

М. Л. Калиниченко  
Л. П. Долгий  
В. А. Калиниченко

# ТЕХНОЛОГИЯ СКЛЕИВАНИЯ: ТЕОРИЯ, ПРАКТИКА, МАТЕРИАЛЫ

Минск  
БНТУ  
2021

FreeBusta is knowledge  
without borders!



УДК 665.93  
ББК 35.75  
К17

К17 **Калиниченко, М. Л.** Технология склеивания: теория, практика, материалы / М. Л. Калиниченко, Л. П. Долгий, В. А. Калиниченко. – Минск: БНТУ, 2021. – 187 с. – ISBN 978-985-583-719-1.

Монография предназначена для специалистов в области создания клеевых соединений машиностроительной отрасли, студентов и преподавателей машиностроительного профиля. Издание описывает классификацию клеевых материалов, область их применения, особенности склеивания различных материалов, а так же экологическую безопасность и охрану труда при проведении клеевых работ.

Табл. 17. Ил. 65. Библиогр. назв. 111. Прил. 6.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом  
Белорусского национального технического университета  
(протокол № 9 от 17.09.2021 г.)

**Р е ц е н з е н т ы:**

первый проректор БГТУ, доктор сельскохозяйственных наук,  
профессор, академик НАН Беларуси *А. Р. Цыганов*;  
доцент кафедры «Технология металлов» БГАТУ,  
кандидат технических наук, доцент *А. А. Андрушевич*

ISBN 978-985-583-719-1

© Калиниченко М. Л., Долгий Л. П.,  
Калиниченко В. А., 2021  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2021

FreeBusta is knowledge  
without borders!



## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| <b>Предисловие</b> .....  | 6  |
| <b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....   | 8  |
| <b>1. КЛАССИФИКАЦИЯ КЛЕЕВ</b> .....                                   | 11 |
| <b>2. ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛЕЕВЫХ СОСТАВОВ</b> ....                        | 17 |
| 2.1. Основные термины и характеристики.....                           | 17 |
| 2.2. Эпоксидные клеи.....   | 19 |
| 2.3. Полиуретановые клеи.....   | 20 |
| 2.4. Акриловые клеи.....  | 22 |
| 2.4.1. Анаэробные клеи.....   | 22 |
| 2.4.2. Цианакрилатные клеи.....                                       | 23 |
| 2.4.3. Акриловые клеи, отверждающиеся<br>при УФ-облучении.....        | 24 |
| 2.5. Клеи на основе канифоли.....                                     | 25 |
| 2.6. Резиновые клеи (каучуковые).....                                 | 25 |
| 2.7. Клеи на основе латексов.....                                     | 27 |
| 2.8. Клеи на основе карбамидоальдегидных олигомеров..                 | 27 |
| 2.9. Клеи на основе поливинилхлорида (ПВХ).....                       | 28 |
| 2.10. Клеи на основе поливинилацетата (ПВА)<br>и его сополимеров..... | 28 |
| 2.11. Клеи на поливиниловом спирте.....                               | 29 |
| 2.12. Фенолоформальдегидные клеи.....                                 | 29 |
| 2.13. Элементоорганические клеи.....                                  | 30 |
| 2.14. Клеи-расплавы.....  | 31 |
| 2.15. Неорганические клеи.....  | 31 |
| <b>3. ТЕХНОЛОГИЯ СКЛЕИВАНИЯ</b> .....                                 | 33 |
| 3.1. Выбор клея и анализ склеиваемых материалов.....                  | 35 |
| 3.1.1. Основные требования к выбору клея.....                         | 35 |
| 3.1.2. Природа склеиваемых материалов.....                            | 35 |
| 3.1.3. Условия эксплуатации склеенного<br>соединения.....             | 37 |
| 3.1.4. Технологические аспекты технологи<br>склеивания.....           | 41 |



|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 3.1.5.    | Экономическая целесообразность применения склеиваемого соединения.....                                  | 43        |
| 3.1.6.    | Анализ склеиваемых материалов.....  | 43        |
| 3.2.      | Очистка поверхностей.....   | 47        |
| 3.3.      | Подготовка склеиваемых поверхностей.....  | 49        |
| 3.3.1.    | Оценка подготовки поверхности материала...  | 52        |
| 3.4.      | Обезжиривание поверхностей.....   | 53        |
| 3.5.      | Подготовка клея к применению.....   | 54        |
| 3.6.      | Способы нанесения клея.....   | 57        |
| 3.7.      | Обеспечение качественной полимеризации клея.....  | 58        |
| 3.8.      | Контроль качества.....  | 59        |
| <b>4.</b> | <b>ИСПЫТАНИЕ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ.....</b>  | <b>61</b> |
| 4.1.      | Условия проведения испытаний.....   | 61        |
| 4.2.      | Методы испытаний.....   | 63        |
| 4.2.1.    | Метод разрушающего контроля на условный сдвиг многомерных композиционных соединений.....                | 65        |
| 4.2.2.    | Метод оценки и контроля замкнутых объемных соединений.....  | 70        |
| <b>5.</b> | <b>ПРИМЕНЕНИЕ КЛЕЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.....</b>                                       | <b>79</b> |
| 5.1.      | Классификация модельных комплектов.....   | 79        |
| 5.2.      | Материалы для создания модельных комплектов и стержневых ящиков.....                                    | 81        |
| 5.3.      | Сравнительный анализ модельных комплектов, изготовленных из древесины и пластиолимерных материалов..... | 83        |
| 5.4.      | Анализ современных композиционных соединений, применяемых при изготовлении модельных комплектов .....   | 85        |
| 5.5.      | Современные методы проектирования и изготовления модельной оснастки.....                                | 102       |
| 5.5.1.    | Разработка технологии отливки.....  | 104       |
| 5.5.2.    | Выбор материала модели и оборудования.....  | 105       |
| 5.5.3.    | Изготовление модели на 3D-станке с ЧПУ....  | 106       |



|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| <b>6.</b> | <b>АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ СЛОЖНЫХ ПОРИСТЫХ ТЕЛ.....</b>                | <b>112</b> |
| 6.1.      | Процессы получения композиционных материалов...                                | 112        |
| 6.2.      | Анализ материалов для создания пористых тел.....                               | 114        |
| 6.3.      | Крепление титановых промышленных сплавов с помощью адгезивов.....              | 118        |
| 6.4.      | Способы крепления цельнометаллических и пористых тел с помощью склеивания..... | 125        |
| <b>7.</b> | <b>ОХРАНА ТРУДА.....</b>   | <b>141</b> |
| <b>8.</b> | <b>ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ.....</b>   | <b>146</b> |
|           | <b>Литература.....</b>   | <b>147</b> |
|           | <b>Приложения.....</b>   | <b>158</b> |



## *Предисловие*

Склеивание разнородных материалов в настоящее время получило широкое распространение благодаря развитию химических технологий, способствующих производству современных клеевых материалов, отличающихся уникальными адгезионными свойствами.

Склеивание является важной, а иногда неотъемлемой частью современного производственного цикла в различных отраслях машиностроения, электроники, медицины, аппаратостроения, строительства, бытовой техники и т. д.

Технология склеивания отличается наибольшей эффективностью, по сравнению с другими технологиями формообразования, за счет быстрого и экономичного способа соединения конструкционных материалов, приспособляемости и специфических характеристик. Характерной особенностью технологии склеивания является ее универсальность, с ее помощью можно получать соединения материалов, отличающихся по своим физико-механическим свойствам. Иными словами, с помощью технологии склеивания можно создавать неразъемные композиционные соединения, чьи характеристики значительно превышают свойства отдельно взятых входящих в них материалов.

Настоящее издание посвящено краткому рассмотрению современного состояния и перспективам развития технологии склеивания. Особое внимание в книге уделяется практическому аспекту применения клеев при мелкосерийном и опытно-производственном производстве, разработана классификация клеев для облегчения выбора необходимого клеевого состава, описана методология выбора клея. Книга состоит из нескольких глав, в которых дается краткий обзор особенностей и тенденций развития технологии склеивания, а также приводятся результаты исследования и разработок последних лет, выполненных авторами книги. Рассматриваются свойства слоистых композиционных материалов, созданных с помощью технологии склеивания, а также представлены рекомендации способа подготовки поверхности.

Научная новизна работы состоит в исследовании концептуальных способов крепления неразъемных деталей в трудно скрепляемых соединениях на основе цельнометаллического основания и пористых вставок на основе пластиков с различной степенью пори-



стости, древесины и металлов в различных комбинациях (металл/пористое тело/металл (МПТМ) или металл/ пористое тело (МПТ)).

Было изучено и подтверждено экспериментальными данными влияние способа подготовки склеиваемой поверхности на разрывную прочность получаемых заготовок.

Рассмотрены аспекты экологической безопасности и правила по охране труда при производстве клееных изделий различного типа и назначения.

Хотелось бы выразить глубокую признательность и благодарность всем, кто оказал существенную помощь и поддержку в проведении исследований, которые легли в основу книги. Авторы выражают особую благодарность специалистам сертифицированного центра структурных исследований и трибо-механических испытаний материалов и изделий машиностроения Объединенного института машиностроения НАН Беларуси (ЦКП – ЦСИМИ ОИМ НАН Беларуси), а именно: начальнику Центра структурных исследований материалов и изделий машиностроения, д. ф.-м. н., проф. В. А. Кукареко и к. т. н. А. Н. Григорчику; директору ООО «АЛМИТЕХ» (официальному дистрибьютору ЗМТМ в Беларуси) А. В. Воробьеву; ведущему инженеру конструктору А. Е. Зелезею (НИИЛ «Промышленная теплофизика», БНТУ). Без их благожелательного отношения и поддержки не было бы возможности осуществить задуманное.

Введение, главы 1–4, 6 и приложения подготовлены М. Л. Калининченко; глава 5 подготовлена совместно с Л. П. Долгим; главы 7 и 8 подготовлены В. А. Калининченко.

Книга рассчитана для повышения квалификации инженерно-технических работников, чья деятельность связана с аддитивными технологиями, а также для использования в учебном процессе.



## ВВЕДЕНИЕ

Области применения клеев очень разнообразны и так же многообразны теоретические подходы к выбору критериев, определяющих целесообразность склеивания, и к обоснованию механизмов адгезионного взаимодействия [1, 2].

Производство клеящих материалов последнее время набирает все большие темпы во всем мире. Как результат, в Европе каждые 10 лет их выпуск увеличивается в 2 раза, в Китае за последние 15 лет производство клеевых материалов увеличилось более чем в 5 раз. Сегодня в мире насчитывается более 1500 крупных производителей клеевых материалов, которые выпускают более 250 000 различных наименований клеев [2, 3]. Анализ рынка клеев, сделанный в 2019 г. компанией Markets and Markets [4], показал, что его глобальная рыночная стоимость к 2020 г. составляет 60 млрд. долларов США, увеличившись в среднем на 4,7 % с 2015 г. Треть объема производства всех клеев приходится на Азиатско-Тихоокеанский рынок (темпы роста с 2015 к 2020 г. составили около 6,2 %), далее следуют Северная Америка и Западная Европа, с заметным отрывом далее идут Восточная Европа, Средний Восток, Африка и Южная Америка.

Образованы ассоциации производителей клеящих и уплотнительных материалов: американская (AST), европейская (FEICA), японские (JAIA и JSIA). Потребление клеящих и уплотнительных материалов (без учета бытовых клеев) распределяется следующим образом, в процентах: переработка бумажной продукции и упаковка – 35; строительство – 24; деревообрабатывающая и мебельная промышленность – 21; машиностроение и приборостроение – 10; остальное – 10. Глобальное производство клеящих материалов ориентируется на дальнейшее слияние производителей. Стоимостная доля ведущих производителей клеев на мировом рынке, в процентах: Henkel – 12; 3M – 9; Avery Dennison – 7; HB Fuller – 6; National Starch – 6; Atafina – 5; Rohm & Haas – 5; остальные – 51 [2, 3].

Область применения клеящих материалов многообразна [1–3; 5–9]: это и соединение разнородных материалов; склеивание многослойных конструкций; приклеивание усиливающих элементов конструкции; конструктивное склеивание; вклеивание пробок, втулок, шпилек, создание соединений типа вал-ступица; герметизации агре-



готов; временное крепление элементов конструкции, целью которого является использование клеевого соединения в течение короткого периода времени вместо других средств сборки; ремонт машин и оборудования. С помощью клеевых материалов устраняют такие повреждения, как трещины, пробоины, коррозионные повреждения в корпусных деталях.

Также растет и производство установок для дозированного нанесения клеев, отличающихся видами насосов, диапазоном вязкостей обрабатываемых композиций, соотношением компонентов в смеси, системой термостатирования, сохранностью продуктов, точностью и объемом дозирования и т. д. В частности, производятся установки высокоточного дозирования [10], начиная с 0,001 мл для адгезивов с различной вязкостью с погрешностью не более  $\pm 1\%$  и с точностью воспроизведения выше 99 %. Несмотря на все многообразие и количество выпускаемых установок, все они оказываются востребованы.

В последнее время, актуальна тема соединения разнородных материалов с целью производства облегченных конструкций в различных областях машиностроения, в том числе и в медицинской технике. Процентное содержание легких конструкционных материалов в автомобилестроении [11] планируется увеличить с 29 % в 2010 г. до 67 % к 2030 г. Внедрение полимерных композиционных материалов в автомобилестроении стало возможным благодаря применению клеевых композиционных соединений (металл/клей/пластик), что привело к развитию клеевой индустрии. Например, на данный момент, в легковом автомобиле используется в среднем до 15 л клея [12], благодаря которым масса автомобиля снижается приблизительно на 50 и более кг. По статистическим данным компании «3М», на данный момент в США доля создания неразъемных соединений из композиционных материалов при помощи процесса склеивания составляет 17 % от объема всех склеенных соединений, а к 2035 г. планируется рост таких соединений до 60 % [13]. Особо представляют интерес клеи, которые могут применяться в тяжелых условиях эксплуатации, например, в условиях повышенной влажности либо наличия различных типов жидких сред [1–3, 5–8].

Исходя из многообразия клеев, следует, что ряд этих составов ориентирован на потребности заказчика с учетом индивидуальных требований. Это может быть клеевой материал, подходящий как для



решения множественных задач, так и для решения сугубо одной определенной задачи. Из экономических соображений потребители предпочитают приобретать, в своем большинстве, универсальные клеи, которые могут иметь не совсем оптимальные параметры по прочности соединения, но пригодные для крепления различных видов материалов, и решения различных конструкционных задач в различных климатических условиях.

Таким образом, чтобы сблизить интересы разработчиков клеевых материалов и их потребителей классификация клеев должна быть как можно проще и понятнее для потребителя с технической точки зрения, что и было предложено авторами в главе 3 «Технология склеивания».



## 1. КЛАССИФИКАЦИЯ КЛЕЕВ

Для рассмотрения вопросов, связанных с использованием клеевых материалов, необходимо выделить часто используемые термины в технологических процессах, основанных на создании композиционных структур с помощью клеевых составов.

Клеевой (клеящий) материал (клей или адгезив) – это вещество, используемое для крепления ряда склеиваемых поверхностей между собой с помощью создания между ними адгезионного слоя, удерживающего, скрепляемые поверхности [1, 2].

Адгезия – это возникновение связи между поверхностными слоями двух разнородных (твердых или жидких) тел (фаз), приведенных в соприкосновение. Является результатом межмолекулярного взаимодействия, ионной или металлической связей [14].

Когезия – это сцепление друг с другом частей одного и того же тела, обусловленное действием сил межмолекулярного взаимодействия, водородной связи и (или) химической связи между составляющими его молекулами (атомами, ионами) и приводящее к объединению этих частей в единое целое с наибольшей прочностью [14].

До сих пор нет единой классификации клеев, удовлетворяющей требованиям производителей, промышленников, ученых и потребителей, и сделать ее представляется довольно сложным. Базовые классификации основаны на типологии по химическому составу клеев, по области применения, по природе склеиваемых материалов, по свойствам и даже в зависимости от их состояния на момент нанесения на поверхность (раствор, «термоплавкое» твердое тело, реактивная система и пр.). Иными словами, фирмы-производители не могут прийти к определенному стандарту. Как результат, практически в каждой стране существует своя классификация.

Например, во Франции основой является стандарт – NF T 76-011, в Германии DIN – 16920, в России, Республике Беларусь и некоторых других постсоветских странах – ГОСТ 30535-97 «Клеевые материалы. Номенклатура показателей», к тому же ряд компаний-производителей пользуются своими внутренними нормативами [13], например, компания «3М» (США).

На основании анализа европейской статистики по клеящим материалам FEICA (Европейская ассоциация производителей клеящих



и уплотнительных материалов) разработала и опубликовала в 1996 г. «Классификацию клеящих материалов, типы продуктов и их применение» [2, 3, 6]. В соответствии с классификатором FEICA все клеевые материалы подразделяют на 7 групп.

В соответствии с ГОСТ 30535-97 «Клеевые материалы. Номенклатура показателей» принята классификация, в соответствии с которой все клеящие и герметизируемые материалы подразделяются на 14 групп [15].

В таблице 1.1 представлены сводные данные классификации клеевых материалов FEICA и ГОСТ 30535-97.

*Таблица 1.1*

**Сводные данные классификации клеевых материалов  
FEICA и ГОСТ 30535-97**

| FEICA (Европейская ассоциация производителей клеящих и уплотнительных материалов)   | ГОСТ 30535-97 «Клеевые материалы. Номенклатура показателей»  |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Клеи на основе природных полимеров</li> <li>2. Полимерные дисперсии и дисперсионные клеи</li> <li>3. Плавкие клеящие вещества (в эту группу включены клеящие вещества, отверждаемые влагой)</li> <li>4. Клеящие вещества, содержащие растворитель</li> <li>5. Реактивные клеевые системы</li> <li>6. Клеящие вещества на основе водорастворимых полимеров</li> <li>7. Особые клеящие материалы</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Растворные</li> <li>2. Дисперсионные</li> <li>3. Эмульсионные</li> <li>4. Порошкообразные</li> <li>5. Пленочные</li> <li>6. Капсулированные</li> <li>7. Расплавы</li> <li>8. Активируемые теплом</li> <li>9. Активируемые растворителем</li> <li>10. Анаэробные</li> <li>11. Контактные</li> <li>12. Чувствительные к давлению</li> <li>13. Липкие</li> <li>14. Герметики</li> </ol> |



Также FEICA выделяет отдельно классификацию по областям применения:

- 1) машиностроение, в том числе и специальное;
- 2) бумага, картон и соответствующая продукция;
- 3) строительные и ремесленные материалы;
- 4) деревообработка и мебельная промышленность;
- 5) транспорт;
- 6) обувь и кожа;
- 7) бытовое потребление;
- 8) монтаж.

Чаще всего клеевые материалы классифицируют [1–3, 5, 6] по следующим признакам: области применения (клеи для склеивания металлов, резин, теплозащитных покрытий и т. д.); физическому состоянию (жидкие, пастообразные, твердые, пленочные); температуре отверждения (клеи холодного и горячего отверждения); химической природе основного компонента – связующего (эпоксидные, фенолоформальдегидные, силоксановые, акрилатные и т. д.); допустимым температурам эксплуатации клеевых соединений (клеи криогенностойкие, термостойкие, применяемые при умеренных температурах и т. д.); количеству компонентов (однокомпонентные, двухкомпонентные и т. д.); механизму их отверждения (клеи и герметики анаэробного отверждения, влажностного отверждения, клеи, отверждаемые активацией, клеи термического отверждения).

Известна классификация клеящих материалов по следующим признакам [2, 3, 5–7]: применение, отверждение, химический состав, стоимость и соответствие материала склеиваемому элементу. В соответствии с этой классификацией, механизм отверждения, т. е. переход адгезива из жидкого состояния в твердое, осуществляется: охлаждением расплава; улетучиванием растворителя; полимеризацией (поликонденсацией).

В соответствии с состоянием адгезива все материалы подразделяются на: растворные (включая термопластичные); термоотверждаемые (нерастворимые и неплавкие). Д. А. Кардашов предложил классификацию клеевых материалов по группам: термопластичные; терморезистивные; эластомерные [16, 17].

Очень подробная классификация по типам клеев представлена в [6, 7].



В первом приближении клеи можно подразделить на 2 большие группы: конструкционные и не конструкционные [2, 9].

К конструкционным, или силовым клеям относятся клеи, которые можно применять в случаях, где требуются прочные соединения, например, для приклейки фрикционных облицовок тормозных колодок, в авиационных конструкциях с легким наполнителем и т. п. Клей в подобных соединениях должен обладать способностью, выдерживать большие напряжения, стремящиеся разъединить скрепленные элементы [9].

Не конструкционные или несилловые клеи дают соединения, которые не в состоянии выдержать значительных усилий, и предназначены лишь для удержания на месте каких-либо ненагруженных деталей в изделии, например, металлических табличек, резиновых подкладок на металлических подставках и пр. Такие клеи часто применяются там, где желательно только временное соединение. Герметики и клеевые покрытия могут относиться к любой из двух групп [9].

Такая классификация помогает установить, какие клеи будут удовлетворять данному назначению. Однако если бы мы ограничились, указанной классификацией, то мы весьма мало знали бы об условиях, требующихся для отверждения клея: температуре, давлении, времени. Точно так же почти ничего не было бы известно о прочности соединений, ползучести, теплостойкости или других физических и химических свойствах данного клея [2, 9].

В результате производства и применения клеев, их поведения в соединениях при эксплуатации изделий необходимо хорошо знать физико-химические свойства материалов, используемых в рецептуре клея. Это особенно важно, если учесть, что многие клеи для металлов включают в себя два или больше основных связующих материалов. В некоторых случаях, например, в поливинилацетатных или в полиуретановых клеях, используется только один тип основного клеевого материала. Но в клеевых композициях, пригодных для конструкционных применений, важную роль играют многокомпонентные смеси основных материалов. Один тип основного связующего материала придает клею в клеевом соединении прочность и жесткость, в то время как другой снижает хрупкость, и т. п. Рациональная классификация клеев не может игнорировать упомянутые признаки [1, 7–9].



Таким образом, скорее всего не следует составлять универсальную классификацию, а стоит разделить клеевые составы по условиям их применения, т. к. ни одна из выше изложенных классификаций изначально не может удовлетворять всем реальным требованиям, связанным с технологией соединения определенных материалов в заданных условиях эксплуатации. Данный аспект будет рассмотрен далее в главе 3 «Технология склеивания».

Перед переходом к следующему разделу необходимо оценить основные свойства технологии склеивания. В таблице 1.2 отражены основные преимущества и недостатки процесса склеивания перед другими способами получения неразъемных соединений.

Таблица 1.2

**Основные преимущества и недостатки процесса склеивания перед другими способами создания неразъемных соединений**

| Преимущества  | Недостатки   |
|---|--|
| 1   | 2  |
| <p>1. Способность соединять самые разнообразные разнородные материалы, в т. ч. через адгезионную подложку, совмещающую их модель упругости и прочие свойства.</p> <p>2. Отсутствие термовоздействия на материал подложки, и как следствие, отсутствие термо- и других концентраторов напряжений.</p> <p>3. Крепление тонкостенных материалов, способных к деформации при нагреве.</p> <p>4. Задание адгезионной прослойке специфических функций (термопоглощение, звуко-, виброизоляция и т. д.).</p> | <p>1. Время, требуемое на технологическую и полную степень отверждения адгезионного состава (зачастую с применением нагрузки, температуры или газов отвердителей).</p> <p>2. При применении ряда адгезивов требуется дополнительная подготовка поверхности (очистка от загрязнений, шероховатость поверхности, поверхностная пористость и т. д.) и соблюдения ряда микроклиматических условий.</p> <p>3. Зависимость стойкости клевого соединения от условий эксплуатации.</p> |



Окончание табл. 1.2

| 1   | 2  |
|---|--|
| <p>5. Возможность снижения фактора электрохимической коррозии (гальванически разнородные материалы).</p> <p>6. Возможность использования адгезивов для крепления конструкции и параллельного создания герметичных соединений.</p> <p>7. Экономическая целесообразность сборки изделий с недлительным сроком эксплуатации.</p> <p>8. Возможность использования для работ персонала, не имеющего высокой степени квалификации.</p> <p>Снижения веса конструкции</p> | <p>4. Экологический фактор. Возможность содержания в цианакрилатах в клеевом составе</p> |



## 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛЕЕВЫХ СОСТАВОВ

### 2.1. Основные термины и характеристики

Химическая природа клея (или адгезива), а также строение его полимерной основы, значительно определяют как выстраивание технологии склеивания, так и эксплуатационные свойства готовых клеевых соединений [18].

Как правило, клеи состоят из нескольких компонентов, которые влияют на когезионные и адгезионные свойства клея, а именно: основного клеевого вещества, растворителя и добавок (отвердителя, наполнителя, пластификатора, активатора, стабилизатора и др., которые в композициях имеют различное назначение) [18–21].

*Основа клея* – это связующее вещество (в твердом или жидком состоянии), имеющее хорошую адгезию к соединяемому материалу.

*Растворитель* – это жидкости, которые переводят основу клея в жидкое состояние, обеспечивают возможность вводить в основу клея другие компоненты и поддерживать требуемую консистенцию. Примеры растворителей: спирт, вода, бензин, и др.

*Отвердители* – это вещества, которые воздействуют на основу клея, в результате чего ускоряется процесс их перехода в нерастворимое состояние. Ускорить отверждение можно и катализатором. Катализаторы и отвердители вводят только в клеи, где процесс отверждения связан с протеканием химических реакций. Примеры отвердителей: слабые кислоты, хлористый аммоний и др.

*Наполнители* – это вещества, которые применяются для изменения механических или теплофизических свойств основы клея, а именно прочности, модуля упругости, теплопроводности и др. Например для повышения вязкости можно использовать мел, цемент, гипс, сажу или древесную или пшеничную муку и т. д.

*Пластификаторы* – это вещества, которые применяются для придания пластичности клеевому шву и снижения его хрупкости. Примеры пластификаторов: глицерин, эфиры фталевой, фосфорной и других кислот, каменноугольные смолы и др.

*Активаторы* – это вещества или смесь веществ, которые увеличивают адгезионные свойства клея к склеиваемой поверхности. Иногда активаторы вводят в основу клея, иногда непосредственно наносят на соединяемые поверхности.



*Стабилизаторы* – это вещества, которые влияют на жизнеспособность уже готового клея. Например: ацетон, этиловый спирт и др.

Наибольшее распространение получила классификация клеев, главным признаком которой является химическая природа основного компонента. Данный подход более приемлем для разработчиков клеев, чем для потребителей. На его основе разработано большинство методических руководств, тем не менее, чтобы иметь общее представление о свойствах клеевых материалов, приведем данную классификацию в сокращенном варианте.

По химической природе основного компонента клеи делятся на природные и синтетические.

Клеи природного происхождения делятся на следующие группы:

- животные (казеиновые, мездровые, костные);
- растительные (углеводные – например, крахмал; белковые – на основе сои; смолянистые – на основе аравийской камеди, канифоли);

- минеральные (силикаты, фосфаты, окись магния и др.)

Клеи синтетического происхождения можно поделить по группам свойств на:

- термопластичные (поливиниловые, полиакриловые, полистироловые, целлюлозные и полиамидные смолы);
- терморезистивные (аминопласты; эпоксидные; эпоксиднополиамидные; эпоксиднобитумные; фенольных смол);
- эластомерные (на основе каучуков (натуральных и синтетических), нитрильные, полисульфидные, неопреновые, бутил-каучуки).

Термопластичные материалы, как правило, обратимо размягчаются при нагревании. Они способны плавиться, растворяться, размягчаются при нагревании. Не изменяют химического строения при формировании клеевого соединения, пригодны к использованию в качестве надежных конструкционных клеев.

Терморезистивные материалы необратимо затвердевают за счет химического превращения (они не плавятся при нагревании, но портятся или разлагаются при нагревании). Обладают высоким модулем упругости и весьма стойки к химическому воздействию. Предназначены для применения в высоконагруженных конструкциях и для эксплуатации при воздействии жестких внешних условий.



Эластомерные клеи, как правило, можно вытянуть вдвое без утраты своей упругости. Широко применяются для модификации терморезактивных клеев, придают им гибкость и повышают их прочность на отрыв. Часто применяются самостоятельно в качестве герметиков. Не предназначены для крепления конструкционных соединений.

## *2.2. Эпоксидные клеи*

Известно [6, 7, 16–19, 22, 23], что эпоксидные клеи являются синтетическими терморезактивными системами, получаемые на основе полиэпоксидной смолы и разных отвердителей основного или кислотного типов.

Как правило, в промышленности эпоксидные смолы получают следующими методами: реакцией эпихлоргидрина с двух- или многоатомными фенолами, фенолоформальдегидными смолами анилином либо прямым эпоксидированием ненасыщенных соединений пероксикислотами.

Известно [6, 7, 16–19, 22, 23], что в качестве компонентов эпоксидных клеев широкое применение нашли эпоксидиановые смолы; азотсодержащие эпоксидные смолы; галогенсодержащие эпоксидные смолы, эпоксидные смолы на базе резорцина и его производных; эпоксинолачные полимеры; карборансодержащие эпоксидные олигомеры. Вследствии большого ассортимента эпоксидных смол и отвердителей, создана широкая палитра эпоксидных клеев. Данные адгезивы могут быть как пастообразными, в виде вязких жидкостей, так и порошкообразными, твердыми, пленочными. Пастообразные клеи могут поступать к потребителю в готовом для применения виде или (наиболее часто) в виде отдельных компонентов. Пленочные клеи, как правило, представляют собой армированные различными тканями пленочные материалы.

Жизнеспособность эпоксидных составов зависит от типа отвердителя и является весьма разнообразной, например, при использовании трифторида бора жизнеспособность адгезива составляет несколько минут, а при применении в качестве отвердителя дициандиамида – колеблется от 6 до 12 месяцев.

Положительным моментом эпоксидных составов является то, что при склеивании они не требуют высокого давления: для боль-



шинства клеев достаточным является давление, обеспечивающее фиксацию склеиваемых деталей. К тому же, температура отверждения зависит от типа используемого отвердителя. Клеи, содержащие алифатические амины и низкомолекулярные полиамиды, отверждаются при комнатной температуре в течение 1–3 суток, а за 4–12 часов они достигают прочности, при которой изделие можно подвергать дальнейшей обработке. Клеи, содержащие комплекс трифторида бора, отверждаются при температурах ниже комнатной температуры. Клеи, содержащие в качестве отвердителей ароматические амины, дициандиаמיד или ангидриды многоосновных кислот, отверждаются при температуре 120–200 °С в течение 1–2 часов. Температуру отверждения в значительной степени определяет катализатор.

Известно [6, 7, 16–19, 22, 23], что прочность клеевых соединений при сдвиге для клеев холодного отверждения (для алюминиевых сплавов) составляет 15–25 МПа, для клеев горячего отверждения – до 35 МПа, для высокопрочных пленочных клеев – до 45 МПа.

Как правило [22], эпоксидные составы широко используются для склеивания широкого спектра металлов, различных типов неметаллов, органических соединений, композиционных материалов и др. Эпоксидные пленочные клеи применяются при склеивании слоистых конструкций и сотовых конструкций с наполнителем без перфорации. Наиболее широкое применение они нашли в авиационной, автомобильной, электротехнической и электронной промышленности.

### ***2.3. Полиуретановые клеи***

Полиуретановые клеи являются универсальными. На рынке клеев имеют известность более полувека, в связи с высокими адгезивными свойствами практически ко всем материалам, что обусловлено наличием в их составе полярных групп –  $\text{HNCOO-c}$ [6]. В некоторых отраслях промышленности данные адгезивы являются незаменимыми, например, при производстве низкотемпературной техники, так как обладают наиболее высокими механическими свойствами. Однако в качестве недостатка, необходимо отметить длительное время его отверждения (до 3-х суток при комнатной температуре).



Известно [6, 7, 16–19, 23], что существует большое количество типов и модификаций данных адгезивов. Однако одной из наиболее удачных классификаций является классификация приводимой авто-рами [6]. Исходя из которой можно выделить следующие группы:

- 1) одноупаковочные клеи, отверждаемые с помощью влаги;
- 2) клеи, твердеющие за счет компонентов, содержащих гидроокислы и изоцианаты;
- 3) растворы на основе гидроксилсодержащих полиуретанов;
- 4) водно-дисперсные полиуретановые клеи;
- 5) клеи-расплавы на основе полиуретанов.

Наибольшее распространение получила *вторая группа* клеев из-за своей высокорекреационной способности, получаемой вследствие наличия в составе изоцианатов. Однако их наличие имеет ряд недостатков, связанных с токсичностью данных соединений, а также резкого изменения скорости затвердевания в случае присутствия влаги.

Клеи *первой группы* наибольшее распространение в мировой практике получили в области деревообработки. Это объясняется их высокой экологичностью, а также длительным временем полимеризации. В результате чего, использование данного клея нецелесообразно для крепления деталей, не требующих фиксации и длительного времени выдержки. Так же фиксация древесины стробцинами, прессами и иными приспособлениями необходима для равномерного распределения клея и уменьшения свободного доступа воздуха, так как в противном случае на поверхности клея образуется корка, которая снижает адгезионную способность полиуретана.

*Третья группа* является промежуточной между первой и второй. К преимуществам данных клеев можно отнести следующее:

- 1) повышенная жидкотекучесть при комнатной температуре;
- 2) достаточно высокая скорость отверждения, вызванная самопроизвольным протеканием внутренних эндотермических реакций;
- 3) клеи данной группы являются весьма экологичными и не представляют проблем в процессе утилизации и переработки.

В *четвертой группе* представлены дисперсионные клеи, которые характеризуются наличием в своем составе сухой полиуретановой основы в количестве 40–50 % по массе, растворенной в ацетоне или расплаве.

Наибольший интерес представляют водно-дисперсные клеи, так как обладают высокой экологичностью и не являются взрывопожа-



роопасными. Кроме этого данная группа характеризуется практически полным отсутствием внутренних напряжений в полимеризовавшемся составе и, как результат, возможностью использования в деталях сложной формы. В результате низкой вязкости, данный тип клея легко наносится практически всеми известными методами, начиная от распылителя, заканчивая кистью или тампоном.

*Пятая группа* представлена клеями-расплавами, которые обладают хорошими адгезионными свойствами и состоят из плавких полиуретанов, являющимися твердыми при комнатной температуре. Процесс их полимеризации протекает в два этапа, начинающегося с охлаждения с последующей окончательной полимеризацией, вследствие взаимодействия с атмосферной влагой.

Работа с данными клеями сопряжена с рядом сложностей, связанных с нагревом клея до температуры 100–140 °С, что может привести к возможному травматизму работников или к уничтожению клеевого состава, вызванному разложением его компонентов при перегреве.

## ***2.4. Акриловые клеи***

Акриловые клеи занимают самый дорогостоящий сегмент рынка клеевых материалов. При этом они имеют практически идеальные адгезионные свойства и являются двухкомпонентными конструкционными адгезивами. Акриловые клеи подразделяются на три основные группы [6, 22]:

- 1) анаэробные клеи;
- 2) цианакрилатные клеи;
- 3) акриловые клеи, твердеющие под воздействием ультрафиолетового (УФ) излучения.

### ***2.4.1. Анаэробные клеи***

Анаэробные клеи имеют сложный состав, основанный на полимерном загустителе, олигомерной основы, наполнителе, активаторе, ускорителе и др.

Анаэробные клеи нашли широкое применение в народном хозяйстве благодаря следующим свойствам [6, 22]:

- способностью в течение длительного времени (до 1 года) сохранять свои первоначальные свойства;



- обладают высокой скоростью отверждения, а также могут оснащаться системой автоматической дозировки;
- имеют широкий температурный диапазон эксплуатации;
- водо- и маслостойкие, а также могут работать в кислых и в ряде других агрессивных средах;
- имеют высокую плотность клеевого шва, что позволяет их для получения изделий, работающих под давлением воздуха или воды.

Для анаэробных клеев характерна высокая чувствительность к склеиваемым поверхностям. Это выражается в скорости затвердевания. По данной характеристике клеи можно разделить на следующие группы:

- *с высокой скоростью полимеризации, исчисляющейся минутами.* Склеивает поверхности из железа, никеля, кобальда, меди, марганца и ряда др.;
- *с обычной скоростью полимеризации, исчисляемой в часах.* Склеивает поверхности из металлов и сплавов на основе алюминия, титана, цинка, драгоценных металлов, пластиков и древесины;
- *со временем полимеризации, исчисляемой сутками.* Склеивает поверхности, имеющие различные типы покрытий, полученные например, хромированием, никелированием и т. д.

Кроме химического состава склеиваемой поверхности, данный тип адгезивов весьма чувствителен к толщине шва. Однако, как показывает практика, не всегда удается достигнуть оптимального значения толщины шва в следствии вязкостных свойств, используемого адгезива. Исходя из этих особенностей, анаэробные клеи нашли широкое применение при создании неразъемных соединений. Например, для стопарения или герметизации резьбовых соединений, уплотнения сварных швов, для фланцевых деталей и т. д. При этом, в случае уплотнения, данный тип клеев применяется как самостоятельно, так и с металлическими прокладками и уплотнителями.

### 2.4.2. Цианакрилатные клеи

Цианакрилатные клеи основаны на эфирах альфа-цианакриловой кислоты и во многих случаях разные модифицирующие добавки. Например, бифункциональные соединения, которые повышают как теплостойкость, так и водостойкость клеевого соединения. Кроме



этого, неотъемлемой частью данных адгезивов являются пластификаторы (фталаты и др.), загустители, стабилизаторы и т. д. Для устранения самопроизвольной полимеризации применяют ингибиторы отверждения [6, 22].

Цианакрилатные клеи являются эффективными адгезивами применяемыми для крепления металлов, в том числе с гальваническими покрытиями, стеклом, пластмасс, дерева, резин и их комбинаций, при этом практически полностью не пригодны для склеивания полиэтилена и фторопласта.

Недостатком этих клеев считается хрупкость, малую стойкость к ударным нагрузкам, низкая влагостойкость и морозостойкость. Кроме этого они обладают высокой адгезией к человеческой коже, в связи с этим необходимо принять меры для исключения контактов с кожей.

Применение данных адгезивов особенно актуально при необходимости быстрого склеивания в основном в приборостроении для радиоэлементов, оптических деталей, микросхем, а так же нашли применение в медицине при полостных операциях.

### ***2.4.3. Акриловые клеи, отверждающиеся при УФ-облучении***

Известны [6, 22] акриловые клеи, которые отверждаются под воздействием УФ-излучения. Для создания этих клеев используются обычные акриловые мономеры, сложные системы на основе акриловых мономеров, или сложные системы на основе акриловых уретанов и «прочные» акриловые смолы.

Как правило, данные клеи, делят на следующие группы:

- *двухкомпонентные, в которые катализатор отверждения вводится непосредственно перед использованием;*
- *двухкомпонентные, в которые катализатор наносят на соединяемые поверхности;*
- *однокомпонентные анаэробные составы.*

Преимущество данных адгезивов может считаться то, что процесс отвердевания закончится за 1–2 минуты. В качестве недостатков необходимо отметить трудность процессов смешивания компонентов в клеевом слое, при этом данный эффект может приводить как, к неоднородности клеевой массы так и к последующим недостаткам клеевого соединения по прочностным характеристикам.



## 2.5. Клеи на основе канифоли

Канифолевые клеи обычно используются в виде растворов или расплавов. Как правило, они имеют неплохую водостойкость, однако слабоустойчивы к воздействию любых видов растворителей и масел, имеют повышенную склонность к старению, сопровождающуюся охрупчиванием и растрескиванием. Как следствие, данные клеи применяются в основном в бумажной промышленности в качестве временных клеев и клеев лаков [6, 7].

## 2.6. Резиновые клеи (каучуковые)

Резиновые клеи представляют собой группу клеевых составов на основе природных или синтетических каучуков. Вследствие чего обладают повышенной пластичностью и являются пригодными для соединения эластичных деталей, а также деталей испытывающих знакопеременные или ударные нагрузки.

По способу отверждения резиновые клеи делятся на две большие группы: на не вулканизирующие клеи, твердеющие в результате испарения растворителя; и вулканизирующие, твердеющие за счет реакции клеевого состава с отвердителем или вулканизатором [6, 7].

Как правило, прочность клеевых соединений зависит от химического состава используемого каучука, а при применении отвердителя, также и от свойств отвердителя.

Наиболее широкое применение данные клеи получили в кожевенной и резинотехнической промышленности, где применяются для соединения резин между собой, а также с керамикой, пластиком и т. д.

В зависимости от материала основы, подразделяются на следующие 6 групп:

1. **Клеи на основе натурального каучука.** Представляют собой вязкие жидкости, включающего от 10–15 % каучука, растворенного в толуоле, этилацетате и др. В качестве отвердителя используется, как правило, сера.

2. **Клеи на основе хлоропеновых каучуков.** Широко представлены группой клеев типа «Клей 88» и применяются для склеивания широкого типа материалов друг с другом, в которых отсутствуют сдвиговые напряжения. Данные клеи представляют собой растворы каучуков в органических растворителях (бензин, бен-



зол), с добавками отвердителя. Данный тип клеев имеет хорошую водостойкость, как результат, используется в широких областях промышленности для крепления резиновых изделий.

3. **Клеи на основе бутадиен-нитрильных каучуков.** Являются растворами с различным соотношением бутадиена и акрилонитрила, растворенные в этилацетате, с наполнителями в виде  $TiO_2$ ,  $SiO_2$  и др. Вулканизаторами являются изоцианаты. Клеи выпускаются в виде жидкости, с количеством каучука от 8,5 до 30 % по массе и применяются, как правило, для склеивания прорезиновых тканей и резин с тканями и пластиками.

4. **Клеи на основе термоэластопластов.** Данные тип клеев определенным способом сочетает в себе вулканизированные эластомеры и термопласты. Как результат, в условиях эксплуатации они показывают прочностные свойства свойственные вулканизированным эластомерам, а при переработке показывают технологические преимущества, свойственные термопластам. В случае создания специфических склеенных узлов, для повышения прочности и теплоустойчивости, в них могут добавляться канифоль или смолы. Данный тип клеев обладает высокой влагостойкостью и используется для склеивания различных органических материалов (пластмасс, резин, тканей и т. д.).

5. **Клеи на основе фторкаучуков.** Представляют собой двухкомпонентные основы, которые смешиваются непосредственно перед применением. Часто используются с различными добавками, например, эпоксидными олигомерами. Данный тип клеев обладает высокой химической стойкостью, масло- и бензиностойкостью. Температура эксплуатации до 250 °С. Как правило используются для склеивания фторсодержащих каучуков, как между собой, так и с металлами и пластиками.

6. **Клеи на основе кремнийорганических каучуков.** Данный тип клеев выпускается без растворителя, но с высоким содержанием наполнителей на основе оксидов, например, титана или кремния. В качестве преимущества, необходимо отметить, что данные клеи отверждаются при комнатной температуре и имеют повышенную атмосферостойкость, а основным недостатком – низкие прочностные характеристики, в особенности на сдвиг. Как правило, данный тип клеев применяется для склеивания резин и термоизоляционных материалов.



