-----|
| 14 | 18,000 | 1.0 | 0.7 | 0.9 |
| 15 | 20,000 | 1.0 | 0.9 | 0.9 |
| 16 | 18,000 | 1.0 | 0.9 | 0.9 |
| 17 | 20,000 | 1.5 | 0.9 | 0.9 |

Конфигурация параметров привела к выбранным двухуровневым полнофакторным проектам, а центральные точки представлены матрицей проектирования в таблице 12.2.:

### Влияние параметров процесса соединения на предел прочности при растяжении

Эффекты четырех технологических параметров RS, FT, FP, и FoP на совместное предельное растягивающее усилие были оценены. В зависимости от комбинации параметров процесса результаты варьировались от 6.3 до 10.7 kN.

На рисунке 12.1 показано влияние всех четырех параметров процесса соединения на предельное растягивающее усилие. Чем выше RS, FT и FoP, тем выше сила извлечения. Увеличения в RS, FT и FoP приводят к более высоким значениям подводимой механической энергии, оставляя дополнительное тепло доступным для деформации и расширения наконечника заклепки. Следовательно, чем шире кончик заклепки (эффективность расклепки), тем больше объем полимера над деформированным кончиком заклепки; поэтому для вытягивания металлической вставки из полимерной подложки требуются более высокие силы. Из анализа ANOVA можно наблюдать нелинейность промежуточного уровня FP, что может указывать на нелинейную зависимость между FP и пределом растягивающей силы

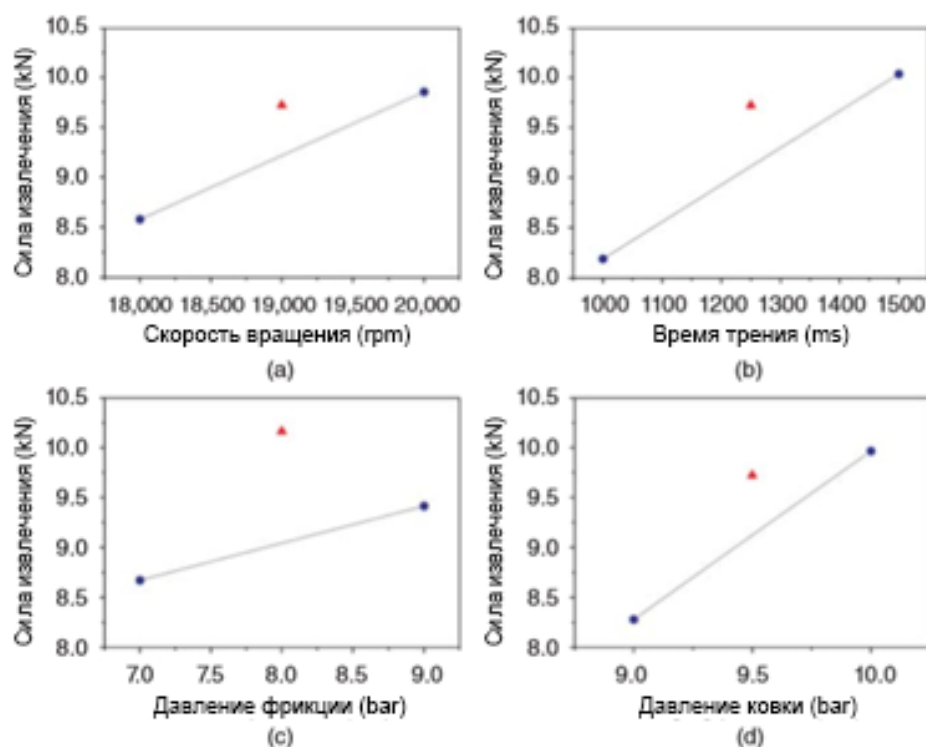


**Рис. 12.1** Графики основных эффектов, показывающие взаимосвязь между условиями сцепления с трением ((a) RS, (b) FT, (c) FP, и (d) FoP) и сила извлечения

ANOVA также подтвердил значительный эффект, оказываемый всеми четырьмя параметрами процесса (p-значения для RS, FT, FP и FoP были 0.000) на пределе силы растяжения. Более того, объявлено влияние двухфакторных взаимодействий FT-FoP (p-значения 0.001) и RS-FT (p-значение 0.022).

Сводка этих графиков основных эффектов показывает оптимизированный набор параметров процесса, который можно использовать для повышения эффективности стяжки заклепок (то есть для повышения эффективности расклепки). В этом оптимизированном наборе параметров, RS, FT и FoP должен быть установлен на более высоких уровнях (RS: 20,000 об/мин, FT: 1.5 с, FoP: 1 МПа), в то время как FP следует установить на промежуточном уровне (FP: 0.8 МПа), потому что это были уровни параметров процесса, отвечающие за самую высокую эффективность грибоводства. Хотя этот набор параметров не был частью факторных прогонов DoE, три соединения были произведены и протестированы для подтверждения результатов этого анализа. Результаты представлены в отдельной рукописи и в основном подтвердили ожидаемые результаты [22]. Трение образцов, заклепанное с оптимизированной комбинацией параметров процесса, привело к высокой эффективности расклепки – 91,4%. Была только одна конфигурация для первоначального исследования, которая показала немного более высокую эффективность расклепки (93.6%): конфигурация 4 (RS: 20,000 об/мин, FT: 1.5 с, FoP: 1 МПа, и FP: 0.9 МПа). Конфигурация 4 также показывает более высокое стандартное отклонение (1%) по сравнению с оптимизированной конфигурацией (0.11%), сделав оптимизированную конфигурацию более надежной комбинацией параметров процесса, которая все еще приводит к очень высокой эффективности стяжки заклепок.

Анализ влияния параметров соединения на другие представленные ответы (эффективность расклепки, глубина вдавливания, энергия) был проведен на аналогичной основе и следует той же логике, что и обсуждение влияния на механические характеристики соединения (то же самое исследование показывает, что ответы, повышающие эффективность и силу извлечения, также напрямую зависимы. Эти результаты были сообщены в [22].

**Проверка статистической модели: оценка влияния параметров процесса на свойства соединения** Полученные наборы данных были проанализированы с использованием параметрического ANOVA. Четыре ответа были проанализированы отдельно. Следовательно, зависимая переменная — это эффективность гриба, глубина проникновения, механическая энергия или сила вытягивания, в то время как RS, FT, FP и FoP были независимые переменные. Модель ANOVA была изменена, чтобы включить независимые переменные и соответствующие двухфакторные взаимодействия.

$$R = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{14} x_1 x_4 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{24} x_2 x_4 + \beta_{34} x_3 x_4 \quad (12.6)$$

Следовательно, регрессионный анализ собранных данных может быть использован для прогнозирования воздействия на ответы из-за значительных параметров процесса и их взаимодействия. Используемое уравнение множественной регрессии является уравнением двустороннего взаимодействия:

В этой модели, R это ответ (то есть, механическая энергия, глубина проникновения, эффективность расклепки предельная сила растяжения), в то время как переменные предиктора включают RS ( $x_1$ ), FT ( $x_2$ ), FP ( $x_3$ ), и FoP ( $x_4$ ). Влияние различных факторов и их взаимодействия на четыре различных отклика показано на диаграммах Парето, показанных на рисунке 12.2. Эффекты всех факторов и их взаимодействия стандартизированы, что означает, что каждый эффект был разделен на его стандартную ошибку. Длина каждого столбца в диаграммах напрямую связана с абсолютным значением соответствующего ему коэффициента регрессии; порядок, в котором организованы факторы, соответствует величине эффекта, начиная с фактора, имеющего наибольшее влияние на оцениваемый ответ. Вертикальная линия на каждой диаграмме Парето соответствует 95% -ному доверительному уровню, указывающему статистическую значимость. Следовательно, влияние фактора можно считать значительным, если соответствующий ему столбец пересекает эту линию на диаграмме Парето. Уравнение множественной регрессии для каждого ответа, включая только важные параметры процесса и взаимодействия, может быть выражено как: - Стандартизированный эффект

$$E_{mech} = 8174 - 0.44RS - 2.95FT - 889FP + 0.0506RS * FP + 0.00018FT * RS \quad (12.7)$$

$$T = -16.7 + 0.000861RS + 0.00483FT + 0.55FP \quad (12.8)$$

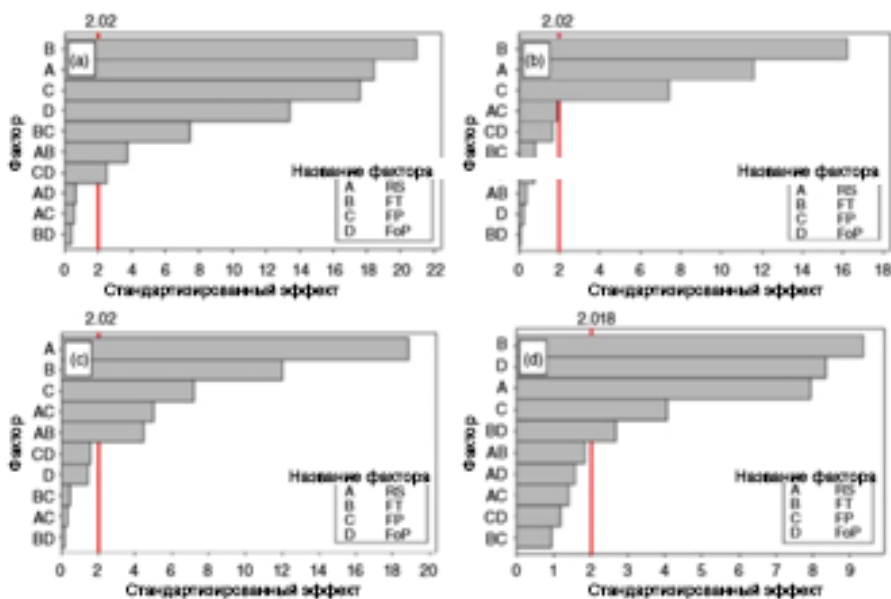


**Рис. 12.2** Диаграммы Парето стандартизированных эффектов для (а) эффективности расклепок, (б) глубины вдавливания, (в) механической энергии и (д) силы вытягивания.

$$e_{помехи} = -31.5 - 0.00009 RS - 0.198 FT - 8.86 FP + 12.2 OP - \quad (12.9)$$

$$0.0134 FT \times FP + 0.000007 FT \times RS$$

$$F_{вдавливания} = -49.7 + 0.723 RS + 0.221 FT + 0.37 FP + 3.98 FOP - 0.0197 FT \times FOP \quad (12.10)$$

Отдельные уравнения регрессии содержат только факторы, доказавшие свою значимость с помощью их р-значений и диаграмм Парето на рисунке 12.2. На рисунке 12.3 сравниваются предсказанные данные, рассчитанные с использованием приведенных ранее уравнений, и измеренные данные всех четырех ответов. Эти диаграммы рассеяния включают линию 45°, которая демонстрирует идеальную линейную корреляцию между измеренными и предсказанными данными; линии, представляющие отклонение 10%, обычно используемые при сварке полимеров, были добавлены здесь в качестве дополнения. Стандартное отклонение в 10% является общей величиной, связанной с изменениями механических свойств из-за различий в производственных партиях одной и той же пластмассовой детали.

Проверка гипотезы регрессионного анализа была выполнена с частотой ошибок 5% (то есть 95% для уровня достоверности). На рисунке 12.3 показано хорошее согласование между предсказанными и измеренными данными для всех четырех ответов, что соответствует линейной корреляции между измеренными и предсказанными наборами данных. Этот ответ доказывает, что уравнения регрессии, приведенные в уравнениях 12.7-12.10, могут использоваться для прогнозирования эффективности грибоведения, глубины проникновения заклепки, подводимой механической энергии и предельного растягивающего усилия (силы вытягивания) как функции существенного процесса. параметры и их двухфакторные взаимодействия. Уровни точности прогнозов для ввода механической энергии, глубины проникновения, эффективности расклепки и силы извлечения приведены в таблице 12.3. Уравнения модели (уравнения 12.7-12.10)

представляют очень хороший уровень точности, варьирующийся от минимума 80.7% до 96.1%.

### Выводы тематического исследования

- DoE был использован для изучения влияния четырех параметров процесса (RS, FT, FP и FoP) на совместное формирование и производительность. Формирование соединения было изучено с использованием характеристик крепления заклепки, представленных эффективностью грибов, глубиной проникновения заклепки и подводом механической энергии. Анализ модели DoE может использоваться для идентификации оптимизированных наборов параметров процесса для различных совместных требований. Следовательно, для этой комбинации материалов и исследуемого диапазона параметров формирование и эксплуатационные характеристики соединений могут быть адаптированы в соответствии с их конкретными требованиями в зависимости от применения.
- Оптимизированный набор параметров, который улучшает производительность выдвижения, был разработан благодаря результатам ANOVA. Для данного набора параметров, RS=20,000 об/мин, FT=1.5 с, FoP =1 МПа, в то время как ДФ должен оставаться на своем промежуточном уровне (0.8 МПа).

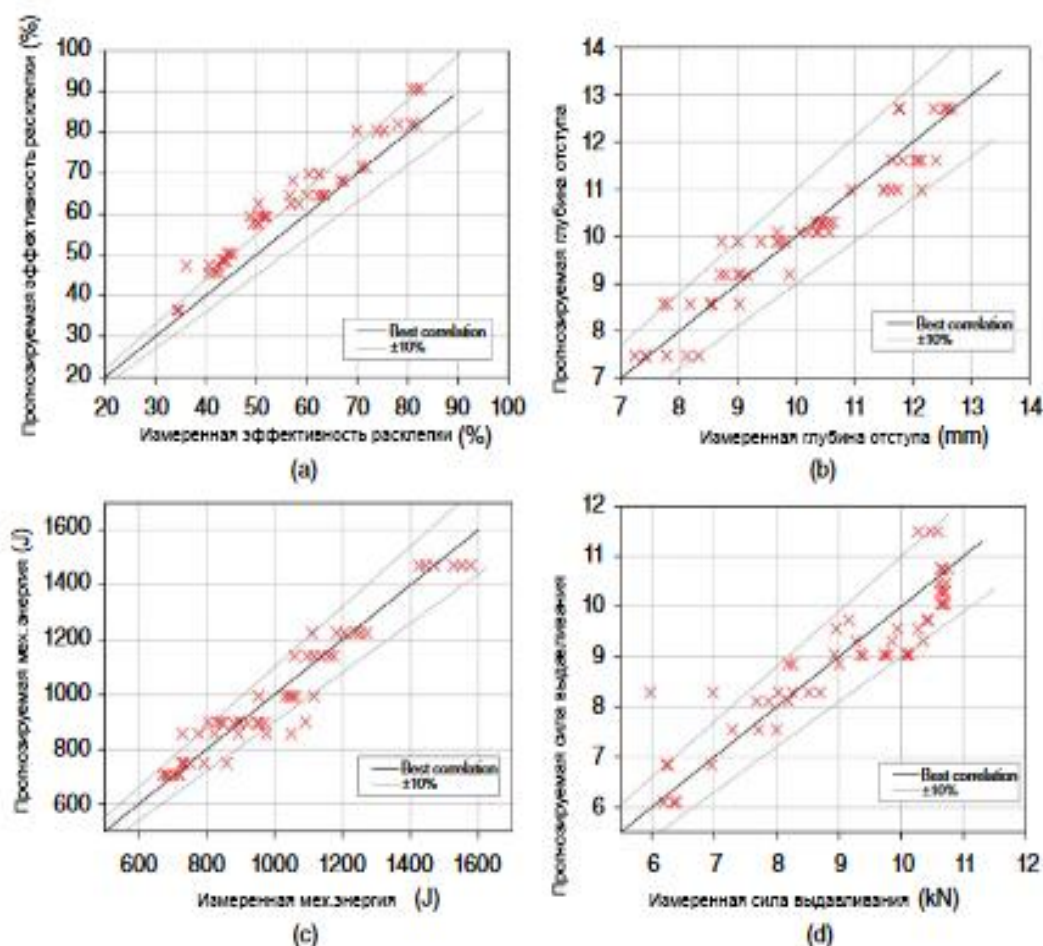


**Рис. 12.3** Прогнозируемые и измеренные ответы: (а) прогнозируемая эффективность расклепки по сравнению с измеренной эффективностью расклепки; (б) прогнозируемая глубина проникновения заклепки по сравнению с измеренной глубиной проникновения заклепки; (в) предсказанный мех. измеренная энергия подвод энергии; и (д) прогнозируемая сила вытягивания, измеренная сила вытягивания

Уравнения регрессии приведены в (12.7)-(12.10) может использоваться для прогнозирования эффективности грибоводства, глубины проникновения заклепки, ввода механической энергии как функции четырех исследованных параметров процесса (RS, FT, FP и FoP), и их двухфакторные взаимодействия. Эти уравнения могут предсказать ввод механической энергии с точностью 92,4%, глубину проникновения с точностью до 90%, эффективность гриба с точностью до 96,1%, а предел прочности при растяжении достигнет точности 80.7%.

**Таблица 12.3** Уровни точности прогнозов по механическому подводу энергии, глубине проникновения, эффективности гриба и силе вытягивания по их уравнениям регрессии.

| Ответы               | $E_{\text{мех}}$ | $T$ | $E_{\text{помехи}}$ | $F_{\text{давливания}}$ |
|----------------------|------------------|-----|---------------------|-------------------------|
| Уровень точности (%) | 92.4             | 90  | 96.1                | 80.7                    |

### 12.2.2.2 Ситуационное исследование: 2- факторный план экспериментов в соединении внахлестку точки фрикции

Следующий пример факторного DoE в развитии процесса соединения металла с полимером происходит от Фрикционного соединения, технологии точечного соединения, разработанной в ГЦГ [23, 24] для получения прочных стыковочных соединений между металлами и композитами. Более подробную информацию о соединении пятна трения можно найти в главе 3. Следующий пример частично или полностью воспроизведен с разрешения Goushegig соавтор. [25].

