

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«Харківський політехнічний інститут»

**Г. М. Черкашина, В. Л. Авраменко,
Л. П. Підгорна, В. В. Лебедєв, І. О. Лаврова**

ТЕХНОЛОГІЯ СКЛЕЮВАННЯ ТА ГЕРМЕТИЗАЦІЇ

Навчальний посібник

для студентів хіміко-технологічних
спеціальностей закладів вищої освіти

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 2 від 29.06.2021 р.

Харків
Друкарня Мадрид
2021

УДК 678.029.5: 621.792.8(075)

Т38

Авторський колектив:

Черкашина Г. М., канд. техн. наук, доц.;
Авраменко В. Л., канд. техн. наук, проф.;
Підгорна Л. П., канд. техн. наук, доц.;
Лебедєв В. В., канд. техн. наук, доц.;
Лаврова І. О., канд. техн. наук, проф.

Рецензенти:

Костюк Т. О., д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Будівельних матеріалів та виробів» Харківського національного університету будівництва та архітектури;

Білогуб О. В., д-р техн. наук, професор Національного університету «Харківський авіаційний інститут»

Рекомендовано Вченою радою Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (протокол № 2 від 29.06.2021 р.)

Технологія склеювання та герметизації : навчальний
Т38 посібник / Черкашина Г. М., Авраменко В. Л., Підгорна Л. П. та ін.
Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 199 с.

ISBN 978-617-7988-84-6

Викладено загальні відомості про адгезію клеїв та герметиків, технологічні процеси склеювання та герметизації, сучасні способи підготовки поверхонь різної природи під склеювання та герметизацію.

Призначено для студентів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», які навчаються за освітніми програмами 161.06 «Хімічна технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів» та 161.07 «Технологія полімерів для медичної, фармацевтичної, харчової галузей та побуту» та інших хіміко-технологічних спеціальностей.

Іл. 55. Табл. 17. Бібліогр.: 43 назв.

УДК 678.029.5: 621.792.8(075)

ISBN 978-617-7988-84-6

© Авторський колектив, 2021

© НТУ «ХПІ», 2021

© ТОВ «Друкарня Мадрид», 2021

ВСТУП

Якість і працездатність будь-якої клеєної конструкції залежать не тільки від того, наскільки правильно обраний клей і які він має властивості, а й наскільки правильно обрана і витримана технологія склеювання. Можна розробити і виготовити клей з високими фізико-механічними характеристиками, здатний склеювати різні матеріали і забезпечувати працездатність конструкції в різних умовах експлуатації. Однак успішне застосування клею залежить і від того, наскільки міцні адгезійні зв'язки він буде утворювати із субстратом. При цьому важливо, щоб у процесі всього терміну служби клейового з'єднання на межі розділу клей – субстрат не утворювався слабкий примежовий шар. Для виконання цієї вимоги склеювані поверхні мають бути ретельно підготовлені, клей має добре їх змочувати, мати оптимальну товщину в клейовому з'єднанні й тверднути за оптимальним для нього режимом. Все це досягається при ретельному дотриманні технології склеювання. Ось чому знання і дотримання технології склеювання є важливим моментом для створення міцних і надійних клеєних конструкцій.

Технологічний процес склеювання складається з декількох стадій, основними з яких є: підготовка поверхонь під склеювання; приготування і нанесення клею на склеюванні поверхні; затвердіння клею.

Властивості і працездатність клейових з'єднань залежать значною мірою від того, наскільки правильно розроблена і витримана технологія склеювання. Так, погана підготовка поверхні під склеювання призводить до зниження адгезії, а в деяких випадках і до руйнування клейового з'єднання. Навіть незначні відхилення від параметрів технологічного процесу склеювання можуть спричинити погіршення адгезійних властивостей клею. При підготовці поверхні необхідно забезпечити повне змочування субстрату клеєм, бо у протилежному випадку навіть при правильному проведенні всіх інших операцій якість з'єднання не можна довести до максимально високого рівня.

Більшість клеїв і герметиків мають за основу синтетичні та природні високомолекулярні сполуки, вони використовуються для склеювання та герметизації різних за природою поверхонь: металевих, полімерних, дерев'яних, скляних, керамічних та ін.

Дисципліна «Технологія склеювання та герметизації» є продовженням дисципліни «Технологія виробництва синтетичних і природних клеїв та герметиків», яку вивчають студенти спеціалізації «Хімічна технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів».

В даному курсі вивчаються питання теоретичних основ адгезії клеїв і герметиків до різних поверхонь, підготовки поверхонь до склеювання та герметизації, обладнання, що використовується для приготування та нанесення клеїв герметиків та ін.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АДГЕЗІЇ

1.1. Адгезія. Основні терміни та визначення

Термін «адгезія» ввели в 1924 р. Бехольд і Нейман [1] для позначення специфічного молекулярного зчеплення на додаток де панували тоді в уявленнях про механічний характер природи склеювання. Поява терміну «клей» відносять [2] до XII століття. Проте і сьогодні не можна сказати, що цим термінам властива точність навіть при використанні їх у науковій літературі.