## ***2.7. Клеи на основе латексов***

Латексные клеи содержат в себе водную основу, которая снижает их взрыво- пожароопасность по сравнению с резиновыми клеями, а также делает их более дешевыми в производстве. Однако, вследствие их водной основы, латексные клеи могут вызывать коррозию металлов и практически не обладают защитными свойствами (низкая морозо- и водостойкость). Данный тип клеев содержит от 30 до 40 % по массе каучука, поверхностно активные вещества (стабилизирующие латекс, а также, в ряде случаев, антикоррозионные добавки). Как правило, данный тип клеев имеет слабую адгезию ко всем типам материалов, но очень высокие когезионные свойства. Для улучшения вязкости и адгезионных свойств, данные составы часто используются с добавками, выполняющими роль загустителей на основе целлюлозы, полиакрилатов, бентонита и др. Кроме того, данные клеи при высыхании имеют склонность к заметной усадке. Для противостояния данному процессу в состав клея вводятся каолин, мел и другие добавки [6, 7, 16–19, 22, 23].

Латексные клеи имеют низкую сопротивляемость отрицательным температурам. Для снижения данного эффекта используются добавки акриловой кислоты.

Известно, что латексы часто используются для изготовления резинотехнических изделий, однако они нашли широкое применение и в строительстве, для крепления керамической плитки к бетону, гипсу, древесине и т. д. В машиностроении основное применение латексных клеев приходится на процесс создания и ремонт конвейерных лент, состоящих из разнородных материалов, соединенных с резиновой основой.

## ***2.8. Клеи на основе карбамидаальдегидных олигомеров***

Данный тип клеев представляет собой, по большей части, конденсат мочевины с формальдегидом, которые при отверждении образуют хрупкие, твердые полимеры, разрушающиеся при наличии влаги, склонные к растрескиванию и усадке. Данный вид клеев твердеет при наличии щавельной, ортофосфорной, лимонной и др. кислоты. В зависимости от типа этих добавок и их количества клей может отверждаться от двух часов до суток. В связи с



нестабильностью качеств данного типа клея и его слабой живучестью в его состав вводят в обязательном порядке древесную муку и крахмал. Применяется данный тип клеев для изготовления экологически чистых фанер, древесно-стружечных плит и исходных материалов. Однако их использование может быть ограничено по причине полного разложения клеевого состава при взаимодействии с горячей водой [6, 7, 16–19, 22, 23].

### ***2.9. Клеи на основе поливинилхлорида (ПВХ)***

Клеи на основе поливинилхлорида (ПВХ) – изготавливаются на основе метилхлоридов и отвердителей. Данный тип клеев обладает высокой жизнестойкостью, а также начальной прочностью, устойчивостью к воздействию воды, солей, щелочей и растворителей. При этом, необходимо отметить сохранение их пластичности после полимеризации. Для улучшения свойств данного типа клеев в их состав включают пластификаторы (например, фосфорную кислоту), гелеобразователи (мыло) и наполнители. В качестве основного преимущества необходимо отметить высокую адгезию данных клеев к влажным и замасленными поверхностям металлов, что приводит к возможности его применению для изготовления топливных и масляных фильтров [24].

Как правило, данный тип клея представляет собой одноупакованные жидкости, которые наносятся пистолетом, шпателем или кистью на склеиваемый материал.

### ***2.10. Клеи на основе поливинилацетата (ПВА) и его сополимеров***

Клеи на основе поливинилацетата (ПВА) – это смесь поливинилацетатной основы, представляющей собой твердый или вязкий прозрачный продукт, с добавлением эфиров целлюлозы, полиакрилатов, производных целлюлозы, хлоркаучуков и др. Как правило, данные клеи применяются в виде водных растворов, отверждение которых происходит в результате испарения водной основы с последующим взаимодействием компонентов основы со склеиваемыми поверхностями. Для улучшения данного взаимодействия



можно использовать уксусную кислоту и ряд других активных составляющих [6, 7, 16–19, 22, 23].

Данный тип клеев при обработке пероксидом водорода заметно увеличивает свои адгезионные свойства и снижает количество бактерий, постоянно имеющиеся в наличии в исходном составе.

Преимуществом данных клеев является возможность длительного хранения, взрывная и пожарная безопасность, транспортабельность и др. В качестве недостатков необходимо отметить ограниченную способность склеивания разнородных материалов, в особенности на металлической основе, а также развитие бактериальной флоры в данных типах адгезивов.

### ***2.11. Клеи на поливиниловом спирте***

Клеи на поливиниловом спирте, уже исходя из определения, становятся ясно, что данные клеи представляют собой растворы данных спиртов в воде или в органических растворителях [6, 7, 19].

Преимуществом данных клеев является то, что они устойчивы к действию масел, жиров, бензина и растворителей. Однако они отличаются невысокой теплостойкостью, недостаточной водостойкостью и прочностью. В качестве наполнителей в них, как правило, используются глина, канифоль, казеин. Применяются данные клеи, как правило, в бумажной промышленности [6, 22, 23].

Благодаря спиртовой основе разновидности данного типа клея хорошо смешивается в любых соотношениях с эпоксидами, изоцианатами, канифолями и др. Как правило, используются в сочетании с пластификаторами в виде фосфатов или филатов, что приводит к улучшению некоторых свойств клея. Данные клеи имеют хорошую адгезию практически ко всем материалам, особенно в сочетании с эпоксидными смолами.

### ***2.12. Фенолоформальдегидные клеи***

Фенолоформальдегидные клеи представляют собой широкую гамму клеев для склеивания практически всех типов материалов благодаря особенности отверждения без использования специальных отвердителей [6, 7, 16–19, 22, 23].

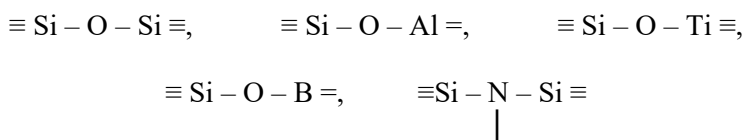


Использование данных клеев с добавлением каучука (клеи типа ВК) позволяют увеличивать пластичность клея и стойкость к высоким температурам. Данный тип клея подходит для склеивания металлических материалов и находит широкое применение, несмотря на то, что являются токсичными, в вертолетостроении и авиастроении, а также нашли применение в энергетической области, при создании контактных пар при наличии, в качестве связующего, медного или железного порошка. При этом необходимо отметить, что данные типы клеев имеет высокую сдвиговую прочность по стали, достигающую 26 МПа [6], а также обладают высокой масло-, бензо- и атмосферостойкостью, успешно работают в присутствии кипящей воды, солевого тумана и растворителей.

Как правило, применяется данный тип клея для сборки силовых конструкций на основе металлов и армированного пластика в том числе, для производства мебели и тары.

### 2.13. Элементоорганические клеи

Данный тип клеев основан на связке элементоорганических полимеров типа [6]:



Обладают особо высокой термостойкостью, обусловленной элементарной связью между элементами. Кроме того, необходимо отметить их атмосферо- и влагостойкость, а также электро- и радиоизолирующие свойства. Благодаря ионной связи, данные клеи обладают низкими когезионными свойствами по отношению к любому типу материалов, а также требуют повышенных температур, для их отверждения, что наглядно видно на клеях типа ВК-2 [6]. Незначительное повышение когезионных свойств клеев данного типа можно получить добавлением силиконов с добавками бора, титана, алюминия. На базе данных клеев разработаны также клеи холодного отверждения типа ВК-22 [6], обладающие, как и другие клеи данной группы, низкими прочностными характеристиками, но



высокими эластичными свойствами, и применяются для материалов с различными коэффициентами температурного линейного расширения. Данный тип клеев часто используется с применением наполнителей, представляющие собой металлические или керамические порошки, стекловолокно и т. д., которые заметно улучшают прочностные и эластичные свойства материалов.

Выпускается данный тип клеев в виде паст или твердеющих жидкостей. Применяются для изготовления изделий, работающих при повышенных температурах до 500 °С, а в некоторых случаях и до 1400 °С.

### **2.14. Клеи – расплавы**

Клеи – расплавы представляют собой термопласты, состоящие из клеящего вещества, которое при нагревании переходит в вязкотекучее состояние с высокой адгезионной способностью и восстанавливающее свое твердое состояние при охлаждении. Так как в состав данных клеев не входят растворители, переходят они в свое исходное твердое состояние с достаточно высокой скоростью [6].

Данный тип клеев образует высокопрочный клеевой шов, который можно эксплуатировать в широком интервале температур. Кроме этого процесс склеивания легко механизуется и, как правило, являются безотходными и экологически чистыми.

При выборе данных клеев необходимо учитывать их адгезионную способность к склеиваемым материалам, диапазон температур плавления и кристаллизации, а также массовость и степень механизации производства, исходный вид адгезива (поставляется в виде порошков, лент, пленок, гранул, цилиндров, брусков или шнуров). В качестве положительного момента необходимо отметить практически неограниченный срок хранения данных клеев при комнатной температуре.

### **2.15. Неорганические клеи**

Группа неорганических клеев представлена наиболее термостойкими клеями (из всех видов адгезивов), которые способны работать при температурах до 2000 °С [6, 7, 22, 23].

Одним из типичных представителей неорганических клеев является **металлические клеи**, основанные, как правило, на металлах с невысокой температурой плавления с добавлением порошков туго-



плавких материалов. Основным активным элементом данных клеев является галлий (так называемые галлиевые пасты). Благодаря повышенной смачиваемости галлия они могут использоваться для склеивания металлов и неметаллов при температурах от 200 °С до 300 °С [6, 22]. Широкое применение эти пасты получили в соединениях с высокой электропроводностью, в которых недопустима пайка, а температура эксплуатации может достигать 800 °С. Как правило, формирование структуры и монолитности клея требует около 24 часов при комнатной температуре и 1–2 часа при нагреве до 100 °С.

Второй известной группой, являются клеи на основе силиката натрия или **силикатные клеи**. Данные клеи состоят из жидкого стекла (натриевая соль кремневой кислоты) с добавлением около 50 % воды по массе. Затвердевшая клеевая пленка у силикатных клеев хрупкая и не стойка к воздействию воды. Однако выдерживает воздействие температуры до 1200 °С. В ряде случаев, для повышения пластичности, в данные клеи может добавляться клей типа ПВА. Силикатные клеи без добавок используются для склеивания бумаги и картона. Силикатные клеи с добавками используются для склеивания асбестовых и других изоляционных материалов, а также для уплотнения щелей в термическом оборудовании.

Кроме этого к неорганическим клеям относятся **фосфатные клеи-цементы**, подразделяющиеся на две группы: клеи, получаемые с применением фосфорной кислоты и клеи, изготавливаемые с применением фосфорных связующих. Данный тип клеев представляет собой пастообразное вещество зеленого цвета. Отверждаются при комнатной температуре с последующей термообработкой при температуре порядка 300 °С. В зависимости от применяемых добавок (на основе Al, Ti, Cr и т. д.) можно получить клеевые составы с повышенной жаростойкостью до 1800 °С. Прочностные свойства клеевого шва зависят от природы склеиваемых материалов. При использовании данного клеи необходимо учитывать усадку, которая напрямую зависит от типа используемого порошка наполнителя. Данные клеи применяются для склеивания керамики, блокировки резьбовых соединений, а также фиксации различных элементов и термодатчиков.



### 3. ТЕХНОЛОГИЯ СКЛЕИВАНИЯ

Прочность клеевого соединения, а, следовательно, и всего изделия в целом зависит от прочности материала клеевой прослойки и склеиваемых элементов, от силы взаимодействия адгезива с поверхностью склеиваемых элементов и других факторов [1, 3, 18]. Технологам, использующим адгезионные технологии в процессе ремонта или монтажа каких-либо изделий, необходимо запланировать возможные конечные параметры получаемого продукта и требования к материалам и их композиций для получения качественного конечного результата. Для этого технологю необходимо иметь технологическую карту склеиваемого или ремонтируемого изделия, либо разработать ее самому лично. При этом важно учитывать, что все, даже незначительные, вносимые в процесс склеивания изменения, могут привести к значительному снижению прочностных характеристик склеенного готового соединения.

Исходя из вышесказанного, технологию склеивания можно разбить на девять основных операций, которые далее будут разделены на подоперации, в зависимости от типа используемого адгезива и характеристик применяемых склеиваемых материалов.

Технология склеивания включает следующие основные операции:

1. Выбор клея и анализ склеиваемых материалов.
2. Очистку поверхности.
3. Подготовку склеиваемых поверхностей.
4. Обезжиривание поверхностей.
5. Подготовку клея к применению.
6. Способы нанесения клея.
7. Обеспечение условий для качественной полимеризации клея.
8. Контроль качества.

*Перед тем, как выработать рекомендации по склеиванию всего изделия, а также перед составлением на него технологической карты, необходимо отработать технологию склеивания на образцах в лабораторных условиях.*

В первую очередь необходимо строго придерживаться рекомендаций производителя клея. Как правило, производителем оговорены параметры эксплуатации клеевого соединения и операционная последовательность его нанесения и сушки. Некоторые про-



изводители предоставляют расширенные рекомендации, а именно, по температуре склеивания, по качеству подготовки поверхности, по толщине нанесения клеевого слоя, по способу нанесения, а также и по другим параметрам. Однако стоит учитывать, что рекомендации, предложенные производителем, зачастую основаны на лабораторных испытаниях определенного числа реперных образцов. Следовательно, если производителем указано, что клей рекомендуется для склеивания железа это не означает, что он будет склеивать сталь и чугун с одинаковыми прочностными свойствами при одинаковых условиях проведения технологии склеивания. При переходе на новый вид клеевого состава конструкторскому бюро и технологу, для уменьшения процента выбраковки, придется дополнить работу технического отдела изготовителя клея. *Поэтому авторами рекомендуется предварительно нанести выбранный клей на отдельные детали, чтобы посмотреть, как он себя ведет на поверхности основы* (оценить визуальную степень вязкости, текучесть, чтобы в последующем наносить достаточное количество адгезива; посмотреть, как он реагирует на поверхность, просто прочувствовать свойства данного клея). Желательно делать это в цеховых условиях предприятия пользователя. Возможно, эти первичные действия сразу внесут коррекцию в дальнейшее использование, по каким из либо пунктов технологического процесса склеивания, например, по подготовке поверхности склеиваемых материалов или метода нанесения клея, с учетом конкретных условий производства.

Также важно не забывать, что над химической формулой клея уже поработала большая группа специалистов химической отрасли, и задача технолога, в основном, состоит в том, чтобы грамотно провести технологический процесс склеивания, а, следовательно, *вносить добавки в клеевой состав является вторичным и только в случае, продиктованном технологической необходимостью.*



### **3.1. Выбор клея и анализ склеиваемых материалов**

#### **3.1.1. Основные требования к выбору клея**

Правильный выбор клея [1, 6, 16, 19] весьма важен и является одним из трех основных факторов, влияющих на конечную прочность:

- 1) правильная подготовка поверхности склеиваемых материалов;
- 2) нагруженность склеиваемых соединений;
- 3) условия эксплуатации.

Как было указано ранее [2, 13, 15], современный рынок клеев исчисляется тысячами предложений с большой номенклатурой их использования. Ряд клеев производители делают под заказ для выполнения конкретной задачи, в определенных условиях эксплуатации. Особые свойства таких клеевых составов часто остаются до конца не изученными, хотя могут оказаться более универсальными и широкополосными в спектре применения и, зачастую, превышать показатели аналогов, рассчитанных на конкретную область применения. Таким образом, выбор клея является сложным и концептуально необходимым исследованием, но если действовать определенными правилами задача выбора клея значительно упрощается.

Разработчикам клеевых соединений и конструкций всегда необходимо находить баланс, исходя из требуемых свойств соединения, и решать какое из требований является более, а какое менее важным [1, 3, 5–9]. Главными требованиями при выборе клея являются [16, 17, 19], по приоритетам:

- 1) природа склеиваемых материалов;
- 2) условия эксплуатации склеенного соединения;
- 3) аспекты технологии склеивания;
- 4) экономическая целесообразность применения конкретного типа клея.

Для практического применения клеевого состава стоит рассмотреть аспекты, связанные с каждым из данных пунктов.

#### **3.1.2. Природа склеиваемых материалов**

На первоначальном этапе оценивается поверхностная активность склеиваемых материалов; степень однородности-неоднородности



скрепляемых поверхностей; шероховатость поверхностей и необходимая толщина наносимого слоя клеевого состава.

Исходя из технического задания, определяется, из какой группы будет выбираться клей согласно предполагаемой или имеющейся конструкторской документации. Как результат, это либо конструкционные (в основном, неразъемные соединения), или не конструкционные (в основном, разъемные соединения) или универсальные (для большинства технологических материалов). Как было указано выше, фирмы производители клеев, как правило, выделяют номенклатуру клеев, которые подходят более всего для какого-то конкретного типа материала. Например, для металлических материалов, или для конкретного типа пластика или металла, где адгезионные свойства данного клея показывает свои оптимальные значения, но это не значит, что он не пригоден для других целей. Это объяснимо тем, что производителю выгодно повышать номенклатуру клеевых составов, основанную на использовании ее на конкретное изделие с умалчиванием позитивного воздействия на другие материалы, что было неоднократно установлено авторами в работах [1, 3, 6–8, 19]. Поэтому, для разработки технологической карты для нужд собственного производства, авторы предлагают *упростить градацию клеев для первичного выбора* и представить ее следующим образом (рисунок 3.1).

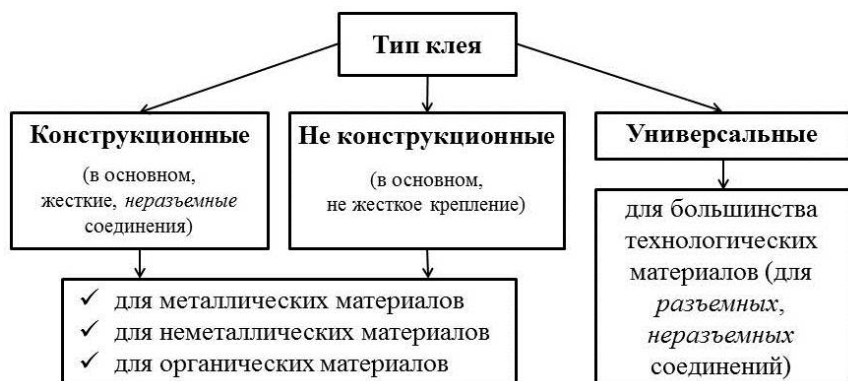


Рис. 3.1. Градация различных типов клеев



Металлы и неметаллы выделены в разные группы по причине упорядоченности кристаллической решетки, наличием технологической пористости, растворимости и др. Как результат они имеют другой механизм взаимодействия поверхностей. Например, металлы и керамические материалы подвергаются резке, шлифовке и полировке, однако, для металлов данные процессы легко осуществимы в бытовых условиях, что нельзя сказать про оксидную керамику.

Иногда фирмы производители предлагают универсальные клеи с расширенной номенклатурой скрепляемых материалов, но возможно с заниженными прочностными характеристиками для некоторых из них при определенных условиях эксплуатации.

### ***3.1.3. Условия эксплуатации склеенного соединения***

В ряде источников [1, 6, 7, 19] основным условием эксплуатации склеенного соединения являются его прочностные показатели, из которых в первую очередь выделяют долговечное, недолговечное соединение (один из критериев надежности), означающий, что зачастую современным производителям необходимо заранее заданный срок службы изделия. Например, срок годности изделия 3 года, после чего адгезионные свойства соединения в изделии уменьшаются или вовсе заканчивается срок их службы, и приходится покупать новое. При этом важно, что за время срока службы изделия, соединение обязано выдержать все заявленные нагрузки. Или наоборот, адгезионное соединение в изделии должно просуществовать как можно дольше: 10 и более лет.

Важно определить преобладающий тип действующей нагрузки в склеиваемой конструкции: *статический или динамический*. Статические нагрузки выдерживают многие типы клеев, а динамические или знакопеременные в большей степени являются источником разрушения клеевых соединений.

В процессе эксплуатации клеевые соединения воспринимают различные виды нагрузки, которые могут быть приведены к четырем основным типам: *сдвиг, равномерный отрыв, внецентровой отрыв, отдир* (рисунок 3.2).

При этом на практике, готовое склеенное изделие будет чаще всего испытывать комбинированный тип нагрузок, т. е. условный сдвиг, смешанный отрыв и т. д.



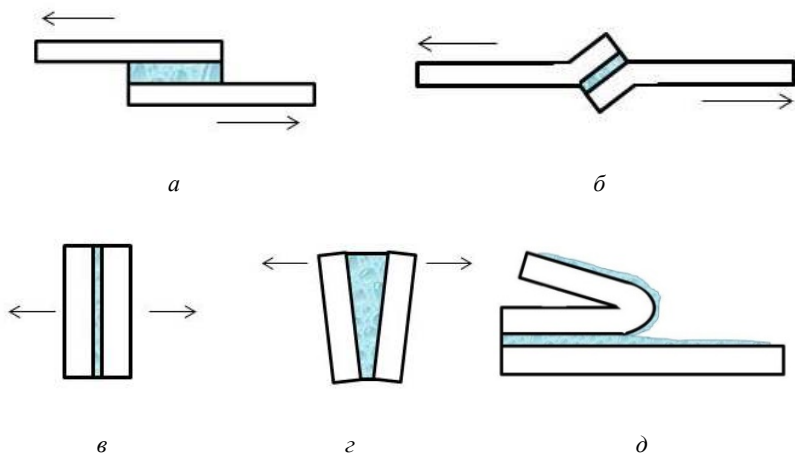


Рис. 3.2. Основные типы нагружения клевого соединения:  
*a, б* – сдвиг; *в* – равномерный отрыв; *г* – внецентровой отрыв; *д* – отдир

При склеивании материала нужно учитывать эпюру прогиба, возникающую при использовании конечного изделия. При этом однородность или разнородность материалов, а также физическое взаимодействие играют важную роль в получаемом композиционном соединении. Рассматривая на примере однородной полосы, находящейся под давлением, можно отметить, что распределение нагрузок в ней будет ассиметричным прикладываемому давлению (рисунок 3.3), с максимальным пиком прогиба в центральной точке приложения нагрузки и минимальным в точках опоры.

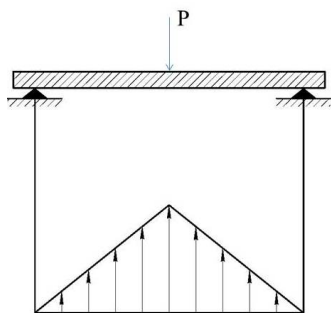


Рис. 3.3. Схема эпюры прогиба при деформации однородной пластины



При использовании вязких и пластичных клеев наблюдается изменение прочностных свойств в месте соединения, как при креплении однородного, так и неоднородного материала. Это обусловлено резким скачком эпюры прогиба на месте стыка неоднородного материала (рисунок 3.4), что может привести к неравномерному износу изделия, образуемому в результате разнородных деформаций, происходящих в трехслойном композиционном соединении. При этом следует отметить, скачкообразное изменение свойств в зоне присутствия клеящего материала, что может приводить в дальнейшем к трудностям, связанным с механической обработкой цельного соединения, а также и последующей эксплуатацией готового изделия. Кроме того, следует отметить, что в данных схемах не указаны коэффициенты термического расширения материалов, составляющих готовое изделие. Наличие данных коэффициентов может внести серьезную корректуру по деформационным смещениям, как однородных, так, в особенности, неоднородных материалов, ввиду их разности по теплопроводности и коэффициенту расширения.

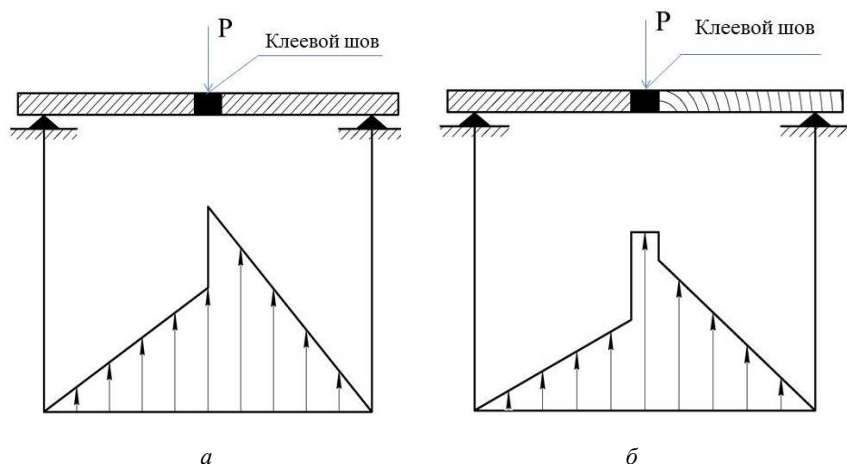


Рис. 3.4. Схема эпюры прогиба при деформации пластины, склеенной вязким клеем:

- а* – при соединении однородного деформируемого материала;
- б* – при соединении деформируемого и недеформируемого материала



Использование клеев, имеющих низкую деформационную способность, и как результат, обладающих высокими прочностными свойствами приводит к ряду изменений в диаграммах прогиба, а именно, к провалу эпюры прогиба при соединении однородных материалов (рисунок 3.5, *а*), и наличию ступеньки в эпюре прогиба при использовании неоднородных материалов (рисунок 3.5, *б*).

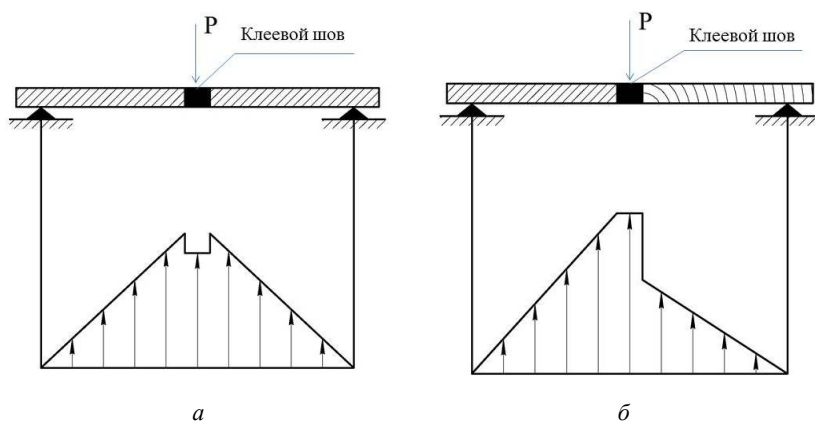


Рис. 3.5. Схема эпюры прогиба при деформации пластины, склеенной высокопрочным клеем:

- а* – при соединении однородного деформируемого материала;
- б* – при соединении деформируемого и недеформируемого материала

Следовательно, во избежание наличия клея, как концентратора напряжений, создающего резкие перепады в эпюрах прогиба, он должен быть максимально приближен, по основным показателям, к материалу заготовки и, по возможности, компенсировать возникающие перепады напряжений при нагрузках в местах соединения. При этом при креплении неоднородных материалов, в первую очередь, должна учитываться усредненная величина адгезии клея к скрепляемому материалу. Второй важной величиной является усредненный коэффициент жесткости, который не мог бы выделить одну из склеиваемых поверхностей в качестве доминанты (концентратора разрушающих нагрузок). Как показано [6], при выборе усредненного клея для двух различных подложек нужно учитывать возможность образования коррозии (например, склеивание железосодержащих материалов клеями с цинковой составляющей или,



учитывать ряд проблем при склеивании пластиков цианакрилатами). Однако, для крепления ряда пластических масс, возможно применения агрессивных растворителей типа дихлорэтана. В том числе и в чистом виде, который создает растворение и смешивание пластических масс, так и в виде клеевого состава, в случае использования в качестве растворителя частиц склеиваемого материала.

В совокупности, решая вопрос прочности крепления материалов, нельзя забывать, что заведомо завышенные требования к прочностным характеристикам клея могут привести к ухудшению других характеристик, таких как пластичность, взаимобрабатываемость и ряд других, актуальных для соединения.

Рассматриваемые ранее вопросы применимы в большей степени к основным направлениям машиностроения, в первую очередь для конструкционной сборки. Однако кроме базовых отраслей существует и специфические, важные для производителя, области применения клеевых составов для которых могут вводиться дополнительные требования. Например, для использования в объектах авиаинженерии важна рабочая температура клея (высокая, низкая или с большими перепадами). В медицинской области первоочередным будет экологичность и не токсичность клеевого состава. Для отдельных производителей необходимы клеи, способные работать в среде с повышенной влажностью или вообще в воде. При этом следует учитывать ограничивающие нормативы по применению клеевого материала в отдельных областях, регионах или по отраслям производства. Например, в соответствии с правилами пожарной безопасности Республики Беларусь [25] использование особо горячих, взрывоопасных клеев и связующих в городских условиях недопустимо.

### ***3.1.4. Технологические аспекты технологии склеивания***

В зависимости от поставленной задачи процесс технологии склеивания, в особенности универсальными клеями, достаточно прост. При отсутствии же отработанного технологического процесса, либо в случаях, когда требуется индивидуальный подход, существенную роль начинают играть такие критерии, как способ нанесения клея, продолжительность нагрева, приложение нагрузки и т. д. Все эти и другие необходимые параметры рекомендуется подробно уточнять у производителя клея. Очень часто, по технологии склеивания необхо-



дима оценка времени схватывания клея и время его живучести, во избежание ситуации, при которой, когда заканчивается процесс нанесение клея на поверхность, первоначально нанесенный состав уже высох и потерял свои адгезионные свойства. Важно уточнять у производителя рекомендации по способу нанесения клея (на одну или обе склеиваемые поверхности, с грунтовкой или без и т. д.).

Одним из основных факторов при выборе клея является срок его живучести после вскрытия упаковки. Данный фактор влияет на закупаемый фасовочный объем клея (от тубы до бочки) и может так же влиять на выбор производителя клея, исходя из требуемой по технологическому процессу фасовки. Так, что на этапе разработки технологического процесса на такой фактор стоит уделить внимание.

По технологическим свойствам скрепляемых материалов идет подборка клеев по вязкости (жидкотекучие и вязкие), исходя из шероховатости поверхности материала, его пористости и склонности к адгезии.

Применение вязких клеев, зачастую, не может охватить пористую поверхность, из-за чего снижается коэффициент крепления. При применении жидких клеев, может иметь место избыточное проникновение их в поры, что тоже ослабляет склеиваемую поверхность, что можно объяснить воздействием капиллярного эффекта и просто растеканием (рисунок 3.6). Как результат, для крепления сложных соединений требуются клеевые материалы, имеющие твердожидкую фазу. Как вариант, возможно использование технологии многослойного нанесения или применения специальной подготовки поверхности, что будет рассмотрено далее.

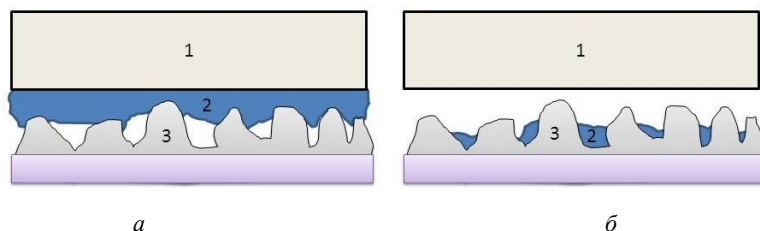


Рис. 3.6. Варианты воздействия при соединении поверхностей вязким клеем (а) и жидким клеем (б):  
1 – компактный склеиваемый материал; 2 – клей;  
3 – пористый склеиваемый материал



### ***3.1.5. Экономическая целесообразность применения склеиваемого соединения***

В некоторых случаях стоимость клея не играет преобладающей роли, например, при работе с узлами особой важности, связанные с жизнедеятельностью людей. При иных условиях, если не предъявляются специфические требования (помимо прочности), удовлетворительный результат можно получить с более дешевым клеем, т. е. можно использовать универсальные клеевые материалы с более низкой стоимостью.

В зависимости от ответственности склеиваемой конструкции, можно выбрать для сравнительных испытаний от 3 до 5 образцов клея. Далее, в ходе экспериментов и одновременного усовершенствования технико-конструкторской документации, технолог оставляет свой выбор по количеству используемых образцов максимально минимизируя опытную партию, которая должна охарактеризовать, оптимально подходящий, по всем требуемым параметрам клей.

Таким образом, технолог-конструктор должен тесно сотрудничать с техническими консультантами производителей клеев и тщательно изучить технические возможности и рекомендации по каждому из выбранных клеевых составов и выбрать несколько оптимальных подходящих для дальнейшего сравнения. Лучше всего это сделать, собрав имеющиеся данные по выбранным клеевым составам в единую таблицу.

### ***3.1.6. Анализ склеиваемых материалов***

В первом приближении все виды склеивания делятся на три группы в зависимости от типа материала [1]:

- 1) склеивание однородных материалов;
- 2) склеивание однородных материалов с искусственно приданными им некоторыми свойствами (пористость, наличие покрытий и т. д.);
- 3) склеивание неоднородных материалов.

По природе материалы могут подразделяться на:

- металлические материалы (с обработанной или необработанной поверхностью);
- керамические материалы;



- органические материалы (пластики, полимеры, древесина, резина, бумага и т. д.).

В основном, производители клеев оговаривают, для какого материала или какой группы материалов подходит тот или иной тип клея, и дают рекомендации о желательных или необходимых способах подготовки склеиваемой поверхности. Однако не всегда данные рекомендации подходят для конкретных условий, что может быть связано как с природой склеиваемых материалов, так и с поверхностной пористостью материалов, которая, например, вызывает капиллярные эффекты при процессе склеивания, что меняет поведение клея на склеиваемой поверхности (как правило, в худшую сторону). Следовательно, выбор оптимальных условий технологии склеивания, производится индивидуально, как результат, при конструировании клеевого соединения необходимо [6–9, 19]:

- определить величину и вид нагружения на всю конструкцию в целом;

- определить какие рабочие температуры будут воздействовать, их продолжительность и цикличность;

- определить среду воздействия (сухая, влажная, маслянистая, агрессивная) и изменения свойств клеевого соединения под действием данных факторов;

- выбрать подходящий материал для склеиваемой основы и клей;

- разработать конструкцию готового изделия и отдельных узлов соединения с учетом резерва прочности;

- разработать технологию склеивания с учетом размера, вида и форм конечного готового изделия, а также с учетом требований к качеству;

- провести лабораторные испытания, чтобы установить, достигнуты ли требуемые свойства клеевого соединения (в стандартных условиях, в условиях эксплуатации, спустя определенный срок эксплуатации);

- в случае необходимости, на основании полученных данных, внести изменения в технологический процесс склеивания;

- провести промышленные испытания готовой конструкции;

- подготовить документацию для серийного производства конструкции с описанием необходимых рекомендаций по данным для оснастки, приспособлений, материалов, параметров технологического оборудования.



## *Склеивание металлов*

По литературным данным [1, 3, 5–8, 19] считается, что для достижения наиболее качественного клеевого соединения склеиваемые материалы должны быть максимально родственными, как по структурной составляющей, так и по физическим составляющим (плотность пористость и т. д.), а также по способу подготовки поверхности. Тем не менее, задача склеивания однородных материалов встречается не часто, следовательно, она может быть решена как способом подготовки поверхности (например, травлением, механическим воздействием на склеиваемую поверхность, нанесением на склеиваемые поверхности промежуточного слоя (например, праймера) так и с использованием клеев с самоустанавливающимся зазором для которых качество подготовки поверхности не играет существенной роли (например, с помощью стеклянных гранул определенного размера, применяемых в клеях типа DP 8805 NS (3M)) [26].

При склеивании металлических материалов необходимо обратить внимание на степень загрязненности и окисленности поверхности, т. к. наличие на поверхности посторонних соединений резко снижает прочность клеевого соединения. При этом нужно учитывать, что из всех рассматриваемых групп материалов, металлы, как правило, обладают наиболее высокими характеристиками по прочности и твердости, в результате чего склеенные поверхности при эксплуатации будут находиться в наиболее жестких условиях эксплуатации.

## *Склеивание керамики*

К керамическим материалам справедливо практически тоже самое, что и к металлам, однако с рядом оговорок:

- керамические материалы имеют очень низкие деформационные свойства, как результат, клеевое соединение должно быть оформлено таким образом, чтобы в нем не имелись напряжения отслаивания и не возникали динамические нагрузки;

- в большинстве своем керамика имеет высокую пористость с высокоразвитой системой внутренних и наружных капилляров, в результате чего под действием капиллярных сил клеевые составы с



высокой и средней жидкотекучестью могут практически полностью поглощаться материалом основы. Данный эффект изменяет физико-механические свойства керамического материала и резко уменьшает прочность соединения вплоть до полного отсутствия механической прочности. Как результат, такие поверхности требуют обязательной обработки праймерами или любых видов механического шаржирования пор [27–29].

### *Склеивание пластиков*

Один из основных критериев при выборе клеев для пластиков является природа материала, его стабильность и химическая активность, т. к. данные типы материалов могут, как химически взаимодействовать с клеевым составом, так и просто в нем растворяться. В основном соединения пластиков не являются столь жесткими, как металлические, поэтому при их склеивании необходимо учитывать их эластичность, прочность и плотность.

Как видно (рисунок 3.7), для пластических масс, склеенных одним и тем же адгезивом, существует заметная разница в прочности соединения в зависимости от их плотности [30].

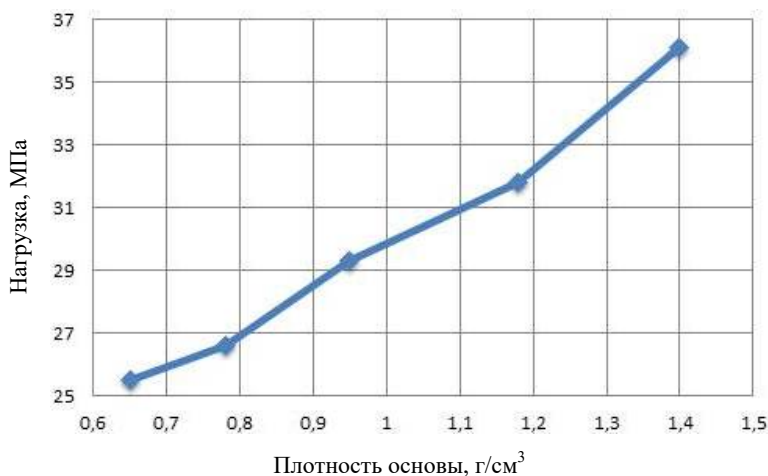


Рис. 3.7. Прочность на растяжение пластических масс различной плотности, склеенных клеем DP 8005 (3M)



В качестве дополнительных критериев необходимо учитывать химическую стойкость, прогнозируемый срок эксплуатации, коэффициент линейного расширения.

Необходимо отметить [19], что при приложении нагрузки на клеевое соединение сначала идет деформация основы материала, в случае если его прочностные характеристики ниже адгезива, а лишь затем нагрузка и разрушающий момент поступает на само соединение. Как результат, если прочность адгезионных сил выше, когезионных сил материала основы, происходит постепенное разрушение основы материала вне шва. Если рассматривать клеевое соединение, где используются различные основы материала и адгезия клея опять-таки велика, то деформируется более податливый материал. Если когезия хотя бы одного материала основы выше, чем прочность адгезионных связей, то характер разрушения будет зависеть от разницы между модулем упругости основы материала и адгезива. Таким образом, между более эластичным материалом основы и клеем, под действием внешней нагрузки возникают концентраторы напряжений, которые и вызывают разрушение соединения. Каким разрушение по клею является когезионным или адгезионным, в данном случае не существенно, но если соединение было выполнено правильно, то оно будет когезионным по клею. Если когезионные силы, склеиваемых двух основ материала выше, чем прочность адгезионных связей между ними и клеем, то разрушение происходит по пограничному слою.

В случае динамических нагрузок клеевые соединения из пластических масс имеют преимущества перед клеевыми соединениями из металлов благодаря их более логарифмическому декременту затухания. В этих условиях рекомендуется использовать более эластичные группы пластических масс (полиамиды и др.) и более эластичные клеи (на каучуковой основе, модифицированные). Как результат, все эти факторы необходимо учитывать при проектировании и конструировании готового изделия.

### ***3.2. Очистка поверхностей***

Исходя из практики, детали, подвергаемые дальнейшему склеиванию, пайке, сварке и т. д. после использования их в механических и литейных цехах находятся в загрязненном состоянии (смазочно-



охлаждающей жидкости (СОЖ), масло, песок, пыль и прочий мусор). Большинство клеевых материалов реагирует с консервантами поверхности. Поэтому, на первом этапе, рекомендовано проводить садовую или индивидуальную очистку материала.

Вне зависимости от типа клея очистку основы материала под склеивание рекомендуется производить в два этапа [1, 3–9, 6]:

1) для удаления мусора, включений и остатков СОЖ, применяется промывка детали в проточной воде или окунанием в ванну, желательнее с циркулирующей водой и наличием системы фильтрации;

2) перед этапом механической или химической подготовки поверхности детали проводится первичное обезжиривание с целью снятия видимых маслянистых налетов, которые могут представлять взрывоопасность при механической подготовке поверхности, либо в разы снижает ее эффективность при иных способах подготовки.

Для этого применяются:

1) *водные моющие растворы* с поверхностно-активными веществами, которые имеют невысокую стоимость, их легко утилизировать, и они обеспечивают удовлетворительное качество очистки, но требуют относительно длительного времени приготовления и последующей сушки;

2) *химически активные препараты* (в основном на основании щелочных растворов) имеют одну из наиболее высоких степеней очистки, т. к. смывают практически все известные СОЖ и масла, а также активируют поверхность для склейки, что способствует улучшению прочности клеевых соединений.

Однако, в дополнение к положительным свойствам химически активных препаратов, имеются и негативные, так как требуют промывку водой с последующей сушкой, а также специальных мер по технике безопасности к применяемому оборудованию, повышают экологический налог, в связи с необходимостью использования специальных способов утилизации;

3) *органические растворители* являются наиболее быстрыми из всего семейства очистных материалов, обладают высокой простотой использования и универсальностью, не требуют использования сушки и дополнительного оборудования. Однако они являются сложно утилизируемыми, взрывоопасными веществами и не подходят для удаления мыла, шлифовальных паст, механической и приобретенной грязи и др.



Необходимо отметить, что каждый из выше перечисленных способов подходит для своей специфики производства и должен выбираться исходя из количества и качества склеиваемого материала, степени и характера его загрязненности, а также используемых в смежных процессах технологических мероприятий по очистке и утилизации отходов.

### 3.3. Подготовка склеиваемых поверхностей

Как и при любом способе создания неразъемного соединения, фактор подготовки поверхности является одним из решающих на выход годного. Данная процедура является весьма существенной и одной из процессобразующих [1, 3–9, 16–19].