Влияние параметров процесса соединения пятна трения на площадь соединения и механические характеристики однополотных соединений было исследовано с использованием двухуровневого полнофакторного DoE и ANOVA. С одной стороны, основными параметрами процесса, оказывающими значительное влияние на площадь соединения, были давление соединения, инструмент RS и время соединения. С другой стороны, инструмент RS и давление соединения показали наибольшее влияние на прочность на сдвиг колен в соединениях с последующей глубиной погружения инструмента, тогда как время соединения не было статистически значимым. Взаимодействие между RS и временем соединения было единственным взаимодействием, которое существенно влияло на механические характеристики. Были получены соединения с предельным усилием сдвига внахлест (ULSF) в диапазоне от  $1698 \pm 92$  Н до  $2310 \pm 155$  Н. Было отмечено, что, как правило, увеличение площади склеивания в результате более высокого тепловыделения приводит к повышению механических характеристик соединений. Сгенерированная регрессионная модель ANOVA была использована для определения оптимизированного набора параметров для увеличения прочности на сдвиг колен суставов до  $2280 \pm 88$  Н. Кроме того, контролировалась температура процесса, которая варьировалась в диапазоне 370-474 °C.

Геометрия однослойного сдвигового соединения широко используется в литературе различными исследователями для изучения механических характеристик однополостных соединений благодаря их геометрической простоте. Тем не менее, в предыдущих исследованиях не исследовалось влияние параметров соединения на механические характеристики и площадь склеивания точечных швов с одним кольцевым трением для AA2024-T3 / армированного углеродными волокнами поли (фениленсульфида) / CF-PPS. Номинальная толщина соединительных деталей составляла 2 мм для AA2024 / T3 и 2,17 мм для CF-PPS. Основная цель данного исследования состояла в том, чтобы исследовать влияние параметров процесса Фрикционного соединения на площадь соединения и механические характеристики с помощью статистического анализа. Для оценки статистической оценки влияния параметров процесса соединения на формирование

пластически деформированной зоны на границе раздела композит-металл и прочность на сдвиг колен в соединениях использовались как двухфакторный DoE, так и ANOVA. Статистические модели, основанные на уравнениях регрессии, были созданы для обоих ответов. Разработанные модели были подтверждены новыми наборами параметров соединения, и был достигнут набор параметров соединения, чтобы оптимизировать прочность однослойных сдвиговых соединений. Наконец, кратко обсуждалось образование дефектов в процессе соединения и их влияние на механические характеристики.

**Статистический анализ и оптимизация процессов для зоны склеивания и механических характеристик** В этом тематическом исследовании эксперименты были предложены в соответствии с 2k полнофакторного DoE с четырьмя параметрами каждый на двух уровнях ( $N=24=16$  прогонов) и дополнительной центральной точкой, что привело к 17 различным прогонам. Параметры объединения (факторы), используемые для оценки их влияния на выбранные ответы вместе с соответствующими уровнями, перечислены в Таблице 12.4.

Были проанализированы выбранные ответы (иногда называемые также «наблюдениями»): нормализованная пластически деформированная область (PDZ) и ULSF однополостных соединений, полученные в результате испытания на сдвиг внахлестку. PDZ - самая сильная часть области сцепления при трении, и было показано, что он имеет прямое отношение к ULSF [26]. Зона PDZ соединений была нормализована к площади рукава (63,6 мм<sup>2</sup>). В таблице 12.5 показаны все 17 экспериментальных прогонов, представленных 24 полнофакторный план и центральная точка. В этой работе три копии для угловых точек и центральной точки были созданы для учета статистической дисперсии.

ANOVA был использован для статистического анализа результатов и уточнения влияния каждого параметра процесса и их взаимодействия на выбранные ответы. Доверительный интервал 95% был выбран для анализа. Таблица 12.6

**Таблица 12.4** Технологические параметры (факторы) фрикционного соединения и их соответствующие уровни, используемые в 23-полнофакторном плане экспериментов в этой работе

| Фактор (тех.параметр) | Символ | Ед.изм | Уровень 1 (-1) | Уровень 2 (0) | Уровень 3(+1) |
|-----------------------|--------|--------|----------------|---------------|---------------|
| Скорость вращения     | RS     | Об/мин | 1900           | 2400          | 2900          |
| Глубина погружения    | PD     | мм     | 0.5            | 0.65          | 0.8           |
| Время соединения      | JT     | с      | 4              | 6             | 8             |
| Давление соединения   | JP     | МПа    | 0.2            | 0.25          | 0.3           |

**Таблица 12.5** Полнофакторная матрица ПЭ, перечисляющая 17 заданных условий соединения



(действующий ПЭ).

| Условие соединения |             | Факторы (технологические параметры) |       |          |
|--------------------|-------------|-------------------------------------|-------|----------|
|                    | RS (об/мин) | PD (мм)                             | JT(с) | JP (МПа) |
| 1                  | 1900        | 0.5                                 | 4     | 0.2      |
| 2                  | 2900        | 0.5                                 | 4     | 0.2      |
| 3                  | 1900        | 0.5                                 | 8     | 0.2      |
| 4                  | 2900        | 0.5                                 | 8     | 0.2      |
| 5                  | 1900        | 0.5                                 | 4     | 0.3      |
| 6                  | 2900        | 0.5                                 | 4     | 0.3      |
| 7                  | 1900        | 0.5                                 | 8     | 0.3      |
| 8                  | 2900        | 0.5                                 | 8     | 0.3      |
| 9                  | 1900        | 0.8                                 | 4     | 0.2      |
| 10                 | 2900        | 0.8                                 | 4     | 0.2      |
| 11                 | 1900        | 0.8                                 | 8     | 0.2      |
| 12                 | 2900        | 0.8                                 | 8     | 0.2      |
| 13                 | 1900        | 0.8                                 | 4     | 0.3      |
| 14                 | 2900        | 0.8                                 | 4     | 0.3      |
| 15                 | 1900        | 0.8                                 | 8     | 0.3      |
| 16                 | 2900        | 0.8                                 | 8     | 0.3      |
| 17                 | 2400        | 0.65                                | 6     | 0.25     |

перечисляет результаты среднего и стандартного отклонения ответов для всех 17 условий соединения.

### **Влияние параметров процесса на выбранные ответы**

**Влияние на Зону PDZ** Результаты нормализованной зоны PDZ, перечисленные в таблице 12.6, показывают изменения между 2,1 и 4,1 мм<sup>2</sup>. Для статистической оценки результатов был выполнен ANOVA с уровнем достоверности 95%. Анализ показал, что RS, JT и JP оказывают существенное влияние на область PDZ, потому что значение  $p$  для всех этих трех факторов было 0,000. Тем не менее,  $p$ -значение для PD было 0,429, предполагая, что влияние не является значительным. В дополнение к основным параметрам, единственным двухфакторным взаимодействием со значительным влиянием на реакцию был PD-JT (значение  $p$  0,043). Все другие взаимодействия привели к значению  $p$  выше 0,05 и, следовательно, не считалось, что они существенно влияют на площадь PDZ. Кроме того, значение  $p$  кривизны было 0,473, что означает, что в выбранном диапазоне влияние параметров на отклик можно объяснить линейно.

Рис. 12.4 иллюстрирует основные графики влияния параметров процесса на зону PDZ. Из рисунка видно, что RS, JT и JP значительно влияют на зону PDZ, однако влияние PD незначительное. На этих графиках больший наклон линии указывает на более сильное влияние параметра на отклик. С другой стороны, когда наклон линии близок к нулю, например, для PD, эффект считается статистически незначимым

**Таблица 12.6** Краткое изложение нормированного PDZ и ULSF для всех 17 условий присоединения.

| Условие<br>соединения | Нормированная PDZ Зона |      | ULSF(N)     |         |
|-----------------------|------------------------|------|-------------|---------|
|                       | средний                | STD. | средний (N) | STD.(N) |
| 1                     | 2.1                    | 0.3  | 1905        | 125     |
| 2                     | 2.8                    | 0.4  | 1977        | 108     |
| 3                     | 3.2                    | 0.4  | 1830        | 96      |
| 4                     | 3.5                    | 0.4  | 1825        | 27      |
| 5                     | 2.9                    | 0.5  | 1941        | 115     |
| 6                     | 3.7                    | 0.3  | 2172        | 193     |
| 7                     | 3.7                    | 0.3  | 1698        | 92      |
| 8                     | 4.1                    | 0.4  | 2310        | 155     |
| 9                     | 2.5                    | 0.0  | 1981        | 107     |
| 10                    | 2.9                    | 0.1  | 2140        | 138     |
| 11                    | 2.7                    | 0.1  | 1931        | 113     |
| 12                    | 3.8                    | 0.7  | 2002        | 22      |
| 13                    | 3.5                    | 0.5  | 2049        | 292     |
| 14                    | 4.1                    | 0.1  | 2280        | 88      |
| 15                    | 3.3                    | 0.0  | 2019        | 225     |
| 16                    | 4.1                    | 0.2  | 2143        | 168     |
| 17                    | 2.8                    | 0.4  | 2075        | 139     |

Подвод тепла во время процесса соединения может быть использован для объяснения этих результатов. Подвод тепла является важным параметром во всех процессах соединения в твердом состоянии, поскольку он определяет температуру в области соединения и, следовательно, локальные и глобальные свойства соединяемых деталей. Уравнение 12.11 показывает тепловую модель, используемую для процесса точечной сварки трением с перемешиванием (FSSW) [27]. Из-за сходства в производстве тепла между FSpJ и FSSW, это уравнение может быть использовано для объяснения влияния параметров процесса FSpJ на производство тепла.

$$Q = \sum_{n=1}^N M(n)\omega(n)\Delta t \quad (12.11)$$

Q это сгенерированное тепло в процессе соединения, M это крутящий момент (Нм),  $\omega$  это RS (рад/с)

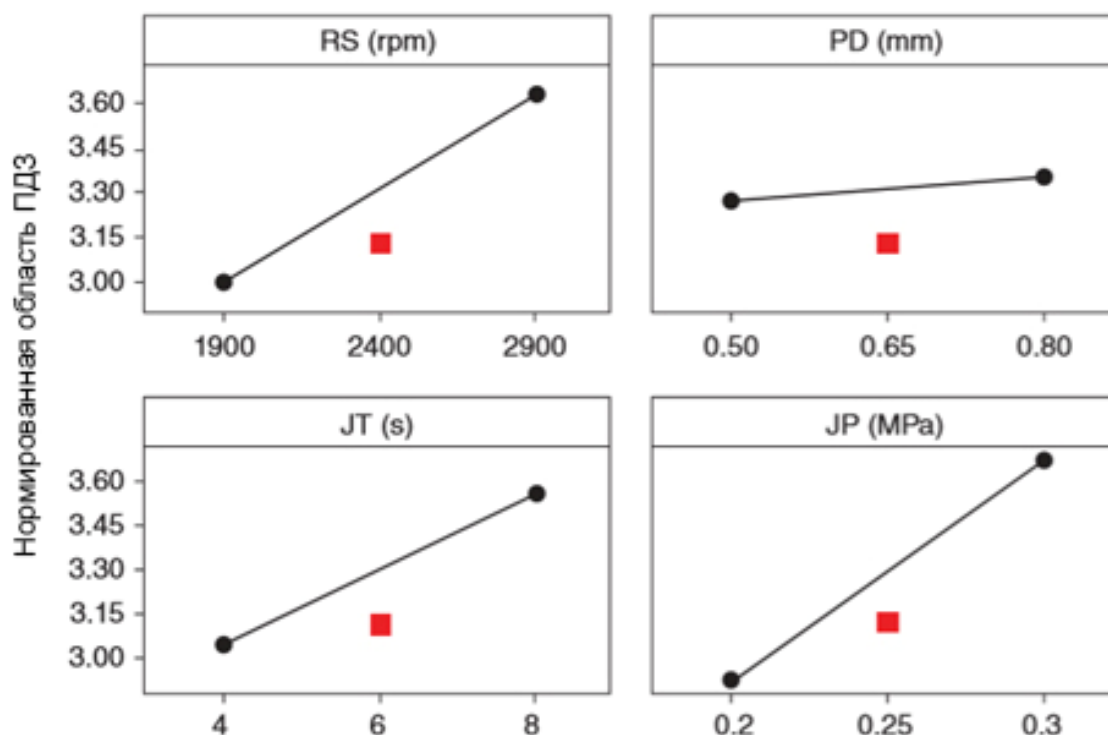


**Рис. 12.4** Графики основного эффекта, иллюстрирующие влияние параметров процесса Фрикционного соединения на нормированную область PDZ.инструмента,

At это время соединения, и N общее количество экспериментов. Из уравнения видно, что RS и JT непосредственно контролирует подачу тепла, где увеличение в обоих из них также увеличивает подвод тепла процесса. JP пропорционально M, поэтому также способствует созданию тепла за счет трения. Как температура присоединения во фрикционном соединении пропорциональна Q, поведение параметров соединения в зоне PDZ можно объяснить [28]. Тепло трения расплавляет тонкий слой полимерной матрицы на границе с металлом. Что касается большинства полимеров, вязкость плавления PPS уменьшается с увеличением температуры (представлен как Q). Следовательно, чем выше Q, тем больше будет объем расплавленной композитной матрицы и тем больше будет зона PDZ.

Чтобы доказать это предположение, зависимость между нормированной площадью PDZ и температурой процесса была показана на рисунке 12.5. В грубом приближении площадь PDZ имеет тенденцию к линейному увеличению с температурой процесса.

Согласно анализу ANOVA, единственным двухфакторным взаимодействием со значительным влиянием на область PDZ был PD-JT, как это наблюдалось на графике взаимодействия на рисунке 12.6. Этот результат может быть объяснен тем фактом, что увеличение PD увеличивает осевое усилие на алюминий под инструментом и, следовательно, на расплавленный полимер в области пятна, которая будет течь с более высокими скоростями. Когда время соединения короткое (4 с), расплавленный PPS не имеет достаточно времени для поддержания достаточно низкой вязкости, и скорость оттока уменьшается быстрее. В этом случае более высокое значение PD может способствовать увеличению скорости потока за счет увеличения приложенного осевого усилия в дополнение к приложенному усилию, создаваемому JP.

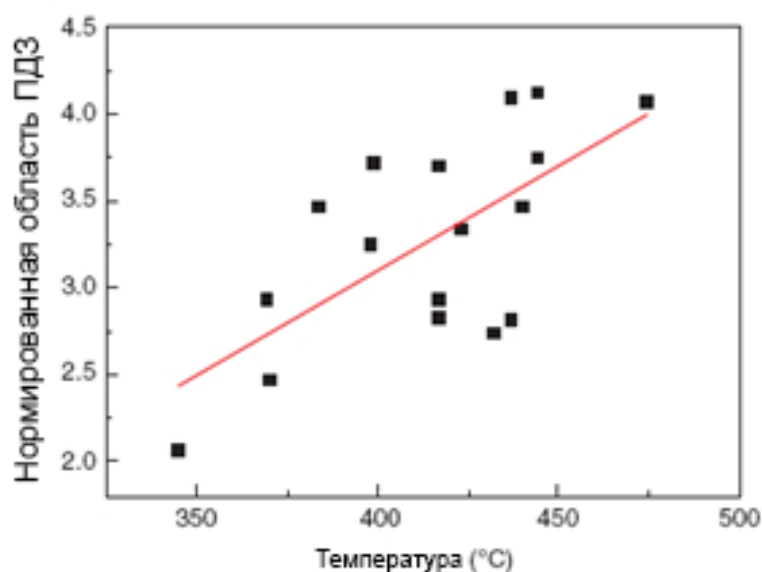


**Рис. 12.5** Нормализованная зависимость температуры процесса зоны PDZ. Как правило, более высокие температуры приводят к увеличению площади PDZ.

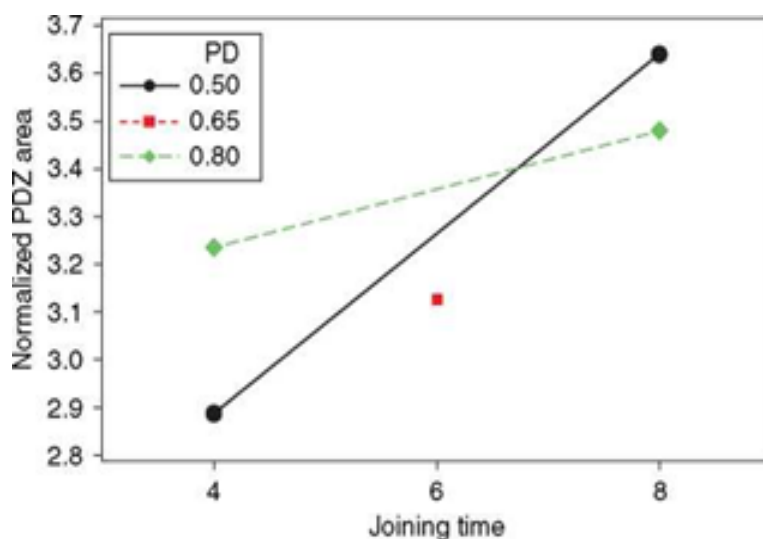


**Рис. 12.6** График взаимодействия, иллюстрирующий влияние PD x JT на нормированную площадь PDZ

Влияние PD полностью изменилось при увеличении JT до 8 с. При JT, равном 8 с, средняя площадь PDZ слегка увеличивается ( $\sim 3\%$ ) путем изменения PD от 0,8 до 0,5 мм; однако средние значения нормированной площади PDZ находятся в диапазоне стандартного отклонения ( $3,5 \pm 0,5$  для PD 0,8 мм и  $3,6 \pm 0,3$  для PD 0,5 мм). Этот результат обусловлен тем, что длительное время JT (при 8 с) может сохранять вязкость расплавленного PPS низкой в течение более длительного периода; следовательно, приложенная сила от JP достаточна, чтобы распространить расплавленный слой PPS в области перекрытия.