Що стосується терміна «адгезія», то багатозначність і невизначеність цього терміна нагадує плутанину і безлад, які панували в XVII–XVIII століттях у фундаментальних поняттях теорії теплоти [3] аж доти, поки винахід і застосування термометру не зробили можливим чітке розмежування понять «температура» і «кількість теплоти». Виходячи з допустимої аналогії з минулими труднощами у формуванні понятійного апарату термодинаміки, можна вважати, що і в питанні адгезії маємо справу не стільки з проблемою лексичної домовленості (конвенціоналізації) в науковому співтоваристві, скільки з методологічною, а точніше, з аксіоматичною проблемою.

Досить драматично для свого часу методологічну проблему висловив С. С. Воюцький, який писав, що існуючі теорії адгезії розглядають різні випадки і різні сторони цього явища, і немає єдиної теорії, що пояснює явища адгезії, немає і, ймовірно, не може бути. У різних випадках адгезія обумовлюється різними «механізмами» [4]. Дійсно, щонайменше, п'ять теоретичних підходів до механізму адгезії існували до кінця 70-х років минулого століття: електрична теорія, адсорбційна теорія, дифузійна теорія, механічна теорія і теорія слабкого межового шару. Спробу формального об'єднання цих теорій зробив К. В. Алєн [5].

Існуючі в літературі численні визначення адгезії за семантичними ознаками можуть бути розділені на три групи. До першої групи віднесено формулювання, що визначають адгезію як процес (послідовну зміну станів). До другої – як властивість (якість, ознака), що становить відмінну рису системи. До третьої – як стан (зовнішні або внутрішні обставини, в яких знаходиться що-небудь) системи. Нижче наведені типові приклади визначень.

Адгезія як процес. «Адгезія (прилипання) – виникнення зв'язку між поверхневими шарами двох різнорідних (твердих або рідких) тіл (фаз), наведених у зіткненні» [6].

«Адгезія – явище, що полягає у виникненні фізичної та/або хімічної взаємодії між конденсованими фазами при їх молекулярному контакті, що приводить до утворення нової гетерогенної системи» [7].

«Адгезія – явище з'єднання наведених в контакт поверхонь конденсованих фаз» [8, 9].

Приклади такого підходу можна множити. Вочевидь, що тут адгезія трактується як процес в системі з двох конденсованих фаз при їх зближенні (з нескінченного віддалення) до відстані дії міжмолекулярних сил, в результаті якого виникає зв'язок між різнорідними конденсованими фазами. Треба сказати, що термінами з аналогічною граматичною структурою, етимологічно висхідними до латинських коренів, дійсно, позначають переважно якісь процеси, наприклад, адсорбцію, дифузію, сорбцію і ін. Щоб не бути голослівними, наведемо приклад з «Фізичного енциклопедичного словника»: «Дифузія – процес встановлення всередині фаз рівноважного розподілу концентрацій ...» [6]. На відміну від них фонетично близькі грекомовні за походженням терміни, наприклад, «енергія» і «ентропія» позначають якусь міру. Таким чином, про даний «процесний підхід» можна сказати, що тут семантичне значення терміна і його граматична форма відповідають одне одному. Але, з іншого боку, фрази, подібні вислову «кінетика формування адгезії», теж нам зрозумілі і не викликають роздратування.

Адгезія як властивість. «Під адгезію розуміють молекулярний зв'язок між поверхнями наведених в контакт різнорідних тіл» [10–12].

«Під адгезією рідини розуміють взаємодію рідкої і твердої фаз на межі поділу цих фаз» [13].

«Адгезія, прилипання ... – зв'язок між наведеними в контакт різнорідними поверхнями» [14].

Б. В. Дерягін зі співробітниками зробив спробу усунути проблему, розділивши процес і властивість: «Загальноприйнято під адгезією, на відміну від когезії, розуміти опір замикання контактів двох різнорідних тіл. Тому явище адгезії природно віднести до поверхневих явищ, контрольованих поверхневими силами. Для усунення двозначності було б доцільно термін «прилипання» відносити до процесів встановлення і прогресивного зростання з часом молекулярного зв'язку між двома тілами, термін же «адгезія» застосовувати для по-

значення досягнутої міцності зв'язку між цими тілами. Таким чином, прилипання в злагоді з етимологічною основою слова має позначати процес, а адгезія – кількісну міру його результату [15]. Зауважимо, що з етимологічної точки зору справедлива лише перша частина останньої в цитаті пропозиції.

Аналогічні визначення в ті ж роки з'являються, наприклад, в англомовній літературі [16, 17]. А. Адамсон, прагнучи обмежити багатозначність терміна, пропонував у вузькому сенсі «під адгезію розуміти міцність зв'язку двох дотичних фаз» [18].