В основном детали, поступающие с литейных или механических участков, кроме загрязнения имеют видимые дефекты в виде заусенцев, облоев и др., а также пассивированную поверхность, обусловленную воздействием окружающей среды. Выше перечисленные дефекты снижают эффект процесса склеивания или делают его невозможным, следовательно, для полного раскрытия свойств, применяемых клеевых составов, поверхность основы материала готовят различными способами, которые подразделяют на три группы [3, 6]: *физические* (механические способы зачистки поверхностей и все способы обезжиривания (последний процесс необходимо выделить в отдельный пункт)); *физико-химические* (электрохимические методы и способы, связанные с облучением поверхности); *химические* (травление).

Известно [1], что шероховатость приводит к увеличению адгезионной прочности, что связано с:

- 1) увеличением фактической площади склеивания;
- 2) меньшей скоростью распространения усталостных трещин;
- 3) большей диссипацией в процессе деформации фрагмента клеювого материала, находящегося непосредственно в микронеровностях.

В настоящее время широкое распространение получила *физическая обработка*, начинающаяся с механической на базе шлифования (наждаком, металлической щеткой или дробеструйными и пескоструйными приборами, а также при помощи токарной, фрезерной или схожих видов обработки). Так же к физическим методам относятся более редко используемые: ультразвуковые и газопламенные



обработки или воздействие высокочастотными разрядами. Для мелкосерийных изделий, требующих особой подготовки поверхности, возможно применение гамма-излучения; лазерного облучения с использованием, в основном, лазера типа Nd: YVO<sub>4</sub> [10]; применение обработки плазмой низкого давления и ряд других. Общей технологической особенностью данных методов, является сглаживание поверхности и устранение микро- и макро неровностей, как путем их механического истирания, так и заполнения материалом в процессе проплавления.

Не меньшее распространение получили *химические методы*, основанные как на растворении поверхностного слоя (тампоном, в потоке, свободно или в комбинации с ультразвуком), так и на создании промежуточного слоя (фосфотирование или азотирование). В качестве *физико-химических* материалов применяются комбинации первых двух групп: например, с помощью режущего электрифицированного инструмента в соляной ванне. При обработке изделий из титана получил распространение способ подачи струи песка в растворе химического травителя [10, 31–39].

Типовая технология подготовки поверхности при использовании *физических способов* обработки состоит из следующих операций [1, 3–9, 16–19]:

- 1) обезжиривание с последующей сушкой;
- 2) механическая очистка (струйная обработка кварцевым песком или абразивным шлифзерном или дробеструйная обработка или гидрореспектоструйная обработка, или зачистка шлифовальной шкуркой);
- 3) очистка пылесосом или обдувка сжатым воздухом;
- 4) обезжиривание с последующей сушкой.

Если на поверхности металла уже нанесено гальваническое покрытие, то механическую очистку не проводят, а ограничиваются только операцией обезжиривания. Такой техпроцесс подготовки поверхности используют для сталей, титановых, бериллиевых, некоторых алюминиевых сплавов, вольфрама, молибдена и других материалов, в том числе и неметаллов [1, 3–9].

*Физико-химические способы обработки поверхности* наиболее широко используют при подготовке под склеивание поверхности деталей из инертных полимеров, таких как полиэтилен, полипропилен, политетрафторэтилен и другие и при склеивании деталей специального назначения из алюминиевых сплавов [1, 16–19].



Типовая технология при использовании физико-химических способов обработки состоит из следующих операций:

- 1) обезжиривание с последующей сушкой;
- 2) обработка поверхности субстрата одним из физико-химических способов [1].

При подготовке поверхности металлов используют следующие физико-химические способы: электроискровое легирование, плазменное напыление, обработка пучком электронов, аппретами, адгезивно-активными грунтовками, химическое осаждение и др. При подготовке поверхности неметаллов используют такие физико-химические способы, как обработка пламенем, тлеющим разрядом, коронным разрядом, создание на поверхности изделий из пластмасс металлической пленки и др. С экономической точки зрения физико-химические способы являются наиболее дорогостоящими, однако, именно они позволяют существенно повышать значения адгезионной прочности.

К химическим способам относится травление. Вариантов составов для травления, пожалуй, не меньше, чем предприятий, их использующих. Наиболее широко эти способы реализуют при подготовке поверхностей алюминиевых, вольфрамовых, титановых, медных и молибденовых сплавов [1, 3–9, 16–19].

Типовой технологический процесс при использовании химических способов подготовки поверхностей состоит из следующих основных операций:

- 1) обезжиривание (чаще всего в водных моющих растворах) с последующей сушкой;
- 2) выдержка в водном растворе кислот, реже щелочей;
- 3) промывка холодной водой до нейтральной реакции и сушка чистым сжатым воздухом или в сушильной шкафу [1].

Примеры подготовки поверхности ряда металлов с помощью обезжиривающего растворителя трихлорэтилен представлены в приложении 1 [40].

*Физико-химические и химические способы подготовки поверхности изменяют молекулярную структуру поверхности склеиваемых деталей и ее механические свойства, например, при подготовке поверхности изделий из титана и его сплавов. К сплавам титана большинство клеящих материалов имеют пониженную адгезию. Для повышения адгезионной способности клеев к поверхности из-*



делий из титана и его сплавов проводят оксидирование в растворах 1 %-ной серной кислоты, или 8 %-ной щавелевой кислоты, или 10 %-ной сульфосалициловой кислоты в смеси с 0,5 %-ной серной при температуре 10...20 °С в течение 10...40 мин при плотности тока 0,5...2,0 А/дм<sup>2</sup> [1].

### 3.3.1. Оценка подготовки поверхности материала

Авторами работы было проведено обобщение ранее проведенных экспериментов по подготовке поверхности ряда пористых и сплошных материалов на основе, различных типов стали, так и других типовых сплавов [27, 28, 41].

Были проведены прочностные испытания на разрыв адгезивных соединений Сталь45–Сталь45; ШХ15–Сталь45; ШХ15–ШХ15 с различной рабочей поверхностью сплошной подложки: с гладкой поверхностью (распил); с рельефной поверхностью (после дробеструйной обработки). Соединение производилось при помощи клея марки DP 8805NS (3M). Результаты испытаний представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

#### Прочностные характеристики адгезивных соединений Сталь45–Сталь45; ШХ15–Сталь45; ШХ15–ШХ15

| Маркировка образца   | Номер группы образцов | Обработка Поверхности | Среднее значение предела прочности, (МПа) |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|---|
| Сталь45 –<br>Сталь45 | 1                     | Распил                | 15,09                                     |
|                      | 2                     | после дроб. Обработки | 17,96                                     |
| ШХ15 –<br>Сталь45    | 3                     | Распил                | 22,00                                     |
|                      | 4                     | после дроб. Обработки | 19,82                                     |
| ШХ15–<br>ШХ15        | 5                     | Распил                | 24,55                                     |
|                      | 6                     | после дроб. Обработки | 13,91                                     |

Выявлено, что наиболее высокие прочностные характеристики показывают образцы на основе стали ШХ15 и их сочетание с



Сталь45. Данный факт может служить подтверждением теории усадки и газонасыщения адгезивных соединений, рассмотренных в работе [3]. В тоже время необходимо отметить феномен увеличения прочностных свойств в отношении низколегированных сталей. Образцы из стали Сталь45 показывают увеличение прочностных свойств на сцепление с 15 МПа, для необработанного образца, до 18 МПа при условии обработки. Это может объясняться, наименьшим количеством легирующих элементов в материале основы, которые могут взаимодействовать с адгезивом.

Доказано, что: для адгезива DP 8805NS неподготовленная поверхность (распил) является предпочтительнее, чем после дробеструйной обработки, что, как результат, уменьшает объем затрат на изготовление реальных изделий за счет исключения технологической операции подготовки поверхности. Было принято решение детально изучить соединение Сталь45–Сталь45, для уточнения нюансов крепления данной стали рассматриваемым адгезивом.

### ***3.4. Обезжиривание поверхностей***

Для увеличения надежности получаемого клевого соединения, перед нанесением клея рекомендуется провести процедуру обезжиривания, т. к. согласно литературным данным [6], в зависимости от типа клея, максимальная величина загрязнений, не сказывающихся на адгезию, составляет от 0,01 до 1 мг на 1,5 см<sup>2</sup> поверхности.

В зависимости от выбранного типа клея и процесса его нанесения возможно использование обезжиривания с применением водных растворов с добавками или органическими растворителями и специальными щелочными растворами для удаления жира и смазки после предыдущих операций и процесса транспортировки. При этом следует учитывать, что протирание поверхности, как правило, приводит только к перераспределению грязи и мусора по всей площади поверхности, поэтому протирку рекомендуется делать только после промывки в струе моющего раствора или после обработки в ультразвуковой ванне.

В силу невысокой стоимости и распространенности, органические растворители занимают наибольшую часть среди всех обезжиривателей. По большей части это спирты, ацетон, уайт-спирит и др. Для обезжиривания металлов, керамики и древесины используют, как правило, спирт, ацетон и бензин. Для пластических масс и ре-



зин – изопропиловый спирт, трихлорэтицелен, при условии, что данные материалы не растворяют склеиваемые поверхности, в противном случае приходится ограничиться ацетоном и бензином. При обезжиривании пластиков и древесины следует учитывать, что в виду их поверхностной пористости, после обработки необходимо производить обязательную сушку поверхности материала, в противном случае, взаимодействие обезжиривателя и клея могут приводить либо к отслаиванию последнего, либо к его вспениванию в результате протекающих химических реакций.

Ввиду того, что большинство органических растворителей либо горючи, либо взрывоопасны, рекомендуется использовать обезжириватели, предлагаемые производителем клеев, а при их отсутствии вводить в выбранный обезжириватель специальные присадки, понижающие их взрывопожароопасность.

В качестве неорганических растворителей в основном используется подготовленная вода с добавлением спиртов, поверхностно активных веществ, ряд кислот, например, олеиновой и др. При использовании обезжиривателей на водной основе, предпочтительно использовать поэтапный процесс, включающий в себя обезжиривание окунанием в подготовленную воду, желательнo с применением ультразвука с последующей промывкой горячей водой, можно с добавлением хромпика и последующей сушкой.

При применении щелочных составов используется подогретая вода, до температуры максимально 60 °С, с разведенными в ней солями щелочного метала, щелочного мыла и добавками поверхностно активных веществ. После обезжиривания данными составами проводится промывка водой с ингибиторами коррозии и обязательной последующей сушкой.

### ***3.5. Подготовка клея к применению***

Существенную роль в процессе склеивания играет подготовка адгезивных материалов к применению. Выбор определяется исходя из структуры адгезива, количества его компонентов их, агрегатного состояния, жизнеспособности готового клея и способа его отверждения.

Перед началом использования любых видов адгезивов, в особенности, готовых к применению без предварительной подготовки,



необходимо провести контроль качества входных материалов на соответствие их нормативно-технической документации.

Как известно [3, 6], многие клеящие и уплотнительные материалы представляют собой многокомпонентные составы, поэтому возникает проблема перемешивания материалов для получения однородных составов (уменьшение градиента концентрации). При этом цель перемешивания – обеспечить такое состояние готовой смеси, когда в элементарно малых объемах проб, отобранных из различных точек пространства системы, концентрация ингредиентов будет соответствовать концентрации последних в системе в целом. Современные производители адгезивов, для исключения данной операции и повышения оптимальных свойств разработанной формулы адгезива, часто поставляются в градуированных тубах. На трубы устанавливаются одноразовые смесительные насадки (рисунок 3.8), как, к примеру, на клеях типа DP 8005 фирмы 3М, которые обеспечивают одновременно смешивание (в необходимых пропорциях) и нанесение компонентов клея. Такая дозировка клея считается экономически целесообразной (потери клея при этом составляют менее 5 %) [42]. Подача клея в носик производится с помощью ручного аппликатора.

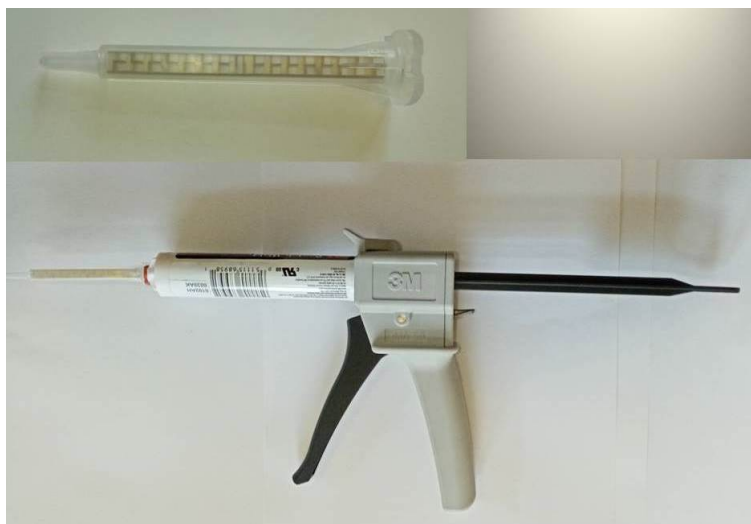


Рис. 3.8. Ручной аппликатор для двухкомпонентных клеев с насадкой



Однако большинство многокомпонентных клеев для условий массового производства поставляются в бочках, следовательно, являются операции внутрипроизводственного приготовления клеев, которые могут осуществляться, как в автоматическом, так и в полуавтоматическом режиме с помощью различных смесителей и дозаторов, в том числе представленных на рынке Республики Беларусь и другими производителями. Можно производить процесс смешивания компонентов вручную, для получения качественной клеящей массы. В данном случае, необходимо не только соблюдать пропорции по смешиванию, рекомендованные производителем, но и проводить тщательный входной контроль всех отдельно взятых компонентов. После приготовления проводится контроль полученного клеевого состава по критериям равномерности перемешивания, наличия сгустков или посторонних включений. Необходимо строго контролировать время хранения готового клея, рекомендованное производителем, т. к. не соблюдение данных условий ведет к изменению реакционной способности клея. При тех или иных условиях она может либо падать, что приведет к заметному замедлению процесса, либо возрастать, что приводит к процессу желирования клея уже в момент его нанесения. Существует ряд дополнительных операций, таких как введение наполнителей, разбавление или вакуумирование. Введение наполнителей может применяться для изменения цветовой гаммы клея, его вязкости или физико-механических свойств. В качестве наполнителей, в основном, выступают порошки, стекло, металлы, керамика и др. с диаметром частиц, как правило, 20–25 мкм [19]. Реже используются ткани, пленки и бумага.

Для клеев с условно ограниченным сроком «жизни», для возобновления их адгезионных способностей возможно применение процедур разбавления или разжижения. Разбавление используется для изменения вязкости или удаления сухого остатка. При разбавлении важно, чтобы используемый разбавитель входил в состав клея или был совместим с разбавителями или растворителями, содержащимися в клее.

Также при применении ряда адгезионных составов необходимо использовать процесс вакуумирования. Данный процесс обычно применяют для адгезивов, которые обладают повышенной жидкотекучестью и изготавливаются методом механического перемешивания. В данном случае, в процессе работы лопаток или шнеков, в



массу адгезива попадают пузырьки воздуха, которые после нанесения клеевого состава могут создавать несплошности в клеевом шве, как результат, для устранения данного дефекта в составах с невысоким временем жизни, где нельзя применить удаление методом отслаивания, необходимо использовать вакуумирование. При этом важно отметить, что многие автоматические и полуавтоматические устройства имеют собственный вакууматор в дозаторе либо в резервуаре для приготовления клея.

### *3.6. Способы нанесения клея*

Для получения качественного склеенного соединения необходимо соблюдать технологию равномерного и равномерного нанесения клеевого состава. Выполнение этих условий зависит от многих факторов, которые включают, например, микроклиматические условия помещения, способа нанесения клеевого состава. Способ нанесения выбирается исходя из масштабов производства, его технической оснащенности, вязкости и агрегатного состояния клея. Наличия площадей для складирования отвержденных заготовок.

При использовании клеевых составов с низкой вязкостью применяются кисти, валики, распылители или применяют метод окунания. Для клеев, со средней жидкотекучестью используются шпатели, шприцы или пистолеты (различных размеров, как правило, из жести, пластика или резины).

Кроме этого, для небольших зазоров, или в случае необходимости нанесения малого количества клея, используются деревянные или стеклянные стержни и палочки. Также возможно нанесение клея с помощью штемпеля или трафарета, в особенности, если необходимо нанести клеевой состав по заранее определенному рисунку.

Порошкообразные клеи обычно наносятся на горячие поверхности с помощью различных по размеру и диаметру отверстий сит, либо с применением специальных пресс-форм.

При нанесении пленочных клеев производится контроль на отсутствие воздушных полостей между пленкой и заготовкой.

При использовании клеев расплавов, на первом этапе производится процесс нагрева клея до температуры его плавления, после чего осуществляется нанесение его на поверхность, как с помощью



ручного пистолета, так и с помощью автоматических дозаторов или валиков. Используются также клеи-расплавы в виде карандашей, проплавление которых осуществляется в результате контакта с разогретой поверхностью.

Часто, в литературных источниках [1, 3–9, 16–19], рекомендуют наносить клеи на обе склеиваемые поверхности, однако данные рекомендации не распространяются на все быстро отверждаемые клеи с самовыставляемым зазором, а также на ряд других клеев, в случае таких рекомендаций от производителя.

### ***3.7. Обеспечение качественной полимеризации клея***

После нанесения клея и соединения поверхностей начинается процесс полимеризации клея. Если клеям-расплавам и клеям на основе цианакрилатов требуется для этого весьма короткий промежуток времени, то при использовании холодно-отверждающих клеев необходима фиксация деталей в определенном положении на заявленный промежуток времени. При этом необходимо учитывать, что при фиксации нужно стараться достигнуть равномерного распределения нагрузки определенной величины удельного давления, зависящих как от вязкости клеящего материала, так и от параметров точности подгонки и жесткости склеиваемых материалов. В единичном производстве, как правило, используются струбцины или грузы.

Фиксация и давление должны в целом обеспечивать следующие параметры [1, 3–6]:

- 1) обеспечить целостность и неподвижность клеевого шва во время его отверждения;
- 2) обеспечить надежный контакт между склеиваемыми поверхностями;
- 3) препятствовать выделению летучих компонентов при отверждении клея, которые впоследствии могут привести к пористости клеевого шва;
- 4) обеспечить течение горячезастывающих клеев перед их затвердеванием.

Проблемным является аспект склеивания детали сложной формы, т. к. это связано с трудностью создания равномерного давления. Это влечет за собой либо заметное удорожание оснастки, ли-



бо использование клеев, процесс отверждения которых происходит без приложения высоких нагрузок.

В единичном и мелкосерийном производстве для создания давления используют струбины. В мелкосерийном производстве используют специальные пружинные приспособления, где усилие передается через эластичные прокладки, что позволяет создавать равномерное давление по всей площади. В серийном и массовом производстве используют вакуумные приспособления или автоклавы. Удельное давление зависит от вязкости клеящего материала; точности изготовления склеиваемых поверхностей; жесткости склеиваемого изделия [3].

При склеивании тонкостенных крупногабаритных деталей сложной геометрической формы создать равномерное давление по всему периметру клеевого шва не всегда технологически возможно. В этом случае требуется использовать клеевые материалы, применение которых не требует высоких давлений. Чем выше давление при склеивании, тем, как правило, сложнее и дороже оснастка, используемая при монтаже клеевого соединения. [1, 3–6].

В процессе приложения давления происходит уменьшение толщины клеевого шва, при этом, чем ниже вязкость клея, тем меньше величина зазора, в результате, при приложении давления необходимо контролировать величину зазора, например, с помощью специальных прокладок, проволок или пластин с толщиной равной требуемой толщине шва.

### ***3.8. Контроль качества***

В результате нарушения каких-либо этапов технологического процесса возможно образование различных дефектов клеевого шва, к которым относятся [3–6, 16–19, 43–48]:

- непрочлей, причины которого могут быть самые различные, например, некачественная подготовка поверхности, перекосы склеиваемых деталей при монтаже, избыточное и (или) неравномерное нагружение на клеевой шов;
- дефектный (например, пористый) клеевой шов, что может иметь место в результате неполного удаления растворителя, непра-



вильного перемешивания, в результате которого в клей попадает большое количество воздушных пузырьков и т. д.;

– неоднородный клеевой шов, который возникает в результате неравномерного нанесения слоя клея, и (или) неравномерного нагружения при склеивании;

– низкие значения адгезионной прочности клеевого соединения, причины которого также очень различны: это и некачественная подготовка поверхности, нарушение технологии отверждения, миграция в клеевой шов пластификаторов из эластичных полимерных субстратов [1, 3–6].

Для их выявления и предотвращения задействована служба ОТК (отдел технического контроля), которая берет на себя, как контроль качества подготовки технической документации, так и контроль за надлежащим исполнением технологии склеивания на всех этапах, описанных ранее, дает контрольную оценку, полученных изделий.

Осмотр начинают с визуального изучения изделия, до его очистки от клеевых подтеков, т. к. по их внешнему виду, цвету, твердости и пористости можно сделать вывод о качестве клея как такового и правильности процесса его отверждения.

После очистки производится контроль склеивания методом разрушающего и неразрушающего контроля.

Разрушающий контроль, как правило, проводится на предсерийном изделии, а в процессе производства на образцах свидетелях.

Для полного выявления картины по качеству склеенных соединений желательно применять методы неразрушающего контроля, к которым можно отнести акустические методы (импульсные, ультразвуковые и эходефектоскопы), а также рентгеновские дефектоскопы.

К сожалению, в связи с высокой стоимостью выше упомянутой аппаратуры, неразрушающий контроль экономически целесообразно использовать только в случае массового производства изделий особо и ответственного назначения.



## 4. ИСПЫТАНИЕ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

### 4.1. Условия проведения испытаний

Перед началом проведения испытаний клеевых соединений проводится ознакомление с нормативно-технической документацией по испытанию. Далее производится составление протокола испытаний, где отмечаются основные технические параметры, а именно, указывается вид используемого клея и подложки, толщина клеевого шва, площадь склеиваемой поверхности, скорость и характер нагружения, температура окружающей среды, характер разрушения и другие дополнительные параметры, связанные с условиями эксплуатации. К ним можно отнести: особенности предварительной подготовки образцов (например, различия в качестве подготовки поверхности), в какой среде образцы были выдержаны (масляная, водная и т. д.), а также особенности проведения самого испытания (например, характер приложения нагрузки - динамический или статический).

По результатам проведенных испытаний проводится усредненный анализ экспериментальных данных. Возможно выпадение некоторых показателей из общей статистики, которые могут быть обусловлены физико-химическими реакциями, происходящими между материалом подложки и адгезивом. Эти эксперименты необходимо провести повторно.

Далее проводится графическое построение зависимостей образцов-свидетелей или натуральных образцов для анализа полученных данных и их технической оценки на предмет характера разрушения клеевого шва. При оценке внесенных технологических изменений (например, усовершенствование поверхностного слоя подложки), желательнее, переводить числовые или табличные данные в процентное соотношение друг к другу для наглядного восприятия получаемого положительного или отрицательного эффекта. Это особенно важно при проведении динамических испытаний, где существует большая разбежка в результатах испытаний, а также для мягких материалов, где требуются проведение максимально большого количества опытов.

При оценке качества клеевого соединения важным является вид его разрушения относительно склеенной поверхности (рису-



нок 4.1) [6]. Во-первых, это наглядно показывает взаимодействие клея с подложкой, а во-вторых, описывает не только характер разрушения, но и степень удержания клея на подложке, а также механизм его разрушения.

Механизм разрушения подразделяется на три группы: *адгезионный, когезионный и смешанный*. Особенности разрушения испытываемого образца важно отметить в протоколе, желательно, с приложением фотографии.

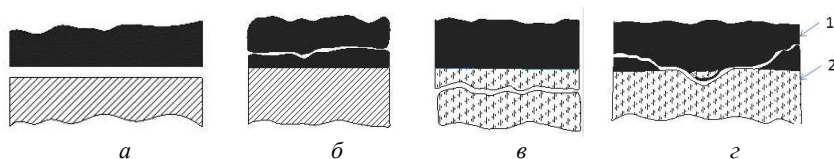


Рис. 4.1. Виды разрушений адгезионных соединений:

*a* – адгезионное; *б, в* – когезионное; *z* – смешанное;

*1* – адгезив; *2* – подложка материала

Если на обеих поверхностях образца очевидно наличие клея, используется термин когезионное разрушение по клееному слою. Также может быть когезионное разрушение по подложке. Такой вид разрушения называют еще разрушением по соединяемому материалу [8]. Если при визуальном осмотре клееного соединения оказывается, что клей присутствует только на поверхности одной или другой подложки, вид разрушения описывается как кажущееся адгезионное разрушение. В данном случае использован термин «кажущееся», так как разрушения, которые визуально кажутся произошедшими в результате нарушения адгезии, не всегда могут быть таковыми. В некоторых случаях это может быть слабое когезионное разрушение по материалу клея. Разрушение может произойти по подложке вблизи его поверхности. Такой вид когезионного разрушения можно определить, используя современные методы исследования поверхности или правильно применяя хорошо известные традиционные методы, например, анализ характера цвета поверхности или измерение краевого угла смачивания [8].

Когезионное разрушение по клеевому слою или подложке является предпочтительным видом разрушения, так как такой вид разрушения дает потребителю клея определенную гарантию, что он



действительно обладает необходимой клеящей способностью. Следовательно, прочность соединения определяется физическими свойствами клеевого слоя, а не адгезией. Правильно спроектированное клеевое соединение часто показывает когезионное разрушение по материалу [8, 19]. Это мнение является весьма распространенным, однако, авторы придерживаются мнения, что наиболее предпочтительным является разрушение смешанного типа, так как прочностные свойства клеевого шва или композиции в целом могут превышать свойства материала основы.

#### ***4.2. Методы испытаний***

Для анализа качества склеенного соединения необходимо учитывать условия его предполагаемой, будущей эксплуатации. Как было отмечено ранее, уже на этапе выбора клея определяется, какие нагрузки будет испытывать готовое клеевое соединение или изделие в будущем. Для определения прочности клеевого соединения, определяется метод проведения испытаний.

Существуют различные методы оценки показателей качества клеев и клеевых соединений. При этом методы испытаний в различных странах регламентируются следующими документами: стандарты Международной организации по стандартизации – ISO; ГОСТ – государственные стандарты, отраслевые стандарты – ОСТ (или ТУ (на территории СНГ)), стандарты Европейского союза – EN; немецкие промышленные стандарты – DIN, стандарты Американского общества по испытаниям материалов – ASTM. Также имеется ряд производственных технических документаций и патентов [1–3, 6–8, 16–19].

Количество схем испытаний клеевых соединений ограничено, это - испытания на сдвиг, растяжение, сжатие, изгиб, кручение и их комбинации. Большая работа по систематизации данных методов проведена коллективом авторов под руководством А. П. Петровой и Г. В. Малышевой [6], представляющих ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ и ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н. Э. Баумана (см. приложение 2).

В случае закупки нового оборудования для проведения испытаний необходимо обращать внимание (в условиях Республики Беларусь) на наличие у производителя сертификации методов Европейскими и СНГ нормами. Однако часто предприятия не имеют воз-



возможности приобрести оборудование, подходящее под те или иные испытания, как следствие, можно расширить возможности имеющегося на предприятии оборудования, усовершенствовав известные тестируемые методы. При этом нужно учитывать, что перепрофилирование испытательного оборудования требует, как патентной поддержки, так и сертификации в БелИСА.

В последнее время отмечено значительное увеличение ассортимента клеящих материалов, расширяются и возможности их применения и, как следствие, необходимость модернизирования и пересмотра подходов к классическим способам испытания. При этом необходимо учитывать новые технические возможности оборудования и тенденции развития промышленности.

Потребителей клеевых материалов интересуют не столько возможные теоретические значения прочности, сколько реальная прочность клеевых соединений в конкретных условиях нагружения. Для этих целей разработаны стандартные методы испытаний, которые позволяют определить нагрузку, при которой происходит разрушение клеевого соединения. Для более точного определения прочности клеев, кроме испытаний на лабораторных образцах, проводят стендовые испытания, а также натуральные испытания, которые приближены к реальным условиям эксплуатации клеесборной конструкции.

В процессе конструирования готовой склеиваемой конструкции специалист должен предвидеть, какой преобладающий тип нагрузок будет испытывать готовое изделие, а, следовательно, может разработать план соответствующих физико-механических испытаний, для оценки фактической прочности склеенного соединения. В связи с этим важно на предприятии создать базу проводимых испытаний и их результатов.

Однако не всегда уже имеющиеся методы могут подойти под специфику склеиваемого соединения. Иногда они позволяют рассмотреть лишь узел соединения, а не работу всего комплексного соединения в целом.



#### ***4.2.1. Метод разрушающего контроля на условный сдвиг многомерных композиционных соединений***

Авторами была разработана методика разрушающего контроля и упрощения оценки прочности на условный сдвиг многослойных и разнотолщинных образцов [49], которая дает возможность испытывать на прочность соединения любых, в том числе пористых, порошкообразных материалов с компактным телом, а также друг с другом. При этом имеется возможность провести оценку качества различных комбинаций склеенных материалов. В результате проделанной работы изучены существующие методы по испытанию на сдвиг клееных материалов [50–54]. Было замечено, что предлагаемые стандартные методы (рисунок 3.2, *а*), имеют ряд недостатков, таких как, например, использование для испытаний только полимерных композитов. Следовательно, полученные результаты в данном случае не являются абсолютными, поэтому для определения величины разрушения материала при нагружении используется термин «кажущееся напряжение при многослойном сдвиге». В модели испытаний (рисунок 3.2, *б*) [55], решен вопрос соосности образца, однако испытания клеевого слоя не соосно совмещают сдвиговые деформации с разрывными (с увеличением угла отрыва возрастает приоритет разрывной деформации). Очевидно, что данная модель требует соответствующей доработки.

Кроме выше изложенного, часто используется метод испытания прочности клеевых испытаний на сдвиг ГОСТ 14759 [56], а также некоторые другие методы, указанные в источниках [1, 3, 5–9, 15–19]. Однако эти способы не позволяют проводить испытания хрупких образцов, а также многомерных соединений. К тому же для проведения испытаний возможно использование образцов строго определенной формы. Соединение деталей по этим методам необходимо производить внахлест, с отсутствием соосности разрываемых частей, что может быть интерпретировано, как работа на излом в совокупности со сдвигом.

Авторами была предложена модель устройства для исследования разрушения образцов на сдвиг для соединений любых видов материалов, в том числе хрупких (пористых, порошкообразных) с компактным телом, (а так же) для проведения испытаний многомерных композиций с использованием стандартного оборудования для раз-



рывных испытаний. Для проведения динамических испытаний производится сборка «сэндвича» или многомерной модели, включающей в себя: компакт – исследуемый материал (один или несколько слоев) – компакт. При этом компакт может также быть испытуемым материалом, изготовленным, например, в форме грибка. На ножке грибка наносится резьба.

Подготовленную склеенную модель («сэндвич») крепят в изготовленные из высокопрочных сплавов бруски (рисунки 4.2, 4.3), которые предварительно изогнуты в соответствии с толщиной испытуемого «сэндвича», для обеспечения соосности по направлению испытания.

В оснастке предварительно предусмотрены отверстия для соединения с округлыми или (при необходимости) прямоугольными испытуемыми образцами.

Рассмотрим поэтапно подготовку к проведению испытаний на условный сдвиг соединений, обладающих определяемым коэффициентом жесткости.

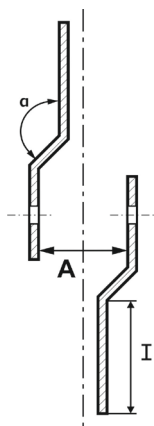


Рис. 4.2. Принципиальная схема приспособления для проведения испытаний на условный сдвиг

На первоначальном этапе пошагово соединяются испытуемые материалы заданных размеров и свойств, в виде многокомпонентного композиционного сэндвича (рисунок 4.3, а). Основанием яв-



ляются подложки, которые также являются опорными (несущими) составляющими образца. В многослойной конструкции наружные слои, как правило, являются основными несущими элементами, воспринимающими и равномерно распределяющими нагрузку, следовательно, рекомендуется изготавливать их из компактного материала. Внутри несущей компактной части размещаются аналогичные по сечению испытываемые образцы, скрепленные заранее выбранным соединительным слоем (адгезив, припой и т. д.). Очень важно, чтобы компактное основание обладало прочностными характеристиками, выше, чем у, находящегося между ним, «сэндвич»-соединения [57, 58].

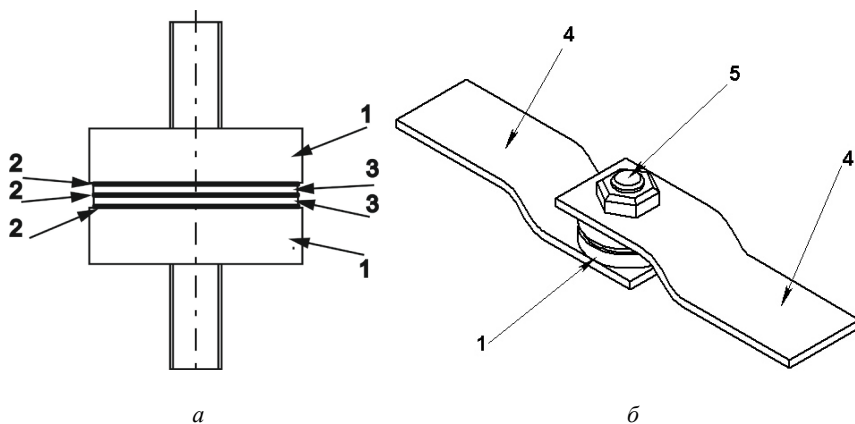


Рис. 4.3. Образец и приспособление для проведения механических испытаний многомерного композиционного соединения:  
*а* – образец в собранном состоянии;  
*б* – образец, закрепленный в приспособление;  
*1* – подложки, которые также являются опорными (несущими) составляющими образца; *2* – соединяющий слой (испытываемое связующее);  
*3* – набор изучаемых композиционных элементов;  
*4* – приспособление из высокопрочных материалов;  
*5* – гайка для крепления образца к оснастке

Полученный композиционный блок крепят в приспособление, с помощью резьбового соединения и фиксируют в разрывной машине. Далее прилагается нагрузка по оси сдвига до полного разрушения образца.



При сопоставимой прочности адгезива и основы, возможно, использовать диаметр резьбовой части, соответствующий диаметру грибка (образец в виде цилиндра). Кроме того, для оценки качества адгезионного соединения задается определенная величина шероховатости поверхности и толщина адгезионного слоя.

Параметры испытываемых образцов в «сэндвиче» могут варьироваться, в зависимости от поставленной задачи. Но толщина А (рисунок 4.2) наборных образцов не должна превышать эпюры образцов по высоте для обеспечения прочности крепления их в подготовленных держателях.

В результате применения предложенной методики, рассматривается поведение соединений при приложении нагрузок на сдвиг, а также и возможна оценка многомерного композиционного соединения в целом.

В качестве примера применения данной методики проведены испытания на условный сдвиг композиционных соединений двух групп. В группе № 1 подложка образцов для склеивания была дополнена повышенной шероховатостью в виде нанесенных токарным станком бороздок (рисунок 4.4). В группе № 2 подложка образцов представлена в виде гладкой поверхностью. В качестве адгезива был использован клей компании 3М марки DP 8805NS. Подготовка поверхности проводилась в соответствии со стандартными методами, разработанными компанией 3М для склейки металла [28, 59].



Рис. 4.4. Вид испытательного композиционного образца, закрепленного в приспособление, перед проведением испытания на условный сдвиг



Далее испытания образцов проводились на базе сертифицированного центра структурных исследований и трибомеханических испытаний материалов и изделий машиностроения Объединенного института машиностроения НАН Беларуси (ЦКП – ЦСИМИ ОИМ НАН Беларуси) с помощью разрывной машины Instron 300LX. Данные обрабатывались с помощью программы Bluehill 2 (Великобритания). В результате были получены диаграммы поведения, рассматриваемого адгезива на подвижные нагрузки в зависимости от вида поверхности (рисунок 4.5).

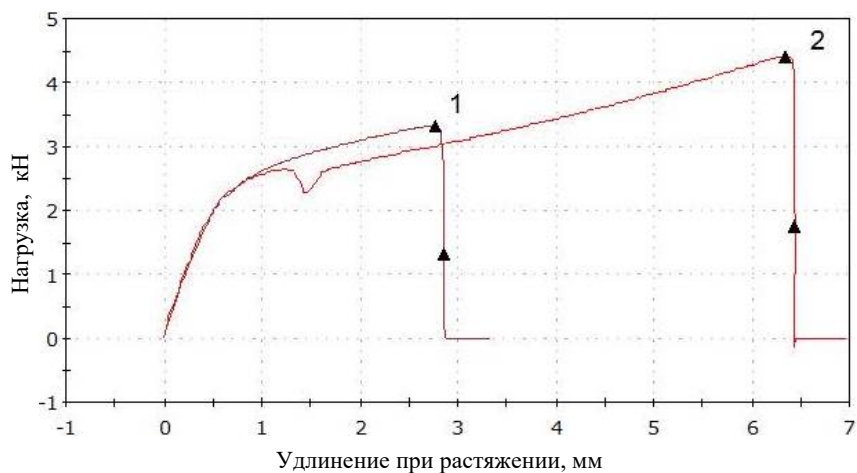


Рис. 4.5. Диаграмма растяжения образцов склеенных клеем DP 8805NS:  
 1 – образец, на подложку которого были нанесены бороздки;  
 2 – образец с гладкой поверхностью подложки

Из диаграммы растяжения видно, что при применении современных адгезивов, таких как DP 8805NS, не требуется дополнительная подготовка поверхности контакта. В порошковой металлургии нанесение бороздок увеличивает площадь скрепляемой поверхности, что играет положительную роль при процессе спекания [60].

Таким образом, предложенная методика испытаний позволяет провести качественную оценку плоскостных соединений, работающих в условиях нагружения по одной плоскости. Од-



нако, на практике, изделия подвергаются нагрузкам, приложенным в различных направлениях.

#### ***4.2.2. Метод оценки и контроля замкнутых объемных соединений***

Практическую ценность представляет оценка многомерного соединения, воспринимающего разнонаправленные нагрузки. Для этого был разработан метод оценки и контроля замкнутых объемных соединений (в независимости от их литража), созданных методами склеивания, сварки или пайки, на разрушающие напряжения приложенных статическим и/или динамическим воздействием давления внутри замкнутого объема, а также разработка моделей для оценки напряжений на условный сдвиг и разрыв [61].

Известны методы схожих испытаний [6, 50, 53–58, 62], однако, они не раскрывают реальных прочностных свойств соединяющего шва, а также механизмов его разрушения, в образцах, представляющих собой замкнутые объемные клеевые соединения, т. к. являются одномерными и воспринимают нагрузку разрушения по выбранной оси. Предлагаемые в работе модели являются многомерными, что позволяет оценивать воздействие сил, приложенных в различных направлениях и точках исследуемого образца. Разработанный авторами метод, основан на использовании моделей, описываемых математическим методом, позволяет создать для испытуемого образца условия максимально приближенные к условиям эксплуатации. Метод основан на принципах, изложенных в «Правилах по обеспечению промышленной безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением», утвержденных постановлением МЧС РФ от 28.01.2016 № 7. (Гл. 1) [63].

Сущность методов эксплуатации и проверки замкнутых соединений, описанных в Правилах, заключается в том, что они направлены на описание эксплуатации агрегатов промышленного назначения, объем которых превышает 25 литров. Недостатком Правил является то, что в них не рассматриваются сосуды менее 25 л. Однако в условиях водоподготовки используются сосуды объемом около 1 дм<sup>3</sup> не включенные в Правила. При этом их общий объем в установке водоподготовки может превышать 100 м<sup>3</sup>.



Следовательно, для оценки систем требуется проверка работы каждого отдельного взятого кластера.

Научный интерес представляет создание метода оценки и контроля замкнутых объемных соединений (в особенности клеевых) на разрушающие напряжения, которые испытывают замкнутые объемы (в независимости от их литража). При этом работа происходит в условиях разрушающих нагрузок, приложенных равномерным и/или скачкообразным воздействием давления внутри замкнутого объема, что позволяет оценить работу модели в условии возникновения напряжений на условный сдвиг и отрыв.

Для характеристики клеевого соединения, испытывающего нагрузки, которые могут привести к его разрушению, авторами были предложены модели для оценки соединений на условный отрыв и сдвиг. Выбор модели осуществляется на этапе технологии крепления, исходя из предварительной оценки нагрузок, которые может испытывать изделие.

Модель для проведения испытаний на условный отрыв (рисунок 4.6, *a*) должна соответствовать геометрическим пропорциям, удовлетворяющим следующим требованиям: соотношение  $h : d$  основано на том, что  $d$  превосходит  $h$ , и чем более выражено это превосходство, тем более ярче выражен определяемый параметр, без учета погрешности на ввод штуцера высокого давления, где  $h$  – высота,  $d$  – диаметр. Модель для проведения испытаний на условный сдвиг (рисунок 4.6, *b*) должно иметь пропорциональность удовлетворяющую соотношению  $H : d$ , при котором  $H$  превосходит  $d$ , и чем более выражено это превосходство, тем более ярче выражен определяемый параметр, без учета погрешности на ввод штуцера высокого давления, где  $H$  – высота,  $d$  – диаметр. Возможны и другие соотношения сил. К примеру, для выравнивания сил отношение  $H : d$  должно составлять  $1 : 1$  (без учета погрешности на ввод штуцера высокого давления).

Известно [1, 3, 6, 7, 19, 48], что место склеивания, так называемый «шов», значительно лучше сопротивляется отрывным усилиям, нежели сдвиговым. Цилиндр с наибольшей высотой (образующая цилиндра максимальна) обладает наибольшей боковой поверхностью в отличие от цилиндра с наименьшей высотой, у которого образующая минимальна.

Исходя из закона Паскаля: давление, приложенное к внешней поверхности жидкости, не нарушающее ее равновесия, передается всем точкам этой жидкости без изменения.



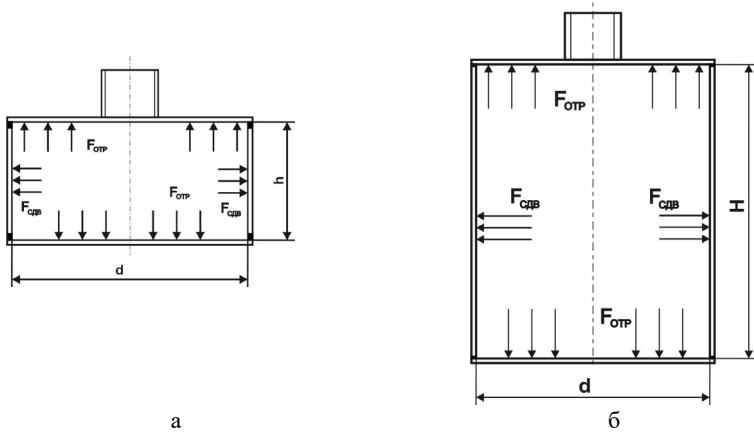


Рис. 4.6. Модели для проведения гидро- или пневматических испытаний:  
*a* – модель для проведения испытаний на условный отрыв;  
*б* – модель для проведения испытаний на условный сдвиг

Сила  $F$  равна произведению давления  $P$  на площадь  $S$

$$F = P \cdot S, \quad (4.1)$$

Сила, приложенная к цилиндрической поверхности более высокого цилиндра

$$F = P \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot H, \quad (4.2)$$

будет больше, чем соответствующая сила у цилиндра с меньшей высотой

$$F = P \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h, \quad (4.3)$$

где  $R$  – радиус днища,  $H$  и  $h$  – соответственно высота большего и меньшего цилиндров.