**Влияние на предельную силу сдвигового наложения (ULSF)** Средние результаты ULSF (таблица 12.6) показали изменение между  $1698 \pm 92$  Н и  $2310 \pm 155$  Н. Выполненный анализ

ANOVA показал, что RS, JP и PD имеют наиболее значительное влияние на ULSF со значениями  $p$  0,000 0,013 и 0,031 соответственно. Однако значение  $p$  0,080 для BC показало, что оно не оказывает статистически значимого влияния на ULSF в выбранном диапазоне экспериментов. Кроме того, взаимодействие RS-JP со значением  $p$  0,026 является единственным двухфакторным взаимодействием со значительным влиянием. Кроме того, кривизна показала  $p$ -значение 0,675, что говорит о том, что связь между ответом и факторами является линейной.

На рисунке 12.7 показано основное влияние параметров процесса на отклик ULSF. Увеличение RS, PD и JP увеличивает ULSF, тогда как увеличение JT уменьшает ULSF. Сравнение влияния параметров процесса на отклики показывает, что RS и JP значительно влияют как на зону PDZ, так и на ULSF (сравните рисунки 12.4 и 12.7). Увеличение RS и JP приводит к увеличению области PDZ и ULSF, тогда как эффект JT обращен вспять. Кроме того, хотя PD не оказывал существенного влияния на область PDZ, он оказывает существенное влияние на механические характеристики соединений.

Как обсуждалось в предыдущем разделе, увеличение RS увеличивает площадь PDZ из-за более высокого подводимого тепла и, как следствие, более низкой вязкости расплавленного PPS. Как сообщалось ранее [26], область PDZ является самой сильной частью сустава. Во фрикционном соединении желательно расширить эту зону.

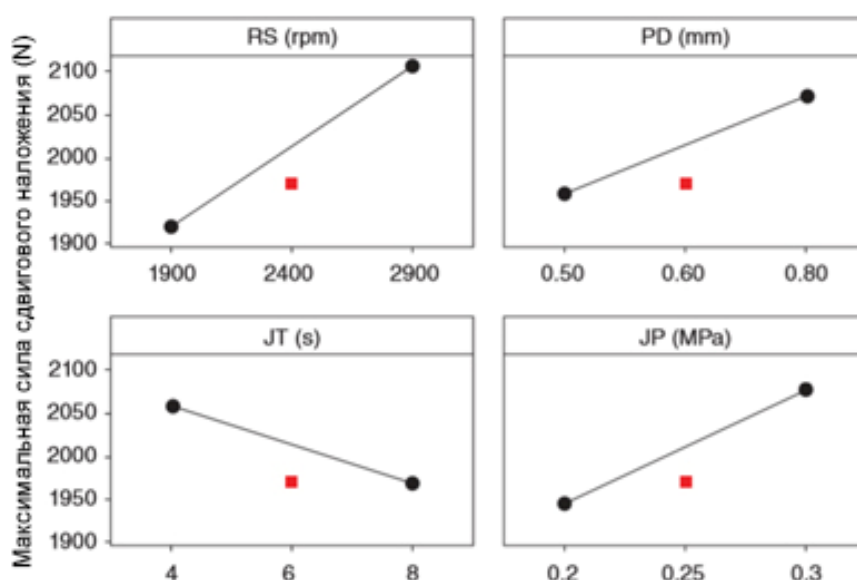


**Рис. 12.7** Графики основного влияния параметров процесса фрикционного соединения на предельное усилие сдвига внахлест.

Существует четкая тенденция, что большая площадь PDZ увеличивает ULSF соединений. Эти результаты соответствуют нашей предыдущей работе [26], которая показала, что увеличение RS инструмента постоянно увеличивает площадь склеивания и, следовательно, прочность на сдвиг внахлест суставов.

Давление соединения является еще одним параметром, оказывающим сильное влияние на прочность соединений на сдвиг. Как объяснено ранее, приложенное осевое усилие путем приложения достаточного количества JP облегчает сжатие потока расплавленного PPS, что, следовательно, приводит к увеличению PDZ. В дополнение к более крупной PDZ, другое объяснение влияния JP на ULSF приведено в [29]. Этот результат объясняется тем фактом, что более высокое значение JP облегчает течение расплавленного PPS в поры и щели на поверхности алюминия. Улучшенное смачивание и заполнение пор увеличивают микромеханическую блокировку как один из основных механизмов связывания.

Глубина погружения инструмента в алюминий также является статистически значимой при анализе ULSF в качестве отклика. PD влияет на форму металлического выступа (геометрический подрез, сформированный в металле на границе раздела с композитом,

см. Главу 3) и, следовательно, на макромеханическую блокировку между алюминием и композитом. Формирование металлического куска и его введение в композит приводит к увеличению макромеханической блокировки и прочности соединений, особенно при сдвиговом нагружении. Более крупный металлический выступ увеличивает макромеханическую блокировку. Следовательно, будет достигнута более высокая прочность на сдвиг колен суставов.

Таким образом, эти результаты позволяют предположить, что самый высокий уровень RS (2900 об/мин), PD (0,8 мм) и JP (0,3 МПа) наряду с самым низким уровнем JT (4 с) может обеспечить оптимизированный набор параметров увеличить прочность на сдвиг внахлестку во фрикционном соединении. Этот набор параметров соответствует прогону 14 выбранного DoE с ULSF  $2280 \pm 88$  Н и нормированной областью PDZ  $4.1 \pm 0.1$  мм<sup>2</sup>.

**Проверка модели ANOVA** предоставила 2 модели для нормализованной области PDZ и ULSF, в которых эти ответы были зависимыми переменными и параметрами соединения (RS, PD, JT, JP), а их взаимодействия были независимыми переменными. На рисунке 12.8 показаны диаграммы Парето для нормализованной области PDZ и ULSF. Вертикальные линии на графиках соответствуют 95% доверительному интервалу, используемому для анализа наборов данных. Все параметры и их взаимодействия с арматурами, проходящими вертикальную линию, считаются статистически значимыми для выбранного ответа и включены в регрессионную модель ANOVA.

Обратите внимание, что для модели ULSF, хотя время соединения статистически считается незначительным параметром, оно также включено в модель, учитывая, что JT является одним из основных параметров процесса. Его включение немного повысило точность модели. Уравнения 12.12 и 12.13 выражают регрессионные модели для нормализованной области PDZ и ULSF соответственно.

нормализованная зона PDZ

$$= -2.69108 + 0.000630833 \times RS + 2.89167 \times PD + 0.402431 \times JT + 0.744167 \times JP - 0.427778 \times PD \times JT \quad (12.12)$$

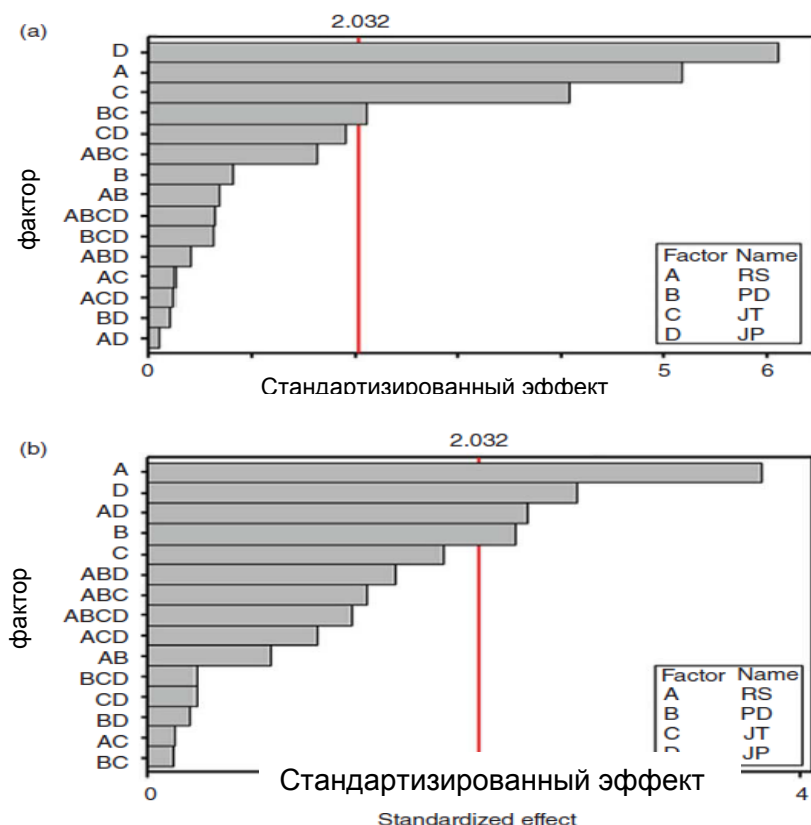


**Рис. 12.8** Диаграммы Парето стандартизированных эффектов для (a) нормализованной области PDZ и (b) ULSF.

$$\begin{aligned}
 ULSF = & 2843.53 - 0.464686 X RS + 182.551 X PD - 18.3718 X JT \\
 & - 627.598 X JP + 0.298916 X RSX JP
 \end{aligned}
 \tag{12.13}$$

Для проверки регрессионных моделей ANOVA были разработаны четыре новых условия соединения. Уровень каждого параметра присоединения генерировался случайным образом в пределах диапазона DoE. В таблице 12.7 перечислены условия присоединения к валидации.

На рисунке 12.9 представлено сравнение экспериментальных данных для обоих ответов и их соответствующих прогнозируемых значений для всех 17 опытов DoE (отметки X) и четырех условий проверки (черные кружки).

**Таблица 12.7** Четыре набора параметров соединения, валидирующих модели регрессии

| Условие<br>соединения | Параметры процесса |         |        |          |
|-----------------------|--------------------|---------|--------|----------|
|                       | RS<br>(об/мин)     | PD (мм) | JT (с) | JP (МПа) |
| V1                    | 2070               | 0.6     | 6.6    | 0.26     |
| V2                    | 2570               | 0.55    | 5.2    | 0.28     |
| V3                    | 2240               | 0.7     | 4.6    | 0.24     |
| V4                    | 2740               | 0.75    | 7.2    | 0.22     |



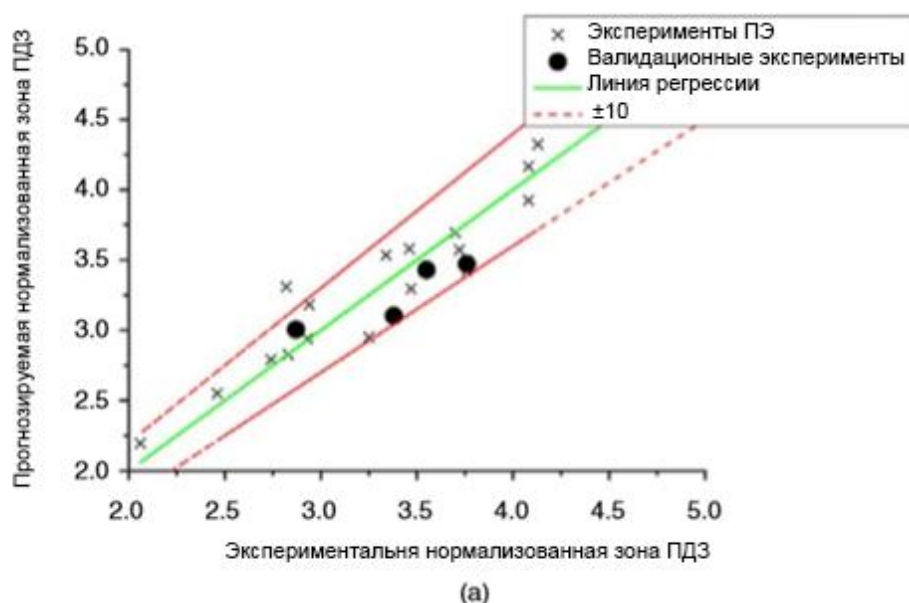


**Рис. 12.9** Прогнозируемые данные из регрессионных моделей в сравнении с экспериментальными результатами для (а) нормализованной области PDZ и (b) ULSF. Крестики (x) иллюстрируют условия присоединения к DoE, тогда как черные точки относятся к результатам условий присоединения к валидации.

Средняя сплошная линия  $45^\circ$  показывает наилучшую линейную зависимость между экспериментальными и прогнозными значениями, тогда как пунктирные линии дают отклонение  $\pm 10\%$  от идеальной линии. Существует очень хорошая корреляция между экспериментальными данными и предсказанными значениями для области PDZ, как видно из рисунка 12.9 (а), в котором большинство точек данных находятся в пределах  $\pm 10\%$  от наилучшего соответствия. Модель также может предсказать нормированную область PDZ для всех четырех условий проверки в пределах ошибки  $\pm 10\%$ . Тем не менее, в случае ULSF, между экспериментальными и прогнозируемыми результатами наблюдается большее отклонение, как показано на рисунке 12.9 (b), в котором некоторые данные не точно прогнозируются моделью. Тем не менее, три из четырех проверочных экспериментов предсказаны в пределах погрешности  $\pm 10\%$  для ULSF.

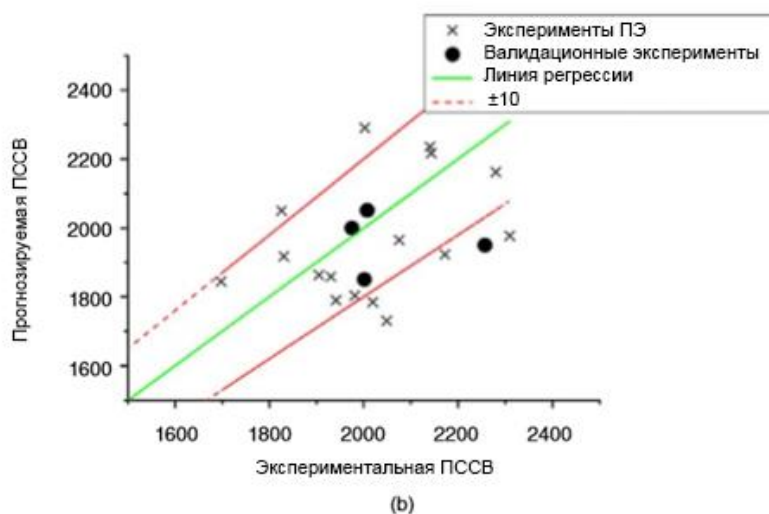


**Рис. 12.9** (Продолжение)

Качественная проверка данных приведена в [25]. Результаты показали, что для области PDZ значение R в квадрате модели составляло 73%, тогда как значение в квадрате R в модели ULSF составляло 70%. Эти значения предполагают, что точность моделей для прогнозирования ответов в выбранном диапазоне параметров соединения составляет приблизительно 70%, что является статистически приемлемым.

**Выводы ситуационного исследования** Основная цель настоящего исследования состояла в том, чтобы статистически оценить влияние параметров процесса Фрикционного соединения на формирование зоны PDZ и прочность однополотных сдвиговых соединений AA2024-T3/CF-PPS. Для статистического анализа были использованы двухуровневые полнофакторные DoE и ANOVA.

На основании статистического анализа был получен набор параметров соединения (RS: 2900 об/мин, PD: 0,8 мм, JT: 4 с, JP: 0,3 МПа), который оптимизирует ULSF соединений. Полученный ULSF с оптимизированными параметрами соединения составил  $2280 \pm 88$  Н. Модели регрессии как для области PDZ, так и для ULSF были получены в соответствии с ANOVA. Модели могут прогнозировать ответы с точностью около 70%, учитывая доверительный интервал 95%, который является статистически приемлемым. Таким образом, эти результаты могут быть использованы в качестве инструмента для оптимизации совместной работы во Фрикционном соединении.

## 12.3 Заключительные примечания

В этой главе показаны основы DoE и ANOVA, которые необходимо учитывать при оптимизации процессов гибридного металлополимерного соединения. DoE представляет собой полезный и хорошо зарекомендовавший себя инструмент для оптимизации и влияния на желаемые реакции процесса. Доступно несколько конструкций, подразумевающих различные сложности и экспериментальные усилия, а также различные возможности для полного понимания влияния параметров процесса и их взаимодействия на реакции процесса. Несколько факторных проектов иллюстрируются в этой главе на основе существующих тематических исследований для фрикционной клепки и фрикционного точечного соединения с их анализом отклонений, интерпретации и проверки результатов. Кроме того, литературные ссылки предоставлены для более глубокого изучения предлагаемых конструкций, исходя из сложности процессов, необходимой глубины анализа и имеющихся ресурсов. Выбор DoE должен основываться на предпосылке максимального эффекта накопленного опыта (т. е. влияния параметров процесса, корреляции между параметрами и ответами, предсказуемости результатов) при минимальном использовании ресурсов (т. е. времени, материала, затрат и т. д.).

## Литература

- 1 Montgomery, D.C. and Runger, G.C. (2003) Applied Statistics and Probability for Engineers, 3rd edn, John Wiley & Sons, Inc.
- 2 Taguchi, G., Chowdhury, S., Wu, Y. et al. (2005) Taguchi's Quality Engineering Handbook, John Wiley & Sons, Inc.
- 3 Montgomery, D.C. (2013) Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, Inc.
- 4 Box, G.E.P. and Draper, N.R. (2007) Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses, John Wiley & Sons, Inc.
- 5 Kutner, M.H., Nachtsheim, C., Neter, J., and Li, W. (2005) Applied Linear Statistical Models, McGraw-Hill Irwin.
- 6 Bilici, M.K. (2012) Effect of tool geometry on friction stir spot welding of polypropylene sheets. Express Polym. Lett., 6, 805–813.
- 7 Y. Bozkurt and S. Salman, (2013) Effect of welding parameters on lap shear tensile properties of dissimilar friction stir spot welded AA 5754-H22/2024-T3 joints, Sci. Technol. Weld. Joining, 18, 337–345
- 8 Harras, B., Cole, K.C., and Vu-Khanh, T. (1996) Optimization of the ultrasonic welding of PEEK-carbon composites. J. Reinf. Plast. Compos., 15 (2), 174–182.