Адгезія як стан. «Адгезія – такий стан двох різнорідних тіл, при якому вони утримуються разом в тісному міжфазному контакті таким чином, що механічна сила або робота, можуть бути передані через межу розділу [19]. Відзначимо, що рамки граматичної структури терміна в цьому напрямку першими подолали англомовні автори. Наведене визначення розширює тлумачення терміна до нового семантичного значення – стану двох різнорідних тіл. У чому особливість цього стану? Згідно з пропозицією автора – в наявності міжфазного контакту між цими різнорідними тілами. Такого контакту, що механічна робота може бути передана через межу розділу фаз. Можливість же передачі механічної роботи через межу розділу означає наявність взаємодії (сили тяжіння, атракції) між фазами, тобто дане визначення, що акцентує стан, по суті, повертає нас до того ж об'єкта – до міжфазної межі і до тієї ж міжфазної взаємодії.

У всіх трьох групах визначень йдеться про один і той же об'єкт – гетерогенне тіло, що складається з двох різнорідних конденсаторів контактуючих фаз, при цьому тіла через межу розділу пов'язані міжмолекулярними силами. Різниця між цими групами визначень полягає в тому, що в першій групі термінів наголос здійснюється на процесі виникнення зв'язку або на переході системи в новий стан – пов'язаний, в другій групі – власне на наявності зв'язку, як міру результату. Нарешті, в третій групі наголос здійснюється на стані (є зв'язок, немає зв'язку) і ігнорується процес.

У сучасній термінографії, на жаль, немає єдиної точки зору щодо допустимості такої неоднозначності. Фахівці однієї школи вважають, що однозначність – неодмінна риса терміна [20]. Інші – що багатозначність терміна не є доказ нечіткості мовних понять [21], тобто спертися на термінографію ми не можемо. У такій ситуації найпростіше – залишити все як є, оскільки з контексту зазвичай ясно, про що йде мова. Педанти віддадуть перевагу процесному підходу, але час все розставить по місцях, а термінологія знайде цьому пояснення.

Звісно ж, що головна трудність полягає не стільки в багатозначності наведених визначень – вони всі про різні сторони одного і того ж явища, скільки

в різноманітні об'єкти і явища, які намагаються підвести під це визначення і розглядати як явища адгезійні, що і призводить до двозначності.

Наприклад, як бути з безліччю теорій, що пояснюють механізм адгезії? Чи справді доля адгезії настільки сумна, що це явище не може бути описано єдиною теорією? Не претендуючи на детальний розгляд всього питання, і навіть на детальний розгляд аксіоматики адгезії, ми тут лише висловимо припущення, що кількість адгезійних теорій може значно скоротитися, якщо обмежити коло об'єктів, що розглядаються, тільки тими, про які дійсно йде мова в розглянутих визначеннях. Так, якщо у визначенні адгезії уточнити, обмежити поняття об'єкта, а саме відмовитися від аморфного словосполучення «різнорідні тіла (фази)» на користь конкретного, «несумісні в термодинамічному сенсі фази», то деякі теорії, які значаться за класом адгезійних, виникнуть з кола адгезійних проблем.

Наприклад, *дифузійна* теорія. Об'єкти і явища, які описуються в дифузійній теорії, дійсно існують, але це сумісні системи без рівноважних міжфазних меж, це системи, для яких характерно зникнення межі розділу, тому, строго кажучи, їх не можна відносити до об'єктів, що розглядаються у всіх трьох наведених вище групах визначень. Звичайно, дифузійні процеси багато визначають в поведінці (кінетика, рівноважні властивості) сумісних систем. Але ці явища не мають відношення до адгезії, а скоріше, до теорії аутогезії або когезії.

Механічна теорія адгезії фактично розглядає системи з різного роду механічними зачепленнями, опис поведінки яких при механічному навантаженні має теоретичний і практичний сенс, але власне механічні зачеплення не мають відношення до міжмолекулярних сил. Звичайно, механічні зачеплення можливі і в реальних адгезійних з'єднаннях. Їх внесок в механічну міцність може навіть перевищувати власне адгезійний внесок, але ця задача відноситься скоріше до обліку властивостей деформованих макротіл, тобто до теоретичної механіки. Відповідно до механічної теорії адгезії пазли також варто було б віднести до адгезійних об'єктів.

Теорія *слабкого граничного шару*. У наш час ясно усвідомлено, що поблизу межі розділу фаз відбувається перебудова структури тіла. Протяжність цих областей може досягати декількох десятків мікрметрів, а самі області характеризуватися іншим ступенем упаковки молекул, ніж тіло в об'ємі. Відповідно до цієї теорії руйнування тіла відбувається за так званим слабким шаром, який, як правило, локалізується поза власне межі розділу фаз. Утворення цього шару є наслідком дії сил міжмолекулярної взаємодії між фазами, тобто вдруге по відношенню до формування зв'язків на межі розділу несумісних фаз. У реальних

системах різна ступінь дефектності міжфазних шарів здатна істотно вплинути на результати, наприклад, механічних випробувань, але ця обставина не є ні необхідним, ні достатнім для віднесення теорії слабкого граничного шару до теорій адгезії. Швидше, ця теорія має бути віднесена до теорій, що пояснюють відхилення від «ідеальної» адгезії.