Силы же, приложенные ко дну (торцу) цилиндров, будут одинаковыми по величине и равные

$$f = P \cdot \pi \cdot R^2, \quad (4.4)$$



Сила, приложенная к торцу цилиндра  $f$ , обеспечивает отрывные усилия на шов, сила, приложенная к боковой поверхности  $F$ , вызывает сдвиговые усилия. Шов (место склеивания) в обоих случаях подвергается одинаковым отрывным усилиям, но различным сдвиговым, при этом, чем больше высота (образующая) цилиндра, тем больше это усилие. Это приводит к тому, что место приклеивания дна к цилиндрической поверхности выдерживает значительно большее давление, когда высота цилиндра меньше.

Отношение силы, вызывающей условный сдвиг,  $F_{\text{сдв}}$ , к силе, вызывающей условный отрыв,  $f_{\text{отр}}$ , выразится следующим образом

$$\frac{F_{\text{сдв}}}{f_{\text{отр}}} = \frac{P \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h}{P \cdot \pi \cdot R^2} = \frac{2 \cdot h}{R}, \quad (4.5)$$

Это отношение будет больше единицы, когда  $h > 0,5 \cdot R$ . При наличии фланца последнее соотношение примет вид

$$\frac{F_{\text{сдв}}}{f_{\text{отр}}} = \frac{P \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h}{P \cdot \pi \cdot (R^2 - r^2)} = \frac{2 \cdot R \cdot h}{R^2 - r^2}, \quad (4.6)$$

Данное отношение будет больше единицы, когда  $2 \cdot R \cdot h > (R^2 - r^2)$ , или  $h > 0,5 \left( \frac{R^2 - r^2}{R} \right)$ . И если  $h > 0,5 \cdot R$ , то тем более  $h$  будет больше, чем  $0,5 \left( \frac{R^2 - r^2}{R} \right)$ , что объясняет отрыв дна именно с фланцем.

Для проверки возможности проведения гидравлических испытаний на условный сдвиг и отрыв замкнутых объемов было предложено использовать реальное изделие. Для реализации данной задачи, в качестве объекта испытаний, был выбран щелевой фильтр для водоподготовки. Были подготовлены чертежи, технологические сборочные карты и модели (рисунок 4.7) образцов щелевого фильтра с целью замены сварных работ (соединение деталей) на процесс склеивания. Для данного метода является существенным, чтобы



образцы были в виде замкнутых цилиндров, с торцевым креплением по местам стыка, со строго пропорциональным соотношением размеров испытуемого образца и испытуемого узла. В одном из торцов каждой модели необходимо наличие входного отверстия под фланец, для приложения гидравлического давления. Отверстие было изготовлено с габаритными размерами сопоставимыми с размерами испытуемой модели.

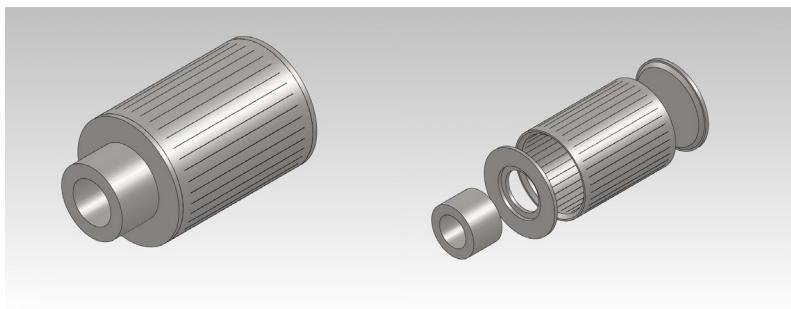


Рис. 4.7. Сборочная схема щелевого фильтра

Сборка цилиндрической образующей с дном производилась с помощью адгезива (при этом крепежный шов являлся сплошным). Выбор адгезива [28, 59] основывался на рекомендациях от производителя (для эксплуатации во влажной среде) и на ранее проведенных экспериментальных данных, а именно, адгезив компании 3M марки DP 8805NS.

Подготовка поверхности проводилась в соответствии со стандартными методиками, разработанными компанией 3M для склейки металла.

Габариты модели были выбраны исходя из ранее заявленных пропорций, представленных на рисунке 4.6. При этом радиус ( $R$ ) днища одинаков для первого и второго образца, а высота цилиндрической поверхности отлична ( $H$  и  $h$ ), особое внимание было уделено строго пропорциональному соотношению размеров испытуемой модели. Радиус ( $r$ ) отверстия под фланец, также был одинаков у каждой модели, и в качестве исходных данных было принято, что  $R = 0,025$  м,  $H = 0,078$  м,  $h = 0,028$  м и  $r = 0,005$  м.



Виды процесса склеивания и сам склеенный образец представлен на рисунке 4.8.



Рис. 4.8. Поэтапный процесс склеивания фильтра

Был получен ряд испытательных образцов (рисунок 4.9) для проведения гидродинамических испытаний на базе участка водоподготовки ОАО «Белэнергоремналадка» (рисунок 4.9, *а*) и последующих промышленных испытаний на базе ОАО «Минскводоканал» (рисунок 4.9, *б*). Стендовые испытания на макете, (представленном на рисунке 4.9, *а*), проводились на базе участка водоподготовки ОАО «Белэнергоремналадка» в соответствии с ГОСТ 3845-75 и ГОСТ 52910-2008 на сертифицированном оборудовании: стенд испытаний гидравлическим давлением КПВУ 3424.00.00 с максимальным давлением 32 МПа. Установка представлена на рисунке 4.10.



*а*



*б*

Рис. 4.9. Образцы для последующих испытаний





Рис. 4.10. Стендовые испытания макета фильтра на ОАО «Белэнергоремналадка»

Проводились динамические испытания методом быстрого равномерного подъема гидравлического давления внутри испытуемого образца до его разрушения. Разрушение макетного образца произошло по крышке (рисунок 4.11).



Рис. 4.11. Испытательный макет и крышка макета после гидравлических испытаний



В результате разрушение модели с наибольшей высотой цилиндра произошло при давлении  $P_1 = 5,64$  МПа, а модели с наименьшей высотой цилиндра  $P_2 = 6,1$  МПа. Расчет силы, приложенной к цилиндрической поверхности более высокого цилиндра, и к цилиндру с меньшей высотой рассчитывается по формуле (4.2) и (4.3) соответственно.

Для цилиндра с высотой поверхности  $H$ :

$$F_{\text{сдв1}} = 5\,640\,000 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,025 \cdot 0,078 = 69,067 \text{ кН}$$

Для цилиндра с высотой поверхности  $h$ :

$$F_{\text{сдв2}} = 6\,100\,000 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,025 \cdot 0,028 = 26,815 \text{ кН}$$

Теперь произведем расчет сил, приложенных к дну (торцу) цилиндра моделей без отверстия под фланец по формуле (4.4).

Для модели с наибольшей высотой цилиндра  $H$ :

$$f_{\text{отр1}} = \pi \cdot 0,025^2 \cdot 5\,640\,000 = 11,069 \text{ кН}$$

Для модели с наименьшей высотой цилиндра  $h$ :

$$f_{\text{отр2}} = \pi \cdot 0,025^2 \cdot 6\,100\,000 = 11,971 \text{ кН}$$

Следовательно, цилиндр с наименьшей высотой стенок может выдержать наибольшее значение оказываемого давления на стенки сосуда.

Расчет соотношения сил производим по формуле (4.5) и (4.6) соответственно.

Отношение сил 
$$\frac{F_{\text{сдв}}}{f_{\text{отр}}} = \frac{2 \cdot 0,028}{0,025} = 2,24 > 1,$$

при наличии фланца 
$$\frac{F_{\text{сдв}}}{f_{\text{отр}}} = \frac{2 \cdot 0,028 \cdot 0,025}{(0,025^2 - 0,005^2)} = 2,333,$$

что подтверждает справедливость вышеизложенного.



При проведении описанного испытания было установлено, что отрыв происходит по крышке снабженной штуцером. Данный факт объясняется разницей в общей площади крышек. Нижняя крышка является сплошной, а верхняя имеет меньшую поверхностную площадь вследствие изготовленного окна под подводящий штуцер (см. формулы 4.5 и 4.6). Если не учитывать данный факт при проведении расчетов, погрешность полученных значений может быть выше значений, получаемых опытным путем.

Таким образом, для проведения гидравлических и/или пневматических испытаний для замкнутых конструкций, работающих под давлением, в модели (рисунок 4.6) в нижней и верхней крышке цилиндра необходимо сделать симметричный подвод штуцеров (рисунок 4.12), с целью уравнивать условия проведения испытаний. Причем штуцер с крышкой должны быть соединены сварочным швом или изготовлены из цельной детали. При одновременной подаче воды или сжатого воздуха склеенные стенки сосуда будут испытывать одинаковое давление.

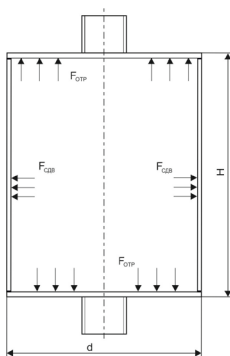


Рис. 4.12. Схема двухштуцерной модели для проведения гидравлических или пневматических испытаний

По результатам испытаний и подтверждающего расчета было доказано, соответствие полученных экспериментальных данных, предложенному физико-математическому обоснованию, которое позволяет оценивать усилия на условный отрыв и условный сдвиг в замкнутых объемных соединениях. Приоритет применения данного метода, может быть отнесен к клеевым соединениям работающих в условиях разрушающих нагрузок приложенных равномерным и/или скачкообразным воздействием давления внутри замкнутого объема.



## **5. ПРИМЕНЕНИЕ КЛЕЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

После экспериментально-теоретической оценки склеенных узлов, практическую ценность представляет исследование работы клеевых соединений в условиях производства реальных промышленных изделий. В данной главе, как пример, будет описано создание готовых изделий методом аддитивных технологий.

В настоящее время при производстве мелкосерийных металлических изделий и заготовок все большее внимание уделяется технологиям, связанным с использованием 3D-прототипирования, порошковой металлургии, а также с другими смежными технологиями. При этом, по энергетическим затратам, традиционное литейное производство дешевле технологий, используемых в порошковой металлургии на 40 % [64], а 3D-прототипирование превышает стоимость литья в несколько раз.

Актуальной задачей современного литейного производства является повышение конкурентоспособности, в том числе, и за счет повышения точности отливок, что часто связано с классом точности модельного комплекта.

Авторами была рассмотрена сборка клеевых соединений при изготовлении модельных комплектов на единичном производстве. Каждое из таких изделий может совмещать в себе целый ряд конструкционных материалов а, следовательно, и используемых адгезивов, что позволяет на практике рассмотреть ранее изложенные теоретические аспекты.

### **5.1. Классификация модельных комплектов**

Известно [65-72], что модельным комплектом называется технологическая оснастка, необходимая для изготовления отливки. В модельный комплект входят модели, подмодельные щитки и модельные плиты, стержневые ящики, формовочные и стержневые шаблоны, контрольные шаблоны, кондукторы и другие приспособления. Основными из этих элементов являются модель и стержневые ящики. Модель, являясь видоизмененной копией отливки, и отличается от нее размерами и наличием стержневых знаков. По своим размерам модель должна быть, в большинстве



случаев, больше получаемой отливки на величину усадки металла в форме при его охлаждении и на припуск для последующей механической обработки. В зависимости от своих размеров и очертаний, модель может быть цельной или разъемной. Состоять из двух или нескольких частей. В большинстве случаев, модель выполняется из двух половин – верхней и нижней, разделяемых по линии разреза. Конструкция модели должна обеспечивать извлечение ее из формы без разрушения отпечатка. Для этого вертикальным поверхностям отливок или отдельным их частям при конструировании необходимо придавать литейные (конструктивные) уклоны. При последующей разработке технологического процесса тем поверхностям и частям отливок, для которых в чертежах литейные уклоны не указаны, придаются формовочные (модельные) уклоны. Таким образом, на выбор материалов для изготовления модельного комплекта большое влияние оказывает технология производства отливок, а также технико-экономические показатели.

Модельные комплекты классифицируются [65–73]:

- по способу изготовления литейной формы; машинной или ручной формовки. Модели для ручной формовки могут иметь небольшое количество разъемов, а также отъемные части. Для машинной формовки, наоборот, модели более просты по своей конфигурации, как правило, с применением наружных стержней;

- по классам прочности [74];

- по роду используемых материалов; подразделяются на деревянные (в индивидуальном и мелкосерийном производстве), металлические (алюминиевые, бронзовые, латунные, стальные, из серого чугуна и т. д.) в массовом производстве и неметаллические (пластмассовые, цементные, восковые и иногда гипсовые), выбор материала зависит от характера производства;

- по конструктивным признакам; делятся на сплошные и пустотелые.

Так же модельные комплекты классифицируются по размерам, сложности изготовления, по точности, сроку эксплуатации модельных комплектов до капитального ремонта и т. д.



## 5.2. Материалы для модельных комплектов и стержневых ящиков

На территории стран ЕАС практически отсутствует проектирование типовых модельных комплектов, а также их производство для нужд литейной промышленности, поэтому представляет интерес изготовление модельных комплектов в условиях собственного проектирования и производства (на настоящий момент менее 10 %) [30, 75].

На данный момент основным материалом для изготовления модельных комплектов и стержневых ящиков в индивидуальном и мелкосерийном производстве в большинстве случаев является *древесина*, реже гипс и цемент [65–69].

Преимущества деревянных моделей – легкая обрабатываемость, невысокая стоимость, хорошая адгезионная способность, а недостатки – деформируемость и склонность к растрескиванию и, как следствие, не долговечность.

Согласно [70–74] к деревянным модельным комплектам предъявляется большой список требований к материалу, к процессу изготовления комплекта и его элементам в зависимости от их класса прочности. Деревянные модели обычно изготавливаются из заготовок, полученных склеиванием нескольких кусков дерева, причем с таким расположением волокон, чтобы модель как можно меньше коробилась и не изменяла своих размеров.

Для предохранения деревянных моделей от влаги (из атмосферы или из сырой формовочной смеси) их окрашивают масляной краской и покрывают лаком. Для того чтобы в процессе формовки легче было определить наличие стержней, отъемных частей, места постановки прибылей и др., деревянные модели окрашивают разной по цвету краской. Иногда покрытия наносятся несколько раз, чтобы соответствовать классу покрытия [70–74].

Однако необходимо отметить высокую производственную трудоемкость обработки древесины при изготовлении модельных комплектов, что обусловлено спецификой производства, подготовка которого построена на ручном, эскизном, весьма приближенном проектировании конструкций и технологий изготовления моделей. Это приводит к неточности материально-технического нормирова-



ния, нерациональному распределению работ и движению материалов по специализированным рабочим участкам [76].

Известно [65–72], что при крупносерийном и массовом производстве отливок методом машинной формовки в основном используются *металлические модельные комплекты*, которые имеют ряд преимуществ – это долговечность, точность геометрических размеров и незначительная шероховатость поверхности. К недостаткам можно отнести высокую стоимость и трудоемкость их изготовления. Материалами для изготовления металлических моделей служат алюминиевые сплавы, сталь, чугуны, бронза, латунь и т. д. Выбор сплава производится, исходя из характера производства, метода формообразования, конкретной модели, условий эксплуатации, максимального срока службы и стоимости.

В условиях единичного или мелкосерийного производства модельные комплекты изготавливаются из быстро твердеющих материалов [70]: гипса (небольшие по размеру модели), цемента, графитсодержащих материалов, что позволяет значительно уменьшить трудоемкость процесса изготовления моделей. Преимущества таких модельных комплектов – простота изготовления и невысокая стоимость; недостатки – невысокая прочность (при ударных нагрузках), при затвердевании образуется избыток влаги, химически не связанной с быстротвердеющей основой, при испарении влаги образуются поры, которые ухудшают свойства модели. Данные модельные комплекты часто применяются при художественном литье.

В литейном производстве все больше завоевывают место модельные комплекты и стержни, изготовленные из *современных полимерных материалов* [66–70, 77]. В Европе, США, Китае, Японии комплекты из высокостойких эпоксидных и полиуретановых смол уже сегодня составляют около 50 % парка модельной оснастки. В настоящее время на рынке предлагается широкая гамма модельных блоков для изготовления модельной оснастки и стержневых ящиков. Предлагаемые блоки имеют широкий диапазон технологических характеристик: плотность – от 0,09 до 1,7 г/см<sup>3</sup>, твердость по Шору – до 90 D и рабочие температуры до 120 °С. Пластиковые плиты легко обрабатываются (практически так же как древесина), обладают малой адгезией с формовочной смесью, имеют неограниченный срок хранения, обработанная поверхность гидрофобная, инертна к большинству растворителей и кислот, обладает прочностью и стойкостью к истиранию, сравнимой с металлической оснасткой [77].



### ***5.3. Сравнительный анализ модельных комплектов, изготовленных из древесины и термополимерных материалов***

При создании мелкосерийных модельных комплектов для мелкого и среднесерийного производства деталей, применяются различные типы разнородных материалов на основе древесины, МДФ, пластических масс, металлов и т. д., которые после обработки монтируются на модельной плите различными способами (штифтование, соединения типа гайка-винт, склейка и т. д.). Материалы, используемые для модельных комплектов, имеют различную плотность, твердость, влагонасыщаемость и склеиваемость и, как следствие, различные характеристики готового изделия по таким показателям как прочность на сжатие, изгиб, износостойкость и т. д., что определяет общие свойства комплекта в целом. Для их монтажа и ремонта существует широкий диапазон крепежа, при этом штифтовые и винтовые соединения имеют возможность разбалтывания в процессе эксплуатации. Поэтому для повышения надежности предлагаются долговременные и временные клеевые составы, ремонтные пасты, предназначенные для различных условий эксплуатации [30].

Для повышения конкурентоспособности производимых отливок предъявляются повышенные требования к качеству продукции. Как результат, уделяется все большее внимание внедрению экологически чистых материалов и способов их соединения, которые могут обеспечить конкурентоспособность при производстве качественных отливок, как на отечественном, так и на международном рынке. При создании модельных комплектов необходимо уделять основное внимание как возможности его производства из отечественного сырья, так и использования мирового опыта, основанного на моделировании и 3D-прототипировании модельных комплектов. Известно [78–81], что при проектировании и использовании модельной оснастки должна быть обеспечена высокая стойкость к истиранию, а также высокая стойкость к связующему веществу формовочной смеси, отсутствие склонности к деформациям в течение всего времени работы. Следовательно, используемые материалы модельных комплектов, должны быть легкими в обработке, легко заменяемыми и ремонтнопригодными, иметь небольшую массу и максимально высокий срок службы.



Наиболее удовлетворяет выше изложенным требованиям применение пластиковых и композиционных моделей, которые имеют целый ряд преимуществ по сравнению с классическими деревянными моделями. К примеру, пластики дешевле металлов и более легкие, а металлические вставки более износостойкие, чем деревянные комплекты, следовательно, принципиально возможным является совмещение материалов для повышения ресурсов модельного комплекта. При этом следует отметить, что использование традиционной оснастки (деревянных моделей) вполне себя оправдывает при единичном или мелкосерийном производстве отливок, а также при крупногабаритном литье [82]. Ее главное достоинство – дешевизна и доступность. По мнению А. Майорова стоимость фанерных изделий из дерева в 6–8 раз меньше стоимости модельных плит из других материалов. Однако, как показали промышленные испытания, изготовление пластиковых моделей менее энергоемко, что подтверждается тем же автором (рисунок 5.1).

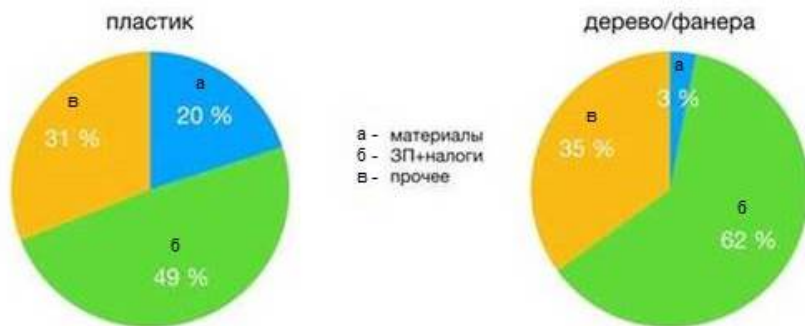


Рис. 5.1. Структура расходов на изготовление оснастки [82]

Если сравнивать время изготовления модельной оснастки из дерева и пластика, то процессы механообработки на станке с ЧПУ, в процессе фрезеровки, в обоих случаях идентичны и не сильно отличаются по времени, а финишная, слесарно-сборочная обработка, по [82] в 1,5 раза быстрее, что приводит к удешевлению процесса (рисунок 5.2).



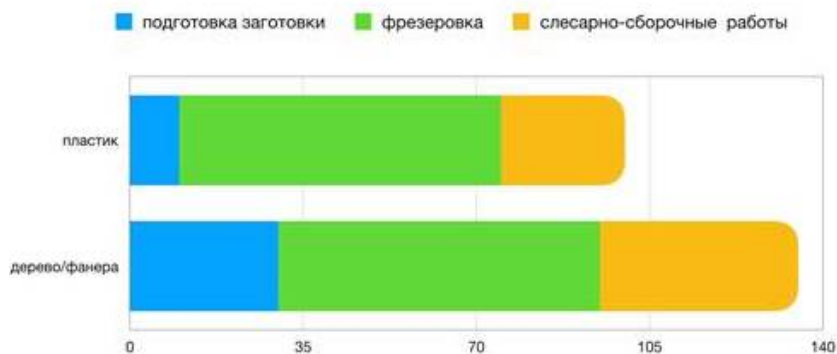


Рис. 5.2. Время изготовления оснастки, в часах [82]

В условиях мелкосерийного производства жизненный цикл модельного комплекта состоит из этапов использования, хранения и профилактики ремонта. При этом общее состояние эксплуатации модельного комплекта состоит из максимального количества формовок, длительности сохранения свойств модельного комплекта, временных и трудовых затрат на ремонт [82].

При использовании гипсовых и цементных моделей, их хранение вообще не является целесообразным. Пластиковые комплекты, в отличие от ранее рассмотренных материалов, имеют более высокие гидроотрицательные свойства, что уменьшает период их обслуживания в несколько раз. Кроме того, необходимо отметить более высокую износостойкость по трению с формовочной смесью у пластика, по сравнению с МДФ и деревом.

Следовательно, результирующее состояние эксплуатации модельного комплекта складывается из: максимального количества получаемых отливок, сохранения свойств модельного комплекта (при надлежащем хранении) и периодичности времени на ремонт [82].

#### ***5.4. Анализ современных композиционных соединений, применяемых при изготовлении модельных комплектов***

Для решения задачи снижения стоимости и трудоемкости, а также повышения оперативности изготовления модельной оснастки в литей-



ном производстве, используются методы создания модельных комплектов на основе полимерных материалов и пластиков, которые изготавливаются методом 3D – фрезерования, с последующим соединением и креплением (подмодельные плиты) на основу с помощью клеевых адгезивных соединений. При изготовлении опытных образцов (до 10 штук) требования к модельным комплектам не являются особенно жесткими, так как возможные дефекты и нестыковки полученных отливок решаются способами механической обработки.

Однако, при изготовлении установочных партий, где число отливок превышает 20 и более, не целесообразно увеличивать расходы на механическую обработку. Как результат, необходимо увеличение срока службы и точности модельного комплекта, что достигается путем повышения точности обработки деталей комплекта и способов их крепления.

Существует большое количество пластических масс различных производителей для создания моделей, приспособленных под конкретные задачи: условия эксплуатации, серийность изделий и т.д. Для наших исследований были выбраны модельные пластики доступные на рынке Республики Беларусь и получившие широкое распространение в отечественном литейном производстве, а именно: PROLAB 65 (Axson); PROLAB 75 (Axson); LAB 850 (Axson); WB-1404 RARU-TOOL (Rampf); Obo-werke 1000 (Obomodulan) предоставленные УП «Технолит», г. Минск, Республика Беларусь, (технические характеристики пластиков см. приложение 3). Все эти пластики имеют приблизительно одинаковую температуру стеклования, но различную плотность, твердость, влагонасыщаемость и склеиваемость и, как следствие различные характеристики готового изделия по таким показателям, как прочность на сжатие, изгиб, износостойкость и т. д., что определяет общие свойства комплекта в целом.

Для крепления этих пластических масс друг с другом и с иными типами материалов, например, МДФ, металл, существует широкий спектр адгезивных связующих, разработанных как непосредственно для работы с материалом партнером, так и универсальных, созданных для оптимизации изготовления сложных модельных комплектов.

Для оценки надежности соединения различных материалов и монтажа моделей, объектом исследования были выбраны следующие адгезивы: DP 8005 (3M), UR 3569 (Axson), EP-2306 (Rampf), технические характеристики которых указаны в приложении 4. Все



эти адгезивы являются двухкомпонентными. При этом только DP 8005, в отличие от других рассматриваемых адгезивов, имеет акриловую основу, а остальные представляют различные модификации на основе полиуретана или эпоксидной смолы. При изготовлении модельной оснастки применяется крепление пластичных масс в различных комбинациях, например, пластик/пластик, пластик/металл, пластик/дерево и его производные (например, МДФ) и их комбинации (рисунок 5.3).

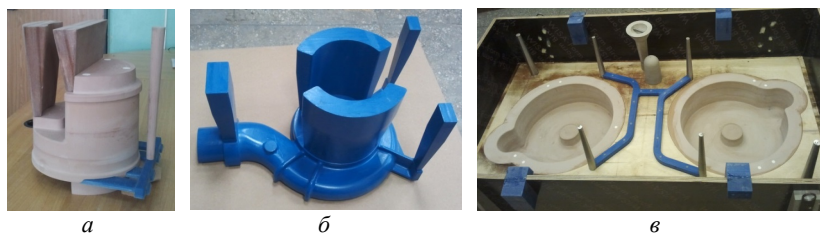


Рис. 5.3. Примеры исполнения модельной оснастки:

*а* – модель корпуса с литниковой системой  
(МДФ и пластики: PROLAB 65 и LAB 850);

*б* – модель корпуса насоса (пластик – LAB 850);

*в* – модельная оснастка (МДФ и пластики: PROLAB 75 и LAB 850)

Для снижения себестоимости проектируемых комплектов необходимо оценить надежность склеенного композиционного соединения. Для этого были подготовлены группы образцов для испытаний на растяжение в виде цилиндров с одинаковым типоразмером (диаметром 17 мм): а) из различных видов модельного пластика; б) из древесины (твердые лиственные сорта, такие как дуб и ольха); г) металлы (на примере Сталь45 и легированной стали).

При съеме готовой формы с модельного комплекта идет его захват формовочными материалами, особенно в местах стыка и сочленений, поэтому было принято решение проводить испытания литейных композиционных соединений на растяжение.

Подготовку поверхности к склеиванию проводили по стандартной методике, описанной в [1, 6, 19, 28]. Учитывая, какие материалы применяются при производстве модельных комплектах, была подготовлена группа образцов склеенных в комбинациях: пластик/пластик, пластик/древесина, пластик/металл. Также была под-



готовлена реперная группа в комбинации: древесина/древесина, металл/металл, а также исходных пластических масс без клеяющего шва. Далее были проведены механические испытания на растяжение. Испытания образцов проводились по схеме, изложенной ранее.

Предварительно была выявлена прочностная зависимость исходных пластиков от прилагаемой нагрузки, что представлено в таблице 5.1 и на рисунке 5.4. Как видно, из представленных данных, с увеличением плотности пластиков, сопротивляемость разрушающим нагрузкам может увеличиваться более чем в 2 раза.

Таблица 5.1

### Усредненные прочностные характеристики некоторых видов исходного пластика при испытаниях на растяжение

|                                       |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Плотность пластика, г/см <sup>3</sup> | 0,65 | 0,78 | 0,95 | 1,18 | 1,4  |
| Усредненная прочность пластика, МПа   | 23,6 | 28,3 | 34,3 | 48,3 | 54,7 |

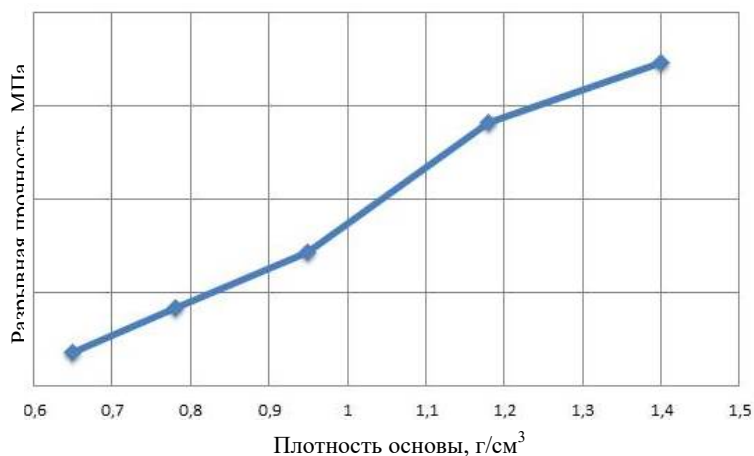


Рис. 5.4. Усредненная прочность некоторых видов исходного пластика при испытаниях на растяжение



Были проведены прочностные испытания группы образцов пластик/пластик, склеенные выбранными адгезивами, при этом соединенные пластики идентичны по плотности. Результаты прочностных испытаний представлены в таблице 5.2 и на рисунке 5.5.

Таблица 5.2

**Усредненные прочностные характеристики на растяжение, склеенных соединений: пластик/пластик**

| Плотность пластика, г/см <sup>3</sup> | Вид адгезива / Усредненная прочность соединений пластик/пластик, МПа |                          |                            |
|---------------------------------------|--|--------------------------|----------------------------|
|                                       | DP 8005 (акриловый)  | UR 3569 (полиуретановый) | EP-2306 (эпоксидная смола) |
| 0,65                                  | 25,49  | 16,36                    | 25,47                      |
| 0,78                                  | 26,6   | 14,54                    | 31,1                       |
| 0,95                                  | 29,3   | 15,79                    | 32,5                       |
| 1,18                                  | 31,8   | 16,83                    | 43,1                       |
| 1,4                                   | 36,1   | 20,83                    | 54,8                       |

Испытания на растяжение данной группы образцов показали практически линейный рост прочностных показателей в зависимости от плотности.

Исходя из рисунка 5.5 видно, что чем выше плотность пластика, тем более высокую нагрузку выдерживают образцы, рассмотренных пластиков. При этом необходимо отметить, что образцы плотностью 0,65 г/см<sup>3</sup>, склеенные полиуретановым клеем UR 3569 были разрушены по пластику (когезионный разрыв по материалу) (рисунок 5.6), и как следствие их значения чуть выше, чем у образцов с плотностью 0,78 г/см<sup>3</sup> и 0,95 г/см<sup>3</sup>, соединенных тем же клеем, но при этом с когезионным разрывом по клею.



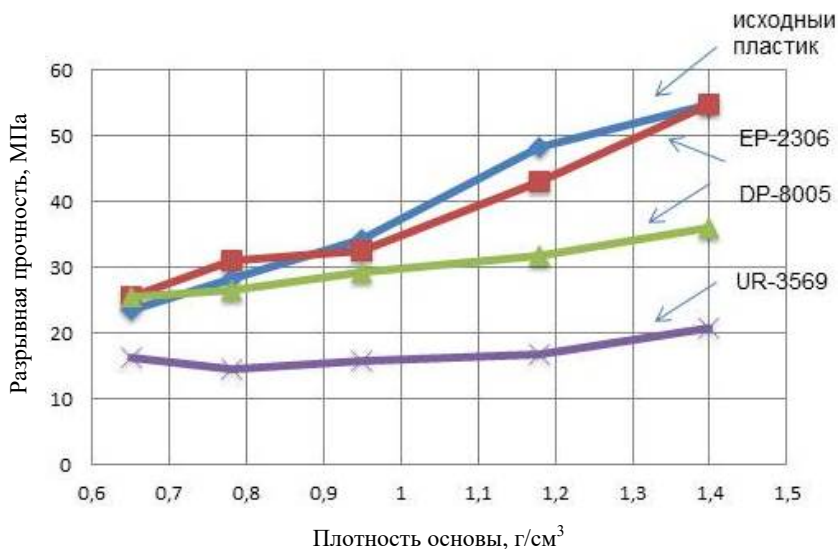


Рис. 5.5. Усредненная прочность на растяжение соединений пластик/пластик, склеенных различными видами клея

Также из рисунка 5.5 видно, что пластики склеенные клеями на эпоксидной и акриловой основе, с низкой плотностью материала основы ( $0,65 \text{ г/см}^3$  и  $0,75 \text{ г/см}^3$ ), заметно превышают усредненную прочность на растяжение, по сравнению с исходным материалом. Данный аспект можно объяснить заполнением или армированием пористости в низкоплотном материале клеевыми компонентами, в результате чего получена композиционная структура пластик/клей/пластик со свойствами, отличающимися от свойств материала основы.

Следует обратить внимание, что практически все соединения пластик/пластик, склеенные эпоксидным клеем EP-2306 (когезионный разрыв по клею), показывают свои прочностные характеристики максимально приближенные к значениям прочностных разрывных характеристик соответствующих исходных пластиков, а иногда и даже выше.





Рис. 5.6. Внешний вид одной из группы образцов пластик/пластик, склеенных клеем UR 3569

Как уже рассматривалось ранее, адгезивы могут иметь различную составляющую, как правило, клеи на основе смол и цианоакрилатов имеют наиболее высокую твердость, а клеи на резиновых и полиуретановых основах имеют наибольший коэффициент пластичности и вязкости.

При соединении пластиков, выбранными группами (по химическому составу) клеев, было выявлено, что наиболее твердые адгезивы практически полностью поддерживают свойства исходного материала с погрешностью  $\pm 3$  %. Изменение стойкости к разрывным нагрузкам для акриловых клеев, в соотношении с исходным материалом, колеблется от 3 % (на низкой пористости) до падения на 34 % (на высокой плотности). При этом для полиуретановых клеев наблюдается стабильное снижение свойств, выраженное практически линейно, как и для акрилатов. Линейная зависимость составляла разбежку в 25 % при уменьшении прочностных свойств по сравнению с исходным пластиком, на 22 % для менее плотного материала, и 62 % для наиболее плотного материала.

После изучения механизмов соединения простых сочленений, представленных однородными материалами, были проведены исследования на предмет крепления разнородных материалов. На первом этапе были составлены композиции из пластических масс и твердых сортов древесины, которые часто используются в литейном производстве, а именно дуба и ольхи. Как и в случае с пластическими массами, изначально были изучены прочностные свойства склеенных древесных материалов, с помощью выше указанных кле-



евых составов. Предварительная подготовка и типы размеров образцов были такими же, как и в случае, рассмотренном ранее. Результаты испытаний представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3

**Усредненные прочностные характеристики на растяжение, склеенных соединений: дуб/дуб, ольха/ольха**

| Вид и плотность древесины, г/см <sup>3</sup> | Вид адгезива / Усредненная прочность соединений, МПа |                          |                            |
|--|--|--------------------------|----------------------------|
|  | DP 8005 (акриловый)                                  | UR 3569 (полиуретановый) | EP-2306 (эпоксидная смола) |
| дуб/дуб<br>0,69 г/см <sup>3</sup>            | 12,52  | 11,00                    | 10,54                      |
| ольха/ольха<br>0,52 г/см <sup>3</sup>        | 15,55  | 15,19                    | 10,57                      |

Анализируя данные представленные в таблице 5.3 видно, что прочностные свойства адгезивов практически сопоставимы, вне зависимости от используемой клеевой основы, тем не менее, соединения твердых сортов древесины, таких как, например, дуб/дуб с плотностью 0,69 г/см<sup>3</sup>, имеют более выраженную линейность по прочностным характеристикам при испытаниях на растяжение. Это может быть объяснимо более низкую шероховатостью поверхности, полученной в результате механической обработки (выполняемой, как правило, на токарных или фрезерных станках при низком вращении и высокой подачей, с целью загиба или сглаживания поверхности). При соединении более мягких древесных сортов таких как, например, ольха/ольха с плотностью 0,52 г/см<sup>3</sup>, наблюдается так же линейность полученных данных при прочностных испытаниях на разрыв. Однако в случае использования жидкотекучего адгезива на эпоксидной основе типа EP-2306, наблюдается резкий провал прочностных характеристик. Это может быть связано, как с качеством подготовки поверхности (срезом), так и с относительно высоким влагопоглощением ольхи (влажность ольхи – 78 %; дуба – 64 % ГОСТ 20022.2 – 80 [83]).

Ряд вопросов крепления соединений типа дерево/дерево достаточно хорошо изучены в деревообрабатывающем производстве, где



обычно используются казеиновые клеи, которые вполне удовлетворяют потребителя своими ценовыми и прочностными характеристиками. Ранее выбранные нами клеи, в отличие от казеиновых, можно применить для создания сложных соединений на основе древесины типа пластик/дерево, дерево/металл.

Для проверки прочности свойств выбранных клеев были подготовлены склеенные композиционные соединения пластика (с различной плотностью) и древесины (дуба и ольхи). Были проведены испытания данных соединений на растяжение. Внешний вид одной из партий разорванных образцов представлен на рисунке 5.7. Результаты испытаний указаны в таблицах 5.4 и 5.5.

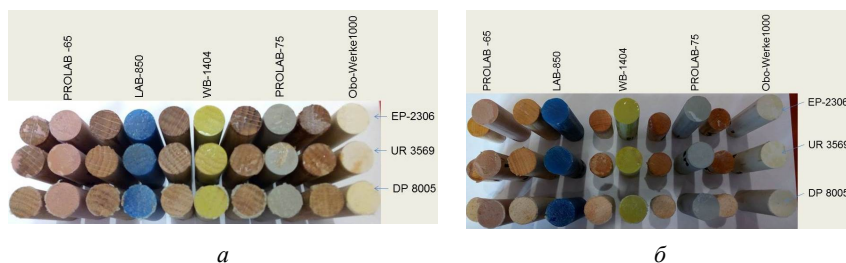


Рис. 5.7. Вид разорванных образцов на основе пластика и древесины:  
*a* – пластик/дуб; *b* – пластик/ольха

Как видно из рисунка 5.7, незначительный смешанный отрыв произошел только в соединении PRO LAB-65/дуб при использовании полиуретанового клея UR 3569 и эпоксидного клея EP-2306. На всех остальных образцах наблюдался когезионный отрыв по клею. Однако незначительный смешанный отрыв наблюдался в соединении PRO LAB-65/ольха при использовании акрилового клея DP 8005 и полиуретанового клея UR 3569.

Сопоставляя полученные данные (таблицы 5.4, 5.5) по разрывным испытаниям (рисунки 5.8–5.10) заметно, что склеенное соединение пластик/пластик превышает прочностные характеристики своих склеенных композиционных соединений с древесиной, за исключением соединений, сделанных при помощи клея на полиуретановой основе.

Немаловажным является наблюдаемая на всех графиках сходная зависимость разрушения склеенного материала основы и ее компо-



зиции с древесиной, что можно отнести, как к качеству проведенных экспериментов, так и к меньшему количеству факторов влияющих на погрешности в данных композиционных соединениях. Кроме того, любопытным является аспект наиболее высокой прочности склеенного соединения пластик/дуб, при том, что склеенное соединение дуб/дуб показало более низкие прочностные свойства. Как уже отмечалось ранее, после проведения механической обработки древесины, поверхностный срез склеиваемой части дубовых образцов (имеющих более высокую прочность по сравнению с образцами из ольхи) оказался более гладкий, что в склеенном соединении дуб/дуб сыграло отрицательную роль. Однако при создании склеенной композиции пластик/дуб, возможно, шероховатость поверхности пластика оказалась сопоставима с шероховатостью дуба. Как результат, склеенное соединение пластик/дуб показало более высокие прочностные характеристики по сравнению со склеенным соединением пластик/ольха, где шероховатость поверхности была различной. К тому же в процесс соединения пластик/древесина могут вмешиваться параметры, влияющие на поведение любого композиционного соединения такие как, например, твердость древесины (дуб – 675 кг·с/см<sup>2</sup>; ольха – 400 кг·с/см<sup>2</sup> [84]), ударная вязкость (дуб – 0,78 кг·с·м/см<sup>2</sup>; ольха – 0,53 кг·с·м/см<sup>2</sup> [84]), плотность, структура древесины и др.

Таблица 5.4

**Усредненные прочностные характеристики на растяжение, склеенных соединений: пластик/дуб**

| Плотность пластика, г/см <sup>3</sup> | Вид адгезива / Усредненная прочность соединений пластик/дуб, МПа |                          |                            |
|---------------------------------------|--|--------------------------|----------------------------|
|                                       | DP 8005 (акриловый)  | UR 3569 (полиуретановый) | EP-2306 (эпоксидная смола) |
| 0,65                                  | 16,26  | 18,51                    | 14,35                      |
| 0,78                                  | 17,59  | 15,81                    | 10,86                      |
| 0,95                                  | 16,67  | 17,77                    | 12,71                      |
| 1,18                                  | 18,63  | 17,90                    | 12,56                      |
| 1,4                                   | 19,27  | 18,59                    | 19,98                      |



**Усредненные прочностные характеристики на растяжение,  
склеенных соединений: пластик/ольха**

| Плотность пластика, г/см <sup>3</sup> | Вид адгезива / Усредненная прочность соединения пластик/ольха, МПа |                          |                            |
|---------------------------------------|--|--------------------------|----------------------------|
|                                       | DP 8005 (акриловый)  | UR 3569 (полиуретановый) | EP-2306 (эпоксидная смола) |
| 0,65                                  | 16,29  | 14,08                    | 10,39                      |
| 0,78                                  | 12,91  | 11,47                    | 9,80                       |
| 0,95                                  | 16,37  | 12,33                    | 10,55                      |
| 1,18                                  | 17,63  | 16,08                    | 11,40                      |
| 1,4                                   | 15,40  | 13,84                    | 8,42                       |

На рисунках 5.8–5.10 представлена зависимость прочностных характеристик соединений пластик/дуб и пластик/ольха, как сравнительная от значения соединения пластик/пластик, так и показано поведение соединений пластик/дуб и пластик/ольха с каждым из выбранных клеев в отдельности.