- 9 Dashatan, S.H., Azdast, T., Ahmadi, S.R., and Bagheri, A. (2013) Friction stir spot welding of dissimilar polymethyl methacrylate and acrylonitrile butadiene styrene sheets. *Mater. Des.*, 45, 135–141.
- 10 Myers, R.H., Montgomery, D.C., and Anderson-Cook, C.M. (2016) *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*, John Wiley & Sons, Inc.
- 11 Amancio-Filho, S.T., Beyer, M., and dos Santos, J. F. (2009) Method of Connecting a Mcoавтоpic Bolt to a Plastic Workpiece.
- 12 Amancio-Filho, S.T., Beyer, M., and dos Santos, J.F. (2011) EP 1 790 462 B1 Verfahren zum Verbinden eines mcoавтоpicischen Bolzens mit einem Kunststoff-Werkstück.
- 13 Amancio-Filho, S.T., Roeder, J., Nunes, S.P. et al. (2008) Thermal degradation of polyetherimide joined by friction riveting (FricRiveting). Part I: influence of rotation speed. *Polym. Degrad. Stab.*, 93, 1529–1538.
- 14 L.-A. Blaga, R. Bancila, J. F. dos Santos, and S. T. Amancio-Filho, Friction riveting of glass–fibre-reinforced polyetherimide composite and titanium grade 2 hybrid joints *Mater. Des.*, 50, 825–829, 2013.
- 15 Алтмейер, J., dos Santos, J.F., and Amancio-Filho, S.T. (2014) Effect of the friction riveting process parameters on the joint formation and performance of Ti alloy/short-fibre reinforced polyether ether ketone joints. *Mater. Des.*, 60, 164–176.
- 16 Proenca, B.C., Blaga, L.-A., Dos Santos, J.F., Canto, L.B., and Amancio-Filho, S.T. (2015) Force controlled friction riveting of glass fiber reinforced polyamide 6 and aluminum alloy 6056 hybrid joints. *Proceeding of ANTEC 2015*.
- 17 Borba, N.Z., Blaga, L.-A., dos Santos, J.F. et al. (2016) Influence of the rotational speed on the microstructure and mechanical performance of friction-riveted thermosetting composite joints. *Soldag. Inspezero*, 21, 30–43.
- 18 Amancio-Filho, S.T. and dos Santos, J.F. (2008) FricRiveting: a new joining technique for thermoplastics-lightweight alloy structures. *Proc. of Mater. Sci. Technol.*, Vol. 4, 2362–2373.
- 19 Amancio-Filho, S.T. (2007) Friction Riveting: Development and Analysis of a new Joining Technique for Polymer–Mcoавтоpic Multi-Materials Structures, Technische Universität Hamburg-Harburg.
- 20 Amancio-Filho, S.T., Roeder, J., Nunes, S.P. et al. (2008) Thermal degradation of polyetherimide joined by friction riveting (FricRiveting). Part I: influence of rotation speed. *Polym. Degrad. Stab.*, 93, 1529–1538.
- 21 Amancio-Filho, S.T. and dos Santos, J.F. (2009) Influence of processing parameters on microstructure and properties of a polyetherimide joined by FricRiveting: investigation of rotational speed. 67th Annual technical conference of the society of plastics engineers, ANTEC 2009.
- 22 Алтмейер, J. (2015) Fundamental Characteristics of Friction Riveted Multi-Material Joints, Technische Universität Hamburg-Harburg.
- 23 Amancio-Filho, S.T. and dos Santos, J.F. (2013) Method for joining mcoавтоpic and plastic workpieces. US 8,567,032 B2
- 24 Amancio-Filho, S.T. and dos Santos, J.F. (2012) Method for joining mcoавтоpic and plastic workpieces. European Patent EP2329905B1
- 25 Goushegir, S.M., dos Santos, J.F., and Amancio-Filho, S.T. (2015) Influence of process parameters on mechanical performance and bonding area of AA2024/carbon-fiber-reinforced poly(phenylene sulfide) friction spot single lap joints. *Mater. Des.*, 83, 431–442.
- 26 Goushegir, S.M., dos Santos, J.F., and Amancio-Filho, S.T. (2014) Friction spot joining of aluminum AA2024/carbon-fiber reinforced poly(phenylene sulfide) composite single lap joints: microstructure and mechanical performance. *Mater. Des.*, 54, 196–206.
- 27 Su, P., Gerlich, A., North, T.H., and Bendzsak, G.J. (2006) Energy utilization and generation during friction stir spot welding. *Sci. Technol. Weld. Joining*, 11, 163–169.
- 28 Goushegir, S.M. (2015) Friction Spot Joining of Mcoавтоpic–Composite Hybrid Structures, Technische Universität Hamburg-Harburg.
- 29 Esteves, J.V., Goushegir, S.M., dos Santos, J.F. et al. (2015) Friction spot joining of aluminum AA6181-T4 and carbon fiber-reinforced poly(phenylene sulfide): effects of process parameters on the microstructure and mechanical strength. *Mater. Des.*, 66, 437–445.

## 13 План Тагучи и методология поверхности отклика металлополимерного соединения

*Lucian-Attila Blaga<sup>1</sup>, Gongalo P. Cipriano<sup>1</sup>, Arnaldo R. Gonzalez<sup>2</sup>, и Sergio T. Amancio-Filho<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup>*Институт материаловедения, механики материалов, процессов соединения твердого тела, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Центр материаловедения и прибрежных исследований, Geesthacht, Германия*

<sup>2</sup>*Кафедра машиностроения DEMEC, Инженерная школа, Федеральный университет Риу-Гранди-ду-Сул, Порту-Алегри, Бразилия*

<sup>3</sup>*Текущее место работы: Институт материаловедения, соединения и формирования, Грацкий технологический университет, Грац, Австрия*

### 13.1 Введение

В этой главе представлены основы плана экспериментов Тагучи (DoE) и методология поверхности отклика (RSM) с акцентом на их применение для глубокого понимания и оптимизации технологий соединения металлов и полимеров. Тематические исследования по проекту Тагучи и Методу поверхности отклика, представленные в этой главе, являются примерами исследовательских работ в рамках Группы современных полимерных и гибридных конструкций в Гельмгольце-Центруме, Германия, и ее проектов международного сотрудничества.

### 13.2 План эксперимента Тагучи

Как обсуждалось в предыдущей главе, факторные DoES относительно просты в создании и отслеживании. Тем не менее, в зависимости от количества параметров и уровней обучения, они могут быть большими и непрактичными, особенно из-за увеличения количества экспериментальных данных, которые будут получены. Вместо того, чтобы тестировать все возможные комбинации переменных, можно эффективно протестировать все пары комбинаций с помощью метода ортогональных массивов Тагучи [1].

#### 13.2.1 Общее описание

План Тагучи [1] дает более сжатую последовательность экспериментов. Для начала нам нужно выбрать подходящий ортогональный массив, исходя из количества изучаемых параметров процесса и их уровней. Как правило, массивы можно найти в литературе, но они также могут быть получены, нарисованы вручную или получены из детерминированных алгоритмов [2]. Селектор массива Тагучи представлен в таблице 13.1.

Таблица 13.1 Матричный искатель ПЭ Тагучи

| Уровень<br>Параметры | 2   | 3   | 4   | 5   |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|
| 2                    | L4  | L9  | L16 | L25 |
| 3                    | L4  | L9  | L16 | L25 |
| 4                    | L8  | L9  | L16 | L25 |
| 5                    | L8  | L18 | L16 | L25 |
| 6                    | L8  | L18 | L32 | L25 |
| 7                    | L8  | L18 | L32 | L50 |
| 8                    | L12 | L18 | L32 | L50 |
| 9                    | L12 | L27 | L32 | L50 |
| 10                   | L12 | L27 | L32 | L50 |
| 11                   | L12 | L27 |     | L50 |
| 12                   | L16 | L27 |     | L50 |
| 13                   | L16 | L27 |     |     |
| 14                   | L16 | L36 |     |     |
| 15                   | L16 | L36 |     |     |
| 16                   | L32 | L36 |     |     |
| 17                   | L32 | L36 |     |     |
| 18                   | L32 | L36 |     |     |
| 19                   | L32 | L36 |     |     |
| 20                   | L32 | L36 |     |     |
| 21                   | L32 | L36 |     |     |
| 22                   | L32 | L36 |     |     |
| 23                   | L32 | L36 |     |     |
| 24                   | L32 |     |     |     |
| 25                   | L32 |     |     |     |
| 26                   | L32 |     |     |     |
| 27                   | L32 |     |     |     |
| 28                   | L32 |     |     |     |
| 29                   | L32 |     |     |     |
| 30                   | L32 |     |     |     |
| 31                   | L32 |     |     |     |
| 32                   | L32 |     |     |     |

Каждый эксперимент имеет определенное количество повторов. Для определения влияния каждой переменной (параметра) на выход (отклик) необходимо рассчитать отношение сигнал/шум (Отношение S/N) для каждого эксперимента. Отношение сигнал/шум — это шкала измерения, используемая в отрасли связи (измерение фактического сигнала и преобразование волны в звук), принятая в разработке качества. Качество измерения выражается соотношением сигнала и шума [1]. Для измерительной системы изучается соотношение вход-выход; истинное значение входным, а результат измерения - выходным. Отношения сигнал/шум имеют три элемента: чувствительность, наклон и изменчивость. Отношение S/N может быть определено с помощью следующих уравнений в соответствии с [1]:

$$S/N_i = 10 \log \frac{\overline{y_i^2}}{s_i^2} \quad (13.1)$$

где  $y$  это значение выхода, а  $s$  это его вариант.

$$\overline{y_i} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N y_{i,u} \quad (13.2)$$

Таким образом,

$$\bar{y}_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N y_{i,u} \quad (13.2)$$

$i$  - номер эксперимента,  $U$  - номер дубликата (пробный), и  $N$  - количество повторов (испытаний) на каждый эксперимент.

Чтобы максимизировать один отклик (выход), отношение S/N должно быть определено следующим образом:

$$S/N_i = -10 \log \left[ \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N \frac{1}{y_u^2} \right] \quad (13.4)$$

После расчета отношения S/N для каждого эксперимента среднее отношение S/N для каждого фактора и уровня. Рассчитывается диапазон R для каждого параметра (макс S/N - мин S/N), это означает, что чем больше R для параметра, тем выше его влияние на процесс. Использование соотношений сигнал/шум позволяет максимизировать надежность процесса, просто выбирая уровни факторов управления, которые имеют наибольшее отношение сигнал/шум. Линейность, один из компонентов S/N, важна для упрощения настроек в процессе проектирования, а также для калибровки измерительных систем. Когда отношение вход/выход не является линейным, отклонения оцениваются как ошибка после разложения вариаций; следовательно, отношение S/N становится меньше [1, 2].

### 13.2.2 Вариационный анализ

Все экспериментальные данные могут быть статистически проанализированы для улучшения качества после того, как проект установлен и экспериментальные данные собраны. В примерах (тематических исследованиях), показанных в этой главе, для этой цели использовалось программное обеспечение MINITAB. AN OVA был выбран для статистического анализа. AN OVA сравнивает средние результаты нескольких групп параметров и измеряет дисперсию записанных данных. Отклонения делятся на систематические отклонения (из-за эффектов экспериментального процесса) и несистематические отклонения (из-за ошибок и неисправностей). Отношение между этими двумя отклонениями — это так называемое отношение F/значение. Существуют односторонний ANOVA (одна независимая переменная и несколько уровней или групп) и факториальный ANOVA (двухсторонний, трехсторонний для нескольких комбинаций с двумя или более переменными и т. д.) [2].

## 13.3 Пример плана эксперимента Тагути при соединении металла к композитным конструкциям

### 13.3.1 Ситуационное исследование 1 - Тагути L9 (34) DoE Соединение с двойной нахлесткой точки трения

Выбранным примером DoE Тагути является тематическое исследование по Фрикционному соединению (FSpJ), опубликованное Esteves соавтор. [3]. Следующий раздел воспроизводит полностью или частично упомянутую исследовательскую работу с разрешением на публикацию.

В этом исследовании было изучено индивидуальное влияние параметров процесса соединения на микроструктуру и механическую прочность гибридных соединений двойного наложения AA6181-T4/CF-PPS с использованием метода Тагути и ANOVA. В этой работе использовались рулонные листы AA6181/T4 номинальной толщины 1,0 и 1,5 мм, которые должны быть соединены с ламинатами CF-PPS 2,17 мм (номинальной толщины).

Как уже обсуждалось в предыдущих разделах, четыремя основными контролируемыми параметрами процесса метода FSpJ являются: скорость вращения инструмента (RS), время соединения (JT), глубина погружения втулки (PD) и сила соединения (JF). Эти параметры процесса напрямую влияют на механизмы склеивания и, следовательно, на микроструктуру и механические характеристики соединений. Вкратце, RS и JT контролируют подвод тепла и количество образующегося полимерного расплавленного

слоя, а также его вязкость. PD отвечает за форму и глубину металлического куска, а JF обеспечивает тесный контакт между пластинами и контролирует поток расплавленного слоя полимера. Для получения дополнительной информации о процессе Фрикционного соединения, пожалуйста, обратитесь к Главе 3.

Подход DoE, разработанный Тагучи и соавт. [1] является мощным статистическим методом, который позволяет оптимизировать производительность продукта, процесса, плана и системы при значительном сокращении экспериментов, времени и затрат [4].

Этот метод уже успешно использовался в нескольких исследованиях по оптимизации процессов сварки. В сочетании с использованием ANOVA модели Тагучи можно использовать для определения относительной важности каждого параметра процесса соединения для свойств соединения [4].

Метод Тагучи DoE и ANOVA использовались для исследования индивидуального влияния каждого параметра процесса Фрикционного соединения (RS, PD, JT и JF) на микроструктуру и сопротивление сдвигу внахлест алюминия из двухслойных соединений AA6181-T4/CF-PPS. RS, за которым следуют JT и PD, оказали наибольшее влияние на прочность на сдвиг колен в соединениях с двумя коленями, в то время как JF оказал наименьшее влияние. Дисперсионный анализ показал, что чем больше JT (большие тепловые затраты), PD (большая макромеханическая блокировка) и JF, тем выше прочность соединения. Был определен верхний предел для RS, где дальнейшие увеличения приводили к меньшим силам соединения (из-за проскальзывания инструмента, уменьшающему тепловыделение), связанным с меньшими областями соединения. Увеличение JF привело к лучшему распространению (сжатию) расплавленного полимера на границе раздела, что привело к лучшей трещине и заполнению пор на поверхности металла; в результате были улучшены силы сцепления и механическая прочность соединения.

### 13.3.1.1 Оптимизация процессов

Параметры (факторы) соединения и их уровни приведены в таблице 13.2. Исследованным ответом была предельная сила сдвига внахлест (ULSF) суставов. Для этой цели была выбрана L9-ортогональная матрица Тагучи. Он состоит из четырех столбцов и девяти строк, что привело к девяти экспериментам. Этот DoE - разработанный для уменьшения количества экспериментов 34-факторной модели с 81 прогоном [1] - был использован в сварке для оценки прочности суставов [5, 6]. Диапазон параметров (уровней) соединения, используемых в качестве входных данных для экспериментов Тагучи, был выбран предварительным микроструктурным анализом для оценки образования соединений (то есть размера связанной области, наличия термических объемных дефектов в консолидированном полимере, трещин в алюминиевом партнере), используя

**Таблица 13.2** Экспериментальные средние значения и стандартные отклонения ПССВ и отношения S/N для соединений AA6181-T4/CF-PPS как функция параметров Фрикционного соединения.

| Условие | CB (rpm) |      |   | Пд (mm) | BC(s)      | CC (kN) | ПССВ (N) | S/N отношение |
|---------|----------|------|---|---------|------------|---------|----------|---------------|
| 1       | 1200     | 0.75 | 2 | 6.8     | 2107±470   | 65.85   |          |               |
| 2       | 1200     | 1.0  | 4 | 7.5     | 2480±286   | 67.75   |          |               |
| 3       | 1200     | 1.15 | 6 | 8.3     | 3523 ± 527 | 70.69   |          |               |
| 4       | 1400     | 0.75 | 4 | 8.3     | 3241 ± 662 | 69.68   |          |               |
| 5       | 1400     | 1.0  | 6 | 6.8     | 3460±381   | 70.65   |          |               |
| 6       | 1400     | 1.15 | 2 | 7.5     | 3254±485   | 69.97   |          |               |
| 7       | 1600     | 0.75 | 6 | 7.5     | 3153±282   | 69.88   |          |               |



|   |      |      |   |     |            |       |
|---|------|------|---|-----|------------|-------|
| 8 | 1600 | 1.0  | 2 | 8.3 | 3112±523   | 69.47 |
| 9 | 1600 | 1.15 | 4 | 6.8 | 3248 ± 722 | 69.63 |

подход «один фактор за один раз» (OFAT), соответствующий изменению одного параметра за один раз. Выбран критерий статистической оценки «чем больше, тем лучше» для отношения сигнал/шум с целью определения максимального значения ответа (ULSF). Отношение S/N для анализа «чем больше, тем лучше» (S/N<sub>ltb</sub>) было рассчитано уравнением 13.5 [1]:

$$S/N_{ltb} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (13.5)$$

где n это количество тестов и y это значение ULSF испытания i-th.