Таким чином, якщо виходити строго з розглянутих визначень адгезії, то можна констатувати, що єдиний предмет у визначеннях адгезії – це міжфазна межа контактуючих несумісних фаз. Інша справа, що для опису цього предмета (явища) існують різні підходи, наприклад, термодинамічний. Або у вигляді молекулярних теорій взаємодії між макроскопічними тілами, наприклад, теорії на основі сил Ван-дер-Ваальса, теорії на основі потенціалу Леонарда–Джонса або теорії Лівшиця, що розглядає електромагнітні хвилі, що випромінюються тілами. Ці теорії досить докладно викладені в ряді монографій, наприклад, в [19]. Інші ж теорії (механічну і теорію слабкого межового шару) доречно розглядати як поправки, що враховують відхилення (іноді істотні) від ідеальної адгезії.

Полемічність викладеного тут підходу на тлі історично сформованих уявлень очевидна. Але ми вважаємо, що система викладених обмежень (одна з вимог аксіоматики) впливає з усіх розглянутих визначень адгезії. Обмеження за об'єктами та явищами може допомогти відділенню вторинних явищ від первинних, допомогти віднесенню явищ іншої, не адгезійної природи, до «своєї ніші». Це і буде означати побудову єдиної і несуперечливої аксіоматики адгезії і усунення існуючої сьогодні термінологічної двозначності.

1.2. Теорії механізмів адгезії полімерів

Перші роботи з вивчення механізму адгезії з'явилися на початку 20-х років минулого століття. У зв'язку з розвитком науки і техніки активно проводилися наукові дослідження, накопичувався і узагальнювався експериментальний матеріал з впливу різних чинників на міцність адгезійних з'єднань. У зв'язку з цим стали з'являтися теоретичні роботи з адгезії.

В даний час відомі, в основному, такі теорії адгезії [22].

Механічна. Дана теорія адгезії фактично розглядає системи з різного роду механічними зачепленнями, опис поведінки яких при механічному навантаженні має теоретичний і практичний сенс, але власне механічні зачеплення не мають відношення до міжмолекулярних сил.

Дифузійна. Адгезія, відповідно до даної теорії, зводиться до взаємної або односторонньої дифузії молекул адгезиву і субстрату. В даний час знаходять застосування наступні теорії адгезії.

Електрична (електронна). Основне положення цієї теорії полягає в тому, що система адгезив – субстрат ототожнюється з конденсатором, а подвійний електричний шар, що виникає при контакті двох різнорідних поверхонь, – з обкладками конденсатора.

Адсорбційна теорія. Відповідно до цієї теорії адгезія відбувається в результаті адсорбції адгезиву на порах і тріщинах поверхні субстрату.

Адсорбційно-молекулярна. Ця теорія розглядає адгезію як результат прояву сил міжмолекулярної взаємодії між контактуючими молекулами адгезиву і субстрату.

Хімічна теорія. Прихильники цієї теорії вважають, що в багатьох випадках адгезія може бути пояснена не фізичною, а хімічною взаємодією.

Кожна зі згаданих теорій враховує і розглядає превалюючий фактор, що визначає адгезійну взаємодію, чого явно не достатньо для повного опису істинної картини.

Розглянемо докладніше більш значущі з перерахованих вище механізмів адгезії.

Механічна теорія адгезії полімерів. Відповідно до цієї теорії основним і визначальним фактором адгезії вважають механічне зчеплення адгезиву з поверхнею субстрату за рахунок затікання адгезиву в нерівності субстрату. Давно встановлено, що штучне створення шорсткості поверхні субстрату склеюваного з'єднання підвищує міцність склеювання (обробка гумових пластин наждачним папером, анодування алюмінію).

У той же час є приклад ефективної взаємодії між гладкими пришліфованими поверхнями, що свідчить про обмежену застосовність механічної теорії. Наприклад, адгезія між пластинами слюди, каучуку із дзеркальною поверхнею скла.

На обмеженість застосування механічної теорії вказують і такі фактори, як вплив хімічної природи субстрату та навколишнього середовища, рН-середовища, наявність адсорбційних шарів, забруднень, наприклад масла. Досить багато прикладів, коли застосування субстратів з близької макро- і мікрошорсткістю призводить до утворення сполук з різною міцністю і довговічністю. Більш того, шорсткий профіль поверхні може призвести до зменшення міцності, а не до її збільшення, оскільки напруги на виступах, «зубцях», які можуть

бути настільки великі, що міжфазна поверхня зруйнується навіть при слабкому навантаженні.

Наприклад, для отримання адгезійних з'єднань системи «метал – полімер» металевий субстрат піддають механічній або хімічній (найчастіше) обробці для формування грубої шорсткості і пористості оксидного шару за умови, що оксидний шар володіє достатніми механічними властивостями (наприклад оксид алюмінію), а адгезив – з відповідними реологічними характеристиками і здатний проникати в пори.