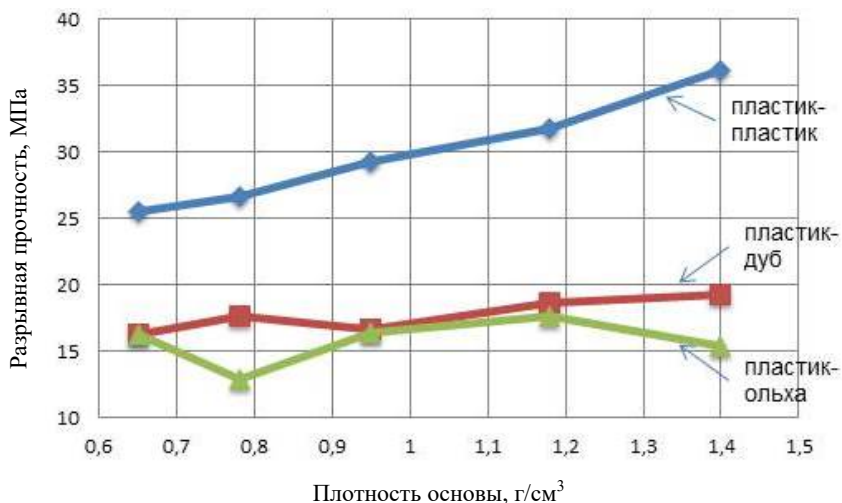


Рис. 5.8. Образцы, склеенные клеем на акриловой основе



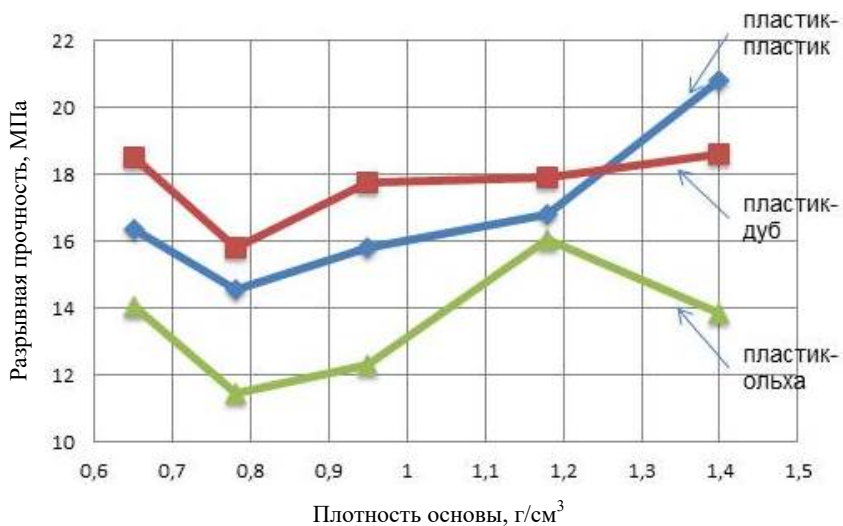


Рис. 5.9. Образцы, склеенные клеем на полиуретановой основе

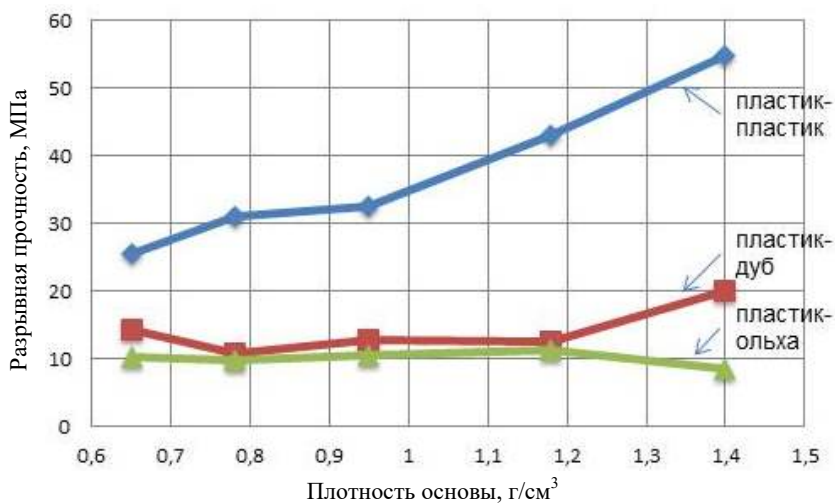


Рис. 5.10. Образцы, склеенные клеем на эпоксидной основе



Наиболее сложными являются склеенные соединения на основе металлов и пластичных масс, т. к. они имеют различную морфологию и происхождение (органика и неорганика). На первоначальном этапе были подготовлены образцы для проведения прочностных испытаний на разрыв склеенных соединений металл/металл на примере углеродистой Сталь45 [85] и легированной стали Х18Н9 [86]. Результаты прочностных испытаний представлены в таблице 5.6.

Выявлено, что при склеивании композиции металл/металл ранее выбранными клеями наихудшие результаты показал клей на основе полиуретана. При этом прочностные свойства склеенного соединения легированная сталь/легированная сталь оказались ниже по сравнению со склеенным соединением Сталь45/Сталь45, за исключением применения универсального клея на акриловой основе DP 8005. Однако, в виду родственности материала основы, снижение и повышение прочностных характеристик было незначительным, например, при применении универсального клея DP 8005 превышение составило 6 МПа, а снижение на клеях с полиуретановой и эпоксидной основами от 0,5 до 1,5 МПа.

*Таблица 5.6*

**Усредненные прочностные характеристики на разрыв,  
склеенных соединений: Сталь45/Сталь45,  
и легированная сталь/легированная сталь**

| Вид соединения              | Вид адгезива / Усредненная прочность соединений, МПа |                             |                               |
|-----------------------------|--|-----------------------------|-------------------------------|
|                             | DP 8005<br>(акриловый)                               | UR 3569<br>(полиуретановый) | EP-2306<br>(эпоксидная смола) |
| Сталь45/<br>Сталь45         | 7,43   | 7,16                        | 21,98                         |
| легир.сталь/<br>легир.сталь | 13,45  | 5,56                        | 21,4                          |

Для проверки прочностных свойств выбранных адгезивов, были подготовлены соединения образцов пластика (с различной плотностью) и образующими на основе Сталь45 и легированной стали. Подготовка образцов и типы размеров образцов были применены,



как и в случае, рассматриваемом выше. Результаты прочностных испытаний на разрыв представлены в таблицах 5.7, 5.8.

Так же было выявлено, что прочность клеевого шва в соединениях пластик/металл, вне зависимости от легирования стали, располагается достаточно линейно (рисунки 5.11–5.13). Однако клеевые соединения на акриловый основе показали на всех образцах когезионный отрыв по клею, при применении полиуретанового клея адгезионная прослойка после разрывных испытаний осталась на пластике, что наблюдалось как на соединениях с нержавеющей сталью, так и на соединениях со Сталь45. При применении эпоксидного состава EP-2306 после разрывных испытаний в соединениях происходил когезионный отрыв по клею, но в большинстве случаев образовался смешанный отрыв (часть пластика оставалась на металлической подложке).

*Таблица 5.7*

**Усредненные прочностные характеристики на разрыв, склеенных соединений: пластик/легированная сталь**

| Плотность пластика, г/см <sup>3</sup> | Вид адгезива / Усредненная прочность соединения пластик/легированная сталь, МПа |                          |                            |
|---------------------------------------|---|--------------------------|----------------------------|
|                                       | DP 8005 (акриловый)   | UR 3569 (полиуретановый) | EP-2306 (эпоксидная смола) |
| 0,65                                  | 9,69  | 13,65                    | 14,52                      |
| 0,78                                  | 19,29   | 12,67                    | 19,21                      |
| 0,95                                  | 18,64   | 13,54                    | 24,46                      |
| 1,18                                  | 16,57   | 18,94                    | 20,37                      |
| 1,4                                   | 22,41   | 12,35                    | 13,76                      |



**Усредненные прочностные характеристики на разрыв,  
склеенных соединений: пластик/Сталь45**

| Плотность пластика, $\text{г/см}^3$ | Вид адгезива / Усредненные прочность соединения пластик/Сталь45, МПа |                          |                            |
|-------------------------------------|--|--------------------------|----------------------------|
|                                     | DP 8005 (акриловый)  | UR 3569 (полиуретановый) | EP-2306 (эпоксидная смола) |
| 0,65                                | 13,457   | 15,49                    | 14,06                      |
| 0,78                                | 12,732   | 15,62                    | 14,42                      |
| 0,95                                | 13,99  | 13,6                     | 17,36                      |
| 1,18                                | 13,401   | 14,55                    | 15,12                      |
| 1,4                                 | 23,328   | 13,53                    | 15,5                       |

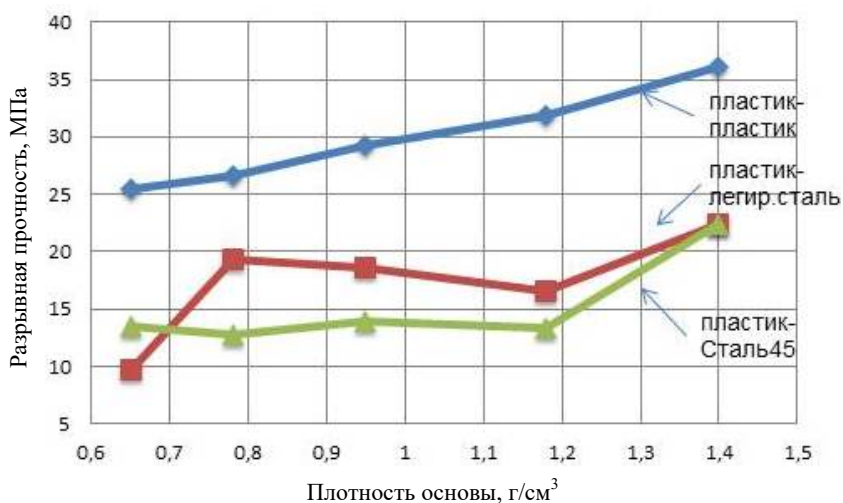


Рис. 5.11. Образцы, склеенные клеем на акриловой основе



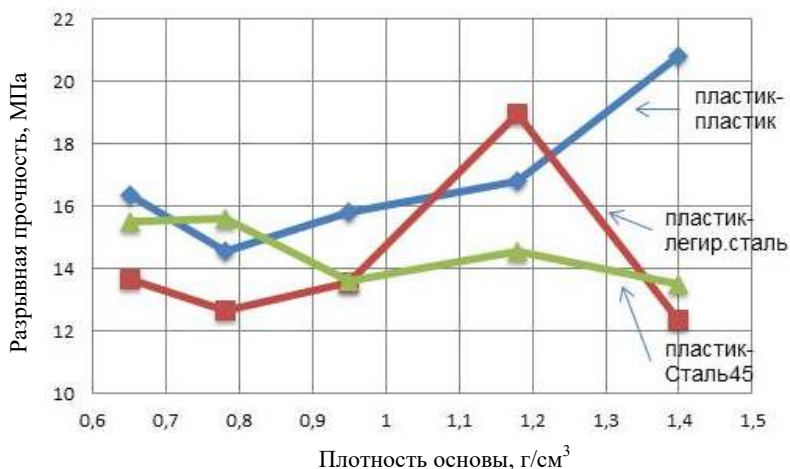


Рис. 5.12. Образцы, склеенные клеем на полиуретановой основе

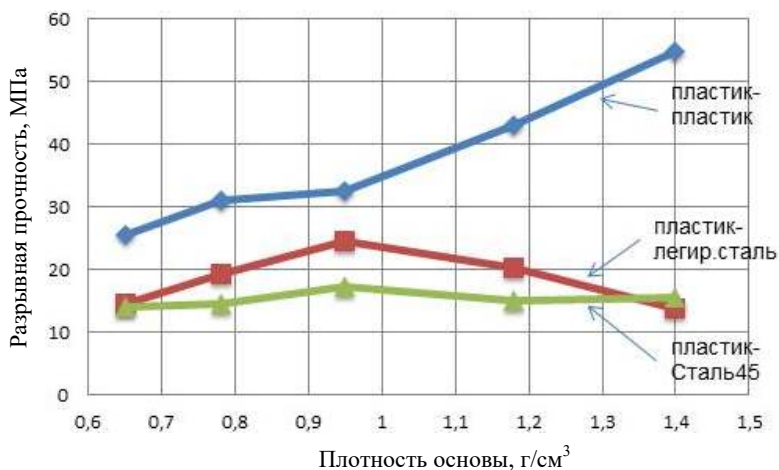


Рис. 5.13. Образцы, склеенные клеем на эпоксидной основе

Необходимо отметить, что при испытании металлических материалов вне зависимости от степени их легирования и материалов, присоединяемых к ним не металлической составляющей, наблюдается очень широкая разбежка параметров, что было не свойственно ни одной из групп, исследуемых ранее образцов. Можно предполо-



жить, что в получаемом многокомпозиционном материале металл/клей/металл возникают различные деформационные усилия, как в каждом рассматриваемом материале в отдельности, так и на границах их сочленения. При углубленном расчете модулей напряжений каждого материала в отдельности и их комбинации друг с другом можно получить более точное истолкование графиков. При отсутствии такого расчета можно только уверенно заявлять о более низких и неравномерных прочностных характеристиках склеенных соединений пластик/металл, в отличие от склеенных соединений пластик/пластик. Было отмечено, что соединение пластик/легированная сталь, в большинстве случаев, показывает более высокие прочностные показатели, чем соединение пластик/Сталь45.

В результате проделанной работы был проведен анализ клеевых составов, применяемых при создании неразъемных соединений, используемых в литейном производстве. Исходя из этого, было установлено, что при склеивании материалов, в особенности разнородных, необходимо учитывать эпюру прогиба, возникающую при использовании конечного изделия. При этом одно- или разнородность материалов, а так же их химическая активность играют ведущую роль. Рассмотрены на примерах различных типов материалов возможные варианты поведения клеевых составов.

По анализу полученных графиков ясно вырисовывается зависимость плотности и природы используемых материалов в соединениях, применяемых для производства модельных комплектов, а так же показаны свойства адгезивов и их влияние на общие прочностные характеристики, получаемого неразъемного элемента. Выявлена сходная зависимость разрушения склеенного материала основы и ее композиции с модельной древесиной, что можно отнести, как и к качеству проведенных экспериментов, так и к меньшему количеству факторов влияющих на погрешности в данных композиционных соединениях. Было показано что, склеенное соединение пластик/дуб имеет более высокие прочностные характеристики по сравнению со склеенным соединением пластик/ольха, где шероховатость поверхности была различной. К тому же в процесс соединения пластик/древесина могут вмешиваться параметры, влияющие на поведение любого композиционного соединения такие как, например, твердость древесины (дуб –  $675 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{см}^2$ ; ольха –  $400 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{см}^2$ ), ударная вязкость (дуб –  $0,78 \text{ кгсм}/\text{см}^2$ ; ольха –  $0,53 \text{ кгсм}/\text{см}^2$ ), плотность, структура древесины и др.



По результатам анализа полученных данных и оптической микроскопии зоны разрушения испытываемых образцов, доказано, что испытанные адгезионные составы в соединениях типа пластик/древесина показывают приемлемые результаты для данного типа соединений. При этом для мягких пород древесины наилучшие результаты были продемонстрированы универсальными акриловыми клеями типа DP 8005. Однако, окончательный выбор клея исходит не только из свойств склеиваемых материалов, но и из условий технического процесса эксплуатации неразъемного соединения и экономической эффективности рассматриваемого соединения.

### ***5.5. Современные методы проектирования и изготовления модельной оснастки***

В заключительной части главы предлагаем небольшой экскурс в теорию и практику производства модельной формовочной оснастки. Материал представлен с учетом выше изложенных аспектов, касающихся рационального использования конструкционных модельных материалов (учитывая их высокую стоимость) с широким использованием адгезивных технологий.

Изготовление литой детали невозможно без наличия ее прототипа, т. е. модели, даже когда изготавливается одна уникальная отливка. Материалов и способов изготовления моделей и модельной оснастки в настоящее время множество.

Материалом для модели могут служить:

– пластилин, воск, гипс, глина, пенополистирол – при изготовлении одноразовых моделей, например, в художественном литье (рисунк 5.14);

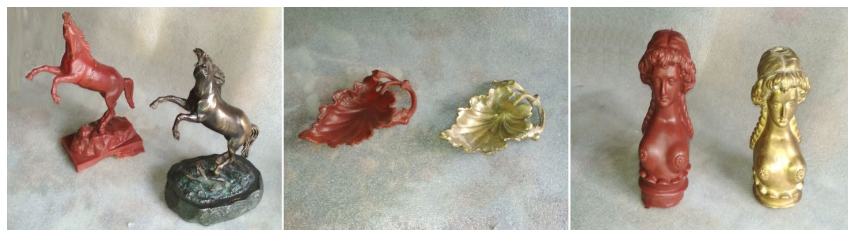


Рис. 5.14. Восковые модели и отливки



– дерево, МДФ, ДСП – в условиях единичного и мелкосерийного производства при ручной и машинной формовке, когда к отливке не предъявляются высокие требования к точности размеров и качеству поверхности (рисунок 5.15);



Рис. 5.15. Деревянная модель и отливка

– металл (алюминиевые сплавы, чугун, сталь) и специальный модельный пластик – при крупносерийном и массовом производстве (рисунок 5.16).



Рис. 5.16. Модели из пластика и отливки

Способов изготовления моделей также множество: от ручного изготовления – лепка и резка из пластических и пеноматериалов до обработки на 3D – станках с ЧПУ.

Производственники при выборе материала и способа изготовления модели учитывают ряд обязательных факторов: серийность производства, требования к будущей литой заготовке, технологичность материала, качество поверхности, стоимость материала и его обработки и другие.



### 5.5.1. Разработка технологии отливки

Рассмотрим последовательность изготовления литейной модельной оснастки на примере отливки серийного производства на машиностроительном предприятии.

На начальном этапе конструктор разрабатывает и выполняет эскиз или чертеж требуемой детали. Затем технолог разрабатывает литейную технологию для данного изделия, при этом учитывается целый ряд важных факторов:

- материал будущей детали (литейный сплав) – от этого зависят параметры, способ и место подвода литниково-питающей системы, объемная и линейная усадка;

- конструкция литниково-питающей системы – наличие различных дополнительных технологических элементов, например, камера для внутриформенного модифицирования, центробежные шлакоуловители, дополнительные прибыльные надставки и др.;

- расположение (ориентация) модели в пространстве – с вертикальным или горизонтальным разъемом литейной формы.

В итоге технолог представляет окончательный вариант чертежа детали со всеми необходимыми технологическими элементами для получения литой заготовки.

На основании разработанной технологии с учетом всех технологических и конструкционных особенностей литейного сплава строится трехмерное изображение будущей модели-отливки в среде любого графического редактора – SolidWorks, AutoCAD, КОМПАС-3D, TurboCAD и др., которые между собой являются совместимыми (рисунок 5.17).

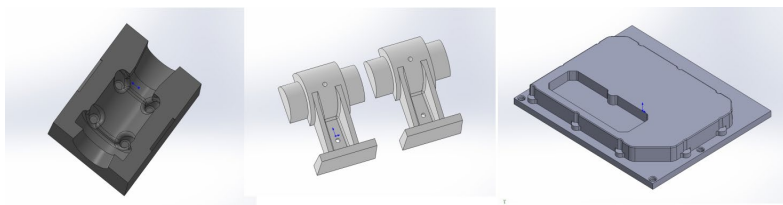


Рис. 5.17. Трехмерное изображение моделей

Трехмерное изображение модели необходимо как минимум в двух случаях - при ее изготовлении на 3D-станке с ЧПУ и для вери-



фикации перед изготовлением ее технологичности на специальных программах имитационного компьютерного моделирования технологических процессов с использованием теплофизических свойств материалов (рисунок 5.18).

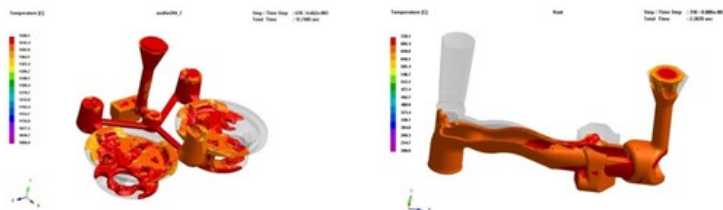


Рис. 5.18. Имитационное моделирование процесса заливки и кристаллизации отливки

В случае возникновения потенциальных очагов брака, таких как пористость, усадочные раковины, вероятность возникновения горячих трещин – технолог корректирует литниково-питающую систему, вплоть до принципиального изменения первоначального варианта технологии изготовления отливки для получения положительного результата.

### ***5.5.2. Выбор материала модели и технологического оборудования***

На следующем этапе производственнику необходимо выбрать материал для модели и способ его обработки. Это взаимосвязанные аспекты, которые, как правило, учитываются одновременно.

Как уже указывалось выше, при выборе материала учитывается целый ряд условий: серийность производства, цена материала, доступность на рынке и ряд других. Кроме этого, в некоторых случаях можно предусмотреть возможность использования одновременно различных материалов (в первую очередь по стоимости) для разных элементов модельной оснастки. Например, для литниково-питающей системы и прибыльных надставок можно использовать менее дорогостоящие и более доступные материалы в связи с невысокими требованиями к их прочности и качеству поверхности, а



также возможностью их оперативной замены в случае их износа или изменении технологии заливки (подвод металла, применение дополнительных элементов литниково-питающей системы).

В зависимости от выбранного материала и комплекса требований к модельной оснастке, выбирается способ ее изготовления, а, соответственно, и обрабатывающее оборудование – от 2-мерных механообрабатывающих станков (токарные, фрезерные, сверлильные и т. д.) до 3D-станков с ЧПУ (рисунок 5.19).



Рис. 5.19. Оборудование для изготовления модельной оснастки

### ***5.5.3. Изготовление модели на 3D-станке с ЧПУ***

Подробнее остановимся на наиболее широко используемом и эффективном сегодня способе изготовления модельной оснастки на 3D-станке с ЧПУ. Существует ряд компьютерных программ, используемых для импортирования 3D модели в системы программирования ЧПУ (САМ систему) – PowerMill, Gemma, MasterCam и др.

После интегрирования трехмерного изображения в САМ систему (в нашем случае PowerMill) специалистом определяется пошаговый алгоритм обработки заготовки, включающий ряд технологических и операционных аспектов.

1. В зависимости от габаритов рабочего стола и технических характеристик обрабатывающего оборудования устанавливается возможность изготовления модели (модельного комплекта) за одну установку обрабатываемой заготовки.



2. Если такой возможности нет, то трехмерное изображение модели делится на модули (блоки) по различным плоскостям построения (X, Y, Z) для удобства последующей механической обработки. В этом случае конструктору необходимо предусмотреть центровочно-штифтовые элементы, необходимые для последующей сборки отдельных блоков в цельную модель.

3. В некоторых случаях появляется необходимость обработки заготовки с «теневых», т. е. обратных плоскостей, что требует поворота (переустановку) заготовок на  $90^\circ$  или  $180^\circ$  относительно осей X или Y. Это значительно усложняет и увеличивает по времени обработку модели, так как требует дополнительной центровки и ориентации заготовки на рабочем столе (установку «нулевой» точки) в существующей системе координат станка для данной заготовки, что значительно влияет на размерную точность изделия.

В некоторых случаях с целью экономии материала и времени обработки рационально размещать на одной заготовке (плите) несколько изделий: элементы литниково-питающей системы, мелкие технологические элементы, отъемные части и т. д. Для этого строится отдельная 3D модель, где с учетом припусков и размеров режущего инструмента (диаметр фрезы) оптимально размещаются обрабатываемые элементы (рисунок 5.20).

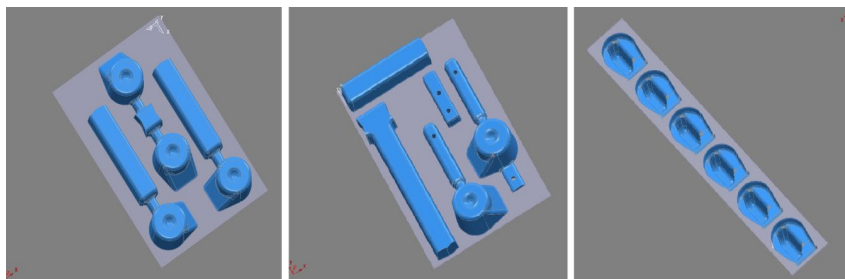


Рис. 5.20. Компоновка элементов литниковой системы

После определения алгоритма обработки и окончательной корректировки 3D-модели будущего изделия подготавливается заготовка необходимых размеров из выбранного материала с учетом припусков на обработку (до 5 мм) и устанавливается на рабочий стол станка (рисунок 5.21).



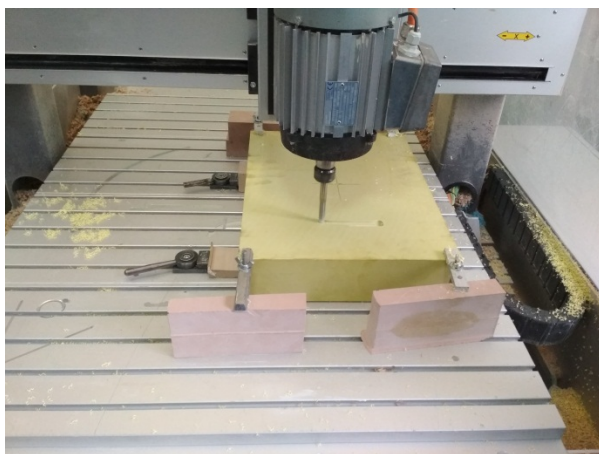


Рис. 5.21. Рабочий стол станка с установленной заготовкой

Далее оператор станка строит систему координат (СК) модели в среде PowerMill, которая может не совпадать с СК модели на трехмерном построении и разрабатывает оптимальную стратегию обработки заготовки.

Технологический процесс изготовления модели рассмотрим на примере отливки «Корпус», материал – чугун марки СЧ20. Высота данной модели не позволяет ее изготовление за одну установку заготовки из-за ограниченного хода инструментальной головки по оси Z. Поэтому в данном случае модель условно делится на две части по высоте (рисунок 5.22). Кроме этого верхний блок модели необходимо обрабатывать с обратной стороны, т. е. с поворотом заготовки относительно оси X на  $180^\circ$ .

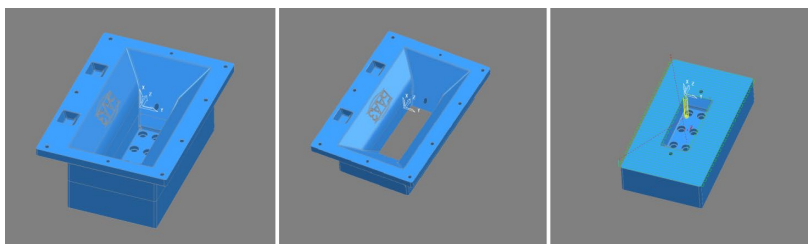


Рис. 5.22. Изображение модели отливки «Корпус»



Как правило, первая стадия обработки – черновая обработка. Основная задача на данном этапе максимальная выборка «лишнего» материала с учетом оставления припусков для дальнейшей чистовой обработки. Выбирается диаметр и профиль фрезы и устанавливаются параметры обработки: скорость вращения шпинделя, скорость подачи обрабатывающей головки по осям обработки (X, Y) и шаг инструмента по оси Z (рисунок 5.23). Черновая обработка может состоять из нескольких траекторий в зависимости от сложности изделия.

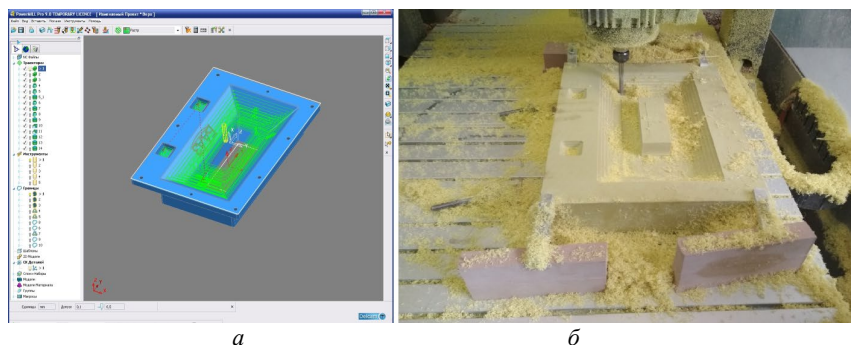


Рис. 5.23. Черновая обработка заготовки:  
*а* – вид диалогового окна PowerMill;  
*б* – обрабатываемая заготовка на рабочем столе

Следующая стадия обработки – чистовая обработка, которая в зависимости от сложности изделия включает несколько стратегий со сменой инструмента от большего диаметра к меньшему до достижения максимально возможной для данного оборудования точности размеров и конфигурации изделия (рисунок 5.24).



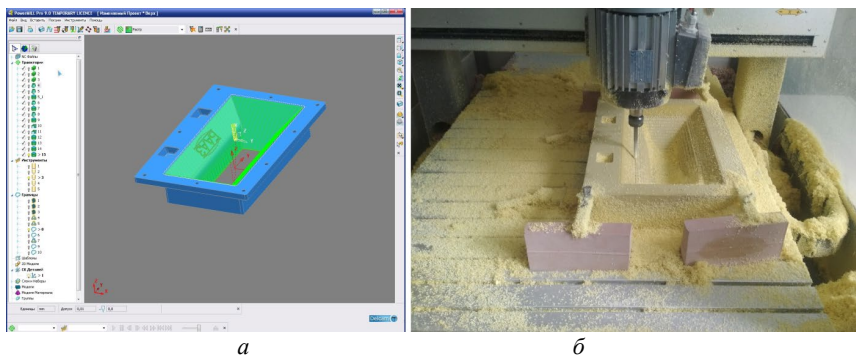


Рис. 5.24. Чистовая обработка заготовки:  
*а* – вид диалогового окна PowerMill;  
*б* – обрабатываемая заготовка на рабочем столе

При необходимости проводится локальная доработка технологических элементов модели мелким инструментом диаметром до 0,5 мм (рисунок 5.25).

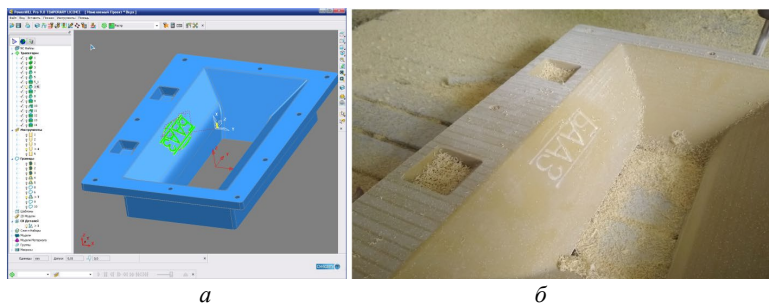


Рис. 5.25. Доработка заготовки:  
*а* – вид диалогового окна PowerMill;  
*б* – фрагмент обрабатываемой заготовки на рабочем столе

Отдельная стратегия – обработка плоскостей, имеющих нулевое отклонение от координат X и Y (рисунок 5.26).



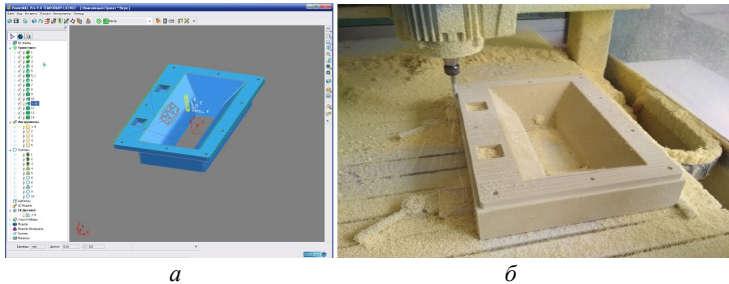


Рис. 5.26. Обработка плоскостей заготовки:  
*а* – вид диалогового окна PowerMill;  
*б* – обрабатываемая заготовка на рабочем столе

После обработки всех элементов и модулей будущей модели производится их монтаж с помощью центровочно-штифтовых элементов и склеивание с использованием выше рассмотренных адгезивов и методов их нанесения (рисунок 5.27).



Рис. 5.27. Модель отливки «Корпус»

Если модель изготавливается из МДФ, ДСП или дерева, то в этом случае проводится дополнительная операция по защите ее поверхности с целью повышения ее износостойкости – покраска, пропитка различными лаками или эпоксидной смолой.

После монтажа, склейки и защиты поверхности производится окончательная ручная доводка модели с помощью различных обрабатывающих инструментов и наждачной бумаги.



## **6. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ СЛОЖНЫХ ПОРИСТЫХ ТЕЛ**

### **6.1. Процессы получения композиционных материалов**

Сущность аддитивных технологий заключается в послойном синтезе детали по цифровой модели без формообразующей оснастки. Создание изделия происходит путем добавления материала, в отличие от технологий, основанных на удалении его излишков, например, механообработки [87, 88]. Прямое выращивание изделий послойным синтезом возможно в различных агрегатных состояниях и высокоэнергетических процессах с объемной, локализованной и фокусированной зоной поглощения в зависимости от мощности потоков энергии. Аддитивные технологии находят большое применение в машиностроении, прежде всего, для создания деталей сложной форм.

В связи с этим представляется актуальным и возможным применение аддитивных технологий для получения изделий конкретного назначения из композиционных материалов, в частности, на основе меди взамен энергозатратной технологии литья и т. п.

Так при помощи 3D-наплавки на уже готовое изделие можно нанести дополнительный слой, с требуемыми технологическими параметрами.

Также к аддитивным технологиям можно отнести склеивание. С помощью склеивания можно собрать изделие, состоящие из различных материалов, часто не совместимых иными способами. Иногда это необходимо по технологическим причинам, иногда оправдано экономически.

Исходя из выше изложенного, в настоящее время возможности процессов получения композиционных материалов значительно расширяются. Применение слоистых композиционных материалов, (представляющие собой материалы, структура которых состоит из набора чередующихся армирующих компонентов-слоев, жестко связанных между собой), позволяет повысить надежность и долговечность узлов, деталей, оборудования, а также сокращает расходы на использование дорогостоящих материалов, снизить массу готовой продукции, расходы на ремонт и техническое обслуживание.



Существуют некоторые необходимые условия формирования композиционных материалов [89–93]:

1) композит представляет из себя сочетание хотя бы двух разнородных материалов с четкой границей раздела между фазами;

2) компоненты композиции образуют ее своим объемным сочетанием;

3) компоненты композиции должны обладать свойствами, которых нет ни у одного из ее компонентов в отдельности.

Таким образом, подбирая исходные компоненты объемов можно управлять итоговыми параметрами композитного материала в целом по ряду значений (прочности, износостойкости, модуля упругости, вязкости и т. д.)

Структура слоистых композитов представлена чередующимися матричными и армирующими слоями. Матричными считаются слои большие по толщине [89, 91].

При этом чередующиеся слои в композите могут быть выполнены как из одного и того же материала, так и из различных. Слои в композите, как правило, соединены друг с другом по всей площади [89]. Их можно классифицировать в соответствии из свойств матрицы и наполнителя на:

1) материалы с твердой матрицей и мягким наполнителем;

2) материалы с мягкой матрицей и твердым наполнителем.

Прочность связей по границе раздела слоев при получении композита может происходить за счет диффузии атомов вещества через границу раздела (например, при процессе термической обработки), или за счет образования новых соединений по границе их раздела, в результате проходящих реакций между соседними слоями (гетеродиффузия), или за счет адгезионных связей [89]. Все зависит от способа формирования композиционного материала.

Существует несколько, уже давно известных, способов формирования композиционных материалов – это газофазные, жидкофазные и твердофазные и новый способ создания композитов – аддитивный (рисунки 6.1).





Рис. 6.1. Классификация процессов получения композиционных материалов

Однако при формировании композиционного материала может возникать проблема из-за несовместимости исходных компонентов (термодинамическая, кинетическая, химическая, механическая и т. д.). Данную проблему можно легко решить при помощи использования аддитивных технологий, которые могут быть эффективно использованы для создания слоистых композиционных материалов, состоящих из композиции трудно скрепляемых традиционными способами материалов, а также при создании многослойных комбинаций на основе пористых и компактных тел.

## 6.2. Анализ материалов для создания пористых тел

Спеченные материалы широко используются для различных отраслей промышленности [94] и изделий медицинского назначения [95]. Процесс получения изделий основан на термичес-



ком воздействию под нагрузкой на порошки или частицы, используемого материала. Этот процесс сопряжен с применением высокоэнергетического оборудования, где затрат энергии требуется на сам процесс прессования, и на нагрев образцов. Альтернативным процессом, получения сходных материалов может быть клеевое крепление гранул, что было реализовано в работе [28].

Наиболее трудносклеиваемыми материалами являются материалы инертные к внешним воздействиям. К этой группе можно отнести сплавы на основе золота, сложнелегированные стали и материалы на основе титана. Так как процесс соединения элементарных материалов давно изучен [1, 3, 6–9, 16–19], объектом изучения были приняты сложно скрепляемые материалы из вышеупомянутых групп, а именно порошок титана марки ТПП4 (ТУ 14–22–57–98), а в качестве материала подложки коррозионно-стойкая сталь марки Х18Н9 [86]. Исходя из ранее выполненного анализа, для соединения сложных материалов, были использованы клеи компании 3М, как наиболее приспособленные для склейки сложных сплавов.

На первом этапе работы было проведено исследование выбранного порошка титана марки ТПП4, применяемого для изделий различного назначения. Анализ показал высокую неоднородность зерен рассматриваемого титанового порошка (рисунок 6.2).

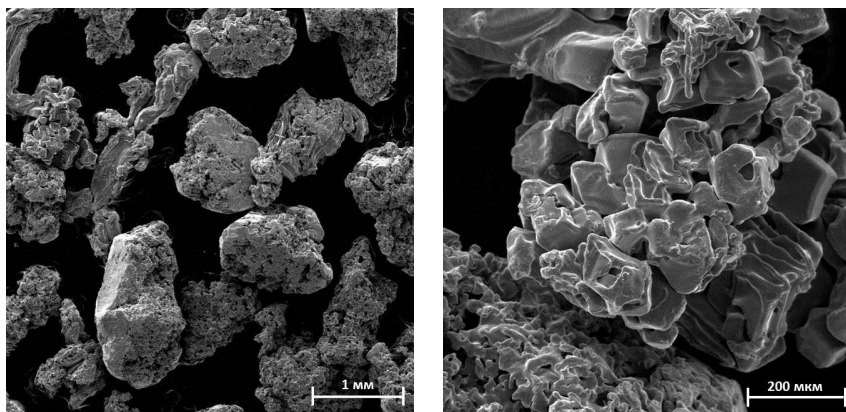


Рис. 6.2. Форма порошкового титана ТПП-4 (ТУ 14-22-57-98)



Для оценки качества, используемого порошкового материала был проведен анализ спектральных составляющих титана, которые приведены на рисунке 6.3 и показывают его чистоту и отсутствие окислов на поверхности, которые могли бы вступать в реакцию с компонентами адгезионных составов.

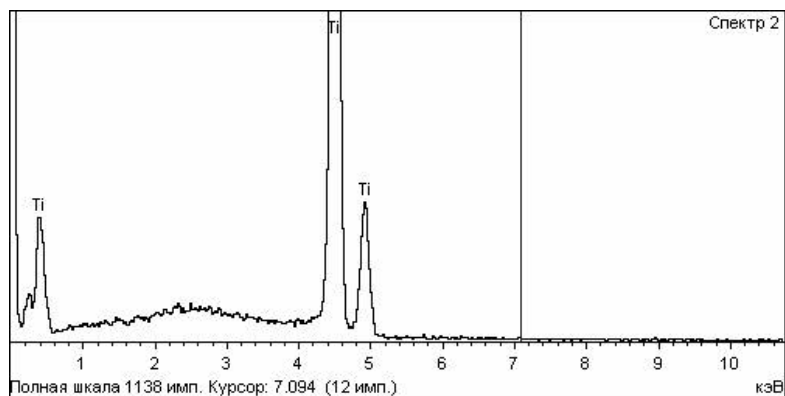


Рис. 6.3. Спектральные составляющие порошка титана марки ТПП4 (ТУ 1422–57–98)

Исходя из заявленных производителем клея данных, по использованию во влажных сухих и масляных средах, были применены 2-х компонентные адгезивы DP 8805NS, DP 490, DP 810, технические характеристики которых представлены в приложении 5.

Для создания наиболее четкого соединения, отвечающего требованиям потребителя, подготовка поверхности проводилась в соответствии со стандартными методиками, разработанными компанией 3М для склейки металла. Все поверхности в сухом, не окрашенном, без оксидных пленок, масел, пыли, релизов и т.п. виде прошли обезжириванием раствором 3М Surface cleaner 60/40 50/50 с последующей обработкой наждачной бумагой Scotch Brite и протиркой очистителем поверхности 3М. Такая обработка поверхности дает хорошую адгезию металлов к клеевым составам. Для изделий, которые не предполагается эксплуатировать в условиях повышенной влажности, обработку поверхности праймерами например компании 3М можно не проводить.



В соединении металл/пористое тело/металл (МПТМ) клей наносили на цельнометаллическую поверхность.

Измерение механических свойств образцов проводили через 2 недели после склеивания (по просьбе импортера клея, в соответствии с американским стандартом ASTM D638). К дальнейшим исследованиям приступили после истечения этого времени для получения максимально достоверных результатов.

Испытания образцов на разрыв проводились по ранее изложенной методике. Результаты представлены в таблице 6.1.

Из анализа испытаний видно, что максимальные значения прочности на разрыв образцов МПТП обеспечивает клей DP 810, однако производитель временно приостановил поставку данного клея на рынок Республики Беларусь, поэтому для дальнейшей работы, при совокупном анализе всех технических данных, было принято решение остановиться на клее DP 8805NS. Проведенные испытания подтвердили возможность применения клеевых составов для производства изделий промышленного назначения на основе МПТМ. Дальнейшее развитие и оптимизация данной технологии позволит отказаться в ряде случаев от применения дорогостоящего оборудования, основанного на реализации процессов холодного и горячего прессования при производстве МПТМ, ускорить и удешевить процесс производства.

*Таблица 6.1*

**Прочностные характеристики группы образцов (МПТМ)  
склеенные клеями DP 8805NS, DP 490, DP 810**

| № группы образцов | Тип адгезива          | Усредненные значения предела прочности на разрыв, МПа |
|-------------------|-----------------------|---|
| 1                 | DP 8805NS (акриловый) | 14,7  |
| 2                 | DP 490 (эпоксидный)   | 14,2  |
| 3                 | DP 810 (акриловый)    | 16,4  |



### **6.3. Крепление титановых промышленных сплавов с помощью адгезивов**

Как было указано выше, использование материалов с низкой окисляющей способностью (титан и его сплавы) определяется их высокой стоимостью по сравнению с близкими по свойствам легко окисляемыми материалами (сплавы на основе железа или алюминия). По результатам исследований мировых компаний, производителей титановой продукции, стоимость на изготовление изделий сопоставимых с изготовлением титана относится как 1 к 40. Как показали исследования компании Boeing, [32, 35–37] одной из основных потребителей порошковых титановых изделий, основную массу расходов составляют расходы на прессование порошка (около 50 %), и расходы на механическую обработку.