### 13.3.1.2. Влияние технологического параметра FSpJ на механические характеристики соединения с помощью плана эксперимента Тагучи

В таблице 13.2 перечислены ортогональные матрицы Тагучи для комбинаций параметров Фрикционного соединения, а также экспериментальные средние значения (отклики) и стандартные отклонения ULSF и отношений S/N для соединений с двумя коленями AA6181-T4/CF-PPS. Отношение S/N указывает, насколько качественная характеристика ULSF отклоняется от желаемого значения. Чем выше отношение S/N, тем надежнее исследуемый отклик [1].

Соединения проявляли сдвиговые усилия в диапазоне от 2107±470Н (прогон 1) до 3523±527 Н (прогон 3). Соединения показывают значения нагрузки при пиковом смещении от 0,7±0,06 мм (прогон 1) до 0,9±0,09 мм (прогон 3), что указывает на хрупкое разрушение. Испытания 1 и 2 показали самые низкие значения для ULSF, вероятно, из-за более низкой потребляемой мощности, как будет обсуждаться в этом разделе. Все оставшиеся прогоны Фрикционного соединения (3-9) приводили к аналогичным значениям ULSF, принимая во внимание общее среднее значение ULSF (3064±466 Н) и стандартные отклонения каждого протестированного состояния сустава.

Прогон 3 показал самое высокое отношение сигнал/шум в результате выбранного сочетания параметров процесса, что привело к высокой подводимости тепла и большому частичному разряду. Основываясь на сходствах Фрикционного соединения и других процессов сварки на основе трения, касающихся тепловыделения, уравнение 13.6 [7] было использовано для лучшего понимания влияния параметров процесса FSpJ на механическое поведение двухшарнирных соединений (см. Пример 2 в Главе 12 для подробного описания).

$$Q = \sum_{n=1}^N M(n) \omega(n) \Delta t \quad (13.6)$$

Из уравнения 13.6 можно сделать вывод, что RS и JT являются важными переменными для выработки тепла. Чем больше эти параметры, тем больше подвод тепла. Более высокий подвод тепла вызывает образование больших соединенных областей соединения, что визуально подтверждается большим количеством расплавленного слоя PPS на границе раздела. Это можно увидеть на поверхности разлома прогона 3 на рис. 13.1 (а) (обозначено белыми стрелками) по сравнению с прогоном 1 (рис. 13.1 (b)). Кроме того, в прогоне 3 наблюдалось выраженное образование комков из-за сочетания большой подводимой теплоты (RS: 1200 об/мин; JT: 6 с) и PD (1,15 мм) (черные стрелки, рис 13.1(c)),

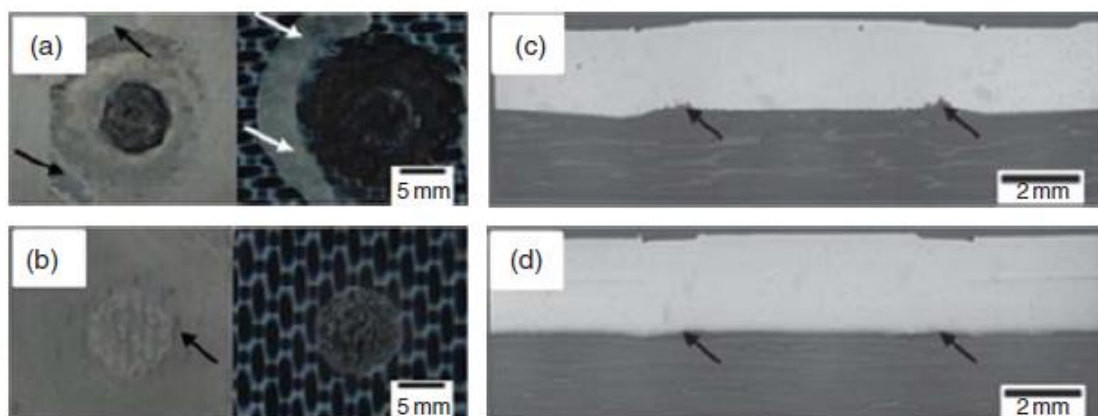


**Рис. 13.1** Поверхности разрушения соединений после испытания на сдвиг внахлест: (а) Использование 3; (b) Использование Run 1. Микроструктура сечения: (с) Использование 3; (d) Использование 1.

в то время как для прогона 1 образование кусочков практически отсутствовало из-за комбинированного меньшего тепловыделения (RS: 1200 об/мин; JT: 2 с) и меньшего PD в 0,75 мм (черные стрелки, рис. 13.1 (d)).

Разрушения прогонов 1 и 3 происходили преимущественно из-за разрушения адгезива (на границе раздела между алюминием и консолидированным полимерным слоем) и разрушения когезии (в пределах толщины консолидированного полимерного слоя в верхних композитных слоях [8]) соответственно. При когезионном разрушении уплотненный слой PPS остается частично прикрепленным к алюминию и композитным пластинам. Прогон 1 показывает самое низкое отношение сигнал/шум в экспериментальной установке из-за его низкого теплового вклада в результате выбранной комбинации параметров процесса (комбинация минимальных значений RS и JT); это вызвало образование меньшего PPS-расплавленного слоя и силы адгезии на границе раздела. Следовательно, была образована меньшая площадь склеивания, снижающая механическую прочность. Кроме того, условие 1 было выполнено с самым низким уровнем PD (0,75 мм), уменьшая формирование/размер выступа и дополнительную макромеханическую блокировку, как показано черными стрелками на рисунке 13.1 (b) и (d).

Выбранная L9-ортогональная матрица в этом DoE Тагучи позволяет анализировать индивидуальное влияние каждого параметра процесса Фрикционного соединения на прочность сустава. Это является ограничением для этого DoE по сравнению с его аналогом 34 полного факторного плана, поскольку некоторые важные взаимодействия второго и высшего порядка не принимаются во внимание. Средние значения отношения S/N для каждого параметра процесса на уровнях 1 (минимум), 2 (среднее) и 3 (максимум) были рассчитаны для ULSF из значений отношения S/N, перечисленных в таблице 13.3. Максимальная разница между средними значениями отношения S/N на трех протестированных уровнях (delta max) была рассчитана для каждого параметра соединения. Это различие показывает, насколько чувствительным является ответ ULSF на изменение заданного параметра соединения, что позволяет ранжировать индивидуальную важность для каждого параметра соединения [2].

Рис. 13.2 - более полное графическое представление таблицы 13.3, иллюстрирующее графики основных эффектов для отношения сигнал/шум.

**Таблица 13.3** Основные эффекты соотношения сигнал/шум в рамках данного ситуационного исследования

| Уровень | RS   | PD    | JT    | JP    |
|---------|------|-------|-------|-------|
| 1       | 68.1 | 68.47 | 68.43 | 68.71 |
| 2       | 70.1 | 69.79 | 69.02 | 69.2  |

|              |       |       |      |       |
|--------------|-------|-------|------|-------|
| 3            | 69.66 | 70.09 | .41  | 69.94 |
| Дельта макс. | 2     | 1.62  | 1.98 | 1.24  |
| Разряд       | 2     | 3     | 2    | 4     |

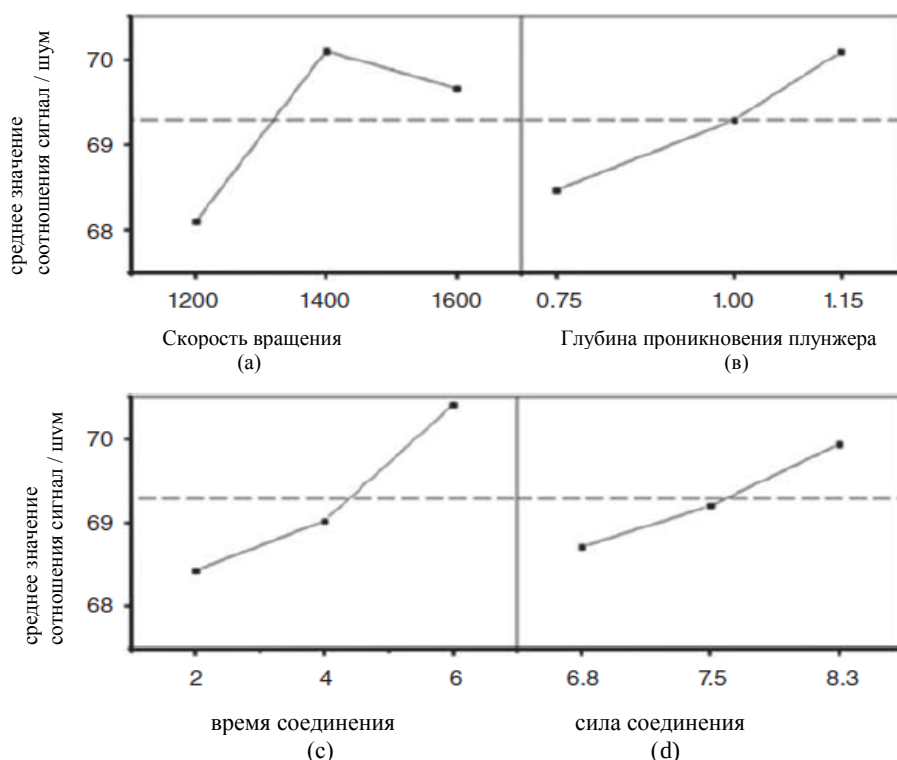


**Рис. 13.2** Графики эффектов для отношения сигнал/шум для каждого параметра процесса выполнения FSpJ соединения: (а) скорость вращения, (б) глубина проникновения плунжера, (с) время соединения, (д) сила соединения

Пунктирная линия представляет общее среднее значение соотношения сигнал/шум, которое было рассчитано как 69,3 дБ (пунктирная линия на рис. 13.2 (a-d)).

В соответствии с таблицей 13.3 и рис. 13.2, RS оказывает наибольшее влияние на предельную прочность сдвигового наложения соединений, за которыми следуют JT, PD и JF (как объяснено в предыдущих разделах, чем больше наклон кривой, тем больше влияние параметра соединения). Влияние наиболее важных параметров процесса - скорости вращения (RS) и времени соединения (JT) - на механическую прочность соединений показывает, что подвод тепла (см. Уравнение 13.5) оказывает значительное влияние на механизмы соединения, благодаря Делю в том, что он отвечает за уровень плавления матрицы PPS на границе раздела. В дополнение к этому эффекту PD способствует образованию макромеханической блокировки листов посредством пластической деформации металла и образования выступа. Следовательно, контроль подводимой теплоты и частичного разряда имеет решающее значение для получения прочных точечных швов с двойным кругом.

ANOVA была проведена для определения относительной важности каждого параметра процесса фрикционного соединения для ULSF. Процент вклада (P%) рассчитывался как отношение суммы квадратов (SS) выбранного фактора и общей суммы квадратов. Ошибка не учитывалась статистической моделью в этом случае, поскольку степень свободы ошибки равна нулю. Среднеквадратичное значение (MS) рассчитывается как SS, деленная на число степеней свободы, связанных с соответствующим параметром процесса [1]. Результаты, представленные в этой таблице, согласуются с результатами, полученными в таблице 13.2, в которых RS (34,77%) является наиболее важным параметром процесса, влияющим на ULSF, за которым следуют JT (32,37%), PD (20,70%) и JF (12,15%).

Индивидуальные влияния параметров процесса Фрикционного соединения на прочность соединения и микроструктуру были индивидуально проанализированы и обсуждены более подробно в следующих разделах.

**Скорость вращения (RS) и время соединения (JT)** ULSF, представленный отношением сигнал/шум, увеличивается с RS от 1200 до 1400 об/мин. Это может быть связано с увеличением подводимой теплоты, что приводит к увеличению площади склеивания на границе композитного металла и, следовательно, к более высоким механическим характеристикам. Такое поведение уже сообщалось в главе 3 для Фрикционного соединения AA2024/CF-PPS. Мы показали, что площадь склеивания постоянно увеличивается за счет увеличения RS инструмента из-за более высокого подводимого тепла, что приводит к более высоким механическим характеристикам соединения. Однако, в отличие от предыдущего наблюдения, прочность на сдвиг соединений с двухсторонней нахлесткой в этом исследовании снизилась при RS выше 1400 об/мин. Такое поведение можно объяснить хорошо известным явлением проскальзывания инструмента, которое обычно наблюдается при сварке алюминия методом точечной сварки трением с перемешиванием (FSSW) [9, 10]. Повышение температуры при дальнейшем повышении RS приводит либо к снижению вязкости пластифицированного алюминия и/или локальному плавлению [10] (последнее не было обнаружено в данном исследовании). Когда RS изменяется от 1400 до 1800 об/мин, может произойти проскальзывание между инструментом и окружающим алюминием. Это уменьшает крутящий момент и уменьшает выделение тепла при трении, что приводит к уменьшению площади склеивания и снижению прочности соединения (рис. 13.3).

По результатам AN OVA, JT является вторым параметром, оказывающим наибольшее влияние на механические характеристики соединений. По тем же причинам, которые обсуждались для RS, увеличение JT в течение анализируемого интервала (2-6 с) увеличивает площадь скрепления и прочность на сдвиговое наложение (рис. 13.4).

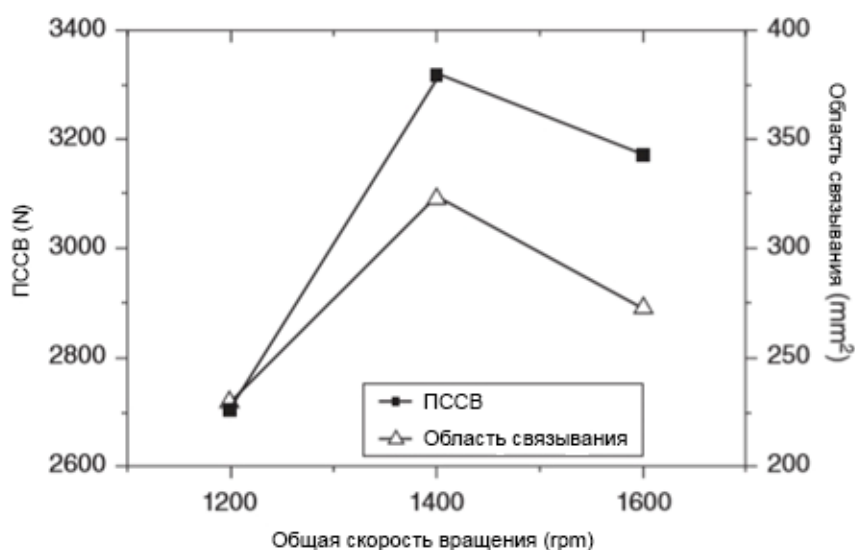


**Рис. 13.3** Влияние скорости вращения инструмента (CB) на ULSF и область связывания

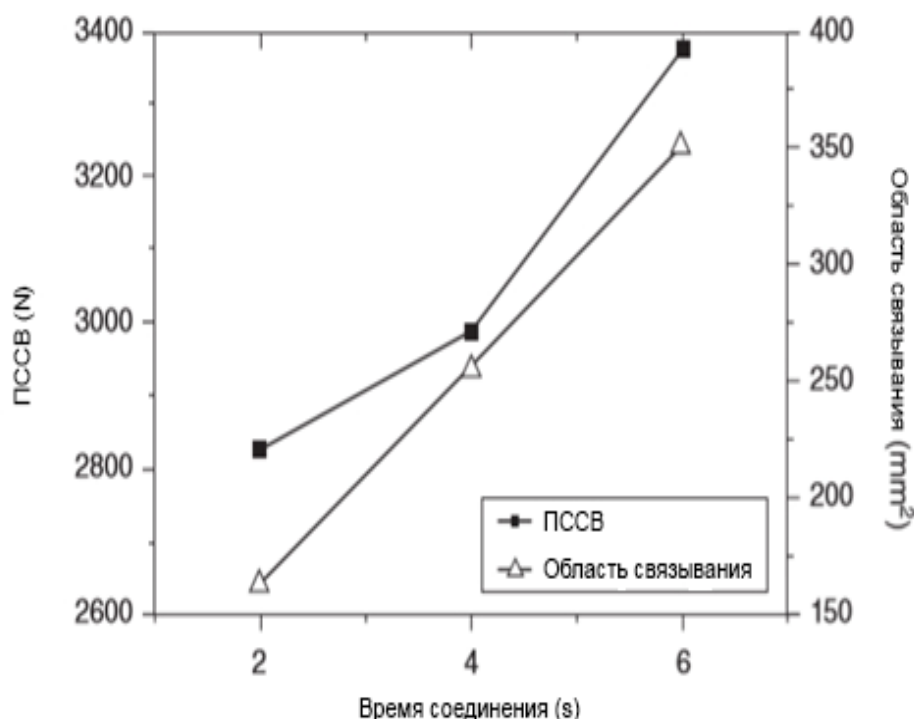


**Рис. 13.4** Влияние времени соединения (JT) на ULSF и область связывания.

**Глубина погружения (PD)** Как обсуждалось ранее на рис. 13.1, прочность на сдвиг колен в точечных соединениях с двойным наложением представляет собой сочетание размера области склеивания и макромеханической блокировки, связываемой с металлическим выступом. Увеличение PD в выбранном диапазоне увеличивает ULSF (рис. 13.5), учитывая большее вдавливание алюминия в композитную поверхность (металлический выступ) и макромеханическую блокировку.