Прикладом реалізації такого підходу є нанесення лакового покриття на поверхню конструкцій з алюмінію, який попередньо пройшов операцію травлення і анодування. Таким способом «лакують» практично всю поверхню крил, фюзеляжу літаків, гвинтокрилів і т. ін.

Механічне зачеплення, як спосіб підвищення адгезійної взаємодії, використовується при металізації неметалічних субстратів (неорганічне скло, пластмаси, пластики та ін.). Підвищення міцності при цьому ряд авторів пов'язує зі зміною топографії поверхні, що обумовлює внесок механічного зчеплення, інші підвищення міцності пов'язують з окисненням поверхні і зростанням міжфазної взаємодії. Третя група авторів дотримується проміжної точки зору, вважаючи значущим внесок механічного зчеплення і хімічної взаємодії. На їхню думку, адгезійна міцність обумовлена механічним зчепленням, але для досягнення оптимальної міцності необхідне також утворення міжфазних хімічних зв'язків. Ними запропонований параметр, який являє собою добуток відповідних характеристик, що утворюють внесок механічного зчеплення і міжфазної хімічної взаємодії.

Основним призначенням механічної обробки є очищення поверхні субстрату від забруднень мастилом, олією, оксидами та ін. В подальшому це покращує адсорбцію, змочування, забезпечує створення більш міцного межового шару, змінює характер розподілу напруги в області міжфазної межі адгезив – субстрат. Наявність виступів і западин на поверхні після обробки перешкоджає прямолінійному поширенню тріщини вздовж межі контакту. Не виключається також і позитивний вплив утворенню в ході обробки на поверхні субстрату активних функціональних кисневмісних груп і радикалів, які сприяють міжфазній взаємодії.

Хімічну обробку поверхні травлення здійснюють з метою створення шорсткого мікрорельєфу, що забезпечує механічне зчеплення, модифікування поверхні, з утворенням проміжних (граничних) шарів, які сприяють міжмолекулярній взаємодії.

Травлення поверхні полімерів здійснюють перед металізацією шляхом обробки в розчинах кислот, солей, лужних металів.

Хімічна теорія адгезії. Хімічна теорія адгезії виходить з того, що на межі поділу адгезив – субстрат можливе формування міжфазних хімічних зв'язків. Енергія хімічного зв'язку зазвичай складає близько 80 ккал/моль, у той час як енергія вандерваальсової взаємодії – усього 2,5 ккал/моль, тому природньо, що формування хімічних зв'язків у полі міжфазного контакту буде ефективно сприяти адгезії. Той факт, що наявність хімічного зв'язку у великій мірі збільшує адгезійну міцність, було доведено експериментально. Було встановлено, що у результаті формування хімічного зв'язку адгезійна міцність збільшується приблизно у 35 разів порівняно з вандерваальсовою взаємодією, що сприяє співвідношенню між енергіями цих зв'язків. Функціональні групи з високою реакційною здатністю – карбоксильні, амінні, амідні, гідроксильні, епоксидні та ізоціанатні – сприяють адгезії на різноманітних субстратах [23].

Дифузійна теорія адгезії. Уявлення про взаємну дифузію полімерів та про зв'язок цих процесів з явищем адгезії та аутогезії існує давно. Вивчення явища зростання було почато з тіл однакової природи, та для нього був запропонований термін «аутогезія».

Аутогезія пов'язувалась з присутністю на поверхні полімерів вільних рухомих кінців макромолекул, за рахунок яких виникало «сплавлення» двох приведених у контакт поверхонь. Загально визнана думка, що в основі цих процесів лежить явище дифузії макромолекул та їх ланок.

Дифузія може бути також при склеюванні різнорідних полімерів. Адгезія полімерів зводиться до дифузії макромолекул або їх окремих ланок та до формування унаслідок цього між адгезивом та субстратом «спайки», яка являє собою поступовий перехід від одного полімеру до іншого. Уявлення про вирішальну роль дифузії при встановленні адгезійного зв'язку, особливо в системах полімер – полімер, поширились під назвою *дифузійної теорії адгезії* [22-23].

Роль взаємної або навіть односторонньої дифузії при формуванні адгезійних сполучень в деяких випадках може виявитися дуже значною. Дифузія – один з дуже ефективних способів досягнення молекулярного контакту між адгезивом та субстратом. Чим глибше макромолекули адгезиву проникають в субстрат, тим більш сприятливі умови для реалізації максимально можливої кількості зв'язків між молекулами адгезиву та субстрату. Проте це не означає, що без дифузії макромолекул адгезиву в субстрат неможливо досягнути високої адгезійної міцності. Але оскільки в реальних системах є фактори, які знижують величину адгезійної міцності, дифузія макромолекул адгезиву в субстрат може

бути дуже корисною. Якщо макромолекули продифундують в субстрат на значну глибину, то сумарна величина міжмолекулярної взаємодії може перевищити сили, необхідні для розриву хімічних зв'язків. Цей ефект пов'язаний з ланцюговою будовою молекул полімерних адгезивів.