Следующей высокой статьёй расходов и первичной в машиностроении являются затраты, связанные с креплением титановых изделий [31]. В настоящее время для данных целей используется лазерная или аргоновая сварка, а также методы порошковой металлургии. Однако все выше перечисленные методы требуют больших энергетических затрат и, как следствие, обладают высокой стоимостью и необходимостью использования дорогостоящего сертифицированного оборудования.

В результате выполненных исследований авторами был предложен метод соединения данных типов материалов с помощью адгезивов, лишенный вышеперечисленных недостатков [29].

В качестве объектов исследования были выбраны наиболее сложно скрепляемые элементы: пористое тело с цельнометаллической подложкой. Сложность данного крепления объясняется тем, что на цельнометаллической подложке адгезив выстраивается линейно, в то время как в пористом теле происходит частичное или полное впитывание адгезива. Как результат научный интерес представляет оценка величины пропитки адгезивом пористого тела, что является важным для соединения фильтрующих элементов, зон безопасности автомобилей, летательных аппаратов.

Для успешного крепления пористого и цельнометаллического тела должны соблюдаться два условия:



1) надежное крепление пористого тела к цельнометаллической подложке;

2) отсутствие заполнения пор адгезивом, (т. к. данный процесс нивелирует деформирующие, армирующие, фильтрующие и иные положительные свойства пористых тел).

Для решения поставленной задачи были взяты образцы на основе пористого титана марки ТПП-4 с различной пористостью (рисунок 6.4). В качестве подложки использовались таблетки из титанового сплава ВТ-1 (ОСТ 9045-72). Соединение цельнометаллической подложки с пористым телом осуществлялось с помощью адгезивов компании 3М (США): DP 270 (на эпоксидной основе), DP 8805NS (на акриловой основе); и эпоксидного универсального клея марки ЭДП быстрого отверждения производитель ООО «НПК «Астат», Россия (рисунок 6.5–6.7 соответственно).



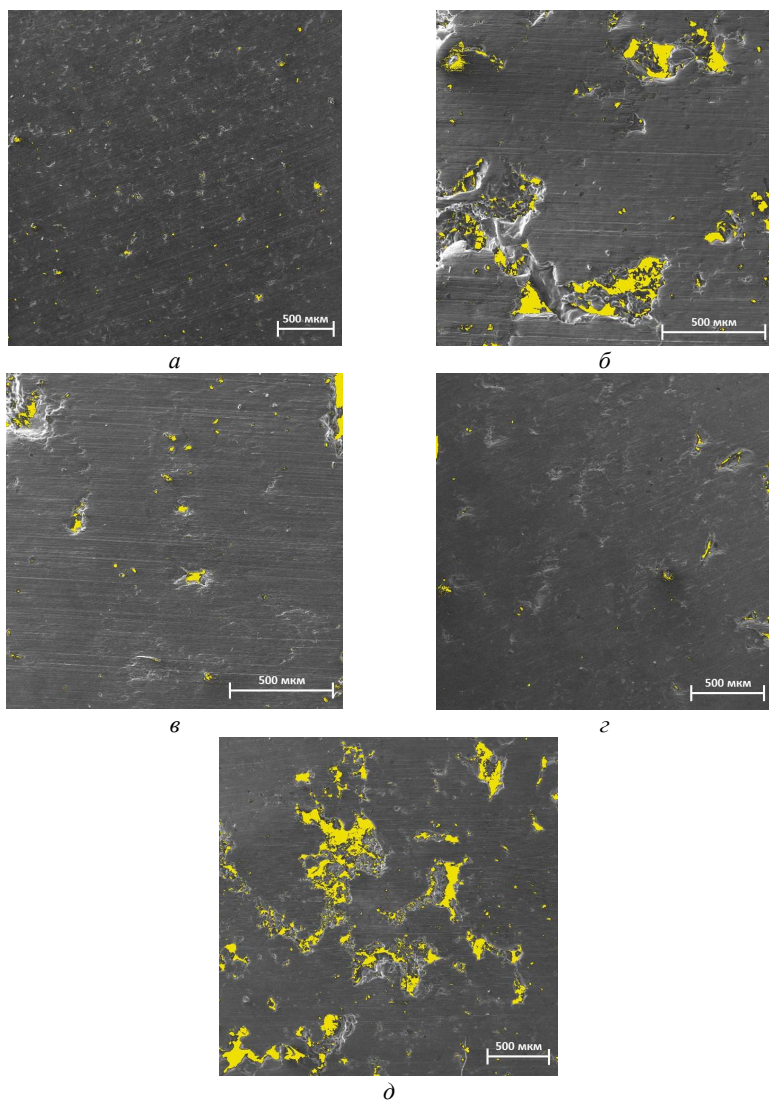


Рис. 6.4. Макроструктура поверхностного слоя исходных титановых таблеток с поверхностной пористостью:  
*a* – 20–25 %; *б* – 30–35 %; *в* – 28–32 %; *г* – 28–32 %; *д* – 40 %



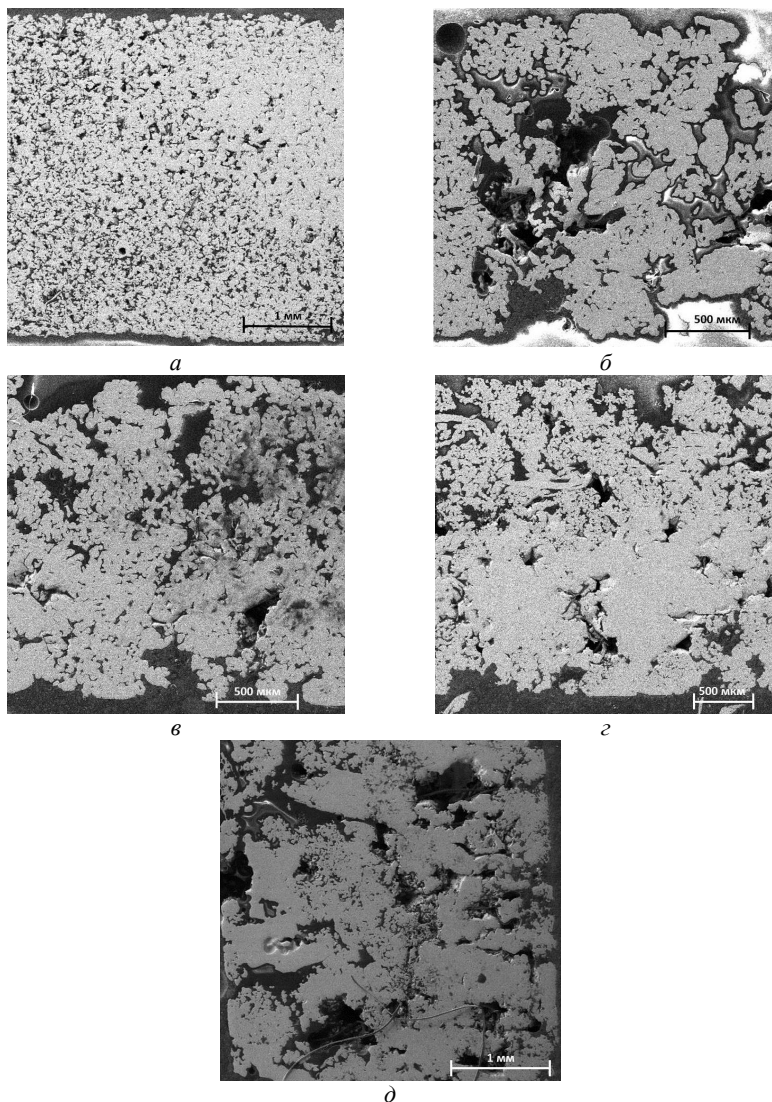


Рис. 6.5. Макроструктура образцов, на основе пористого тела (вверху) и цельного металла (внизу), склеенные эпоксидным клеем марки DP 270:  
*a* – 20–25 %; *б* – 30–35 %; *в* – 28–32 %; *г* – 28–32 %; *д* – 40 %



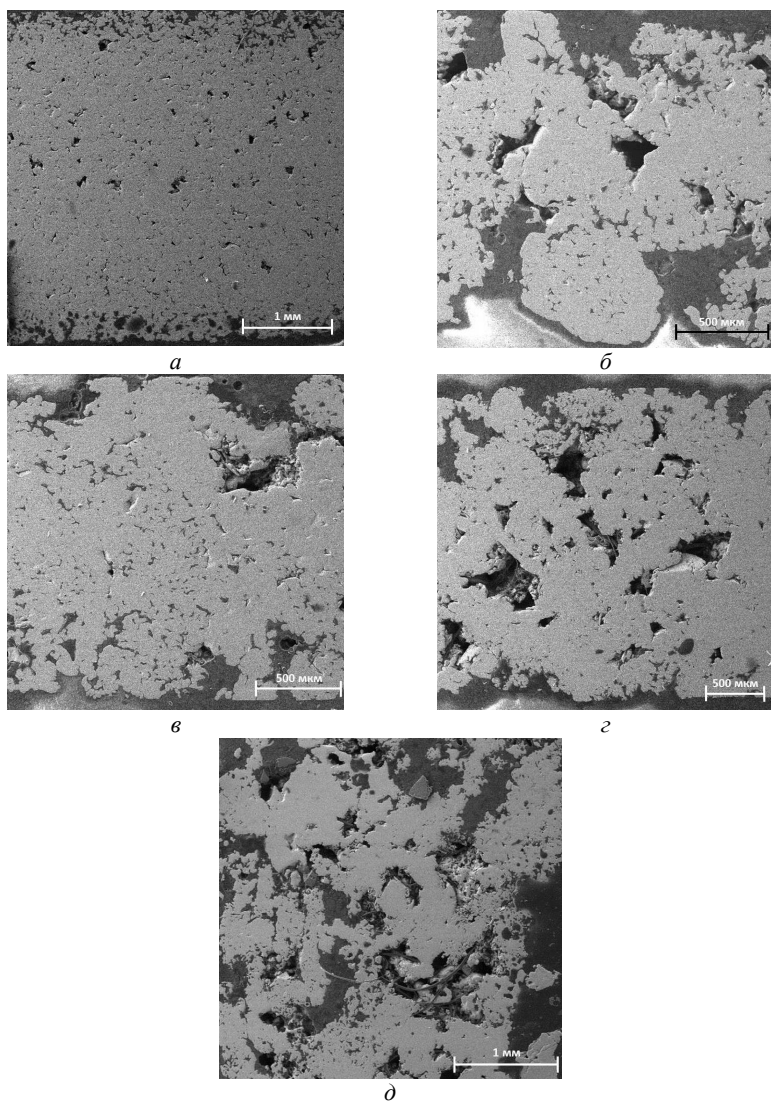


Рис. 6.6. Макроструктура образцов, на основе пористого тела (вверху) и цельного металла (внизу), склеенные акриловым клеем марки DP 8805NS:  
*a* – 20–25 %; *б* – 30–35 %; *в* – 28–32 %; *г* – 28–32 %; *д* – 40 %



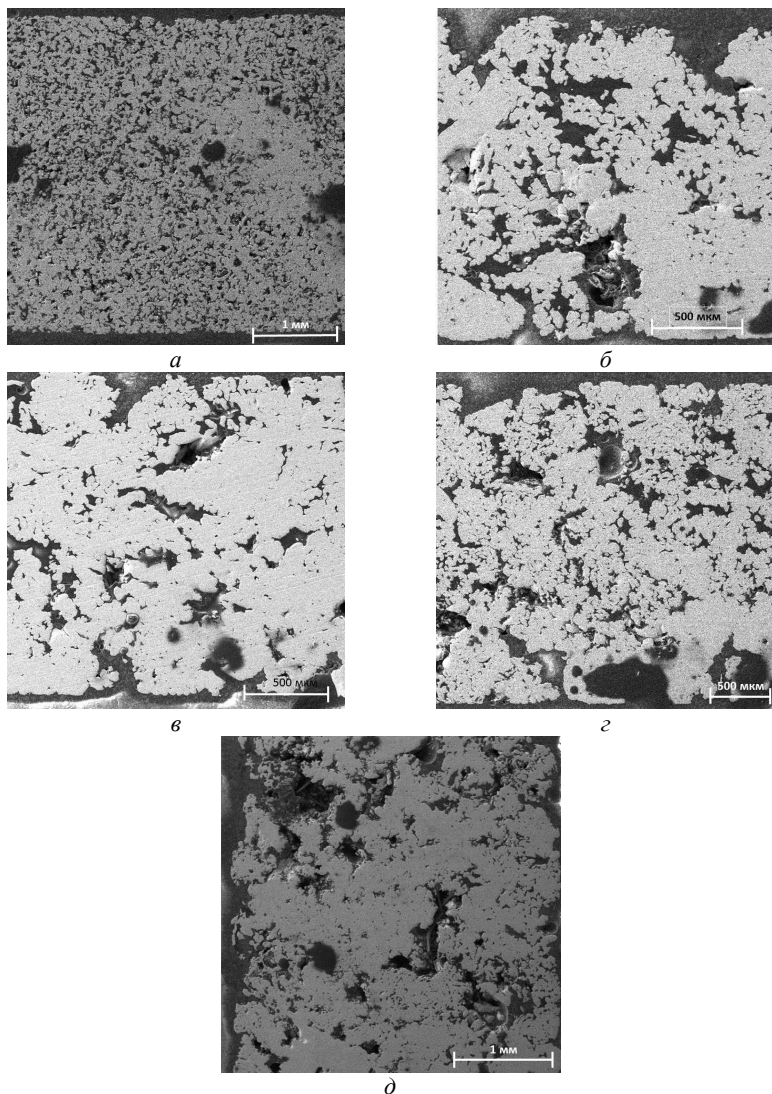


Рис. 6.7. Макроструктура образцов, на основе пористого тела (вверху) и цельного металла (внизу), склеенные эпоксидным универсальным клеем марки ЭДП:  
*a* – пористость 20–25 %; *б* – 30–35 %; *в* – 28–32 %; *г* – 28–32 %; *д* – 40 %



По результатам исследования было выявлено, что адгезивы на основе эпоксидных смол, такие как DP 270 и ЭДП, имеют особенность к заполнению пористого тела, т. к. обладают высокой жидкотекучестью и коэффициентом смачиваемости (по данным производителей). В тоже время необходимо отметить, что универсальные машиностроительные адгезивы на акриловой основе (типа DP 8805NS) не обладают столь высокой проникаемостью в пористое тело, что отражено на рисунке 6.8, где показаны мениски эпоксидного клея и акрилового клея в порах титана.

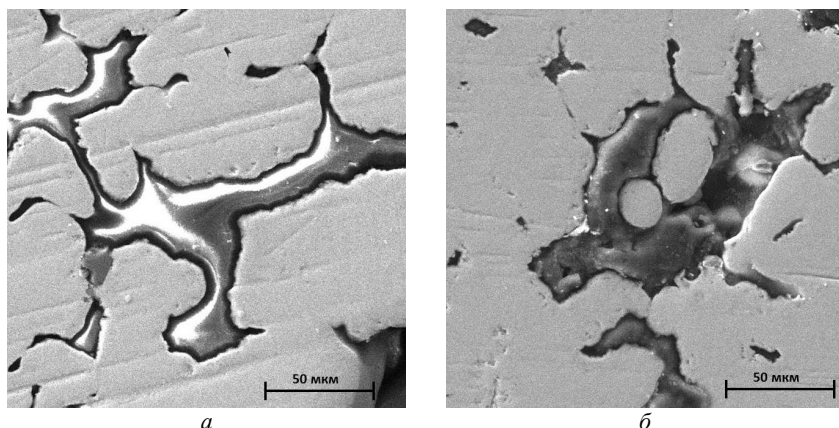


Рис. 6.8. Клеевые мениски в порах титановой губки  
*а* – эпоксидная основа, *б* – акриловая основа

В результате проведенной работы было выявлено, что применяемые адгезивы, на примере широко используемых эпоксидного универсального клея марки ЭДП, отличаются полным заполнением пористого тела (рисунок 6.8, *а*), что ведет к снижению заявленных ранее свойств пористого тела и увеличению расхода адгезива, связанного с пропиткой пористого тела, при этом следует отметить, что клеи на акриловой основе (типа DP 8805NS), имеющие в своем составе гранулы ограничители, охватывают только низкий слой пористого тела (рисунок 6.8, *б*), обеспечивая при этом достаточную жесткость крепления и не нарушая механических и эксплуатационных свойств пористого материала.



На данном примере было показано, что адгезивные технологии могут соперничать при тех или иных условиях с традиционными способами крепления материалов. Был произведен анализ влияния различных адгезивов на скрепляемые материалы и доказано, что жидкотекучесть адгезива не всегда подходит для решения конкретных задач в машиностроении.

#### ***6.4. Способы крепления цельнометаллических и пористых тел с помощью склеивания***

Исходя из предыдущего раздела, возникает вопрос влияния состава адгезива и способа подготовки поверхности на показатели качества точных неразъемных композиционных соединений на основе клеевых адгезионных связей, для обеспечения надежного крепления в условиях эксплуатации в воздушной, водной и масляной средах.

Подготовка поверхности для неразъемного крепления деталей на основе МПТМ или МПТ (металл/пористое тело) по технологии склеивания играет весьма существенную роль для получения качественного и высокопрочного соединения. Сложность реализации данной композиции объясняется тем, что в отличие от соединения металл/металл, в МПТМ или МПТ происходит различное взаимодействие адгезива с материалом. В частности, в случае цельнометаллической основы адгезив выстраивается линейно, в то время как на пористом теле реализуется капиллярный эффект (эффект губки), т. е. происходит частичное или полное впитывание адгезива в пористое тело склеиваемой детали, что приводит к уменьшению прочности соединения. Кроме этого, адсорбция влаги в порах неблагоприятно сказывается на прочности соединения деталей, изготовленных из МПТМ или МПТ, в особенности, если в качестве пористого тела используются керамические элементы с повышенным влагонасыщением.

Известно [1, 3], что при подготовке поверхностей некоторых материалов требуется, наряду с традиционными методами обезжиривания и механического шлифования (зашкуривания), нанесение на поверхность специального слоя. При этом тонкие покрытия могут иметь толщину не более нескольких микрон. При нанесении таких покрытий решаются следующие задачи:



– увеличение когезионных свойств поверхности подложки, т. к. покрытие позволяет закрыть поры и трещины, присутствующие на поверхности скрепляемых тел;

– увеличение адгезионной прочности покрытий за счет механического сцепления и физико-химического взаимодействия с поверхностью;

– стабилизация характеристик металлических поверхностей, например, чувствительности к коррозии и иным воздействиям.

Одним из критериев выбора является вязкость материала покрытия, т. к. она должна обеспечить равномерное растекание материала покрытия по подложке [1, 3, 5–8, 15–19, 26]. При этом одной из главных задач покрытий, является улучшение микрорельефа подложек, а также обеспечение хорошего адгезионного взаимодействия между клеем и подложкой. В некоторых случаях требуется нанесение не полимерных, а металлических и (или) родственных с ними покрытий. Этот тип покрытий особо эффективен, если требуется соединить трудносклеиваемые подложки. Иногда само покрытие является сложным по своему составу материалом, т. е. состоит из нескольких слоев. Эти соединения, как и некоторые другие производные, позволяют получать покрытия с хорошими адгезионными свойствами. Они образуют в процессе склеивания межфазную границу, обладающую хорошими механическими свойствами, стойкостью к коррозии и старению при воздействии влаги.

Известно [1, 3, 5–8, 41, 45, 96], что действие воды может привести к растворению или набуханию адгезива. Действие воды на клеевые швы не отличается от ее действия на клей в свободном состоянии. Однако диффузия воды в клеевой шов, в случае склеивания непористых материалов, происходит только через торцы клеевого шва, площадь которых невелика. При определении водостойкости (степени сохранения прочности склеивания при действии воды) часто используют разные критерии – кратковременное (до нескольких суток) или длительное (месяц, год и более) действие воды. Это обуславливает противоречивость литературных данных по водостойкости тех или иных клеев. Как результат, были проведены исследования, направленные на проверку данных заявляемых производителями адгезивов, по свойствам производимых ими клеевых составов после нахождения их в жидких средах. Произведена оценка свойств



клеев и предложены способы очистки отработанных клеенных соединений от остатков адгезивов.

В связи с этим, представлял интерес изучить адгезионную прочность соединения МПТ и МПТМ при различных условиях эксплуатации в например воздушной, водной и масляной среды. Авторами были использованы ранее описанные МПТМ на основе титана и нержавеющей стали с использованием адгезивного состава на акриловой основе компании 3М (США) DP 8805NS. Данный адгезив использовался для крепления подготовленных, в соответствии с методикой компании 3М, образцов из спеченного порошка титана с различной фракцией, и цельнометаллической подложки из коррозионностойкой стали X18H9. Диаметр клеенной поверхности составил 30 мм.

После достижения необходимого времени полимеризации образцы были подвергнуты разрывным испытаниям, согласно ранее изложенной методике и визуальному исследованию с помощью микроскопа OLYMPUS GX 51 по методу подсчета доли пористой составляющей по условному сечению образца (рисунок 6.9).

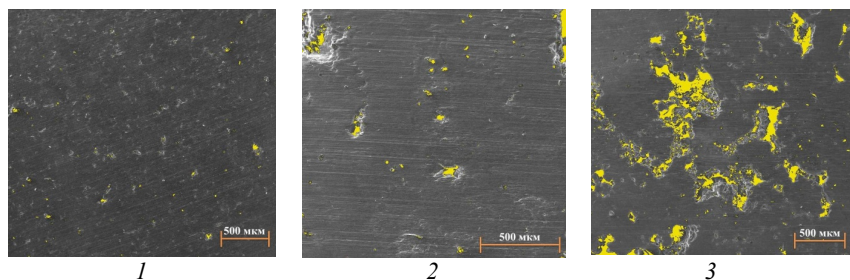


Рис. 6.9. Макроструктура исходных титановых образцов:  
1 – образец  $d_{\text{фракций}} = 0,10\text{--}0,16$  мм; 2 – образец  $d_{\text{фракций}} = 0,4\text{--}0,63$  мм;  
3 – образец  $d_{\text{фракций}} = 0,63\text{--}1,0$  мм

По результатам микроскопических исследований была определена средняя поверхностная пористость исходных образцов титана из исходного пористого материала с различной фракцией частиц, предлагаемого порошка, спеченного традиционным способом. В результате обработки данных была получена зависимость, представленная в таблице 6.2.



## Характеристика образцов из пористого титана

| Номер группы образцов | Размер фракций исходного порошка, мм | Средняя поверхностная пористость, % | Распределение пор по поверхности |
|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 1                     | 0,10–0,16                            | 43                                  | Равномерное                      |
| 2                     | 0,40–0,63                            | 44                                  | Неравномерное                    |
| 3                     | 0,63–1,0                             | 60                                  | Равномерное                      |

Качество подготовки поверхности подложек в работе не рассматривалось, так как присутствующие в адгезиве стеклянные микрогранулы выставляют оптимальную для данного состава толщину зазора до 250 мкм, что превосходит шероховатость поверхности подложек, изготовленных методом токарной обработки.

Для проверки ориентации и распределения микрогранул после прохождения двухкомпонентного акрилового адгезива через картуш-перемешиватель, рекомендованный для данного типа клея компанией производителем, был проведен размерный анализ микрогранул (рисунок 6.10). Однако определение реального размера стеклянных гранул стало затруднительно в связи с тем, что линия сечения поверхности шлифа не обязательно проходит через максимальный диаметр гранул (эффект айсберга).

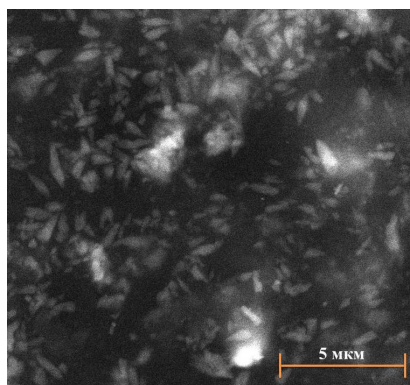


Рис. 6.10. Структура акрилового адгезива типа DP 8805NS



Далее образцы подвергли прочностным испытаниям на разрыв. В результате испытаний установлено, что разрывная прочность соединений МПТМ возрастает при увеличении размера пор от 8,171 МПа при фракции порошка 0,10–0,16 мм до 13,428 МПа при фракции 0,63–1,0 мм. Результаты испытаний приведены на рисунке 6.11, таблице 6.3.

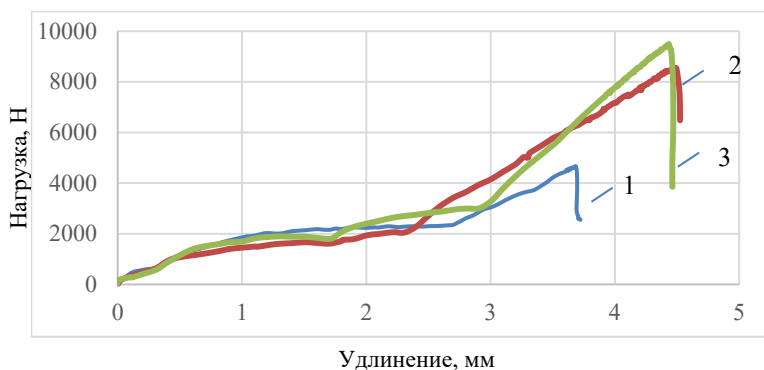


Рис. 6.11. Диаграмма растяжения группы образцов МПТМ, соединенных клеем DP 8805NS:

- 1 – группа образцов  $d_{\text{фракций}} = 0,10\text{--}0,16$  мм;
- 2 – группа образцов  $d_{\text{фракций}} = 0,40\text{--}0,63$  мм;
- 3 – группа образцов  $d_{\text{фракций}} = 0,63\text{--}1,00$  мм

Таблица 6.3

### Прочностные испытания на разрыв группы образцов МПТМ с различной фракцией частиц исходного порошка титана

| Номер группы образцов | Размер фракции исходного порошка, мм | Разрывная прочность, МПа |
|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| 1                     | 0,10–0,16                            | 8,171                    |
| 2                     | 0,4–0,63                             | 12,127                   |
| 3                     | 0,63–1,0                             | 13,428                   |

Была исследована возможность улучшения прочностных свойств соединения МПТМ за счет воздействия ряда факторов, а именно: изменения способа нанесения клеевого состава (растирание стек-



лянных частиц), а также за счет изменения морфологии поверхностного слоя пористой таблетки из титана. В первом случае после нанесения адгезива и его последующего соединения с цельнометаллической поверхностью производилось растирание адгезива с приложением давления. В результате такой обработки микрогранулы стекла могут заполнять поверхностные поры, что приводит к сглаживанию рельефа пористой поверхности (растирание проводилось с высокой скоростью для предотвращения схватывания адгезива).

Во втором случае поверхностный слой пористых таблеток подвергали механической обработке на токарном станке. При этом происходило выравнивание поверхности с образованием сглаженного поверхностного слоя за счет шаржирования продуктов износа обрабатываемой среды в поры. Обработывалась группа пористых тел с размером фракций 0,40–0,63 мм (рисунок 6.12) [29].

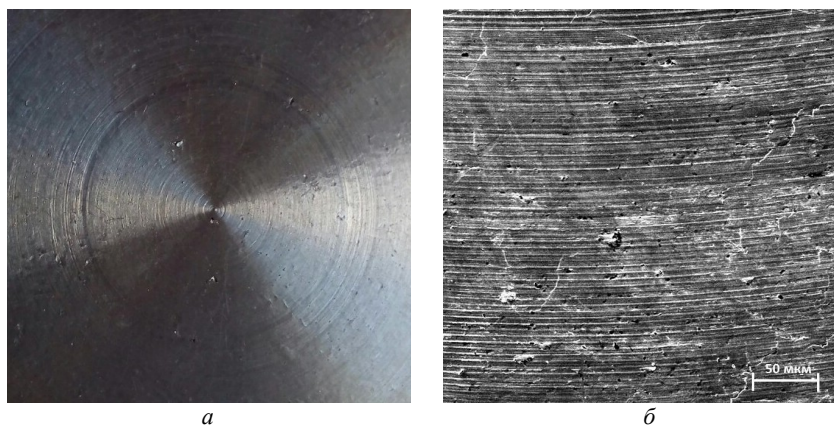


Рис. 6.12. Поверхность образца пористого титана с размером фракций порошка 0,4–0,63 мм, подвергнутая механической обработке:  
*a* – общий вид поверхности образца; *б* – образец при увеличении  $\times 65$

Известно [1], что в мировой практике при склеивании пористого тела используют специальные промежуточные пленки, закрывающие поры. Было принято решение сравнить этот способ с шаржированием поверхности. В результате подготовку поверхности для склеивания группы образцов МПТМ было решено проводить в два



этапа. А именно: на пористое тело, в виде таблетки, был нанесен и равномерно распределен по поверхности (с двух сторон) тонкий слой ранее указанного адгезива, далее, после достижения полной полимеризации, адгезив был нанесен повторно, поверх первого слоя, с последующей склейкой с металлической подложкой (создание МПТМ).

После вышеуказанной обработки все группы образцов адгезивных соединений подвергали испытаниям на разрыв. Результаты прочностных испытаний приведены на рисунках 6.13, 6.14 и в таблице 14.

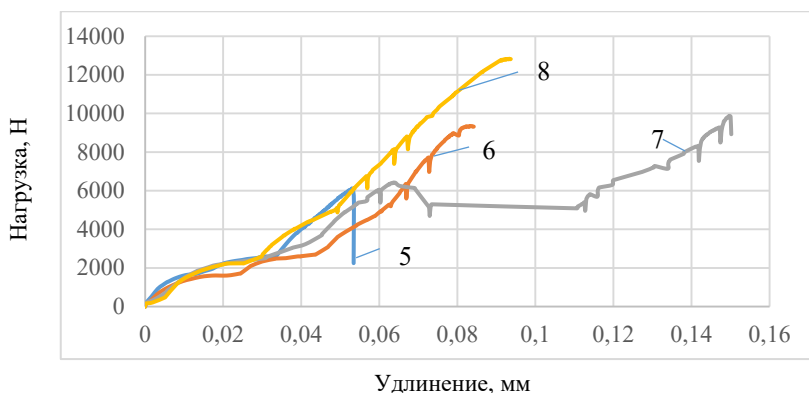


Рис. 6.13. Диаграмма растяжения группы образцов МПТМ, соединенных клеем DP 8805NS:

5 – группа образцов  $d_{\text{фракций}} = 0,10\text{--}0,16$  мм;

6 – группа образцов  $d_{\text{фракций}} = 0,40\text{--}0,63$  мм;

7 – группа образцов  $d_{\text{фракций}} = 0,63\text{--}1,00$  мм;

8 – группа образцов  $d_{\text{фракций}} = 0,40\text{--}0,63$  мм, прошедший токарную обработку

Как видно из рисунка 6.13, практически для всех типов групп образцов наблюдаются тенденции, замеченная в ранее проведенных экспериментах, а именно, наименьшую разрывную прочность показывают образцы с наименьшим фракционным составом порошка.



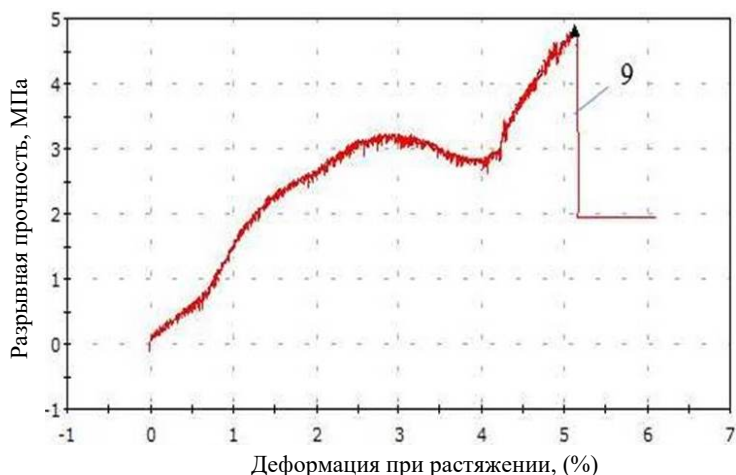


Рис. 6.14. Диаграмма растяжения группы образцов МПТМ, соединенных клеем DP 8805NS с использованием промежуточного внутреннего клеевого слоя

Таблица 6.4

### Результаты испытаний на разрывную прочность образцов МПТМ с различной фракцией исходного порошка титана

| Номер группы образцов | Размер фракции исходного порошка, мм | Вид обработки поверхностного слоя пористой таблетки       | Разрывная прочность, МПа |
|-----------------------|--------------------------------------|---|--------------------------|
| 5                     | 0,10–0,16                            | Растирание стеклянных гранул                              | 10,69                    |
| 6                     | 0,40–0,63                            | Растирание стеклянных гранул                              | 13,50                    |
| 7                     | 0,63–1,00                            | Растирание стеклянных гранул                              | 14,25                    |
| 8                     | 0,40–0,63                            | После токарной обработки                                  | 18,53                    |
| 9                     | 0,40–0,63                            | С использованием промежуточного внутреннего клеевого слоя | 4,8                      |

Таким образом, добавка в адгезив производителем присадок в виде стеклянных микрогранул, а также изменение способа нанесения клеевого соединения (растирание стеклянных гранул),



приводит к шаржированию мелких пор и повышению адгезионной прочности соединения. В частности, для группы образцов с фракцией порошка 0,10–0,16 мм адгезионная прочность возрастает в среднем более чем на 2,5 МПа (на 30,8 %), для группы образцов с фракцией 0,4–0,63 мм адгезионная прочность возрастает в среднем на 1,373 МПа (на 11,3 %), для группы образцов с фракцией 0,63–1,0 мм в среднем на 0,822 МПа (на 6,1 %). Как результат, наиболее эффективно использовать клеевые составы с микрогранулами для образцов с наименьшим размером пор по сравнению с высокопористыми образцами, где стеклянные микрогранулы заполнять пустоты не могут и, как следствие, не могут играть позитивную роль на склеивание пористой поверхности.

Второй способ, изменения морфологии поверхностного слоя пористой таблетки из титана также показал на группе образцов с фракцией порошка 0,4–0,63 мм повышенную адгезионную прочность соединения. Прочность возрастает в среднем более чем на 6,4 МПа (на 38 %), что на 26,7 % выше, чем при использовании присадок для образцов с такой же фракцией порошка.

Однако, на группе образцов с фракцией порошка 0,4–0,63 мм с использованием промежуточного внутреннего клеевого слоя, были получены наихудшие результаты. Возможно, это связано с увеличением толщины клеевого шва, что для данного адгезива не приемлемо.

Следующим этапом было исследовано влияние способа подготовки поверхности (нанесение разделительных слоев, шаржирование и т. д.), а также влияние жидких сред на прочность адгезионного соединения.

На водостойкость клеевых соединений влияет природа склеиваемых материалов [45]. Как результат для каждого типа материалов важен подбор адгезивного состава. Для определения критических состояний соединений металл-адгезив (по разрывной прочности и прочности на сдвиг) в работе была использована сложнoleгированная нержавеющая сталь X18H9.

Кроме свойств склеенного материала, существенное влияние на клеевой шов соединений МПТ и МПТМ оказывают агрессивные реагенты, которые могут находиться в водной среде. Как результат, был выбран адгезив компании 3М марки DP 8805NS, заявленный производителем, как подходящий для вышеупомянутых условий эксплуатации.



Известно [1, 3, 8], что вода и другие среды могут постепенно разрушать адгезионные связи. В противном случае наличие первоначальных дефектов (пор, капилляров) привело бы лишь к небольшому возрастанию водопоглощения и изменению других свойств. Однако, по мере увеличения продолжительности пребывания в жидких средах прочность и другие характеристики клеевых соединений (и, вообще, гетерогенных систем) могут сильно меняться, причем в большей степени, чем свойства аналогичных гомогенных материалов.

Как результат, было принято решение проверить рассматриваемый адгезив на водопоглощение и водостойкость.

Для исследования адгезива на водопоглощение были подготовлены четыре группы образцов нержавеющей стали с произвольно нанесенным адгезивом. Формы затвердевшего адгезива получились округлые, высотой (данные даны усредненные)  $h = 3$  мм и диаметром  $d = 15$  мм. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 30535-96 и ГОСТ 4650-80. Использовались аналитические весы ВЛА – 200<sub>2</sub> – м.

Согласно методике проведения испытаний первоначально было произведено взвешивание сухих образцов. Далее образцы были погружены в емкость с водопроводной водой. В течение 40 суток, проводилось ежедневное контрольное взвешивание обезвлажненных образцов. Результаты изменений по показателям массы приведены на рисунке 6.15.

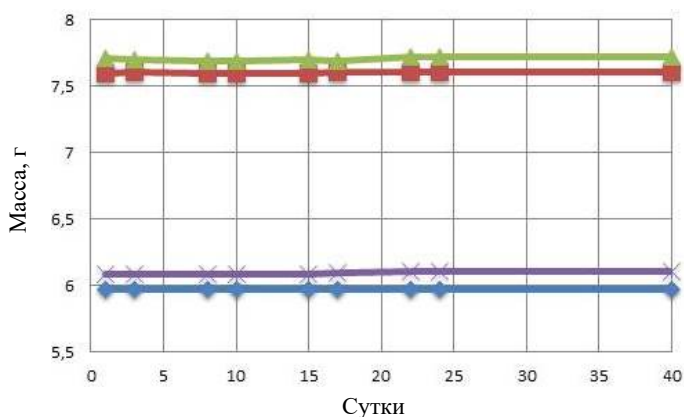


Рис. 6.15. Изменение массы образцов при выдержке в водной среде



Как видно, из рисунка 6.15, адгезив на акриловой основе DP 8805NS является водоненасыщаемым и водонерастроримым. Однако, отсутствие влагопоглощения или вагонасыщения не является основным критерием оценки адгезивных соединений, необходимо сравнение ранее рассмотренных показателей с механическими свойствами (прочностные испытания на разрыв), полученных МПТМ после применения влажных и масляных сред. Для анализа этих свойств была подготовлена серия образцов, где были использованы заготовки в виде таблеток из порошка титана марки ТПП-4 с размером частиц 0,4–0,63 мм и подложки из коррозионностойкой стали X18H9. При этом в одной из серий образцов МПТМ поверхностный слой пористой таблетки из титана подвергли механической обработке (шаржированию для удаления поверхностной пористости) на токарном станке. В других сериях поверхностный слой не подвергался изменениям. В мировой практике при склеивании пористого тела используют специальные промежуточные пленки, закрывающие поры [1]. Было принято решение сравнить этот способ с шаржированием поверхности. В результате подготовку поверхности для склеивания ряда образцов МПТМ было решено проводить в два этапа. На пористое тело, в виде таблетки, был нанесен и равномерно распределен по поверхности (с двух сторон) тонкий слой ранее указанного адгезива, после достижения полной полимеризации, адгезив был нанесен повторно, поверх первого слоя, с последующей склейкой с металлической подложкой (создание МПТМ). Образцы были подвергнуты ускоренному старению (в течение 40 суток) в водной и масляной средах.

После проведения разрывных испытаний была выявлена закономерность характера разрушения образцов в независимости от способа подготовки их поверхности, что и представлено в таблице 6.5 и на рисунках 6.16, 6.17.



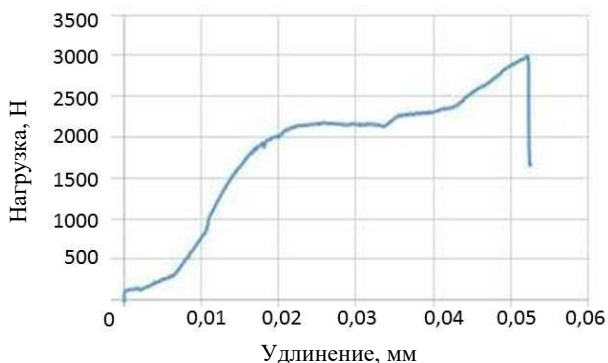


Рис. 6.16. Диаграмма растяжения образцов МПТМ, прошедшие испытания на разрыв, после искусственного старения адгезионного клеевого соединения (акриловый клей DP 8805NS) в условиях водной среды с использованием промежуточного внутреннего клеевого слоя

По результатам испытаний образцов первой и второй групп было выявлено (таблица 6.5), что, несмотря на то, что адгезив DP 8805NS заявлен производителем как влагоненасыщаемый, и ранее проводимые эксперименты это подтвердили, тем не менее, клеевой состав подвержен в водной среде старению в связи с возможными структурными изменениями, что существенно отражается на полученных результатах. Так в образцах МПТМ первой группы, в которых поверхностный слой пористой таблетки не был подвергнут предварительной обработке, присутствовало саморазрушение клеевого соединения по истечению 40 суток пребывания в водной среде. Образцы МПТМ второй группы, в которых поверхностный слой подвергли токарной обработке, разрушались при незначительном усилии (в процессе монтажа на испытательный стенд). Однако образцы МПТМ с предварительно нанесенным промежуточным слоем адгезива выдержали давление на разрыв около 4,36 МПа, что является удовлетворительным результатом для данных условий эксплуатации.



**Прочностные испытания на разрыв образцов МПТМ  
после выдержки в водной и масляной средах**

| № гр. образцов | Размер фракции исходного порошка, мм                                     | Среда искусственного старения МПТМ | Разрывная прочность, МПа         |
|----------------|--|------------------------------------|----------------------------------|
| 10             | 0,40–0,63  | водная                             | разрушение без приложения усилий |
| 11             | 0,40–0,63<br>(после шаржирования)  | водная                             | разрушение без приложения усилий |
| 12             | 0,40–0,63<br>(с использованием промежуточного внутреннего клеевого слоя) | водная                             | 4,36                             |
| 13             | 0,40–0,63<br>(после шаржирования)  | масляная                           | 6,58                             |
| 14             | 0,40–0,63<br>(после шаржирования; клеевой шов с доп. наружной защитой)   | масляная                           | 7,40                             |

Исходя из особенностей эксплуатации МПТМ, немаловажный интерес представляет исследование влияния масляной среды на адгезионную прочность этих соединений. Были подготовлены склеенные образцы МПТМ, с поверхностным слоем пористой таблетки, подвергнутой токарной обработке (сглаживанию), т. е. выравниванию поверхности с образованием покрывающей металлической пленки, так как ранее (при испытаниях в нормальных условиях), эти образцы показали наилучшие показатели.



Данные образцы были подвергнуты ускоренному старению (в течение 40 суток) в масляной среде. При этом в ряде образцов, предназначенных для испытаний в масляной среде, внешний клеевой шов закрыли от проникновения масляной среды в межслоевое пространство с помощью лакокрасочных покрытий на основе маслостойких эмалей. Далее образцы были подвержены прочностным испытаниям на разрыв (рисунок 6.17).