Механизмы, диктующие образование металлического куска, до сих пор не полностью поняты; однако современная теория утверждает, что на размер и форму будет оказывать непосредственное влияние не только PD, но и локальная формуемость металла. Следовательно, разные уровни подводимого тепла могут изменить конечную геометрию металлического выступа на тех же самых PD. Например, прогоны 1 и 7 ортогональной матрицы L9 Тагучи имеют одинаковый уровень PD (0,75 мм). Тем не менее, прогон 7 был объединен с более высоким подводом тепла (RS: 1600 об/мин и JT: 6 с) по сравнению с прогоном 1 (RS: 1200 об/мин и JT: 2 с), увеличивая формуемость алюминия и площадь склеивания, что приводит к более высокой механической прочности

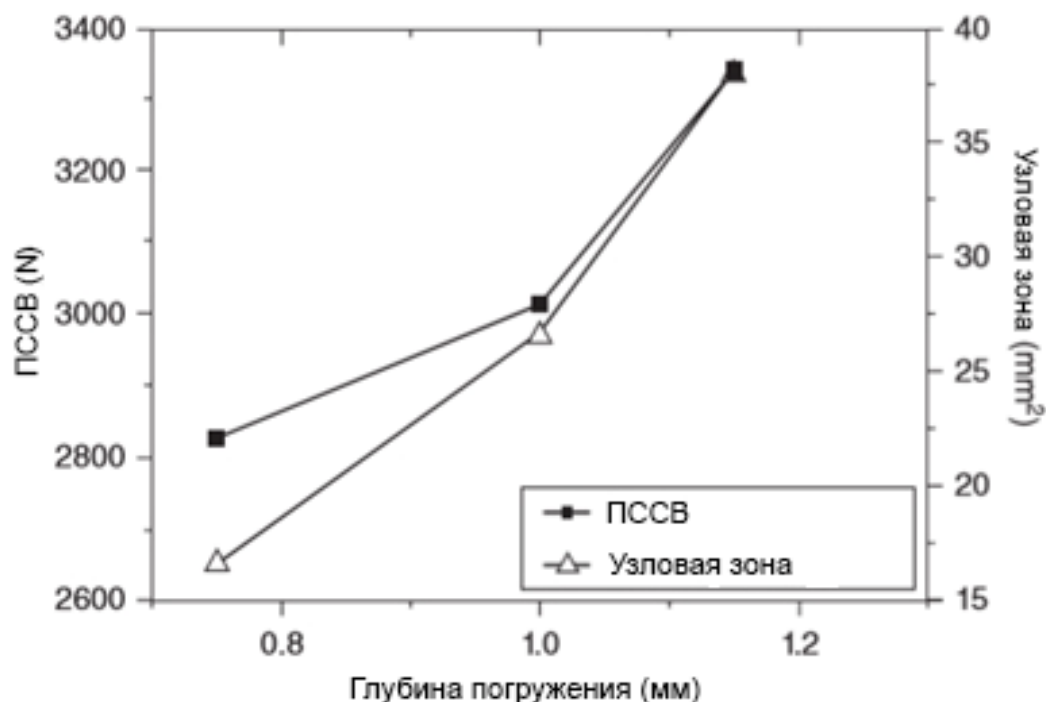


**Рис.13.5** Влияние глубины погружения (PD) плунжера на ULSF и узловую зону.

**Сила соединения (JF)** Для выбранных материалов и изученного диапазона параметров процесса прочность на сдвиг в двух кругах показала наименьшую чувствительность к изменению JF. Микромеханизмы связывания на границе металл-композит были недавно описаны в [8]. Гидростатические силы, создаваемые в результате применения JF, в основном контролируют поток расплавленного полимера и неровности / щелевую щель на поверхности алюминия. Ожидается, что более высокие JF увеличат распространение слоя расплавленного полимера на щели и поры поверхности металла, улучшая смачиваемость (заполнение пор) на границе раздела. Следовательно, эффективность микромеханической блокировки может увеличиваться, поддерживая лучшие механические характеристики. С другой стороны, чрезмерная JF может уменьшить толщину расплавленного слоя, выталкивая расплавленный полимер за пределы области склеивания (сжимающий поток). Очень тонкие уплотненные полимерные слои на границе раздела металл-композит уменьшат силы адгезии на границе раздела, что приведет к снижению прочности. В этой работе выбранный диапазон JF, полученный с помощью анализа OFAT, был оптимизирован, чтобы позволить совместное формование. Таким образом, существенных различий в механических характеристиках образцов не наблюдалось. Для более глубокого понимания этого поведения требуются дальнейшие исследования в более широком диапазоне JF.

### 13.3.1.3 Выводы ситуационных исследований

Индивидуальное влияние параметров процесса Фрикционного соединения на микроструктуру и механическую прочность двухслойных соединений из поли (фениленсульфида) ламината (CF-PPS), армированного алюминием AA6181-T4/CF-PPS, было исследовано с использованием DoE и ANOVA.

Использование DoE Тагути L9 (34) и дисперсионный анализ позволили определить индивидуальное влияние основных параметров соединения на сопротивление сдвигу соединения. Анализ Тагути показал, что инструмент RS является параметром, оказывающим наибольшее влияние на прочность на сдвиг соединений (34,77%), за которым следуют JT (32,37%), PD (20,70%) и JF (12,15%). Было продемонстрировано, что совместное взаимодействие RS и JT увеличивает выработку тепла, изменяя микроструктуру сустава и прочность на сдвиг. Уровень подводимого тепла отвечает за

количество расплавленного слоя PPS на стыке, что увеличивает площадь склеивания. Кроме того, PD играет важную роль в макромеханических механизмах блокировки на границе раздела металл-композит, контролирующая образование металлического куска. Чем выше PD, тем более выраженным будет металлический выступ (рис. 13.1). Следовательно, в результате повышенных JTс и оптимизированных RSs будет присутствовать больший подвод тепла (существует верхний предел для первого, где увеличение последнего приведет к проскальзыванию инструмента, уменьшению тепловыделения), а также PD приведет к более прочным соединениям. Однако у PD есть ограничение, так как слишком большие PD могут вызвать разрыв алюминиевых пластин в области точечного соединения.

Выбор Тагучи DoE в качестве замены на полнофакторный DoE оказался интересным инструментом для первоначального понимания микроструктуры и механических характеристик двухточечных шарнирных соединений. Текущие результаты показали довольно хорошую корреляцию с полнофакторными результатами, обсуждаемыми в главе 12; это указывает на то, что для отдельного влияния отдельных факторов (параметров объединения) более низкое разрешение, связанное с конструкцией L9-Тагучи, не было невыгодным. По правде говоря, это показывает, что для предварительного понимания новых соединительных материалов или методов, Тагучи может быть хорошей альтернативой для сокращения расхода материала, рабочей силы и времени эксперимента по сравнению с полнофакторным подходом. Однако последний является более сложным DoE и может предоставить важную ценную информацию относительно влияния факторов второго или более высокого порядка на определенный ответ. Следовательно, окончательное решение о выборе наилучшего DoE должно приниматься на основании количества оцениваемых факторов объединения, типа ответов (свойств присоединения) и доступных ресурсов.

## 13.4 Методология поверхности отклика

### 13.4.1 Введение

В настоящее время RSM является одним из наиболее часто используемых методов, связанных с оптимизацией процесса, благодаря его простоте и статистической теории [11]. Название происходит от его четкого иллюстративного графического представления, где ответ на результат изображается как поверхностная зависимость заданных независимых входных факторов [12,13].

RSM основан на наборе математических и статистических методов, которые направлены на установление функциональной корреляции между откликом (выходной переменной) и параметрами (входными переменными), влияющими на такой отклик рассматриваемого процесса. Реакция данного процесса может быть определена как качественная или количественная, в зависимости от изучаемого процесса. Оптимизация или дальнейшее понимание процесса достигается путем изучения «поверхности», сгенерированной трехмерным представлением функции отклика, которая моделирует отношение «отклик-факторы». Эта функция отклика представлена полиномиальной моделью, выраженной как [12]:

$$y = f'(x)\beta + \varepsilon \quad (13.7)$$

где  $\beta$  обозначает неизвестный вектор коэффициента  $\rho$  и  $\varepsilon$  представляет отклонение (случайную ошибку) в результате факторов, не учитываемых векторной функцией ( $x$ ). Если предполагается, что  $\varepsilon$  равно нулю, то

$$\eta(x) = \beta f'(x) \quad (13.8)$$

где  $\eta(x)$  является средним откликом  $y$ .

DoE в стремлении к соответствию поверхности отклика характеризуется следующими признаками:



- Картирование поверхности отклика в заранее установленной изучаемой области по параметрам процесса.
- Оценка значимого влияния параметров на отклик.
- Для оптимизации данного отклика значения параметров могут быть получены из приведенной модели.
- Возможна одновременная оптимизация с несколькими откликами при сбалансированных настройках.

Наиболее широко предполагаемые формы уравнения 13.7 представлены моделями регрессии первого порядка:

$$= \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (13.9)$$

и моделями регрессии второго порядка:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (13.10)$$

где  $\beta$  - коэффициент регрессии приведенной модели,  $\beta_k$  - основные отклики,  $\beta_{kk}$  - квадратичные основные эффекты и  $\beta_{k-1,k}$  - двухфакторные взаимодействия, которые определяют вектор.

$n \times k$  – матрица плана (D):

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad (13.11)$$

где  $x_u = (x_{u1}, x_{u2}, \dots, x_{uk})'$  - вектор  $u$ -о параметра плана значений  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , каждая строка – одна из точек плана. При этом, уравнение 13.10 приобретет следующий вид с учетом  $u$ -о значения отклика

$$y_u = f'(x_u)\beta + \varepsilon_u, u = 1, 2, \dots, n \quad (13.12)$$

или

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (13.13)$$

где  $X$  – это матрица  $n \times r$  со строками соответствующими значениям  $f'(x_u)$ .

Как и предполагалось ранее,  $\varepsilon$  имеет нулевое среднее значение, и матрица ковариантности-ковариантности  $\sigma^2 I_n$  позволяет получить такую обычную оценочную функцию  $\beta$  наименьших квадратов как

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'y \quad (13.14)$$

$$Var(\hat{\beta}) = \sigma^2 (X'X)^{-1} \quad (13.15)$$

Заменяя  $\beta$  на  $\hat{\beta}$ , и становится прогнозируемым уравнением:

$$\hat{y}(x) = f'(x_u)\hat{\beta} \quad (13.16)$$

При этом вариантность  $\hat{y}(x)$  принимает форму

$$Va[\hat{y}(x)] = \sigma^2 f'(x)(X'X)^{-1} f(x) \quad (13.17)$$

Когда экспериментатор не обладает начальным окном уровня параметров, то есть экспериментальной областью интереса, необходимо провести серию предварительных экспериментов, чтобы определить диапазон значений или уровней параметров объединения. Это приводит к оптимизированному отклику или к области, где, как считается, находится оптимальная точка. Обычно используются две стратегии: описанный выше подход OFAT и самый крутой подход к восхождению (SAA).

SAA состоит из проведения небольшого эксперимента, обычно двухуровневого факториала или дробного факториала, с уровнями параметров в области, которая, как считается, содержит условие оптимального отклика. Затем полученные данные отклика вписываются в модель первого порядка. Из этой модели определяется направление наискорейшего подъема, и на основе отклика плоской поверхности и графика контуров можно проверить, что направление перпендикулярно контурам. Перемещая эксперимент вдоль этой линии в пошаговых шагах, можно найти окрестность оптимального отклика, когда эксперименты, проводимые в последовательных шагах, не дают увеличения отклика или даже указывают на уменьшение (указание точки перегиба). Когда область интереса определена вокруг этой области, модель более высокого порядка может использоваться для оценки кривизны поверхности отклика [12,13].

После определения исследуемой области можно применить модель второго порядка, содержащую

$$p = \frac{(k+1)(k+2)}{2} \quad (13.18)$$

параметры, где  $p$  это минимально необходимое количество проектных баллов.

Наиболее распространенными DoEs RSM являются трехуровневый полный факториал, Box-Behnken и Центральный Композит. Хотя большая часть информации о взаимодействиях параметров может быть извлечена из полного факториала, как обсуждалось в предыдущих разделах, эти варианты DoE требуют больше времени и ресурсов. В следующем разделе будет рассмотрен центральный композитный план (CCD) [12,13].

## 13.4.2 Центральный композиционный план

### 13.4.2.1 Общее описание

CCD был представлен Бокс-Вильсон [13]. Он считается эффективным DoE (планом экспериментов) второго порядка и состоит из трех частей: дробной, осевой и центральной точек, указанных ниже в том же порядке:

- Двухуровневый полный ( $2^k$ ) или разрешающий  $V$  дробный ( $2^{1/k-f}$ ) факторный план с уровнями кодированных факторов,  $-1$ ,  $+1$ .
- Аксиальное расположение  $2k$  точек, где в каждой точке только один фактор имеет кодированное значение  $\alpha$ , отличное от его среднего уровня ( $0$ ), которое обозначает осевое расстояние до центра плана
- $n_c$  количество прогонов репликации, выполненных в центральной точке.

Уровни кодировки получают через формулу:

$$\text{Уровень кодировки} = \frac{\text{реальное значение} - \text{среднее значение}}{\text{половину факторной области}}$$

Несколько свойств плана зависят от осевого значения  $\alpha$  и  $n_c$ , следовательно, они должны быть выбраны в соответствии с целями экспериментаторов. Значение  $\alpha$  меняется от  $1/\sqrt{k}$

Количество прогонов (или расчетных точек), необходимых для CCD

$$N = 2^k + 2k + n_c \quad (13.20)$$

при  $(k+1)(k+2)/2$  параметрами модели для вычисления. Одним из свойств, которые необходимо учитывать, является вращаемость конструкции. Проект считается вращаемым, если дисперсия прогнозируемого значения отклика не зависит от направления.

Таблица 13.4 Определение  $\alpha$  в ЦКП.

| $k$        | $F$ | $N$        | $\alpha$ |
|------------|-----|------------|----------|
| 2          | 4   | $8 + n_c$  | 1.414    |
| 3          | 8   | $14 + n_c$ | 1.682    |
| 4          | 16  | $24 + n_c$ | 2        |
| 5          | 32  | $42 + n_c$ | 2.378    |
| 5 (2 повт) | 16  | $26 + n_c$ | 2        |

Источник: Box and Wilson 1951 [13]. Воспроизводится с разрешения John Wiley & Sons.

Например, если две точки удалены на одинаковое расстояние от центра плана, но в противоположных направлениях, обе будут иметь одинаковую дисперсию прогноза. Таким образом, они нечувствительны к вращению согласованных осей. Таблица 13.4 иллюстрирует значения  $\alpha$ , которые придают вращаемость проекту, независимо от количества центральных точек,  $n_c$  [14], где

$$\alpha = \sqrt[4]{F} \quad (13.21)$$

где  $F$  - общее количество экспериментальных прогонов, выполненных на факториальной части плана.

Выбор  $n_c$  позволит вращающемуся плану иметь одинаковую точность и ортогональность. Проект считается ортогональным, если  $X'X$  является диагональной матрицей. Свойство равномерной точности проверяется, когда  $\text{Var}[y(*)]$  имеет одинаковое значение в начале плана и на расстоянии одного значения от него. Гари и Корнел [15] предоставляют значения для  $n_c$ , чтобы получить любое из этих свойств вращающегося плана.

### 13.4.3 Факторный план Бокса-Бенкена

Этот DoE был введен Боксом и Бенкеном в 1960 году [16]. Он основан на теориях для сбалансированных неполных блочных конструкций [17], в соответствии с которыми выполняется подгонка поверхности отклика второго порядка в трехуровневую конструкцию. Факторный план Бокса-Бенкена (BBD) широко применяется в промышленности благодаря тому, что представляет собой экономичные планы. План BBD относительно похож на CCD, но предусматривает собой крайние или угловые расчетные точки, что требует также меньшего количества прогонов, то есть трехуровневых факторных планов. Также помогает избежать экстремальных комбинаций факторных уровней. Рис. 13.6 графически иллюстрирует пространственное распределение кодированных расчетных точек для BBD. Можно заметить, что BBD состоит из трех блоков с полным факториальным планом, каждый из которых имеет два фактора с двумя уровнями и третий фактор с нулевым значением, средним значением. Указатели плана расположены на поверхности сферы с центром в начале системы координат [16].

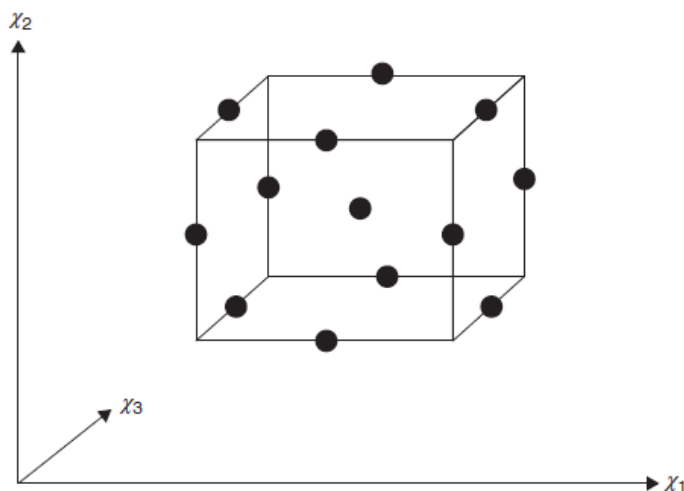


**Рис. 13.6** График пространственного распределения точек плана BBD Источник: Бокса и Бенкена 1960 [16]. Воспроизводится с разрешения John Wiley & Sons).

#### 13.4.3.1 Общее описание

BBD может быть описан как рассматриваемая часть факториальных комбинаций трехуровневого полнофакторного плана. Каждый фактор кодируется в трех настройках - 1, 0, +1. Этот план не всегда обладает способностью к вращению, в зависимости от количества рассматриваемых факторов. Кроме того, BBD не следует использовать, когда экспериментатор намеревается рассмотреть прогнозирование откликов для указателей, расположенных в углах куба проектирования; это связано с тем, что в этом проекте не учитываются точки проектирования, в которых все факторы одновременно находятся на своих крайних уровнях. В таблице 13.5 показан пример матрицы проектирования BBD для процесса с тремя параметрами и тремя уровнями (как показано на рисунке 13.6 в графическом виде) [12,16].