Часто вважають, що рушійною силою дифузії є градієнт концентрацій. Проте переміщення, викликане градієнтом концентрацій та спричиняюче поступову гомогенізацію системи, не вичерпує усі можливі прояви цього складного процесу. Дуже часто при дифузії виникає не вирівнення концентрацій, а навпаки, подальше руйнування компонентів системи. Тому більш правильно вважати, що рушійною силою дифузії є різниця термодинамічних потенціалів. Вирівнювання термодинамічних потенціалів та приближення до термодинамічної рівноваги досягається за рахунок теплового руху атомів (молекул).

В основу молекулярно-кінетичної дифузії в полімерах покладені уявлення про теплові флуктуації у рідинах. Молекули дифундууючої речовини пересуваються в конденсованому тілі окремими імпульсами через «дірки» – мікропорожнини, які виникають в результаті теплових флуктуацій кінетичних одиниць, атомів та молекул в масі конденсованого тіла у безпосередній близькості від дифундууючої молекули.

Дифузія в полімерах безпосередньо пов'язана з гнучкістю макромолекул. Чим вища гнучкість макромолекули, тим більший набір її конформацій, тим менший розмір сегмента. Чим менший розмір сегмента, тим більш незалежні рухомі окремі частинки макромолекули, тим частіше по сусідству з молекулою дифундууючої речовини виникає флуктуація густини та формуються мікропорожнини, та тим швидше пересувається дифундууюча речовина у полімері. У еластомерів величина сегмента становить декілька ланок. У склоподібних полімерів розміри сегментів порівняні з розмірами макромолекул, тобто практично незалежне переміщення ланок відсутнє. Сітка у просторових полімерах чинить вагомий вплив на гнучкість. Особливо помітний вплив сітки, коли довжина ланок між вузлами сітки виявляється одного порядку з розмірами сегментів.

Дифузія у склоподібних та кристалічних полімерах характеризується дуже низьким коефіцієнтом. Проте часто у подібних матеріалах є система внутрішніх порожнин, тріщин та капілярів, що істотно впливає на дифузію.

У металах та склі дифундууюча речовина проникає у кристали та дифундує у міжвузлові решітки. Зрозуміло, що таким чином можуть дифундувати тільки атоми та молекули дуже невеликих розмірів. Об'ємна дифузія може здійснюватися шляхом обміну місцями у кристалічній решітці, а також через вакансії

(«дірки»). Крім того, є й інший вид активованої неспецифічної дифузії – дифузія вздовж тріщин молекулярних розмірів, по межах зерен і т. ін. При зниженні температури більш чутлива до неї дифузія в решітці зменшується та починає зростати дифузія вздовж межі зерен. Взагалі цей вид дифузії в металах та склі є переважним.

Крім дифузії макромолекул слід враховувати дифузію через межу розділу різноманітних низькомолекулярних речовин – інгредієнтів, які входять до складу адгезиву та субстрату, домішок, мономерів, що не прореагували й т. п. У результаті дифузії цих речовин можуть змінитися міцносні властивості адгезиву та субстрату, що в свою чергу вплине на величину адгезійної міцності [22].

Позитивною стороною дифузійних уявлень в адгезії є саме врахування особливостей полімерних адгезивів – ланцюгова будова та гнучкість їх макромолекул. Та хоча застосування дифузійних уявлень в адгезії до реальних систем дуже обмежене та визначається виконанням щонайменше двох умов: термодинамічної (полімери повинні бути взаєморозчинні) та кінетичної (макромолекули та їх ланки повинні мати достатню рухливість), – слід враховувати їх роль при вивченні умов формування молекулярних контактів.

Згідно з дифузійною теорією адгезійна взаємодія визначається взаємною дифузією макромолекул через міжфазну межу розділу. Необхідною умовою протікання такого процесу є достатня рухливість (сумісність макромолекул або їх сегментів). Рухливість макромолекул визначається їх гнучкістю, величиною міжмолекулярної взаємодії і тими усіма факторами, що впливають на гнучкість (молекулярна маса, будова і структура, наявність замінників і т. ін.). Відповідно до цієї теорії міцність адгезії визначається, крім зазначених факторів, також часом і температурою.

Встановлено, що в результаті дифузії (взаємопроникнення), наприклад, макромолекул поліізобутилену навіть на глибину 1–2 нм (0,001–0,002 мкм) міцність зростає в 5–9 разів.

Одним з недоліків дифузійної теорії адгезії вважається те, що вона не враховує високоеластичну і пластичну дисипації енергії при руйнуванні адгезійного з'єднання.

Прикладом використання дифузійної моделі на практиці може служити зварювання полімерів, наприклад, поліакрилатів, полікарбонатів та ін. При нагріванні макромолекули поверхневих шарів стають рухливими, що забезпечує їх взаємопроникнення і утворення з'єднання. Аналогічний результат, тобто утворення адгезійного з'єднання можна досягти, якщо використовувати відповідні розчинники.