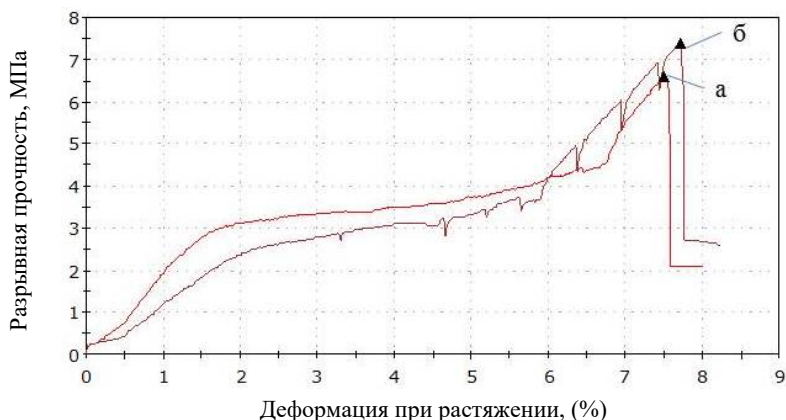


Рис. 6.17. Диаграмма растяжения образцов МПТМ, прошедшие испытания на разрыв, после искусственного старения адгезионного клевого соединения (клей DP 8805NS) в условиях масляной среды: а – группа образцов  $d_{\text{фракций}} = 0,40\text{--}0,63$  мм без дополнительной защиты клевого шва; б – группа образцов  $d_{\text{фракций}} = 0,40\text{--}0,63$  мм с дополнительной защитой клевого шва при помощи лакокрасочных изделий

Установлено, что соединение МПТМ с измененной морфологией поверхности пористой таблетки, показало лучшие результаты для образцов выдержанных в масляной среде, по сравнению с образцами, прошедшими старение в воде. Было выявлено, что образцы в условиях масляной среды, где шов был обработан лакокрасочными изделиями, показали результат в среднем на 11 % выше (7,4 МПа), чем образцы, находившиеся в масляной среде без дополнительной защиты клевого шва (6,6 МПа). Однако данные результаты ниже в 2,5 раза, чем при использовании этого же способа подготовки поверхности образцов пористого титана в нормальных условиях (18,53 МПа).



Актуальным вопросом является не только качество соединения клеевого шва, но и способы удаления адгезива с поверхности деталей, например, для повторного склеивания. Известно [2–4, 7–10, 15], что действие воды может привести к растворению или набуханию адгезива. Проведенные ранее эксперименты доказали, что данный адгезив в действительности не подвержен изменению веса, и как следствие, является не влагонасыщаемым, но при этом он не является влагостойким. Было принято решение данную особенность адгезива использовать для его удаления с клеевых поверхностей, для снижения затрат на механические способы обработки. При этом, в случае механической обработки, образцы постепенно истончались и требовали изготовления новой заготовки, кроме того выделяющаяся в процессе очистки образцов клеевая пыль требует систем фильтрации и индивидуальных средств защиты работающих. В результате проведения экспериментов по снятию отработанного клеевого слоя образцы из нержавеющей стали с остатками адгезива были помещены в резервуар с водой на 40 дней. По истечению данного срока адгезив легко отделялся от материала подложки. Небольшие включения, на поверхности, легко снимались в процессе протирки поверхности (рисунок 6.18).

Таким образом, был найден легкий, дешевый и удобный способ удаления ряда акриловых адгезивов типа DP 8805NS с металлической поверхности.



Рис. 6.18. Вид образца с отслоившимся от подложки адгезивом

Как результат можно с уверенностью заявить, что с увеличением размера поверхностных пор титановых образцов напряжение



отрыва адгезионных соединений возрастает до значения, составляющего 13,428 МПа по стандартной технологии. Указанное явление связано с оптимальным распределением адгезива по поверхности образца. Кроме этого весьма эффективен способ изменения морфологии поверхностного слоя пористой таблетки из титана с помощью токарной обработки (сглаживания), показал на образцах с фракцией порошка 0,4–0,63 мм повышенную адгезионную прочность соединения. Прочность возрастает на 6,403 МПа (на 38 %), что на 26,7 % выше, чем при использовании присадок для образцов с такой же фракцией порошка.

Однако способ применения промежуточного внутреннего клеевого слоя между цельнометаллической подложкой и пористым телом в соединении МПТМ с использованием акрилового адгезива типа DP 8805NS в нормальных условиях показал себя не целесообразным к использованию.



## 7. ОХРАНА ТРУДА

Санитарное благоустройство предприятий и их надлежащее содержание являются важнейшими мероприятиями в борьбе за высокую культуру труда. Оно предусматривает защиту работников от вредных веществ, шума и неблагоприятных метеорологических условий в помещении и т. д. Предприятия, их отдельные здания и сооружения с технологическими процессами, являющимися источниками вредных веществ или наличия таких процессов, необходимо отделять от жилой застройки санитарно-защитными зонами, требования к которым определяются Санитарными нормами, правилами и гигиеническими нормативами «Требования к организации санитарно-защитных зон предприятий, сооружений и иных объектов, являющихся объектами воздействия на здоровье человека и окружающую среду», утвержденными Министерством здравоохранения Республики Беларусь 15 мая 2014 г. № 35 [97, 98].

Ввиду того, что процессы склейки и подготовки поверхности связаны с использованием активных химических сред, соблюдение вопросов охраны труда на них является приоритетной задачей, как и на любом другом химическом производстве. Следовательно, в процессе склеивания присутствует широкий ряд вредных факторов, которые могут привести к различным видам заболеваний или снижению работоспособности, а так же опасных факторов, приводящих к профессиональному заболеванию, резкому ухудшению здоровья, отравлению или гибели работающего. Наиболее опасными являются хронические отравления, отличающиеся стойкостью симптомов и приводящие к профессиональным заболеваниям [99]. В качестве вредных факторов необходимо упомянуть фенольные компоненты, вызывающие аллергические реакции, а в качестве опасных факторов выступают взрывоопасные компоненты, применяемые для подготовки поверхности и компоненты самих клеев. В любом случае, основная масса процессов, протекающих в период склеивания связаны с использованием или выделением в воздушную среду летучих вредных веществ.

В соответствии с ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» [100] и СанПиН № 11-19-94 «Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе в рабочей зоне» [101] устанавливают требо-



вания к показателям микроклимата к допустимому содержанию вредных веществ в воздухе рабочей зоны, которой считается пространство, ограниченное по высоте двумя метрами над уровнем пола или площадки, на которых находятся места постоянного или непостоянного (временного) пребывания работников.

СанПиН № 11-19-94 [102] и ГОСТ 12.1.005-88 [103] устанавливают предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны - обязательные санитарные нормативы для использования их при проектировании производственных зданий, технологических процессов, оборудования и вентиляции, а также для текущего санитарного надзора. В качестве данных по ПДК принимается концентрация, которая при ежедневной работе (но не более 40 ч в неделю) в течение всего рабочего стажа (составляющего на данный момент 25 лет) не может вызвать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований, в процессе работы.

ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ «Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности» [104] подразделяет вредные вещества по степени воздействия на организм человека на четыре класса опасности:

- I – вещества чрезвычайно опасные ( $\text{ПДК} < 0,1 \text{ мг/м}^3$ );
- II – вещества высокоопасные ( $\text{ПДК} = 0,1 \dots 1,0 \text{ мг/м}^3$ );
- III – вещества умеренно опасные ( $\text{ПДК} = 1,1 \dots 10,0 \text{ мг/м}^3$ );
- IV – вещества малоопасные ( $\text{ПДК} > 10,0 \text{ мг/м}^3$ ).

Исходя из выше сказанного, опасность, как правило, представляют не сами адгезивы, а входящие в их состав компоненты, которые являются, как правило, веществами 3 и 4 класса опасности (таблица 7.1).



**Классы опасности и ПДК для наиболее часто встречающихся при работе с клеями вредных веществ [22]**

| Вещество                                    | ПДК,<br>мг/м <sup>3</sup> | Класс<br>опасности | Агрегатное<br>состояние |
|---|---------------------------|--------------------|-------------------------|
| Ацетон                                      | 200                       | 4                  | Пары                    |
| Бензин                                      | 100                       | 4                  | Пары                    |
| Бензол                                      | 5                         | 3                  | Пары                    |
| Бутилацетат                                 | 200                       | 4                  | Пары                    |
| Винилацетат                                 | 10                        | 3                  | Пары                    |
| Гексаметилендиамин<br>(эпоксидные смолы)    | 1                         | 2                  | Пары                    |
| Дибутилафталат                              | 0,5                       | 2                  | Пары + аэрозоль         |
| Димителанилин                               | 0,2                       | 3                  | Пары                    |
| Диэтилентриамин                             | 1                         | 2                  | Пары                    |
| Дифенилолпроан<br>(ди(гидроксифенил)пропан) | 5                         | 3                  | Аэрозоль                |
| Малеиновый ангидрид                         | 1                         | 2                  | Пары + аэрозоль         |
| Метилметакрилат                             | 10                        | 3                  | Пары                    |
| Метилэтилкетон                              | 200                       | 4                  | Пары                    |
| Стирол                                      | 5                         | 3                  | Пары                    |
| Толуилендиизоциант<br>(полиуретановые клеи) | 0,05                      | 1                  | Пары                    |
| Толуол (эпоксидные смолы)                   | 50                        | 4                  | Пары                    |
| Трихлорэтилен                               | 10                        | 3                  | Пары                    |
| Фенол                                       | 0,5                       | 2                  | Пары                    |
| Формальдегид (формалин)                     | 0,5                       | 2                  | Аэрозоль                |
| Фосфорная кислота<br>(фосфатные клеи)       | 1                         | 2                  | Аэрозоль                |
| Фталевый ангидрид<br>(эпоксидные смолы)     | 1                         | 2                  | Пары + аэрозоль         |
| Эпихлоргидрин<br>(эпоксидные смолы)         | 1                         | 2                  | Пары                    |
| Этилацетат                                  | 200                       | 4                  | Пары                    |

Кроме этого токсический эффект воздействия вредных веществ неодинаков в отношении пола. К одним ядам более чувствителен женский организм, к другим – мужской. СанПиН № 9-72 РБ 98 [105] приводит перечень 156 потенциально опасных химических веществ, влияющих на репродуктивную функцию. В этот перечень внесены



такие вещества, как ацетон, бензол, кадмий, ксилол, марганец, медь, пестициды, ртуть, свинец, стирол, фенол, формальдегид и др.

Характер и тяжесть выполняемой работы также влияют на восприимчивость организма к ядам. При тяжелой физической работе активизируются дыхание, кровообращение и потовыделение, что усиливает процесс проникновения ядовитых веществ в организм человека.

Воздействие токсических веществ зависит и от других производственных факторов, рассмотренных выше. Как правило, они увеличивают опасность воздействия из-за функциональных изменений в состоянии организма и возможном изменении токсических свойств самих веществ [99].

Министерством здравоохранения совместно с Министерством труда и социальной защиты Республики Беларусь определен перечень химических веществ повышенной опасности и токсичности, наличие которых в воздухе рабочей зоны считается вредным даже в том случае, когда их фактическая концентрация меньше ПДК. Этот перечень разработан на основе СанПиН №12-32-95 [106] и включает 186 наименований (например, окислы азота, аммиак, марганец и его соединения, медь, озон, оксид углерода, ртуть, серную кислоту, фенол, хлор, щелочи едкие и другие). В соответствии с постановлением правительства Республики Беларусь при работе с указанными веществами осуществляется бесплатное обеспечение работников молоком или равноценными пищевыми продуктами с целью профилактики профессиональных заболеваний.

При этом предельно допустимые концентрации вредных веществ, как правило, фигурирующих в клеевых составах представлены в приложении 6.

Для обеспечения здоровья работающих рабочие места должны быть оснащены местной и общеобменной вентиляцией, в соответствии с СНБ от 4 февраля 01-03, а также соответствовать микроклиматическим условиям [107] (температура воздуха; температура рабочих поверхностей; относительная влажность воздуха; скорость движения воздуха; интенсивность теплового облучения и тепловая нагрузка среды).

В зависимости от типов применяемых материалов персонал должен быть обеспечен средствами индивидуальной защиты (халаты женские рабочие ГОСТ 12.4.131-83 [108], халаты мужские рабо-



чие ГОСТ 12.4.132-83 [109], ГОСТ 14253-83 [110] полотна холсто-прошивные обтирочные и т. д.), предназначенных для выполнения конкретных видов работ.

В виду повышенной опасности, возникающей из-за возможных взрывов и пожаров материалов для подготовки поверхности и материалов – компонентов клеев, необходимо в соответствии с ППБ Беларуси 01-2014 г. [111] обеспечить производственные помещения, как системами пожарного оповещения, так и первичными средствами пожаротушения (асбестовое полотно, песок, углекислотный огнетушитель и т. д.). Кроме этого, каждое рабочее помещение должно быть оснащено аптечкой, дополнительно укомплектованной средствами оказания первой помощи при ожогах.



## **8. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

Отдельное место должно быть уделено аспектам охраны окружающей среды при использовании клеев и клеевых технологий. Для обеспечения экологической безопасности в Республике Беларусь изданы законы об обращении с отходами и другие нормативные акты. Как результат, актуальным является вопрос обезвреживания отходов производства и потребления. В связи с ростом производства количество образующихся токсичных отходов тоже возросло, как результат борьба с ними идет по следующим направлениям:

1. Переработка отходов в местах их образования.
2. Передача подходящих отходов для использования в качестве сырья, в другой сфере деятельности.
3. Централизованная переработка или захоронение опасных отходов.

Отходы, не представляющие экологической опасности, подлежат утилизации в общем порядке. Вещества, представляющие определенную экологическую опасность, захораниваются уполномоченными государственными органами на специальных полигонах.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Вильнав, Ж. Ж. Клеевые соединения / Ж. Ж. Вильнав; под ред. Г. В. Малышевой – М.: Техносфера, 2007. – 385 с.
2. Калиниченко, М. Л. Классификация клеящих материалов и их выбор для промышленного использования / М. Л. Калиниченко, В. М. Александров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 2(51). – С. 33–40.
3. Склеивание в машиностроении: справочник: справ. в 2 т. / Д. А. Аронович [и др.]; под общ. ред. Г. В. Малышевой. – М.: Наука и технологии, 2005. Т. 1. – 544 с.
4. Сайт Мировая экономика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ereport.ru>. – Дата доступа: 27.05.2020.
5. Клеи и технология склеивания деталей в машиностроении: учебн. пособие / В. Ф. Каблов [и др.]. – Старый Оскол: ТНТ, 2014. – 187 с.
6. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги: учеб. пособие / А. П. Петрова, Г. В. Малышева; под общ. ред. Е. Н. Каблова; Всерос. науч.-исслед. ин-т авиационных материалов. – М.: ВИАМ, 2017. – 472 с.
7. Шилдз, Дж. Клеящие материалы: справ. / Дж. Шилдз; под ред. В. П. Батизата – М.: Машиностроение, 1980. – 368 с.
8. Поциус, А. Клеи, адгезия, технология склеивания / А. Поциус; 3-ие изд. под ред. Г. В. Комарова – СПб.: ЦОП «Профессия», 2016. – 384 с.
9. Эпштейн, Г. Склеивание металлов / Г. Эпштейн; под общей ред. А. Т. Туманова – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1956. – 212 с.
10. Комаров, Г. В. Тенденции в технологиях изготовления соединений деталей из полимерных материалов и соединений с их участием / Г. В. Комаров // Полимерные материалы. – 2017. – № 2. – С. 37–43.
11. Ярмушевич, Г. А. Легкие полимерные материалы и облегченные конструкции для транспортостроения / Г. А. Ярмушевич // Полимерные материалы. – 2019. – № 2. – С. 16–20.
12. Wagner, G. Megatrend Kleben bestimmt die Zukunft / G. Wagner // Werkstoffe in der Fertung. – 2015. – № 5. – P. 8–9.



13. Официальный сайт компании 3М [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.3m.com>. – Дата доступа: 07.02.2017.

14. Физико-энциклопедический словарь: научн. однотомный энциклопедический словарь: 4-ое издание репр. / гл. ред. А. М. Прохоров [и др.]. – М.: Советская энциклопедия, 1983. – 944 с.

15. Клеи полимерные. Номенклатура показателей. ГОСТ 30535–97. – Введ. 01.01.2002. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2001. – 10 с.

16. Кардашов, Д. А. Конструкционные клеи / Д. А. Кардашов. – М.: Химия, 1976. – 504 с.

17. Кардашов, Д. А. Синтетические клеи / Д. А. Кардашов; изд. 3-ие., перераб. И доп. – М.: Химия, 1976. – 504 с.

18. Клеящие материалы. Герметики: справочник / А. П. Петрова, А. А. Донской. – СПб: Професионал, 2008. – 589 с.

19. Ковачич, Л. Склеивание металлов и пластмасс / Л. Ковачич; под ред. А. С. Фрейдина. – М.: Химия, 1985. – 241 с.

20. Клеи полимерные. Термины и определения: ГОСТ 28780–2004. – Введ. 01.01.2007. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь: НПРУП «БелГИСС», 2006. – 19 с.

21. Глебов, И. Т. Оборудование для склеивания древесины / И. Т. Глебов. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2010. 170 с.

22. Сайт: Все о клеях: виды, области применения, подбор марки и рекомендации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.okleyah.ru>. – Дата доступа: 15.02.2021 г.

23. Кардашов, Д. А. Полимерные клеи / Д. А. Кардашов, А. П. Петрова. – М.: Химия, 1983. – 48 с.

24. ПВХ-пластизоли: получение, свойства, применение / Г. В. Рыбачук [и др.] // Клеи. Герметики. Технологии. – 2006. – № 2. С. 2–6.

25. Правила пожарной безопасности Республики Беларусь: ППБ Беларуси 01-2016: введ. 01.05.2016. – Минск: Правила пожарной безопасности Республики Беларусь, 2016. – 201 с.

26. Калиниченко, М. Л. Технологические аспекты склеивания металлических элементов / М. Л. Калиниченко, В. М. Александров // Машиностроение: сб. науч. тр.: вып. 30 / Министерство образования Республики Беларусь, БНТУ; редкол.: В. К. Шелег (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 118–125.



27. Калиниченко, М. Л. Инновационное решение крепления цельнометаллических и пористых тел с помощью склеивания / М. Л. Калиниченко // *Веснік Гродз. дзярж. унів. імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка; рэдкал.: А.Д. Король (гл. ред.) [и др.]*. – Гродно: *Веснік Гродз. дзярж. унів. імя Янкі Купалы*, 2019. – Т. 9. – № 2. – С. 13–26.

28. Калиниченко, М. Л. Новые методы крепления пористых и компактных материалов / М. Л. Калиниченко, В. А. Калиниченко // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 3 кн. / НАН Беларуси, ФТИ; редкол.: С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]*. – Минск, 2015. – Кн. 2 : Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. – С. 72–79.

29. Способ подготовки поверхности пористых материалов: заявка ВУ а20200304 / М. Л. Калиниченко, Л. П. Долгий, В. А. Калиниченко. Опубл. 30.10.2020.

30. Калиниченко, М. Л. Анализ современных композиционных материалов, применяемых при изготовлении модельных комплектов для мелкосерийного литейного производства, полученных с помощью технологии склеивания / М. Л. Калиниченко, Л. П. Долгий, В. А. Калиниченко // *Литье и металлургия*. 2020. – № 3. С. 15–22.

31. Александров, В. М. Анализ использования порошков титана в мировой практике для получения компактов и пористых материалов / В. М. Александров, М. Л. Калиниченко // *Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка: сб. докладов 9-ого Международного симпозиума, Минск, 8–10 апреля 2015 г. / Инст. порошковой металлургии им. ак. О. В. Романа; Минск: Бел. навука, Ч. 1. 2015. – С. 258–267.*

32. Bram, M. Pulvermetallurgische Herstellung von porösen Titan und NiTi-Legierung für biomedizinische Anwendungen / M. Bram // *Forschungszentrum Jülich GmbH*. – 2012. – Vol. 171. – 259 p.

33. Buchkremer, H.P. Membranen in der Energietechnik / H. P. Buchkremer, D. Stoeber // *Forschungszentrum Juelich GmbH*. – 2014. – 155 p.

34. Тумилович, М. В. Пористые порошковые материалы и изделия на их основе для защиты здоровья человека и охраны окружающей среды: получение, свойства, применение / М. В. Тумилович [и др.]. – Минск: *Беларус. Навука*, 2010. – 365 с.



35. Materials Science and Engineering – Forging Stronger Links to Users, NMAB, National Academy Press pub NMAB-492, Washington D.C., 1999.

36. F. H. Froes, D. Eylon, and H. Bomberger (editors), Titanium Technology: Present Status and Future Trends, TDA, Dayton, Ohio, 1985.

37. F. H. Froes, Yau Te-Lin, and H. G. Weidenger, Titanium, Zirconium and Hafnium, Materials Science and Technology - Structure and Properties of Nonferrous Alloys, K. H. Matucha, VCH Weinheim, (editors), FRG, 401, 1996.

38. Важнова, А. И. исследование уплотняемости композиционных гранул с удаляемой сердцевинной при получении высокопористых материалов на основе титана / А. И. Важнова, О. Л. Сморгы, А. И. Марукович // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 14-й Международной научно-технической конференции, Минск, 9–11 сентября 2020 г. / Инст. порошковой металлургии им. ак. О. В. Романа; Минск: Бел. наука. 2020. – С. 89–93.

39. Влияние порошков губчатого титана в составе шихты из сферических порошков титана на проницаемость и прочность получаемых электроимпульсным спеканием пористых проницаемых материалов / В. В. Савич [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 14-й Международной научно-технической конференции, Минск, 9–11 сентября 2020 г. / Инст. порошковой металлургии им. ак. О. В. Романа; Минск: Бел. наука. 2020. – С. 292–295.

40. Сайт компании ООО «АтакамаСТ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.germstroy.ru>. – Дата доступа: 13.12.2020 г.

41. Калиниченко, М. Л. Влияние дробеструйной обработки и водной среды на адгезионную прочность различных соединений из металлов / М. Л. Калиниченко, А. Г. Слуцкий, В. А. Калиниченко // Машиностроение: сб. науч. тр.: вып. 31 / Министерство образования Республики Беларусь, БНТУ; редкол.: В. К. Шелег (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2018. – С. 48–53.

42. Сайт ООО «Алмитех» официальный дистрибьютор 3M™ в Республике Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://almitech.by/>. – Дата доступа: 07.10.2019.



43. Калиниченко, М. Л. Аспекты надежности промышленных клеевых соединений / М. Л. Калиниченко, В. М. Александров // Машиностроение: сб. науч. тр.: вып. 30 / Министерство образования Республики Беларусь, БНТУ; редкол.: В. К. Шелег (гл. ред.) [и др.] – Минск, 2017. – С. 104–110.

44. Калиниченко, М. Л. Контроль качества клеевых соединений / М. Л. Калиниченко, В. М. Александров // Машиностроение: сб. науч. тр.: вып. 30 / Министерство образования Республики Беларусь, БНТУ; редкол.: В. К. Шелег (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 110–118.

45. Фрейдин, А. С. Прочность и долговечность клеевых соединений / А. С. Фрейдин. – М.: Химия, 1971. – 256 с.

46. Малышева, Г. В. Оптимизация выбора параметров, характеризующих состояние соединения объекта, при решении задач надежности / Г. В. Малышева, И. К. Романова // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2015. – № 6. – С. 33–38.

47. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб. пособие / Н. И. Баурова, В. А. Зорин. – М.: МАДИ, 2016. – 264 с.

48. Басин, В. Е. Адгезионная прочность / В. Е. Басин. – М.: Химия, 1981. – 208 с.

49. Метод и приспособление для испытаний на сдвиг многомерных соединений из композиций любых материалов, обладающих определяемым коэффициентом жесткости: пат. ЕАПО 036595 / М. Л. Калиниченко, В. А. Калиниченко, В. А. Кукареко, А. Е. Зеленей. – Опубл. 25.10.2017.

50. Петрова, А. П. Методы испытания клеевых соединений / А. П. Петрова // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2014. – № 3. – С. 26–28.

51. Яковлев, Н. О. Сравнение нормативных баз различных стран по испытанию клеевых соединений материалов / Н. О. Яковлев, В. С. Ерасов, А. П. Петрова // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2014. – № 7. – С. 2–8.

52. Яковлев, Н. О. Сравнение нормативных баз различных стран по испытанию клеевых соединений материалов / Н. О. Яковлев, В. С. Ерасов, А. П. Петрова // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2015. – № 10. – С. 7–14.



53. Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге методом испытания короткой балки: ГОСТ 32659-2014. – Введ. 28.03.14. – Москва: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

54. Система внешнего армирования из полимерных композитов. Метод определения межслойной прочности на сдвиг. ГОСТ P57067-2016. – Введ. 13.09.16. – Москва: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии: Стандартинформ, 2016. – 19 с.

55. Инновационные методы тестирования для клеевых соединений пластмасс / Э. Краус [и др.] // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2015. – № 9. – С. 19–24.

56. Клеи. Метод определения прочности при сдвиге. ГОСТ 14759-69. – Введ. 01.01.1970. – Москва: Государственный стандарт Союза ССР: ИПК Издательство стандартов, 1999. – 13 с.

57. Клеи. Метод определения прочности при отрыве. ГОСТ 14760-69. – Введ. 01.01.1970. – Москва: Государственный стандарт Союза ССР: ИПК Издательство стандартов, 1986. – 6 с.

58. Петрова, А. П. Методы испытания клеевых соединений / А. П. Петрова // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2013. – № 12. – С. 25–30.

59. Калиниченко, В. А. Новые методы крепления пористых и компактных материалов на основе титана / В. А. Калиниченко, М. Л. Калиниченко, А. Н. Григорчик // Веснік Гродз. дзярж. унів. імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка; редкол.: А. Д. Король (гл. ред.) [и др.]. – Гродно: Веснік Гродз. дзярж. унів. імя Янкі Купалы, 2015. – № 1 (198). – С. 24–30.

60. Александров, В. М. Перспективные технологии получения компактно-пористых материалов / В. М. Александров, С. Г. Бохан, М. Л. Калиниченко // Пористые проницаемые материалы: технологии и изделия на их основе: сб. докладов 6-ого Международного симпозиума, Минск-Раков, 19–20 октября 2017 г. / Инст. порошковой металлургии им. ак. О. В. Романа; Минск: Бел. наука. 2017. – С. 495–509.

61. Модель для проведения гидравлических и/или пневматических испытаний для замкнутых конструкций, работающих под давлением: заявка ВУ а20190033 / М. Л. Калиниченко, В. А. Калиниченко, Ю. К. Кривошеев, А. Е. Зелезей. – Опубл. 08.02.2019.



62. Калиниченко, М. Л. Инновационное решение крепления цельнометаллических и пористых тел с помощью склеивания / М. Л. Калиниченко // Веснік Гродз. дзярж. унів. імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка; редкол.: А. Д. Король (гл. ред.) [и др.]. – Гродно: Веснік Гродз. дзярж. унів. імя Янкі Купалы, 2019. – Т. 9. – № 2. – С. 13–26.

63. Нормы и правила по обеспечению технической, промышленной, ядерной и радиационной безопасности. Постановление «Об утверждении Правил по обеспечению промышленной безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением, утвержденные постановлением МЧС Республики Беларусь»: Пос. от 28.01.2016 № 7 (33130): – Введ. 01.03.2016. – Национальный фонд технических нормативных правовых актов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.tnpra.by/#!/FileText/470834/346357> – Дата доступа: 07.09.2017.

64. Затуловский, С. С. Литые композиционные материалы / С. С. Затуловский, В. Я. Кезик, Р. К. Иванова. – Киев: Техника, 1990. – 240 с.

65. Абрамов, Г. Г. Справочник молодого литейщика / Г. Г. Абрамов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1983. – 207 с.

66. Технология машиностроения. Штамповое и литейное производство: учебник для СПО / В. А. Рогов, Г. Г. Позняк. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 330 с.

67. Граблев, А. Н. Машины и технология литейного производства. Введение в специальность: учеб. пособие / А. Н. Граблев, А. Н. Болдин. – М.: МГИУ, 2010 – 228 с.

68. Никифоров, В. М. Технология металлов и других конструкционных материалов: учебник для техникумов / В. М. Никифоров. – 10-е изд., стер. – СПб.: Политехника, 2015. – 382 с.

69. Вальтер, А. М. Основы литейного производства: учебник / А. И. Вальтер, А. А. Протопопов. – Москва; Вологда: Инфа-Инженерия, 2019. – 332 с.

70. Конспект лекций по курсу «Модельное производство» (для студентов дневной, заочной дистанционной форм обучения, а также самостоятельного изучения дисциплины) / сост. Сосновцев М. Н. – Мариуполь: ПГТУ. – 2009. – 138 с.

71. Клебанер, В. Я. Экономика и организация модельного производства / В. Я. Клебанер. – Л.: Машиностроение, 1968. – 160 с.



72. Дмитриевич, А. М. Справочник литейщика / А. М. Дмитриевич. – Минск: Выш. шк., 1989. – 391 с.

73. Справочник литейщика / С. А. Алексеев [и др.]; под общ. ред. Н. Н. Рубцова. – М.: МАШГИЗ, 1962. – 524 с.

74. Комплекты модельные деревянные. Технические условия: ГОСТ 13354-91: введ. 01.01.1993г. – Москва: Межгосударственный стандарт: ИПК Издательство стандартов. 2004. – 10 с.

75. Оспенникова, О. Г. Направления развития изготовления модельных композиций для лопаток и других деталей ГТД / О. Г. Оспенникова, И. Р. Асланян // Литейное производство. 2018. – № 3. С. 20–24.

76. Влияние технико-экономических показателей деревообрабатывающего модельного производства на методологию автоматизации его технической подготовки / В. И. Малыгин [и др.] // Лесной журнал. 2010. – № 2. – С. 108–115.

77. Нелюб, И. А. Особенности и преимущества применения современных пластиополимерных материалов для изготовления модельной оснастки / И. А. Нелюб, П. А. Кушель, С. Л. Ровин // Литье и металлургия. 2010. – Т. 58. – № 4. – С. 36–39.

78. Янович, А. Полимерные материалы RAMPF Tooling для изготовления литейной оснастки / А. Янович, А. Кравец // Литейное производство. 2013. – № 8. – С. 9–10.

79. Янович, А. Модельный пластик RAKU-TOOL для изготовления литейно-стержневой оснастки / А. Янович, П. Костяев // Литейное производство. 2013. – № 11. – С. 34–36.

80. Янович, А. Объемные блоки производства RAMPF Tooling для изготовления литейной оснастки / А. Янович, П. Костяев // Литейное производство. 2013. – № 12. – С. 26–28.

81. Современные способы создания модельных комплектов для литья / М. Л. Калиниченко [и др.] // Литье и металлургия. – 2018. – Т. 91. – № 3. – С. 125–130.

82. Майоров, А. Пластик – перспективный материал для модельной оснастки / А. Майоров // Литейщик России. 2018. – № 9. – С. 12–18.

83. Защита древесины. ГОСТ 20022.2-80. – Введ. 01.07.1981. – Москва: Государственный стандарт Союза ССР: ИПК Издательство стандартов, 1981. – 22 с.

84. Боровиков, А. М. Справочник по древесине / А. М. Боровиков, Б. Н. Уголев. – М.: Лесн. пром-сть., 1989. – 296 с.



85. Сталь углеродистая качественная конструкционная. Марки и общие требования. ГОСТ 1050-60. – Введ. 01.01.1961. – Москва: Государственный стандарт Союза ССР: ИПК Издательство стандартов, 1973. – 12 с.

86. Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. ГОСТ 5632-72. – Введ. 01.01.1975. – Москва: Государственный стандарт Союза ССР: ИПК Издательство стандартов, 1995. – 61 с.

87. Андрушевич, А. А. Аддитивные технологии для производства композиционных материалов / А. А. Андрушевич, В. А. Калининченко // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь: сб. докладов Международного научно-практического симпозиума, Минск, 30 сентября 2020 г. / Инст. порошковой металлургии им. ак. О. В. Романа; Минск: Бел. наука. 2020. – С. 16–22.

88. Чижик, С. А. Перспективы развития технологических комплексов аддитивного синтеза композиционных материалов и формообразования изделий / С. А. Чижик, М. Л. Хейфец, С. А. Филатов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – № 4. – С. 68–74.

89. Ковтунов, А. И. Слоистые композиционные материалы: электронное учебное пособие / А. И. Ковтунов, С. В. Мямин, Т. В. Семистенова. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017. – 75 с.

90. Материаловедение: учебник для технических вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.]. – М.: Из-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2001. – 648 с.

91. Композиционные материалы: справочник / В. В. Васильев [и др.]; под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

92. Карпов, Я. С. Композиционные материалы: компоненты, структура, переработка в изделия / Я. С. Карпов, О. В. Ивановская. – Харьков: Национальный аэрокосмический ун-т. 2001. – 153 с.

93. Батаев, А. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: учеб. пособие / А. А. Батаев, В. А. Батаев. – М.: Университетская книга; Логос, 2002. – 400 с.

94. Ильющенко, А. Ф. Металлургические аддитивные технологии в Беларуси. Опыт комплексного решения проблем / А. Ф. Ильющенко // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: ма-



териалы 14-й Международной научно-технической конференции, Минск, 9–11 сентября 2020 г. / Инст. порошковой металлургии им. ак. О. В. Романа; Минск: Бел. наука. 2020. – С. 15–27.

95. Луцкая, И. К. Перспективы и опыт использования аддитивных технологий в практической стоматологии / И. К. Луцкая, П. Е. Милько, И. Е. Назаров // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь: сб. докладов Международного научно-практического симпозиума, Минск, 30 сентября 2020 г. / Инст. порошковой металлургии им. ак. О. В. Романа; Минск: Бел. наука, 2020. – С. 97–101.

96. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб. пособие / Н. И. Баурова, В. А. Зорин. – М.: МАДИ, 2016. – 264 с.

97. Лазаренков, А. М. Охрана труда: учебник для студентов высших учебных заведений / А. М. Лазаренков, В. А. Калиниченко. – Минск: ИВЦ Минфина, 2010. – 464 с.

98. Санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы «Требования к организации санитарно-защитных зон предприятий, сооружений и иных объектов, являющихся объектами воздействия на здоровье человека и окружающую среду», утвержденными Министерством здравоохранения Республики Беларусь: Пос. от 15.05.2014 г. № 35 (8/28781): – Введ. 03.07.2014. – Национальный правовой портал Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pravo.by/> – Дата доступа: 30.01.2021.

99. Охрана труда: лабораторный практикум для студентов всех специальностей / сост.: А. М. Лазаренков [и др.]. – Минск: БНТУ, 2008. – 152 с.

100. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. – Введ. 01.01.1989. – Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2008. – 50 с.

101. Санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы «Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе в рабочей зоне», утвержденные Министерством здравоохранения Республики Беларусь: Пос. от 11.10.2017 г. № 92 (8/32492): – Введ. 09.11.2017. – Национальный правовой портал Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://pravo.by.](http://pravo.by/) – Дата доступа: 06.02.2021.



102. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны: ГН 2.2.5.12-32-РБ 2003: Доп. 3 к Прил. 1 СанПиН № 11-19-94: Введ. 01.07.04 // Сборник официальных документов по медицине труда и производственной санитарии. Ч. XIII. – Минск. 2004. – С. 197–209.

103. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны : ГОСТ 12.1.005-88. – Взамен ГОСТ 12.1.005-76; введ. 01.01.89. – Москва, 2009. – 76 с.

104. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности : ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Введ. 01.01.1977. – Москва. 2009. – 5 с.

105. Гигиенические требования к условиям труда женщин : СанПиН № 9-72 РБ 98 // Сборник официальных документов по медицине труда и производственной санитарии. Ч. VI. – Минск. 1999. – С. 203–243.

106. Перечень аварийно опасных химических соединений (сильнодействующих ядовитых веществ); введ. 01.01.96 до 01.01.99 СанПиН № 12-32-95 // Сборник официальных документов по медицине труда и производственной санитарии. Ч. III. – Минск. 1997. – С. 35–44.

107. Санитарные нормы и правила «Требования к микроклимату рабочих мест в производственных и офисных помещениях», утвержденные Министерством здравоохранения Республики Беларусь: Пос. от 30.04.2013 № 3 (8/27576): – Введ. 14.06.2013. – Национальный правовой портал Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pravo.by/>. – Дата доступа: 26.01.2021.

108. Халаты женские. Технические условия. ГОСТ 12.4.131-83. – Введ. 01.01.1989. – Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2005. – 11 с.

109. Халаты мужские. Технические условия. ГОСТ 12.4.132-83. – Введ. 01.01.1989. – Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2005. – 11 с.

110. Полотна холстопршивные обтирочные. Технические условия. ГОСТ 14253-83. – Введ. 01.01.1985. – Москва: ИПК «Издательство стандартов», 2003. – 5 с.

111. Правила пожарной безопасности Республики Беларусь. ППБ Беларуси 01-2014 г. – Введ. 01.07.2014. – Минск: УП «Промбытсервис», 2014. – 211 с.



**Метод подготовки поверхности ряда металлов с помощью трихлорэтилена [40]**

| Склеиваемый материал                | Метод обработки поверхности   | Примечание   |
|-------------------------------------|---|--|
| 1<br>Алюминий и алюминийевые сплавы | 2<br>1. Придать поверхности шероховатость – обдуть абразивным порошком или провести мокрую пескоструйную обработку, или зашкурить наждачной шкуркой № 100*, а затем обезжирить растворителем<br>2. Травить в течение 30 мин при 60...65 °С в растворе, мас. ч.:<br>– серная кислота (93 %, плотность 1,84) – 27,0;<br>– бихромат натрия (кристаллический) – 7,5;<br>– вода (дистиллированная) – 2,5;<br>Промыть водопроводной водой, затем прополоскать в дистиллированной воде и просушить на воздухе<br>3. Погрузить на 5 мин при 65 °С в раствор, мас. ч.:<br>– метасиликат натрия – 1,0;<br>– очищающее средство (не диссоциирующее) – 0,1;<br>– вода (дистиллированная) – 40,0;<br>Промыть водопроводной водой, прополоскать в дистиллированной воде и просушить на воздухе<br>4. Погрузить на 10 мин при 77±6 °С в раствор, мас. ч.:<br>– метасиликат натрия –30;<br>– едкий натр – 1,5;<br>– пирофосфат натрия – 1,5;<br>– очищающее средство – 0,5;<br>– вода (дистиллированная) – 28,0 | 3<br>Предназначен для клеваемых соединений общего назначения. Обдувка стальной дробью не рекомендуется<br><br>Применяется для получения максимальной прочности склеивания. При промывке и сушке температура не должна превышать 65 °С<br><br>Пригоден для обработки фольги. При промывке и сушке температура не должна превышать 65 °С<br><br>При сушке и промывке температура не должна превышать 65 °С. Применяются также растворы с иными соотношениями бихромата натрия, серной кислоты и дистиллированной воды - 7:2:17; 3:5:15; 2:2:6; 1:2:7. Не реком. для обработки фольги |



| 1  | 2  | 3  |
|--|--|--|
| <p>Алюминий и алюминиевые сплавы</p>           | <p>Промыть в воде с температурой ниже 65 °С и травить 10 мин при 68 °С ± 3 °С в растворе, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– бихромат натрия – 1;</li> <li>– серная кислота (93 %, плотность 1,84) – 10;</li> <li>– вода (дистиллированная) – 30.</li> </ul> <p>Промыть водопроводной водой, затем прополоскать в дистиллированной воде и просушить на воздухе</p> <p>5. Травить в течение 3 с при 20 °С в растворе, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– азотная кислота (67 %, плотность 1,41) – 3;</li> <li>– плавиковая кислота (48 %) – 1.</li> </ul> <p>Промыть холодной, затем горячей водой, прополоскать в дистиллированной воде и просушить на воздухе</p> | <p>Предназначен для литевых сплавов с высоким содержанием меди. При промывке и сушке температура не должна превышать 65 °С</p> |
| Бериллий                                       | <p>Погрузить на 5...10 мин при 20 °С в раствор, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– едкий натр – 20...30;</li> <li>– вода (дистиллированная) – 170...180.</li> </ul> <p>Промыть водопроводной водой, прополоскать в дистиллированной воде и просушить в печи 10 мин при температуре 121...177 °С</p>   |  |
| <p>Бронза латунь (см. также медные сплавы)</p> | <p>Травить 5 мин при 20 °С в растворе, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– окись цинка – 20;</li> <li>– серная кислота (93 %, плотность 1,84) – 460;</li> <li>– азотная кислота (67 %, плотность 1,41) – 360.</li> </ul> <p>Промыть в воде с температурой ниже 65 °С, повторно травить в кислотном растворе 5 мин при 49 °С. Промыть водой, прополоскать в дистилл. воде и просушить на воздухе</p>  | <p>При промывке и сушке температура не должна превышать 65 °С</p>  |



Приложение 1 (продолжение)

| 1                    | 2   | 3  |
|----------------------|---|--|
| Кадмий               | <p>1. Придать поверхности шероховатость – обдуть абразивным порошком или подвергнуть мокрой пескоструйной обработке, или зачистить наждачной шкуркой № 100, а затем обезжирить растворителем</p> <p>2. Никелировать или серебрить гальваническим методом</p>  | <p>Пригоден для клеевых соединений общего назначения</p> <p>Для обеспечения максимальной прочности склеивания</p>  |
| Хром                 | <p>1. Придать поверхности шероховатость – обдуть абразивным порошком или подвергнуть мокрой пескоструйной обработке, или зачистить наждачной шкуркой № 100, а затем обезжирить растворителем</p> <p>2. Травить 5...10 мин при 90...95 °С в растворе, мас. ч.:<br/>– соляная кислота (37 %) – 17<br/>Промыть холодной, затем горячей водой, прополоскать в дистиллированной воде и просушить горячим воздухом</p>  | <p>Пригоден для клеевых соединений общего назначения</p> <p>Для обеспечения максимальной прочности склеивания</p>  |
| Медь и медные сплавы | <p>1. Придать поверхности шероховатость – опескоструить или зачистить проволочными щетками или наждачной шкуркой зернистостью 100, затем обезжирить в парах растворителя или жидким растворителем</p> <p>2. Травить 10 мин при 66 °С в растворе, мас. ч.:<br/>– сульфит трехвалентного железа – 1,0;<br/>– серная кислота (95 %) 0,75;<br/>– вода – 85.<br/>Промыть в воде при 20°С и травить в холодном растворе, мас. ч.: бихромат натрия – 5; серная кислота (95 %) – 10</p> | <p>Пригоден для клеевых соединений общего назначения. Для фольги использовать наждачную шкурку зернистостью 320</p> <p>Для обеспечения максимальной прочности склеивания. Пригоден для лагуни и бронзы</p> |



| 1                         | 2   | 3  |
|---------------------------|---|--|
| Медь и медные сплавы      | <p>Прополоскать в воде, окунуть в аммиак (плотность 0,88) и промыть в водопроводной воде.</p> <p>Прополоскать в дистиллированной воде и просушить теплым воздухом</p> <p>3. Травить 1...2 мин при 20°C в растворе, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– хлорное железо (раствор 42 мас. %) – 0,75;</li> <li>– азотная кислота (плотность 1,42) – 1,5;</li> <li>– вода – 10.</li> </ul> <p>Промыть холодной водой, прополоскать в дистиллированной воде и просушить в струе воздуха при 20 °С</p> | <p>Для обеспечения максимальной прочности при склеивании эпоксидными клеями рекомендуется наносить адгезионный грунт – смолу Х83/65.</p> <p>Применяются также растворы с иными соотношениями хлорного железа, азотной кислоты и воды - 1:1:10; 1:2:7; 2:4:27; 1:2:13</p> |
| Германий                  | <p>4. Травить 30 с при 20°C в растворе, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– персульфат аммония – 1;</li> <li>– вода – 4.</li> </ul> <p>Промыть холодной водой, прополоскать в дистиллированной воде и просушить в струе воздуха при 20 °С</p> <p>Придать поверхности шероховатость – обдуть абразивным порошком или подвергнуть мокрой пескоструйной обработке, а затем обезжирить растворителем</p>  | <p>Взамен предыдущего травящего раствора для случаев, когда необходима быстрая обработки</p>   |
| Золото                    | <p>Слегка зашкурить мелкозернистой наждачной шкуркой, а затем обезжирить в парах растворителя или жидким растворителем</p>  | <p>–</p>   |
| Железо                    | <p>См. Сталь низкоуглеродистая</p>  | <p>–</p>   |
| Свинец и свинцовые припои | <p>Придать поверхности шероховатость – обдуть абразивным порошком или подвергнуть мокрой пескоструйной обработке, затем обезжирить растворителем</p>  | <p>–</p>   |