Рассматривая схему с тремя переменными, будут применяться три блока, где каждая из двух переменных будет иметь значения -1, +1, а третья останется постоянной на уровне 0 в двухуровневой факторной схеме второго порядка, что приведет к различным комбинации факторов на каждом из блоков. По планам BBD с различным количеством факторов авторы рекомендуют обратиться к учебникам Бокс и Драпер[11,18].

#### 13.4.4 Ситуационное исследование 2 - центральный композитный план фрикционного заклепывания

Пример, представленный в этом разделе, призван в упрощенной форме продемонстрировать, как использовать RSM через CCD, применительно к фрикционному заклепыванию.

Данное исследование направлено на оценку совместного процесса фрикционного заклепывания для комбинации материалов AA2024-T351/PEI в широком диапазоне параметров. В качестве образцов основного материала использовались цилиндрические заклепки AA2024-T351

**Таблица 13.5** BBD расчетная матрица для трех параметров с тремя уровнями.

| x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> |
|----------------|----------------|----------------|
| -1             | -1             | 0              |
| 1              | -1             | 0              |
| -1             | 1              | 0              |
| 1              | 1              | 0              |
| -1             | 0              | -1             |
| 1              | 0              | -1             |
| -1             | 0              | 1              |
| 1              | 0              | 1              |
| 0              | -1             | -1             |
| 0              | 1              | -1             |
| 0              | -1             | 1              |
| 0              | 1              | 1              |
| 0              | 0              | 0              |
| 0              | 0              | 0              |
| 0              | 0              | 0              |
| 0              | 0              | 0              |

номинального диаметра 5 мм и номинальной длины 60, и пластины из аморфного термопласта PEI номинальной толщины 13,4 мм. Несколько измерений были выполнены на общей геометрии заклепки соединения в качестве основы для сравнения и корреляции с параметрами процесса. Оцененные отклики позволили рассчитать объемное отношение (VR) для каждого условия соединения. Это ОО был продемонстрирован Blaga et al. [19] быть показателем глобальных механических характеристик/эффективности сцепления гибридных соединений с клепаной клепкой. VR определяется с помощью следующего уравнения

$$VR = \frac{(H-B)(W^2-D^2)}{W^2*H} \quad (13.22)$$

где Н - глубина проникновения заклепки в полимерный компонент, В - высота деформированного наконечника заклепки, D - диаметр заклепки, а W - ширина также деформированного наконечника заклепки, закрепленного в полимере. В данном тематическом исследовании рассматривались следующие параметры: RS; время трения (FT); сила трения (FF); Время ковки (FF); и Forging Force (FoT). Чтобы уменьшить количество экспериментов, была выбрана CCD с дробным факториальным компонентом 2<sup>5-1</sup>, всего 16 прогонов. Всего было проведено 10 экспериментов в качестве центральных точек, а для осевых точек конструкции было установлено а а из двух. С помощью рентгеновской томографии

Таблица 13.6 CCD план уровней.

| Факторы                    | Кодированные уровни |        |        |        |        |
|----------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|
|                            | -2                  | -1     | 0      | 1      | 2      |
| Скорость вращения (об/мин) | 17,000              | 18,000 | 19,000 | 20,000 | 21,000 |
| Время трения (с)           | 1.4                 | 1.6    | 1.8    | 2      | 2.2    |
| Сила трения (Н)            | 1,500               | 2,000  | 2,500  | 3,000  | 3,500  |
| Времяковки (с)             | 0.5                 | 1      | 1.5    | 2      | 2.5    |
| Ковочное усилие (Н)        | 3,300               | 3,900  | 4,500  | 5,100  | 5,700  |

форма анкерного наконечника деформированной заклепки была оценена до проведения каких-либо механических испытаний суставов. Кодированные уровни параметров процесса, используемые для этой работы, приведены в таблице 13.6. Полная матрица проектирования представлена в таблице 13.7.

Выполнена оценка корреляции параметров процесса и изученным откликом, VR. Установлено, что VR (объемное соотношение) варьируется от 0,14 до 0,48. Результаты оценивались с помощью метода обратной ступенчатой элиминации, который определял статистическую значимость условий модели регрессии поверхности отклика для VR. В этой процедуре поэтапно удаляются наименее значимые факторы, а модельный анализ отклонений пересчитывается. Учитывая, что статистическая значимость включает в себя значение  $p$ , ниже 0,05 в пределах ANOVA (в данном случае уровень достоверности 95%), графики основных эффектов для параметров процесса, которые соответствуют этому критерию, представлены на рисунке 13.7.

Из этих графиков можно видеть, что происходит относительно линейное увеличение значения VR при индивидуальном увеличении RS, FT и FoF. Установлено, что на основной эффект FF влияют факторы более высокого порядка, демонстрирующие выраженную кривизну на графике. Именно с этим параметром VR вменялся наибольшей степени. Значения  $p$  для RS, FT, FF и FoF равны 0,012 для первого и 0,000 - для остального. Установлено, что FoT не является статистически значимым.

Уравнение полиномиальной регрессии для выполнения VR прогноза в этой модели:

$$VR = 0.343 + 0.018 * RS + 0.043 * FT + 0.060 * FF - 0.030 * FoF - 0.031 * FF^2 - 0.017 * FT * FF \quad (13.23)$$

Значения, спрогнозированные статистической моделью, нанесены на график против фактических значений VR на рисунке 13.8. На этом графике проверки пунктирная линия изображает взаимно-однозначную корреляцию между осями. Сплошные серые линии определяют верхний и нижний пределы прогнозирования модели для одного наблюдения. Объясняющая способность (скорректированный R-квадрат) модели составляет 83,2%, стандартная ошибка (S) равна 0,03 и прогнозируемый R-квадрат - 73,9%. Из графика видно, что все прогнозируемые значения VR находятся в пределах интервалов прогнозирования и относительно близко к линии 45°.

Таблица 13.7 Матрица плана ситуационного исследования CCD.

|                   | Прогон | RS<br>(об/мин) | FT (с) | FF (Н) | FoT(с) | FoF (Н) |
|-------------------|--------|----------------|--------|--------|--------|---------|
| горные точки      | 1      | 18,000         | 1.6    | 2,000  | 1      | 5,100   |
|                   | 2      | 20,000         | 1.6    | 2,000  | 1      | 3,900   |
|                   | 3      | 18,000         | 2      | 2,000  | 1      | 3,900   |
|                   | 4      | 20,000         | 2      | 2,000  | 1      | 5,100   |
|                   | 5      | 18,000         | 1.6    | 2,000  | 2      | 3,900   |
|                   | 6      | 20,000         | 1.6    | 2,000  | 2      | 5,100   |
|                   | 7      | 18,000         | 2      | 2,000  | 2      | 5,100   |
|                   | 8      | 20,000         | 2      | 2,000  | 2      | 3,900   |
|                   | 9      | 18,000         | 1.6    | 3,000  | 1      | 3,900   |
|                   | 10     | 20,000         | 1.6    | 3,000  | 1      | 5,100   |
|                   | 11     | 18,000         | 2      | 3,000  | 1      | 5,100   |
|                   | 12     | 20,000         | 2      | 3,000  | 1      | 3,900   |
|                   | 13     | 18,000         | 1.6    | 3,000  | 2      | 5,100   |
|                   | 14     | 20,000         | 1.6    | 3,000  | 2      | 3,900   |
|                   | 15     | 18,000         | 2      | 3,000  | 2      | 3,900   |
|                   | 16     | 20,000         | 2      | 3,000  | 2      | 5,100   |
| центральные точки | 17     | 19,000         | 1.8    | 2,500  | 1.5    | 4,500   |
|                   | 18     | 19,000         | 1.8    | 2,500  | 1.5    | 4,500   |
|                   | 19     | 19,000         | 1.8    | 2,500  | 1.5    | 4,500   |
|                   | 20     | 19,000         | 1.8    | 2,500  | 1.5    | 4,500   |
|                   | 21     | 19,000         | 1.8    | 2,500  | 1.5    | 4,500   |
|                   | 24     | 19,000         | 1.8    | 2,500  | 1.5    | 4,500   |
|                   | 25     | 19,000         | 1.8    | 2,500  | 1.5    | 4,500   |
|                   | 6      | 9,000          | .8     | .500   | .5     | 4,500   |
|                   | 7      | 7,000          | .8     | .500   | .5     | 4,500   |
|                   | 8      | 1,000          | .8     | .500   | .5     | 4,500   |
|                   | 9      | 9,000          | .4     | .500   | .5     | 4,500   |
|                   | 0      | 9,000          | .2     | .500   | .5     | 4,500   |
|                   | 1      | 9,000          | .8     | .500   | .5     | .500    |
|                   | 2      | 9,000          | .8     | .500   | .5     | .500    |
|                   | 3      | 9,000          | .8     | .500   | .5     | .500    |

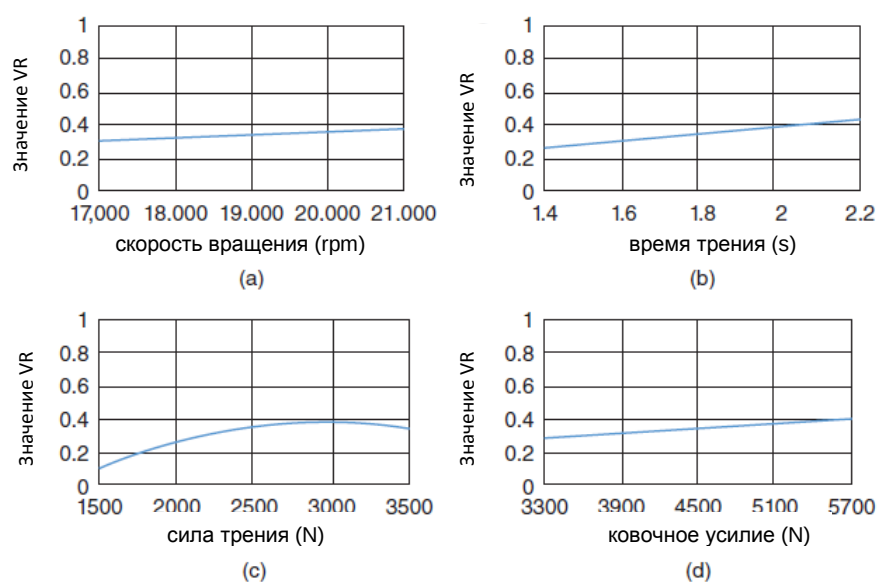
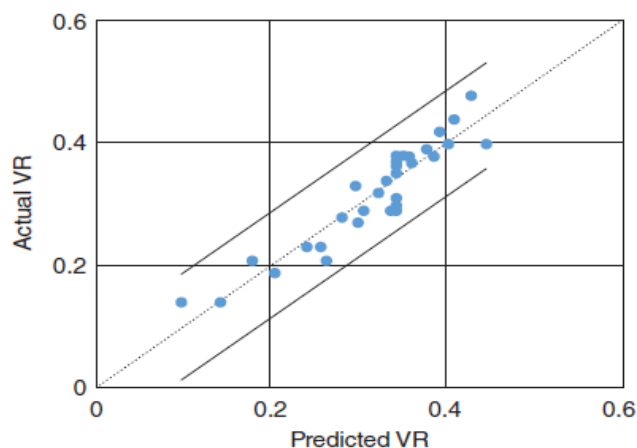


Рис. 13.7 Графики основных эффектов среднего значения VR для всех параметров процесса: (а) скорость вращения, (b) время трения, (с) сила трения и (d) ковочное усилие



**Рис. 13.8** График статистической модели VR



Следует напомнить, что взаимодействие FT и FF явилось статистически значимым, анализ поверхности отклика для этих двух параметров является оправданным. Соответствующие графики поверхности и контура показаны на рис. 13.9. Контурная диаграмма - это в основном горизонтальная или вертикальная проекция поверхности отклика для изучаемого отклика, в данном случае VR. Одним из полезных прямых применений использования контурного графика было бы определение оптимальной области максимального отклика для двух параметров. Контурные графики полезны для углубленной визуализации поверхности отклика, в которой выполняются разрезы на желаемом исследуемом уровне параметра (оси), в то время как влияние другого параметра может быть изучено.

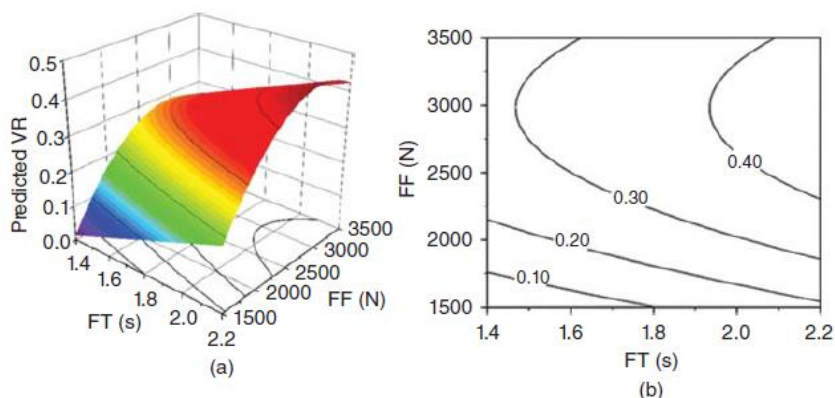


**Рис. 13.9** Время трения (FT) и сила трения (FF) графики во взаимодействии с объемным соотношением (VR). (a) Поверхность отклика и (b) контурный график.

Понятно, что квадратичный эффект FF присутствует во всем диапазоне параметра FT. Увеличение времени приводит к увеличению значения VR, эффект, который более выражен при более низких уровнях FF. Максимальный вклад этого взаимодействия в увеличение VR может быть достигнут только при значениях FT, близких к верхнему пределу нашего диапазона параметров с FF в верхней половине его диапазона. Углубленный анализ всех взаимодействий и других вопросов во Фрикционном заклепывании через CCD будет предметом отдельной публикации.

#### 13.4.4.1 Выводы ситуационного исследования

Влияние параметров фрикционного заклепывания на образование соединения оценивали с помощью CCD-экспериментов. Оценка отклика VR, представленная в данном ситуационном исследовании, позволила получить уравнение полиномиальной регрессии, способное спрогнозировать отклик с учетом параметров процесса, для изученных диапазонов и материалов. Кроме того, можно было оценить, как двустороннее взаимодействие между FT (время трения) и FF(сила трения), также влияет на VR (объемное соотношение).

## 13.5 Другие планы поверхности

Согласно Монтгомери [4], Майерс и Монтгомери [12] и Гари и Корнелл [15] для изучения, разработки или оптимизации инженерного процесса возможно применять несколько планов экспериментов (DoE). Обычно предлагается полностью факторный план с тремя уровнями  $3k$  или дробным  $3k$ , где на поверхности отклика присутствует кривизна. К ним относятся представленные ранее, такие как CCD и BBD, насыщенные или почти насыщенные кубоидальные конструкции, гибридные конструкции, небольшие составные конструкции и составы экспериментальных смесей, описание которых можно найти в [4, 12, 20]. Прежде чем выбрать один из этих проектов, необходимо принять во внимание конечную цель для этого. Конечная цель экспериментатора может также установить необходимость использования последовательности из двух или более проектов, направленных на более точное приближение к реальной поверхности отклика.

## 13.6 Заключительные примечания

В этой главе приведено описание применения метода Тагути и RSM (методология поверхности отклика) на основе существующих данных ситуационных исследований фрикционного заклепывания и соединения, которым предшествует краткое объяснение их фундаментальных теорий и принципов. Что касается предыдущей главы о факторных DoE, авторы рекомендуют несколько литературных ссылок для руководства, связанного с различными сложностями плана Тагути и поверхности отклика. Как видно из представленных ситуационных исследований, эти методы эффективны как для оптимизации процесса (технический подход), так и для определения корреляций между структурой и свойствами процесса (материаловедение и инженерный подход).

## Литература

- 1 Taguchi, G., Chowdhury, S., Wu, Y. et al. (2005) Taguchi's Quality Engineering Handbook, John Wiley & Sons, Inc.
- 2 Ross, P.J. (1996) Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design, McGraw-Hill.
- 3 Esteves, J.V., Goushegir, S.M., dos Santos, J.F. et al. (2015) Friction spot joining of aluminum AA6181-T4 and carbon fiber-reinforced poly(phenylene sulfide): effects of process parameters on the microstructure and mechanical strength. *Mater. Des.*, 66, 437–445.
- 4 Montgomery, D.C. (2013) Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, Inc.
- 5 Campanelli, L.C., Suhuddin, U.F.H., dos Santos, J.F., and de Alcantara, N.G. (2012) Parameters optimization for friction spot welding of AZ31 magnesium alloy by Taguchi method. *Soldag. Insp.*, 17 (1), 26–31.
- 6 Bilici, M.K. (2012) Application of Taguchi approach to optimize friction stir spot welding parameters of polypropylene. *Mater. Des.*, 35, 113–119.
- 7 Su, P., Gerlich, A., North, T.H., and Bendzsak, G.J. (2006) Energy utilization and generation during friction stir spot welding. *Sci. Technol. Weld. Joining*, 11, 163–169.
- 8 Goushegir, S.M., dos Santos, J.F., and Amancio-Filho, S.T. (2014) Friction spot joining of aluminum AA2024/carbon-fiber reinforced poly(phenylene sulfide) composite single lap joints: microstructure and mechanical performance. *Mater. Des.*, 54, 196–206.
- 9 Gerlich, A., Su, P., and North, T.H. (Dec. 2005) Peak temperatures and microstructures in aluminium and magnesium alloy friction stir spot welds. *Sci. Technol. Weld. Joining*, 10 (6), 647–652.
- 10 Gerlich, A., Yamamoto, M., and North, T.H. (Jan. 2008) Local melting and tool slippage during friction stir spot welding of Al-alloys. *J. Mater. Sci.*, 43 (1), 2–11.
- 11 Box, G.E.P. and Draper, N.R. (2007) Response surfaces, mixtures, and ridge analyses, John Wiley & Sons, Inc.
- 12 Myers, R.H., Montgomery, D.C., and Anderson-Cook, C.M. (2016) Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons, Inc.
- 13 Box, G.E.P. and Wilson, K.B. (1951) On the experimental attainment of optimum conditions. *J. R. Stat. Soc. Ser. B*, 13 (1), 1–45.