Слід ще раз підкреслити, що дифузійна теорія може бути застосована для полімерних систем, компоненти яких взаємно розчинні або сумісні. Критерієм для оцінки співвідношення ступеня розчинності або сумісності служить параметри Гільдербрандта:

$$\delta_z^2 = \frac{\Delta H_1}{V_1} - \frac{\Delta H_2}{V_2} \leq 1 \div 2, \quad (1.1)$$

де ΔH_1 – молекулярна теплота (ентальпія) пароутворення (випаровування); V_1 – молекулярний об'єм.

Відношення $\Delta H/V$ – називають щільністю когезії. Чим більша різниця густини когезії компонентів в системі, тим менш сумісність і розчинність компонентів. При істотному розходженні густини когезії, високому ступені структування або кристалічності одного з полімерів, а також при температурі, нижчій, ніж температура склування, взаємною дифузією можна знехтувати. В цьому випадку адгезійна взаємодія буде реалізуватися за іншими механізмами.

Електрична теорія адгезії. Простого контакту з подальшим роз'єднанням двох різнорідних металів достатньо для їх електризації. Контактна електризація виявляється при розділенні (без тертя) двох металів – діелектрик та двох діелектриків. Електризація при терті двох діелектриків відома з глибокої давнини. Очевидно, електризація при терті та при відриві (без тертя) має одну й ту ж природу, тому що тертя є послідовним встановленням та порушенням контактів.

Процеси, які лежать в основі статичної електризації, дуже складні, різноманітні за природою та недостатньо вивчені. Найбільш загальний характер має ідея Гельмгольца про подвійний електричний шар – молекулярний конденсатор що виникає у зоні контакту двох різних поверхонь. При порушенні контакту обкладинки цього конденсатора роз'єднуються і на кожній з них з'являються заряди протилежного знаку. Отже, причина статичної електризації лежить в розділенні зарядів подвійного електричного шару. При встановленні контакту адгезивів з субстратами різної природи у більшості випадків також виникає подвійний електричний шар [22].

Можливим механізмом формування подвійних електричних шарів є поверхнева орієнтація нейтральних молекул, які містять полярні групи. Цей випадок електризації при контакті відповідає процесам, які проходять на межі субстрат-полімерний адгезив, незалежно від того, чи є субстрат металом, склом, полімером і т. ін. Переважна більшість діелектриків містить полярні групи. В масі речовини їх дипольні моменти взаємно компенсуються, а на поверхні – ні.

При контакті з металом або діелектриком відбувається орієнтація поверхневих диполей, і поверхня набуває заряд певної величини та знаку. Таким чином, виникнення зарядів на поверхні при контакті металу з діелектриком або двох діелектриків пов'язано з ефектом орієнтації. При встановленні контакту полімерних адгезивів з субстратами різної природи на межі поділу виникає подвійний електричний шар. Цей процес розвивається відповідно до описаних механізмів та є наслідком хімічної взаємодії адгезиву та субстрату, формування водневих зв'язків, донорно-акцепторної взаємодії, орієнтованої адсорбції дипольних молекул адгезиву на поверхні субстрату, різноманітної спорідненості до електрона адгезиву та субстрату. У всіх цих випадках встановлюється таке розподілення електронної густини, що сумарний ефект призводить до формування подвійного шару на межі поділу. При відриві плівки полімеру на одній поверхні переважають позитивні заряди, на іншій – негативні. Все це покладено в основу *електричної теорії адгезії*. Вивчення електричних сил стимулювалось такими обставинами. По-перше, деякі аспекти адгезійних явищ не знаходили задовільного розв'язання у рамках існуючих уявлень. Зокрема, недостатньо була зрозуміла природа залежності адгезійної міцності від швидкості прикладеної руйнівної сили. Тому виникло припущення, що міцність адгезійного сполучення не може бути обумовлена дією тільки одних молекулярних сил. Було зроблено припущення про додатковий фактор – вплив подвійного електричного шару, який виникає на межі адгезив–субстрат. По-друге, урахування електричних сил вперше дозволило пояснити різні електричні явища, які виникають при порушенні адгезійної взаємодії поверхонь, що утворились при руйнуванні адгезійного зв'язку: виникнення електричних розрядів, що супроводжується характерним тріском та світінням, електронна емісія та, нарешті, надмірно високі значення відшарування [23].

Електрична теорія адгезії була запропонована Б. В. Дерягиним, Н. А. Кротовим і В. П. Смилгою. Виходячи з міркувань наявності різної структури електронних зон адгезиву і субстрату, ними було висловлено припущення про можливе перенесення зарядів і формування, таким чином, електричного шару. Виникаючі при цьому електричні сили, на їхню думку, можуть вносити на міжфазній межі істотний внесок в адгезійну взаємодію.