Приложение 1 (продолжение)

| 1                         | 2  | 3   |
|---------------------------|--|---|
| Магний и магниевые сплавы | <p>1. Зачистить наждачной шкуркой зернистостью 100 и обезжирить растворителем</p> <p>2. Погрузить на 5 мин при 70...75X в раствор, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– промыть в холодной воде и травить 5 мин при 20 °С в растворе, мас. ч.:</li> <li>– сульфат натрия</li> </ul> <p>Промыть в холодной воде, прополоскать в дистиллированной воде и просушить на воздухе при 40 °С</p> | <p>Клей наносить немедленно по окончании очистки</p> <p>Применяется для обеспечения максимальной прочности склеивания, клей следует наносить сразу же</p> |
|                           | <p>1. Зачистить наждачной шкуркой зернистостью 100 и обезжирить растворителем</p>  | <p>Клей наносить немедленно по окончании очистки</p>  |
|                           | <p>2. Погрузить на 5 мин при 70...75X в раствор, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– промыть в холодной воде и травить 5 мин при 20 °С в растворе, мас. ч.:</li> <li>– сульфат натрия</li> </ul> <p>Промыть в хол. воде, пропол. в дистиллированной воде и просушить на воздухе при 40 °С</p>  | <p>Применяется для обеспечения максимальной прочности склеивания, клей следует наносить сразу же</p>  |
|                           | <p>3. Погрузить на 3 мин при 20 °С в раствор, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– хромовый ангидрид – 16,6;</li> <li>– нитрат натрия – 20;</li> <li>– уксусная кислота – 105;</li> <li>– вода – 100.</li> </ul>  | <p>Взаимозаменяем с раствором по методу 2</p>   |



| 1                                | 2   | 3 |
|----------------------------------|---|---|
| <p>Магний и магниевые сплавы</p> | <p>Промыть в хол. воде, пропол. в дистиллированной воде и просушить на воздухе при 40 °С</p> <p>4. Обезжирить в парах растворителя и погрузить на 10 мин при 70 °С в раствор едкого натра (63 г/л). Прополоскать в дистиллированной воде и погрузить на 5 мин при 55 °С в раствор, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– хромовый ангидрид – 13,8;</li> <li>– нитрат кальция – 2.</li> </ul> <p>Прополоскать в дистиллированной воде и погрузить на 3 мин при 55 °С в раствор, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– хромовый ангидрид – 10;</li> <li>– сульфат натрия – 0,5.</li> <li>– прополоскать в дистиллированной воде и просушить на воздухе при 60 °С</li> </ul> <p>5. Травить 30 мин при 60...70Х в растворе, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– бихромат натрия – 10;</li> <li>– сульфат магния – 5;</li> <li>– сульфат марганца – 5;</li> <li>– вода – 80.</li> </ul> <p>Прополоскать в обычной, затем в дистиллированной воде, просушить на воздухе</p> <p>6. Обезжирить растворителем и погрузить на 20 мин в кипящий раствор следующего состава, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– бихромат аммония – 1,5;</li> </ul> |   |



| 1                                | 2   | 3  |
|----------------------------------|---|--|
| <p>Магний и магниевые сплавы</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– сульфат аммония – 3;</li> <li>– бихромат натрия – 1,5;</li> <li>– аммиак – 0,3;</li> <li>– вода – 93.</li> </ul> <p>Промыть теплой водой, затем прополоскать в дистиллированной воде и просушить</p>   |  |
|                                  | <p>7. Анодировать в растворе кислого фтористого аммония (100 г/л) с температурой до 30 °С при напряжении переменного тока 90...120 В до тех пор, пока плотность тока станет ниже 0,45 А/м<sup>2</sup> поверхности одного электрода. Промыть в воде и просушить</p>  |  |
|                                  | <p>8. Травить 10...15 с при 20 °С в растворе, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– серная кислота (93 %, плотность 1,84) – 1;</li> <li>– азотная кислота (67 %, плотность 1,41) – 2;</li> <li>– вода – 45.</li> </ul> <p>Прополоскать в холодной воде и протравить в растворе с хромовой кислотой либо по методу 2, либо по методу 3</p> | <p>Хороший травящий раствор для плохо окисленных или потускневших поверхностей, загрязненных пригоревшей смазкой, используемой при горячей штамповке или волочении</p> |
|                                  | <p>9. Обезжирить в парах растворителя а анодировать при 20...30 °С с следующим раствором, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– едкий калий – 12;</li> <li>– алюминий (металл) – 0,75;</li> <li>– фторид калия (безводный) – 3,4;</li> <li>– тринатрийфосфат – 3,4;</li> <li>– перманганат калия – 1,5.</li> </ul>                        |  |



| 1                         | 2   | 3  |
|---------------------------|---|--|
| Магний и магниевые сплавы | <p>– вода – 80.</p> <p>Использовать переменный ток напряжением до 85 В при плотности тока 1.1...1.4 А/м<sup>2</sup> поверхности одного электрода. Промыть в холодной дистиллированной воде и просушить на воздухе</p>   |  |
| Никель                    | <p>1. Зашкурить наждачной шкуркой зернистостью 100, затем обезжирить жидким растворителем</p> <p>2. Травить 5 с при 20 °С в азотной кислоте (67 %, плотность 1,41). Промыть в холодной, затем в горячей воде. Прополоскать в дистилл. воде и просушить на воздухе при 40 °С</p>   | Для клеевых соединений общего назначения   |
| Платина                   | Слегка зашкурить наждачной шкуркой зернистостью 320, обезжирить жидким растворителем  |  |
| Серебро                   | Зашкурить наждачной шкуркой зернистостью 320, затем обезжирить  |  |
| Стали коррозионностойкие  | <p>1. Придать поверхности шероховатость – зачистить наждачной шкуркой зернистостью 320 или обдуть абразивным порошок, или провести мокрую пескоструйную обработку, затем обезжирить растворителем</p> <p>2. Погрузить на 10 мин при 70...80 °С в раствор, мас ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– метасиликат натрия – 6,4;</li> <li>– пирофосфат натрия – 3,2;</li> <li>– едкий натр – 3,2;</li> <li>– вода – 32,1.</li> </ul> <p>Промыть в холодной, затем в дистиллированной воде. Просушить на воздухе при 93 °С</p> | Обработка в щелочной ванне для очистки поверхности, используете для клеевых соединений общего назначения |

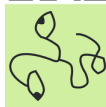


| 1   | 2   | 3  |
|---|---|--|
| <p>Стали низкоуглеродистые, железо черные металлы (кроме корр. стойких)</p> | <p>1. Придать поверхности шероховатость обдувкой абразивным порошком или мокрой пескоструйной обработкой, затем обезжирить растворителем, не содержащим воды<br/>2. Зачистить наждачной шкуркой зернистостью 100, затем обезжирить растворителем</p>  | <p>Предпочтительнее применять ксилол или толуол, чем ацетон или другие кетоны, так как они могут содержать влагу в количествах, достаточных для ржавления. Для клеевых соединений общего назначения. При пескоструйной обработке следует использовать песок зернистостью 60...70 меш; давление 60 Н/см<sup>2</sup></p> |
|   | <p>3. Травить 5...10 мин при 20 °С в растворе, мас. ч.:<br/>– соляная кислота (37 %) – 1;<br/>– вода – 1<br/>Промыть холодной водой, прополоскать в дистиллированной воде и просушить теплым воздухом 10 мин при 93 °С</p>  | <p>Склеивание следует производить немедленно по окончании обработки, так как черные металлы ржавеют. Если склеивание нужно выполнять не сразу, следует применять абразивную обработку</p>  |
|   | <p>4. Травить 10 мин при 60 °С в растворе, мас. ч.:<br/>– ортофосфорная кислота(88 %) – 1;<br/>– этиловый спирт (денатурированный) – 2<br/>Удалить нейлоновой кистью черный налет при промывке в проточной воде. Прополоскать в дистиллированной воде и просушить с нагревом 1 ч при 120 °С</p> | <p>Применяется для обеспечения максимальной прочности клеевых соединений. Можно также взамен нагрева при 120 °С использовать электролитическое травление в серной кислоте(до появления на обрабатываемой поверхности газовых пузырьков)</p>  |
|   | <p>5. Погрузить на 5 мин при 60...65 °С в раствор, мас. ч.:<br/>– ортосиликат натрия – 30;<br/>– алкиларилсульфонат натрия – 3;<br/>– вода – 967.<br/>Промыть в горячей дистиллированной воде и просушить в нагревательной печи при 100...105 °С</p>  | <p>Для клеевых соединений общего назначения</p>  |



Приложение 1 (продолжение)

| 1   | 2   | 3  |
|---|---|--|
| <p>Стали низкоуглеродистые, железо черные металлы (кроме коррозионно-стойких)</p> | <p>6. Травить 10 мин при 71...77 °С в растворе, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– бихромат натрия – 4;</li> <li>– серная кислота (93 %, ρ = 1,84) – 10;</li> <li>– вода – 30.</li> </ul> <p>Прополоскать в обыкновенной, затем в дистиллированной воде и просушить при 93 °С</p>                            | <p>Можно применять раствор с соотношением бихромата, кислоты и воды 2:5:15 (травление 10 мин при ~75 °С)</p>     |
| <p>Олово</p>  | <p>Слегка зачистить тонкой наждачной шкуркой (зернистостью 320) и обезжирить жидким растворителем или паром</p>   | <p>–</p>   |
| <p>Титан и титановые сплавы</p>   | <p>1. Придать поверхности шероховатость - обдуть абразивным порошком или подвергнуть мокрой пескоструйной обработке либо зачистить наждачной шкуркой с зернистостью 100. Затем обезжирить растворителем</p>   | <p>Для клеевых соединений общего назначения</p>  |
|   | <p>2. Погрузить на 10 мин при 70...80 °С в раствор, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– метасиликат натрия – 6,4;</li> <li>– пирофосфат натрия – 3,2;</li> <li>– едкий натр – 3,2;</li> <li>– вода – 32,1</li> </ul> <p>Промыть в холодной, затем в дистиллированной воде. Просушить на воздухе при 93 °С</p> | <p>Обработка в щелочной ванне для очистки поверхности. Используется для клеевых соединений общего назначения</p> |



Приложение 1 (продолжение)

| 1                               | 2   | 3   |
|---------------------------------|---|---|
| <p>Титан и титановые сплавы</p> | <p>3. Травить 5...10 мин при 20 °С в растворе, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– фторид натрия – 2;</li> <li>– серная кислота (93 %, плотность 1,84) – 10;</li> <li>– хромовый ангидрид – 1;</li> <li>– вода – 50</li> </ul> <p>Промыть в обычной, затем в дистиллированной воде. Просушить на воздухе при 93 °С</p> <p>4. Травить 2 мин при 20 °С в растворе, об. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– плавиковая кислота (60 %) – 84;</li> <li>– соляная кислота (37 %) – 8,9;</li> <li>– ортофосфорная кислота (85 %) – 4,3</li> </ul> <p>Прополоскать в обычной и в дистиллированной воде. просушить на воздухе при 93 °С</p> | <p>Для обработки сплавов перед склеиванием поли бензимидазольными клеями. Склеивать не позднее чем через 10 мин после окончания обработки</p> |
|                                 | <p>5. Травить 2 мин при 20 °С в растворе, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– тринатрийфосфат;</li> <li>– (раствор 50 г/л) – 25;</li> <li>– фторид калия;</li> <li>– (раствор 20 г/л) – 10;</li> <li>– плавиковая кислота (2,6 %) – 15</li> </ul> <p>Прополоскать и выдержать в воде 15 мин при 60 °С, прополоскать в дистиллированной воде и просушить на воздухе</p>  |   |



| 1   | 2   | 3   |
|---|---|---|
| <p>Титан и титановые сплавы</p>   | <p>6. Травить 10...15 мин при 38...52 °С в растворе, об. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– азотная кислота;</li> <li>– (69,8 %, плотность 1,42) – 6;</li> <li>– плавиковая кислота (60 %) – 1;</li> <li>– вода – 20.</li> </ul> <p>Промыть водой, затем дистиллированной водой. Просушить в нагревательной печи при 71...82 °С в течение 15 мин</p>  | <p>Для обработки сплавов, подлежащих склеиванию полиамидными клеями, можно также использовать раствор с соотношением азотной, плавиковой кислоты и воды 5:1:27 (по массе), травить 30 с при 20 °С</p> |
| <p>7. Травить 1...5 мин при 20 °С в растворе, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– азотная кислота;</li> <li>– (69 %, плотность 1,42) – 6;</li> <li>– плавиковая кислота (60 %) – 1;</li> <li>– серная кислота (93 %, плотность 1,84) – 10;</li> </ul> <p>В раствор добавляется несколько капель перекиси водорода (20 %). После травления прополоскать в обычной, затем в дистиллированной воде. Просушить на воздухе 15 мин при 71...82 °С</p> | <p>Для обработки сплавов, подлежащих склеиванию полиамидными клеями, можно также использовать раствор с соотношением азотной, плавиковой кислоты и воды 5:1:27 (по массе), травить 30 с при 20 °С</p>   | <p>Для обработки сплавов, подлежащих склеиванию полиамидными клеями, можно также использовать раствор с соотношением азотной, плавиковой кислоты и воды 5:1:27 (по массе), травить 30 с при 20 °С</p> |
| <p>Вольфрам и вольфрамовые сплавы</p>   | <p>Травить 1...5 мин при 20 °С в растворе, мас. ч.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– азотная кислота (69 %, <math>\rho = 1,42</math>) – 6;</li> <li>– плавиковая кислота (60 %) – 1;</li> <li>– серная кислота (93 %, <math>\rho = 1,84</math>) – 10</li> </ul> <p>В раствор добавляется несколько капель перекиси водорода (20 %). После травления прополоскать в обычной вод. Просушить на воздухе 15 мин. При 71...82 °С</p> | <p>Для обработки сплавов, подлежащих склеиванию полиамидными клеями, можно также использовать раствор с соотношением азотной, плавиковой кислоты и воды 5:1:27 (по массе), травить 30 с при 20 °С</p> |



Приложение 1 (окончание)

| 1                      | 2  | 3  |
|------------------------|--|--|
| Уран                   | Провести абразивную обработку металла в ванне из жидкого клея (используются оксидные смолы)  | Для обработки сплавов, подлежащих склеиванию полиамидными клеями, можно также использовать раствор с соотношением азотной, плавиковой кислоты и воды 5:1:27 (по массе), травить 30 с при 20 °С |
| Цинк и цинковые сплавы | 1. Придать поверхности шероховатость – обдуть абразивным порошком или подвергнуть мокрой пескоструйной обработке, или зачистить наждачной шкуркой с зернистостью 100, затем обезжирить растворителем   | Для клеевых соединений общего назначения   |
|                        | 2. Травить 2...4 мин при 20 °С в растворе, об. ч.:<br>– соляная кислота (37 %).. 10...20;<br>– вода 90...80<br>Прополоскать в теплой воде, затем в дистиллированной воде. Просушить 30 мин на воздухе при 66...71 °С                           | Взамен соляной кислоты можно использовать ледяную уксусную кислоту   |
|                        | 3. Травить 3...6 мин при 38 °С в растворе, мас. ч.:<br>– серная кислота (93 %, ρ = 1,84) – 2;<br>– бихромат натрия (кристаллический) – 1;<br>– вода – 8.<br>Прополоскать в воде, затем в дистиллированной воде. Просушить на воздухе при 40 °С | Для свежооцинкованного металла   |



**Перечень стандартов на различные методы механических испытаний клеевых соединений [6]**

| № п/п  | Характеристики                               | Стандарты РФ  | Международные стандарты ASTM и ISO   | Стандарты EN  |
|--|--|---|--|---|
| 1  | 2  | 3   | 4  | 5   |
| <b>Кратковременные статические испытания</b> |  |   |  |   |
| Уруго-прочностные характеристики             |  |   |  |   |
| 1.1  | Прочность при сдвиге клевого соединения, МПа | РТМ1.2.015-81<br>ГОСТ 14759-69<br>OCT1 90358-84<br>РТМ1.2.126-88*<br>OCT1 90071-72*<br>OCT1 90331-82*<br>РТМ1.2.07 5-86*<br>РТМ1.2.119-88**<br>OCT3-2345-74** | ISO 4587:2003<br>ISO 9311-2:2011<br>ISO 11003-1:2001<br>ISO 11003-2:2001<br>ISO 13445:2003<br>ISO 19212:2006<br>ISO 29863:2007<br>ISO 10123:2013<br>ISO 14615:1997<br>ISO 10354:1992<br>ASTM D816-06(2011)<br>ASTM D2918-99(2012)<br>ASTM F2255-05(2010)<br>ASTM D1002-10<br>ASTM D1144-99(2011)<br>ASTM 02718-00(2011)<br>ASTM D4501-01(2009)el<br>ASTM C961-06(2011)<br>ASTM D906-98(2011)<br>ASTM D2294-96(2008)<br>ASTM D2295-96(2008)<br>ASTM D2339-98(2011)<br>ASTM D3163-01(2008) | CSN EN 1373:1999<br>DIN EN 1465:2009<br>CSN EN 2243-1:2005<br>CSN EN 2243-2:2005<br>CSN/DIN EN 15337:2007<br>DIN EN 302:2013<br>DIN EN 1373:1999<br>CSN EN ISO 13445:2006<br>CSN EN 2243-6:2005<br>CSN/DIN EN ISO 9311-2:2011<br>CSN/DIN EN 14869-1:2011<br>CSN/DIN EN 14869-2:2011<br>DIN 54455:1984 |



Приложение 2 (продолжение)

| 1   | 2  | 3   | 4  | 5   |
|-----|--|---|--|---|
|     |  |   | ASTM D3164-03(2011)<br>ASTM D3165-07<br>ASTM D3983-98(2011)<br>ASTM D4562-01(2013)   |   |
| 1.2 | Прочность клевого соединения при равномерном отрыве, МПа   | РТМ1.2.015-81<br>ГОСТ 14760-69<br>ОСТ1 90069-72*<br>СТН1-595-11-199-87*<br>РТМ1.2.134-88*<br>ГОСТ 209-75**<br>ОСТ1 90300-81**<br>ОСТ3-22-70**<br>РТМ1.2.048-84* | ISO 29864:2007<br>ASTM D429-08<br>ASTM D897-08<br>ASTM F2258-05(2010)<br>ASTM C907-03(2012)<br>ASTM D2094-00(2006)<br>ASTM D2095-96(2008)<br>ASTM D5179-02(2008) | CSN EN 2243-4:2005  |
| 1.3 | Прочность клевого соединения при отслаивании (на плавающих роликах, под углом 90 или 180 град), Н/мм | РТМ1.2.015-81<br>ОСТ1 90315-85*<br>РТМ1.2.068-85*<br>ГОСТ 411-77**<br>ГОСТ 21981-76**<br>ОСТ1 90153-74*   | ISO 4578:1997<br>ISO 8510-2:2006<br>ISO 14676:1997<br>ASTM D1876-08  | CSN/DIN EN 1464:2010<br>CSN/DIN EN ISO 8510-2:2010<br>DIN EN 28510-1:1993 |



Приложение 2 (продолжение)

| 1                               | 2   | 3   | 4   | 5   |
|---------------------------------|---|---|---|---|
| 1.4                             | Прочность при расслаивании (Т-образное расслаивание и др.), Н/мм  | PTM 1.2.015-81<br>PTM1.2.069-85*<br>OCT1 90152-74*<br>OCT1 90332-82*<br>ГОСТ 6768-75* | ISO 11339:2010<br>ASTM 03807-98(2012)<br>ASTM D7272-06(2011)<br>ASTM F2256-05(2010) | CSN/DIN EN ISO 11339:2010<br>CSNEN 1372:1999<br>DINEN 1895:2007 |
| 1.5                             | Разрушающее напряжение, МПа, для клевого соединения при совместном действии касательных и нормальных напряжений | PTM1.2.015-81<br>ГОСТ 209-75**  | ASTM D4027-98(2011)   | –   |
| 1.6                             | Прочность клевого соединения на неравномерный отрыв при изгибе, Н/мм  | PTM1.2.015-81   | ISO 14679:1997  | –   |
| 1.7                             | Модуль сдвига клея в клеевом соединении, МПа  | ГОСТ 25717-83<br>OCT1 90244-76  | ASTM D4027-98(2011)<br>ASTM D3983-98(2011)<br>ASTM D5656-10                         | –   |
| 1.8                             | Модуль нормальной упругости клея в клеевом соединении, МПа  | ГОСТ 26454<br>85 OCT1 90245-76  | –   | –   |
| 1.9                             | Прочность клеевых соединений при испытании на изгиб со сдвигом, МПа   | –   | ISO 15108:1998  | –   |
| Характеристики трещиностойкости |   |   |   |   |
| 1.10                            | Критическая скорость освобождения энергии деформации клея в клеевом соединении $G_{1c}$ , Н/мм                  | PTM1.2.015-81<br>PTM1.2.092-86  | ISO 25217:2009<br>ASTM D3433-99(2012)   | –   |



Приложение 2 (продолжение)

| 1                                       | 2  | 3             | 4                                     | 5                 |
|---|--|---------------|---------------------------------------|-------------------|
| 1.11                                    | Критическое значение коэффициента интенсивности напряжений $K_{Ic}$ , Н·мм <sup>-3/2</sup>   | РТМ1.2.015-81 | -                                     | -                 |
| Характеристики конструктивной прочности |  |               |                                       |                   |
| 1.12                                    | Прочность склеивания сотового пакета при расслаивании (в том числе метод удара клином), МПа  | ОСТ1 90153-74 | ISO 15107:1998<br>ASTM 05041-98(2012) | DIN EN 14444:2006 |
| 1.13                                    | Прочность при отслаивании кле-евого соединения сотового за-полнителя с обшивкой (погонный отслаивающий крутящий момент при наматывании обшивки на барабан приспособления), МПа | ОСТ1 90196-75 | -                                     | CSNEN 2243-3:2005 |
| 1.14                                    | Прочность при сдвиге клеевого соединения сотового заполнителя с обшивкой, МПа  | ОСТ1 90071-72 | -                                     | -                 |
| 1.15                                    | Прочность при отрыве клеевого соединения сотового заполнителя с обшивкой, МПа  | ОСТ1 90069-72 | -                                     | -                 |
| 1.16                                    | Прочность при сдвиге болтовых соединений с контражной клеевой композицией, МПа   | РТМ1.2.015-81 | ISO 10964:1993                        | CSNEN 15865:2009  |



Приложение 2 (продолжение)

| 1                        | 2   | 3              | 4                  | 5                   |
|--------------------------|---|----------------|--------------------|---------------------|
| 1.17                     | Прочность клевого соединения при неравномерном отрыве, Н/мм (погонное отрывающее усилие для оценки конструктивной прочности образца клевого соединения обшивки с элементом каркаса) | ОСТ1 90016-71  | ISO 29862:2007     | -                   |
| Характеристики при ударе |   |                |                    |                     |
| 1.18                     | Ударная вязкость при изгибе, Дж/м <sup>2</sup>  | PTM1.2.015-81  | -                  | -                   |
| 1.19                     | Ударная вязкость при сдвиге, Дж/м <sup>2</sup>  | PTM1.2.015-81  | ASTM D950-03(2011) | -                   |
| 1.20                     | Динамический предел прочности при сдвиге, МПа (при испытании образцов с нахлесткой по схеме изгиба)   | PTM1.2.015-81  | -                  | -                   |
| 1.21                     | Динамический предел прочности при равномерном отрыве, МПа   | PTM 1.2.015-81 | -                  | -                   |
| 1.22                     | Разрушающее напряжение при равномерном сдвиге соединения внахлестку, МПа  | PTM1.2.015-81  | ISO 9653:1998      | CSNEN ISO 9653:2000 |



Приложение 2 (продолжение)

| 1    | 2   | 3                              | 4   | 5   |
|------|---|--------------------------------|---|---|
| 1.23 | Энергия разрушения при равномерном сдвиге соединения внахлестку, Н/м    | PTM1.2.015-81                  | –   | –   |
| 1.24 | Сопrotивление расслаиванию при ударе (метод удара клином), Н/м          |                                | ISO 11343:2003  | CSN EN ISO 11343:2005                     |
| 2    | Испытания при циклических нагрузках                                     |                                |   |   |
| 2.1  | Предел выносливости при сдвиге, МПа                                     | ОСИ 90112-73<br>PTM 1.2.015-81 | ISO 9664:1993   | DIN EN ISO 9664:1995                      |
| 2.2  | Предел выносливости при равномерном сдвиге, МПа                         | PTM 1.2.015-81                 | –   | –   |
| 2.3  | Предел выносливости при равномерном отрыве, МПа                         | PTM1.2.015-81                  | –   | –   |
| 2.4  | Предел выносливости при неравномерном отрыве, МПа                       | PTM1.2.015-81                  | –   | –   |
| 2.5  | Скорость роста трещины усталости, мм/цикл                               | PTM 1.2.093-86                 | –   | –   |
| 3    | Испытания на длительную прочность и ползучесть                          |                                |   |   |
| 3.1  | Предел длительной прочности при сдвиге, МПа                             | ОСТ1 90092-73                  | ISO 15109:1998<br>ASTMD6463/<br>D6463M-06(2012)<br>ASTM D2919-01(2007)<br>ASTM D4680-98(2011) | CSN/DIN EN 15336:2007<br>DIN EN 1902:1999 |
| 3.2  | Предел длительной прочности при сдвиге (испытание по схеме изгиба), МПа | –                              | –   | CSNEN 15416-3+AI:2010                     |



Приложение 2 (окончание)

| 1  | 2   | 3             | 4  | 5               |
|--|---|---------------|--|-----------------|
| 3.3  | Предел длительной прочности при равномерном сдвиге, МПа           | РТМ1.2.015-81 | -  | -               |
| 3.4  | Предел длительной прочности при равномерном отрыве, МПа           | ОСТ1 90274-78 | -  | -               |
| 3.5  | Относительная деформация сдвига при ползучести, %                 | РТМ1.2.015-81 | ASTM D2293-96(2008)<br>ASTMD3931-08<br>ASTM D905-08(2013)<br>ASTM D5405/<br>D5405M-98(2011)el<br>ASTM D6383/<br>D6383M-99(2011)el<br>ASTM D4680-98(2011) | CSNEN 1902:1999 |
| 3.6  | Относительная деформация при равномерном сдвиге при ползучести, % | РТМ1.2.015-81 | ASTM 01780-05(2012)  | -               |
| 3.7  | Относительная деформация при равномерном отрыве при ползучести, % | РТМ1.2.015-81 | -  | -               |
| * Стандарты по испытанию клеевых соединений неметаллических материалов;<br>** Стандарты по испытанию клеевых соединений неметаллических материалов с металлами |   |               |  |                 |



**Модельные обрабатываемые плиты. Технические характеристики**

| Материал          | Описание   | Цвет    | Применение  | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Прочность на сжатие, МПа | Прочность на изгиб, МПа |
|-------------------|--|---------|---|------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1                 | 2  | 3       | 4   | 5                            | 6                        | 7                       |
| PROLAB 65 (Axson) | Непористый материал, отличная размерная стабильность. Окрашивается. Обработка вручную или на станках инструментами для обработки дерева или алюминия | Красный | Мастер-модели и прототипы, фрезерованные или вырезанные вручную   | 0,65                         | 28                       | 34                      |
| ROLAB 75 (Axson)  | Низкая плотность. Окрашивается. Отличная размерная стабильность  | Серый   | Оснастка для металлургии. Контрольные приспособления (ложементы) для неабразивных материалов. Мастер-модели для композитных форм под ручную выкладку или формование вакуумным мешком магериалов. Мастер-модели для композитных форм под ручную выкладку или формование вакуумным мешком | 0,78                         | 54                       | 43                      |



Приложение 3 (окончание)

|                             |   |           |  |      |       |       |
|-----------------------------|---|-----------|--|------|-------|-------|
| 1                           | 2   | 3         | 4  | 5    | 6     | 7     |
| LAV 850 (Axson)             | Высокая ударопрочность, износостойкость. Простая ЧПУ-обработка, хорошая поверхность после обработки. Прочные кромки во время обработки  | Синий     | Литейная абразивостойкая оснастка, стержневые ящики и другая оснастка для обработки на станках с ЧПУ   | 1,18 | 41    | 57    |
| WB-1404 RAKU-TOOL (Rampf)   | Плотная структура поверхности, очень легко обрабатывается, хорошая стабильность размеров, хорошая устойчивость к истиранию, жест подвергается полировке   | Оливковый | Негативы и выпуклые модели; модельные плиты для литья; модели, формы и модельная оснастка; пуансоны и матрицы для холодной штамповки.<br>Дает возможность замесить алюминий в серийном производстве литейных форм и стержней | 1,4  | 85-95 | 80-90 |
| Obo-werke 1000 (Obomodulan) | Однородная и гладкая поверхность, равномерная и мелкая структура вспенивания, высокая прочность края, минимальный коэффициент теплового расширения, простота обработки и низкое пылеобразование, физиологически нейтрален, практически без запаха | Кремевый  | Дизайн-модели, архитектурные и рабочие модели, модели для испытаний, литейные модели, копиры, шаблоны, оснастка для ламинирования, пресс-формы, штампы   | 0,95 | 52    | 55    |



**Характеристика промышленных адгезивов DP 8005NS, UR 3569, EP-2306**

| Адгезивы                     | DP 8005NS  |                 | UR 3569   |                 | EP-2306   |                 |
|------------------------------|--|-----------------|---|-----------------|---|-----------------|
|                              | 2  | 3               | 3   | 4               | 4   | 4               |
| 1                            | Основа (Б)   | Отвердитель (А) | Основа (Б)  | Отвердитель (А) | Основа(Б)   | Отвердитель (А) |
| Тип                          | акриловый  |                 | полиуретановая смола  |                 | эпоксидная смола  |                 |
| Плотность, г/см <sup>3</sup> | н.д.   |                 | 1,05  | 1,03            | 0,77  | 1,00            |
| Вязкость                     | 17 000–30 000  | 35 000–55 000   | 7500  | 190             | паста   | 90–130          |
| Цвет                         | оранжевый  | белый           | бледно-желтый   | бесцветный      | коричневый  | прозрачный      |
| Время жизни                  | 2,5–3 мин  |                 | 20 мин  |                 | нет данных  |                 |
| Полная полимеризация         | 8–24 часов   |                 | 24 часа   |                 | 16 мин  |                 |
| Соотношение компонентов      | По массе 9,16Б : 1А  |                 | По массе 100Б : 40А   |                 | По массе 100Б : 30А   |                 |
|                              | По объему 10Б : 1А   |                 | По объему 100Б : 39А  |                 | нет данных  |                 |
| Срок хранения                | 18 месяцев с даты производства при хранении в заводской упаковке при температуре 4 °С. Не замораживать |                 | 12 месяцев с даты производства при хранении в заводской упаковке при температуре от 15 до 25 °С |                 | 12 месяцев с даты производства при хранении в заводской упаковке при температуре от 15 до 30 °С |                 |
| Тип                          | акриловый  |                 | полиуретановая смола  |                 | эпоксидная смола  |                 |
| Прочность на изгиб, МПа      | нет данных   |                 | нет данных  |                 | 30–35   |                 |
| Температура стеклования, °С  | нет данных   |                 | 105   |                 | 60–65   |                 |



Приложение 4 (окончание)

| 1                            | 2  | 3  | 4                                  |
|------------------------------|--|--|------------------------------------|
| Прочность на растяжение, МПа | нет данных   | 30   | нет данных                         |
| Область применения           | Склеивает все виды пластиков, стекло, медь, нержавеющей сталь, гальванические покрытия | Полуэтановая литейная смола для поверхностей, предназначенная для литейной оснастки (модели, стержневые ящики) или алюминиевых преформ | Клей для склеивания модельных плит |



**Характеристика промышленных клеев DP 8805NS, DP 490, DP 810, DP 270**

| Тип клея   | DP 8805NS    |                   |                   | DP 490          |                   |                   | DP 810       |                   |                            | DP 270       |                    |        |
|--|--------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-------------------|--------------|-------------------|----------------------------|--------------|--------------------|--------|
|  | Основна<br>Б | Отверд-<br>тель А | 2                 | Основна<br>Б    | Отверд-<br>тель А | 3                 | Основна<br>Б | Отверд-<br>тель А | 4                          | Основна<br>Б | Отверди-<br>тель А | 5      |
| Тип клея   | акриловый    |                   | эпоксидный        | акриловый       |                   | эпоксидный        | акриловый    |                   | эпоксидный                 |              |                    |        |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>   | 1,08         |                   | 1,0               | 1,07            |                   | 1,15              |              |                   |                            |              |                    |        |
| Вязкость,<br>Па · с  | 90 000       |                   | 35 000            | нет данных      |                   | 18 000–<br>20 000 |              | 18 000–<br>20 000 |                            | 22 000       |                    | 18 000 |
| Цвет   | белый        | голубой           | черный            | желтова-<br>тый | зеленый           |                   | белый        |                   | прозрачный или чер-<br>ный |              |                    |        |
| Время жизни в<br>смешивающей<br>насадке при<br>23 °С   | 3–5 мин      |                   | не менее 1,5 часа |                 |                   | 8 мин             |              | 60–70 мин         |                            |              |                    |        |
| Время достиже-<br>ния транспорт-<br>ной прочност<br>(время первона-<br>чального схва-<br>тывания) при<br>23 °С | 6–8 мин      |                   | 4–6 часов         |                 |                   | 10 мин            |              | 3 часа            |                            |              |                    |        |
| Полная полиме-<br>ризация<br>при 23 °С   | 24 часа      |                   | 7 дней            |                 |                   | 8–24 часа         |              | 48 часа           |                            |              |                    |        |



Приложение 5 (продолжение)

| 1  | 2   | 3   | 4  | 5  |
|--|---|---|--|--|
| Время достижения структурной прочности (7 МПа – сдвиг) | 8–10 мин  | нет данных  | нет данных   | нет данных   |
| Срок хранения  | 18 месяцев с даты производства при хранении в заводской упаковке при температуре ниже 27 °С. Хранение при 4 °С может увеличить срок пригодности клея. Не замораживать | 15 месяцев со дня поставки 3М при хранении в оригинальной упаковке при 21 °С и 50 % влажности. Повышенная температура сокращает срок хранения     | 12 месяцев с даты производства при хранении в заводской упаковке при температуре от 0 до 4 °С или ниже.<br>Не замораживать | 12 месяцев с момента поставки со склада 3М при хранении в оригинальной упаковке при 15–25 °С и 50 % огн. влажности |
| Область применения                                     | Склеивает большинство металлов, керамику, резину, пластик, древесину с минимальной подготовкой поверхности, а также замазанные и окрашиваемые материалы               | Конструкционная склейка металла, дерева, композитных материалов. Элементы алюминиевой рамы велосипедов. Листы стеклопластика к металлической раме | Склеивает большинство металлов, керамику, резину, пластмассы и древесину с минимальной подготовкой поверхности             | В первую очередь предназначен для крепления, герметизации, капсулирования электронных компонентов                  |



Приложение 5 (окончание)

| 1                              | 2  | 3  | 4  | 5   |
|--------------------------------|--|--|--|---|
| <p>Дополнительные сведения</p> | <p>6–8 минут для достижения транспортной прочности.<br/>Ускорение полимеризации клея при мощности нагрева.<br/>Содержит стеклянные микрочастицы диаметром 0,25 мм для контролируемого клевого зазора.<br/>Минимальная подготовка поверхности</p> | <p>Обладает высокой ударопрочностью.<br/>Устойчив к воздействию высоких температур и окружающей среды.<br/>Не стекает по вертикальным поверхностям</p> | <p>Минимальная подготовка поверхности.<br/>10 минут для достижения транспортной прочности.<br/>Склеивает нерж. сталь.<br/>Акриловый клей с минимальным запахом.<br/>Превосходная прочность на сдвиг и на отрыв</p> | <p>Не вызывает коррозию меди, устойчив к термическим перепадам, сохраняет отличные изоляционные свойства при высокой влажности.<br/>Длительное время жизни.</p> |



Классификация веществ по ПДК [6]

| Вредное вещество  | Предельно допустимая концентрация вещества (класс опасности) |  |   |
|---|--|--|---|
|   | в воздухе рабочей зоны, мг/м <sup>3</sup>                    | в атмосферном воздухе, мг/м <sup>3</sup> | в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, мг/м <sup>3</sup> |
| 1   | 2  | 3  | 4   |
| Ацетон (деметилкетон, пропанон)   | 800/200<br>(4, п)  | 0,35/-<br>(4, рефл.)                     | 2,2<br>(3, общ.)  |
| Бензин нефтяной (лигроин, петролейный эфир, растворитель топливный)             | 300/100<br>(4, п)  | 5/1,5<br>(4, рефл.)                      | 0,1<br>(3, орг. зап.)   |
| Бензол  | 15/5<br>(2, п, К)  | 0,3/0,1<br>(2, рез.)                     | 0,001<br>(1, с.-т., К)  |
| м-Фенилендиамин (бензол-1,3-диамин)   | 0,1<br>(2, п+а, А)   | -  | 0,1<br>(1, с.-т.)   |
| Бутилацетат (бутиловый эфир)  | 200/50<br>(4, п)   | 0,1/-<br>(4, рефл.)                      | 0,1<br>(4, общ.)  |
| Винилацетат (виниловый эфир уксусной кислоты)                                   | 30/10<br>(3, п)  | 0,15/-<br>(3, рефл.)                     | 0,2<br>(2, с.-т.)   |
| Гексаметилендиамин (гексан-1,6-диамин)  | 0,1<br>(1, п, А)   | 0,001/-<br>(2, рефл.)                    | 0,01<br>(2, с.-т.)  |
| Дибутилфталат (дибутиловый эфир фталевой кислоты, дибутилбензол-1,2-дикарбонат) | 1,5/0,5<br>(2, п+а)  | -  | 0,2<br>(3, с.-т.)   |



Приложение 6 (продолжение)

| 1  | 2                   | 3                              | 4                          |
|--|---------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Диметиламинобензол (диметиланилин, ксилидин)                                     | –                   | 0,04/0,02<br>(2, рефл.-рез.)   | –                          |
| Диэтилтриамин (бис-(2-аминоэтил) амин)   | –                   | 0,01/-<br>(3, рефл.)           | –                          |
| Дефенилолпропан (ди-4-гидроксибензил) пропан, 2,2-(4,4'-дигидроксибензил) пропан | 5                   | –                              | –                          |
| Малеиновый ангидрид (фуран-2,5-дион)   | 1<br>(2, п+а, А)    | 0,2/0,05<br>(2, рефл.-рез.)    | –                          |
| Метилметакрилат (метиловый эфир метакриловой кислоты)                            | 20/10<br>(3, п)     | 0,1/0,01<br>(3, рефл.-рез.)    | 0,01<br>(2, с-т.)          |
| Метилэтилкетон   | 150/50<br>(3, п)    | 0,6/-<br>(3, рефл.-рез.)       | 0,024<br>(4, орг. зап.)    |
| Стирол (винилбензол)   | 30/10<br>(3, п)     | 0,04/0,02<br>(2, рефл.-рез.)   | 0,02<br>(1, с-т., К)       |
| Толуиленидицианат  | 0,05<br>(1)         | –                              | –                          |
| Толуол (метабензол)  | 150/50              | –                              | –                          |
| Трихлорэтилен  | 30/10<br>(3, п)     | 4/1<br>(3, рефл.-рез.)         | 0,005<br>(1, с-т., К)      |
| Фенол  | 1/0,3<br>(2, п)     | 0,01/0,003<br>(2, рефл.-рез.)  | 0,001<br>(4, орг. Зап., Г) |
| Формальдегид (формалин, метаналь)  | 0,5<br>(2, п, О, А) | 0,035/0,003<br>(2, рефл.-рез.) | 0,05<br>(2, с-т.)          |



Приложение 6 (окончание)

| 1   | 2                | 3                           | 4                       |
|---|------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Фосфорная кислота (артофосфорная кислота)   | 1<br>(а)         | –                           | –                       |
| Фталевый ангидрид (2-бензофуран-1,3-дион)   | 1<br>(2, п+а)    | 0,1/0,02<br>(2, рефл.-рез.) | –                       |
| Эпихлоргидрин ((хлорметил)оксиран)          | 2/1<br>(2, п, А) | 0,04/0,004<br>(2, рез.)     | 0,0001<br>(1, с.-г., К) |
| Этилацетат (этиловый эфир уксусной кислоты) | 200/50<br>(4, п) | 0,1/-<br>(4, рефл.)         | 0,2<br>(2, с.-г.)       |

Примечания:

1. В числителе – максимальное разовое значение, в знаменателе – среднесменное, один норматив – максимальное разовое значение.
2. Особенности токсического действия вещества на организм: А – вещества, способные вызывать аллергические заболевания в производственных условиях; К – канцерогены; О – вещества с остронаправленным механизмом действия, требующие автоматического контроля за их содержанием в воздухе; Г – летучие фенолы с суммарным содержанием 0,001 мг/л.
3. Лимитирующий показатель: рефл. – рефлекторный; рез. – резорбтивный; рефл.-рез. – рефлекторно-резорбтивный; общ. – общесанитарный; орг. зал. – органолептический по запаху (изменяет запах воды); с.-г. – санитарно-токсикологический.
4. Агрегатное состояние вещества: п – пары и/или газы; а – аэрозоль; п+а – смесь паров и аэрозоля



Научное издание

**КАЛИНИЧЕНКО** Мария Львовна  
**ДОЛГИЙ** Леонид Петрович  
**КАЛИНИЧЕНКО** Владислав Александрович

**ТЕХНОЛОГИЯ СКЛЕИВАНИЯ:  
ТЕОРИЯ, ПРАКТИКА, МАТЕРИАЛЫ**

В авторской редакции

Подписано в печать 09.11.2021. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Цифровая печать.  
Усл. печ. л. 10,93. Уч.-изд. л. 8,55. Тираж 100. Заказ 630.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.

FreeBusta is knowledge  
without borders!