- 14 Atkinson, A. and Donev, A. (1992) Optimum Experimental Designs, Oxford University Press.
- 15 Khuri, A.I. and Cornell, J.A. (1996) Response Surfaces, 2nd edn, Dekker, New York.
- 16 Box, G.E.P. and Behnken, D.W. (Nov. 1960) Some new three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics*, 2 (4), 455.
- 17 Yates, F. (1936) Incomplete randomized blocks. *Ann. Eugen.*, 7, 121–140.
- 18 Box, G.E.P. and Draper, N.R. (1987) Empirical Model-Building and Response Surfaces, John Wiley & Sons, Inc.
- 19 Blaga, L., Bancilă, R., dos Santos, J.F., and Amancio-Filho, S.T. (2013) Friction riveting of glass–fibre-reinforced polyetherimide composite and titanium grade 2 hybrid joints. *Mater. Des.*, 50, 825–829.
- 20 Montgomery, D.C. and Runger, G.C. (2003) Applied Statistics and Probability for Engineers, 3rd edn, John Wiley & Sons, Inc.

# Алфавитный указатель

## А

AA2024 61, 65-69, 71, 73-75, 79, 81-87,, 91-92, 180, 186,, 188, 203, 204, 208, 282, 290, 297, 307, 308, 316, 323, 323  
 FricRiveting 88-93, 182-213, 218, 220, 223  
 PA6 121, 122, 124, 180, 189, 201, 203, 203  
 PA66 102-105, 108, 110, 112, 226, 236  
 автомобильный xvii, xviii, xx, 3, 24, 26, 32, 50, 74, 99, 103, 140, 151, 164, 194, 201, 204, 223, 225, 226, 230, 232, 240, 242, 254  
 адгезив 17-20, 22-53, 84, 85, 88, 94, 112, 116, 120, 244, 245, 262, 277, 279, 314  
 адгезивное адгезионное связывание 17-19, 33, 36-48, 85, 94  
 алюминиевый сплав 20, 30, 37, 51, 61, 74, 88, 99, 109, 115, 119, 135, 136, 140, 141, 146, 176, 186, 193, 196  
 аморфные полимеры 81, 176, 202, 209, 211, 235  
 анализ напряжения 252, 253, 290, 291, 298  
 армирование 12, 19, 36-40, 47, 54, 61, 62, 66, 67, 76-78, 86, 88, 94, 95, 98, 99, 106, 107, 124, 158, 178, 180, 185, 186, 187, 193, 197, 201, 204, 208, 211, 217, 220, 224, 226, 262, 263, 266, 268, 269, 272, 277, 278, 280, 281, 297

## Б

блокировка 70, 71, 79, 244, 245, 246, 281

## В

вдавливание 66, 67, 71, 229, 295, 297, 317  
 виды отказа 17, 18, 23, 25, 28-33, 49, 50, 52, 54, 57, 80, 136, 143, 144, 150, 167-170, 203, 204, 235, 263, 279  
 волокнистые металлические ламинаты (ВМЛ) 37-42, 44, 45, 54, 56, 57, 150, 158  
 вторичный изгиб 84, 135, 141, 142, 235  
 выбор материала xvii, 153, 156-159, 253  
 выпуклость 70, 304, 310, 318, 319  
 выработка тепла 72, 75, 95, 181, 184, 185, 266, 268, 286,0 313, 318  
 вязкость разрушения 23, 25, 26, 31, 32, 45, 56, 70, 71, 73, 74, 85-87, 116, 152, 157, 158, 168, 170, 172, 174, 175, 183, 225, 277, 281

## Г

гибридные конструкции 12, 15, 37, 38, 40, 42, 43, 44, 49, 112, 135, 144, 150, 179, 212, 264, 269, 281, 282, 328

## Д

дисперсионный анализ (ANOVA) 286, 289, 290, 291, 293, 294, 296, 297-299, 303-305, 307, 311, 312, 315, 318, 325  
 допуски 149, 150, 153, 158, 169, 174, 218, 230, 231, 263

## И

измерение 149  
 Измерение температуры 130, 284  
 индукционная сварка 13, 94, 103, 108, 109, 112, 113, 114  
 инфракрасный 105, 186, 189, 198, 220, 221, 224, 230, 273

## К

клепка 14, 19  
 клежки 164, 179, 181, 185, 197, 203-209, 215, 216, 224, 290

ковка 171, 181, 182, 183, 185, 193, 194, 201, 203, 292, 324  
 когезивный 17, 23, 28, 32, 52, 70, 255, 279, 281, 314  
 композит 12-14, 19, 21, 22, 28, 29, 33, 36-45, 48, 49-54, 62-74, 80, 89, 94, 101, 103-107, 111, 112, 114, 120, 131, 150, 157, 158, 167-179, 271, 311, 323  
 конструкция самолета 12, 36, 40, 43, 61, 89, 134, 135, 137, 140, 141, 150-160, 164  
 контурный план 228, 324  
 коррозия 19, 154-156, 160  
 крепление 5, 19, 20, 36, 44, 62, 69, 90, 135, 136, 144, 155, 159, 167, 179, 181, 207, 216, 219, 221, 223, 235  
 критерий плана 164, 230

## Л

лазерная сварка 75, 119  
 лазерное соединение без промежуточного слоя 115, 130  
 Лазерное соединение металлопластика (LAMP) 116-131  
 линия раздела 12, 22, 28, 30, 31, 32, 52, 65, 67, 58, 72, 74, 77, 79, 126, 191, 246

## М

межфазный 18, 22, 26, 28, 41, 50, 52, 56, 221, 245, 246, 255, 331  
 металл 61, 62, 64, 66, 69, 70, 72, 76, 83, 86, 87, 88, 94, 95, 101, 107, 111, 112, 116, 126, 127, 135, 150, 152, 154, 158, 168, 177, 191, 193, 227, 234, 241, 243, 244, 245, 246, 247, 251, 258, 263, 279, 281, 290, 291, 298, 318, 319  
 металлический 39, 40, 61, 65, 67, 70, 87, 89, 94, 108, 112, 131, 155, 191, 193, 201, 242, 245, 251, 253, 263, 267-269, 282, 304, 317, 319, 333,  
 методы испытания 21, 22, 26, 38  
 механизм 24, 49, 88, 100, 112, 171, 184, 198, 207, 223, 244, 247, 268, 273, 275, 279, 281  
 механика конечного разрушения (МКР) 168, 169, 171, 176  
 механика линейного упругого разрушения 50  
 механика повреждения 31, 48, 49, 56  
 механика разрушения 14, 23, 30, 31, 32, 47, 48, 49, 50, 58, 140, 141, 143, 145, 168, 173  
 механическая блокировка 69, 70, 71, 79, 246, 312  
 механические свойства 22, 23, 33, 72, 76, 87, 120, 121, 143, 193, 199, 228, 229, 234, 262, 265, 267, 275, 276  
 механические характеристики 12, 13, 70, 79, 107, 112, 183, 193, 199, 201, 209, 227, 228, 241, 244, 262, 265, 290, 291, 294, 297, 303, 311, 313, 316  
 механическое крепление 20, 44, 62, 69, 90, 135, 159, 167, 216, 221  
 микроскопия 70, 188, 197, 274  
 микроструктура 13, 73-76, 78, 188, 189, 191, 192, 197, 225-227, 270, 271, 273, 274, 314  
 микроструктурные зоны 72-75, 191, 193, 195, 197, 202, 225, 226  
 микротвердость 77-79, 208, 210, 211, 239, 241, 295, 298  
 многоочаговое усталостное повреждение (МУП) 141, 142, 143  
 моделирование когезивной зоны 22, 28, 32, 47, 52, 55  
 модель конечного элемента (МКЭ) 30, 48, 140, 141, 146, 148, 149, 178, 230, 232, 235

## Н

нагнетательное соединение клепкой (НСК) 217, 221-228, 236  
 натяжные соединения 145-150, 160, 164  
 неокрашенный кузов (BIW) 240, 243, 247, 248, 254, 255, 256, 258  
 неразрушающий контроль (НК) 187  
 несущий 12, 17, 19, 20, 33, 50, 64, 65, 97, 108, 121, 138, 198, 217, 221, 231, 232, 240, 242, 243, 244, 247, 254, 255, 256, 263, 268, 277, 298, 279

## О

обработка поверхности 21, 25, 29, 39, 106, 124, 130, 144, 160, 161, 261  
 общие механические характеристики 270, 323

одноосноориентированной 37, 185  
 оптимизация 14, 50, 52, 77, 144, 168, 176, 193, 208, 211, 221, 247, 248, 247, 275, 277, 282, 289, 290, 291, 298, 301, 305, 312, 319, 320, 328, 332  
 оптическая микроскопия 45, 77, 189, 200  
 остаточное напряжение 27, 28, 72, 86, 107, 111, 144, 149, 150, 164, 165, 193, 219, 220, 223, 225, 229  
 осуществимость 42, 94, 101, 116, 124, 130, 134, 174, 218, 246, 276  
 отверждение 24, 26, 40-43, 144, 244

## П

параметры 31, 72, 96, 97, 99, 141, 151, 169, 175, 182, 183, 266, 298  
 плавление 85, 94, 100, 108, 114, 123, 127, 134, 135, 263, 265, 268  
 план Бокса-Бенкена 321, 322  
 план Тагучи 309-313, 318, 319, 328  
 план экспериментов 288-300  
 пластическая деформация 30, 45, 46, 69, 188, 191, 195, 206, 216, 218, 225, 226, 236, 267, 268, 274, 279, 298, 315  
 пластичность 31, 47, 49, 152, 159, 203, 264  
 поверхность отклика 327  
 подвод энергии 49, 73, 86, 95, 102, 180, 186, 218, 219, 229, 266, 268, 291, 294, 296  
 подготовка поверхности 21, 24, 25, 31, 51, 184, 260  
 поли (фениленсульфид) 62, 72, 77, 91, 158, 236, 284, 297, 318  
 поли (эфир эфир кетон) (ПЕЕК) 180, 186, 189, 193, 194, 196, 207, 284, 290, 291, 307  
 полиамид 120, 124, 158, 180, 186, 201, 236, 241, 242, 245  
 поликарбонат 180, 186, 201, 203, 204  
 полимер 32, 67, 69, 70, 106, 107, 116, 118, 126-128, 179, 181, 184, 185, 186, 190-191, 200, 219, 220, 226-228, 231, 244, 245-247, 251, 252, 258, 262, 265, 268, 274, 275, 279, 281, 290, 301, 318  
 полиметилметакрилат 232, 236  
 полиэфиримид 158, 180, 186, 228, 236, 269, 272, 290  
 полукристаллические полимеры 72, 86, 94, 105, 107, 109, 192, 218, 226, 249, 250  
 предел поперечной силы сдвига 112, 131, 143, 151-159, 230-235, 245, 277, 298, 303, 312  
 предел прочности 103, 105, 151, 161, 199, 293, 297  
 прижимной болт 158, 159, 162  
 проверка 18, 23, 37, 56, 57, 135, 144, 152, 294, 295, 305, 307, 325  
 проектирование соединения 20, 22, 26, 28, 68, 86, 150, 152, 154, 163, 235, 241  
 Производство аддитивного слоя (ALM) 262, 263  
 просвечивающая электронная микроскопия (ТЕМ) 126, 127  
 прочность 12, 14, 17, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 31, 33, 36, 40-44, 48, 52-54, 61, 74-90, 94, 101, 103-109, 112, 113, 120, 121, 128, 131, 143, 151-159, 164, 168, 171, 172, 175, 196, 201, 203, 204, 207, 209, 230-235, 245, 277, 287, 290, 297, 298, 303, 304, 307, 311, 312, 314, 315, 316, 317, 318

## Р

разрушение при сдвиге 279  
 расслоение 39, 45, 49, 52, 56, 86, 106, 167, 171, 176, 236, 275  
 рентгенографические исследования 80, 103, 127, 188, 189, 190, 207, 274, 291, 324  
 рост трещины 45-48, 55, 134

## С

сборка соединения 25, 28, 36, 180, 275  
 сварка 13, 19, 20, 63, 82, 93, 94, 109, 110, 113, 114, 119, 130, 135, 144, 159, 184, 236, 262  
 световая оптическая микроскопия 197  
 связывание 17-20, 27, 28, 33, 36, 41-43, 62, 69, 85, 94, 100, 112, 116, 144, 243, 246, 264, 270, 330

Сила сдвига прочности 112, 131, 143, 151-159, 164, 168, 196, 201, 203, 209, 230-235, 245, 277, 297, 298, 303, 312, 314, 317  
 силы адгезии 65, 69, 6265, 268, 314, 318  
 сканирующая электронная микроскопия (SEM) 45, 70, 71, 126, 127, 279, 280  
 слепая заклепывание 159  
 слияние 86, 240, 279  
 слой 29, 30, 38, 41, 44, 52, 53, 56, 68, 69, 70, 71, 73, 80, 86, 112, 127, 170, 181, 192, 221, 226, 246, 253, 262, 273, 279, 301, 302, 314, 332  
 снижение веса xvii, 20, 39, 44, 57, 61, 88, 114, 164, 165, 179, 218, 241  
 совместного отверждения 40, 42, 262  
 соединение 12-14, 18, 20, 22, 25, 28, 29, 36, 37, 38, 40, 42, 44, 62, 63, 65, 76, 80, 82, 85, 88, 94, 100, 106, 111, 112, 116, 120, 124, 129, 130, 134, 137, 138, 141, 142, 143, 150, 2160, 179, 184, 188, 218, 230, 232, 244, 262, 266, 274, 278, 282  
 соединение внахлестку 21, 28, 38, 44, 69, 80, 113, 154, 204, 207, 208, 209, 233, 234, 235, 276, 277, 278, 290, 297  
 спиннинговая сварка 182, 185  
 сталь 41, 44, 83, 84, 121, 122, 124, 126, 127, 130, 141, 146, 155, 157, 158, 160, 161, 164, 170, 174, 180, 219, 225, 240, 241, 247, 254, 255, 272, 277  
 статистический анализ 290, 291, 298, 311  
 стекловолокно 12, 36, 38, 40, 61, 76-78, 106, 124, 158, 179, 180, 186, 187, 197, 201, 236, 272, 279  
 структурные требования 163, 171  
 структурный анализ 293  
 структурный план xvii, 140, 170, 187

## Т

твердость 76-78, 151, 153, 200, 228, 275, 276  
 температура плавления 111, 236  
 температура стеклования 68, 94, 105, 192, 198, 218, 230, 236  
 температурное проявление 72, 188, 236  
 тепловое расширение 19, 20, 24, 27, 29, 64, 72, 73, 107, 116, 128, 129, 135, 153, 182, 183, 184, 185, 211, 215, 226-229, 253, 269, 273  
 теплопроводность 68, 73, 98, 116, 154, 181, 183, 186, 198, 222, 223, 250, 251  
 термическая история 195, 226, 303, 313  
 термопластик 13, 77, 116, 120, 181, 248, 249  
 терморективный 94, 120, 158, 179, 180, 185, 186, 187, 197, 201, 227, 282  
 титан 12, 20, 37, 40, 41, 43, 50, 51, 52, 53, 61, 124, 141, 158, 160, 161, 164, 179, 189, 197, 207, 221, 262, 267, 270, 275, 291  
 точечная сварка (ТС) 223, 234  
 точечная сварка 63, 82, 110  
 тягучесть 22, 45, 145, 228

## У

углерод-армированные волокна поли (полифенилсульфид) (CF-PPS) 62, 65-69, 71-87, 91, 92, 99, 297, 307, 311, 312, 313, 316, 318  
 углерод-армированные волокна полиэфирэфиркетон (CF-PEEK) 180, 189, 194, 207  
 углеродное волокно xvii, 69-71, 93, 95, 96, 102, 119, 128, 160, 225, 243, 298  
 удельная прочность 12, 13, 152  
 ультразвуковой 14, 42, 45, 113, 114, 217, 221, 223, 224, 228, 236, 243, 262-269, 272-274, 282  
 усадка 27, 64, 86, 193, 244, 247, 248, 249, 251-253, 264, 268  
 усталость 20, 22-24, 26, 33, 39, 45, 42, 54, 56, 83, 84, 142-148, 151, 158

## Ф

факторный план экспериментов 286-291, 297, 298, 318, 321, 322  
 физико-химические изменения 105, 188, 197



Формование избыточным инжектированием 217, 222, 231 ,243 ,245, 263, 271

формование инжектированием 217, 222, 231 ,243 ,245, 263, 271

фрикционная сварка 63, 135, 236

Фрикционное крепление 217, 222, 246

Фрикционное соединение (FSpJ) 61-70, 73-79, 85-91, 300, 311, 313, 315

## **Х**

характеристика соединения 30-33, 40, 242, 285, 295

## **Ц**

центральный композитный план 321-323, 327-329

## **Ч**

чистое натяжение 167, 169-172, 177, 178, 210

## **Э**

эластичность 19, 36, 152

## **Лицензионное соглашение издательства Wiley и заказчика**

Ссылка на электронную книгу издательства Wiley, EULA

[www.wiley.com/go/eula](http://www.wiley.com/go/eula)