Систему адгезив–субстрат автори розглядають як конденсатор, заряд якого обумовлений і визначається контактом двох різних матеріалів. При поділі обкладинок конденсатора, тобто при міжфазному руйнуванні, виникає різниця потенціалів ($\Delta\phi$), зростаюча до моменту розрядки. Адгезія зумовлена наявністю

взаємодії в подвійному електричному полі, а енергія – робота поділу A_z – визначається виразом:

$$A_z = \frac{h_1 \cdot \epsilon d}{8\pi} \left(\frac{dV_1}{dh_1} \right)^2, \quad (1.2)$$

де V_1 – потенціал розрядки; h_1 – розрядний проміжок; ϵd – діелектрична проникність.

При перевірці можливості застосування електронної теорії до розрахунку адгезійної міцності встановлено, що в більшості випадків не спостерігається узгодженості теоретичних і експериментальних даних.

Більшість авторів дотримуються тієї думки, що електростатичні сили, що виникають при порушенні адгезійного шару, є скоріше наслідком, ніж причиною високої міцності адгезійних з'єднань.

При руйнуванні адгезійного з'єднання, наприклад, при відшаруванні адгезиву від субстрату, створюється електричне поле, під дією якого спостерігається електронна емісія, механоемісія електронів, як результат утворення нових поверхонь.

Крім того, критиками електронної теорії підкреслюється, що подвійний електричний шар не робить істотного внеску в енергію міжфазної взаємодії. Енергія відшарування значною мірою визначається дисоціацією енергії при деформації адгезиву у вязкотекучому і високоеластичному стані, вона не повинна входити у значення електростатичної енергії в результаті утворення подвійного електричного шару.

Теорія слабого межового шару. У наш час ясно усвідомлено, що поблизу межі розділу фаз відбувається перебудова структури тіла. Протяжність цих областей може досягати декількох десятків мікрметрів, а самі області можуть характеризуватися іншим ступенем пакування молекул, ніж в об'ємі. Відповідно до цієї теорії руйнування тіла відбувається по слабкому шару, який, як правило, локалізується поза власні межі розділу фаз. Утворення цього шару є наслідком дії сил міжмолекулярної взаємодії між фазами, тобто вдруге по відношенню до формування зв'язків на межі розділу несумісних фаз.

Адсорбційна теорія адгезії. Адсорбційна теорія (називається також адсорбційно-молекулярною, або молекулярною) розглядає адгезію як результат прояву сил молекулярної взаємодії між контактуючими молекулами адгезиву та субстрату. Тому важливо, щоб адгезив та субстрат мали полярні функціональні групи, здатні до взаємодії, як це виходить з правила полярності. Висока адгезія

не може бути досягнута між полярним субстратом та неполярним адгезивом або між неполярним субстратом та полярним адгезивом [22-23].

Адсорбційна теорія адгезії ділить процес утворення адгезійного зв'язку на дві стадії. Перша стадія – «транспортування» молекул адгезиву до поверхні субстрату. Підвищення температури та тиску, введення пластифікатору, застосування розчинників – всі ці фактори полегшують проходження першої стадії процесу та сприяють досягненню контакту між молекулами адгезиву та субстрату. Розтікаючись твердою поверхнею, адгезив повинен проникнути у чисельні пори, щілини та капіляри, швидкість заповнення яких залежить не тільки від їх геометричних розмірів та в'язкості адгезиву, але також і від змочуваної здатності та поверхневого натягу. Чим повніше змочування, тим менше повітряних бульбашок залишається у мікропоглибленнях поверхні на межі поділу з адгезивом, і тим вищою може бути у кінцевому підсумку міцність адгезійного зв'язку. Змочування та розтікання адгезиву по поверхні субстрату супроводжується поверхневою дифузією та міграцією молекул адгезиву поверхнею. Ці процеси у тій чи іншій мірі є підготовчими. Друга стадія починається, як тільки відстань між молекулами стає меншою за 5 Å. Між молекулами адгезиву та субстрату починають діяти молекулярні сили. Поступово настає адсорбційна рівновага [23].

Найбільш вагоме досягнення у вивченні адгезії – встановлення чіткого взаємозв'язку між кількістю функціональних груп в адгезиві та значенням адгезійної міцності. При систематичному дослідженні великої кількості різних об'єктів було виявлено, що крива залежності адгезійної міцності від вмісту у адгезиві функціональних груп має чітко виражений максимум.

У адсорбційній теорії адгезію подають з позиції молекулярної взаємодії, а весь комплекс адгезійних явищ розглядається як результат прояву міжмолекулярної взаємодії (вандерваальсова, водневі і хімічні взаємодії).

Сили молекулярної взаємодії істотно залежать від відстані. Розрахунками та експериментально встановлено, що сили тяжіння обернено пропорційно відстані у третьому або в четвертому ступені, тобто $E_{\text{взаім}} \sim 1/23 + 1/24$. Наприклад, при розщепленні слюди на відстань від точки розщеплення в 100 Å сила тяжіння $\sim 1,5 \text{ кг/см}^2$, при 20 Å – 300, а при 10 Å (1 нм) $\sim 1100 \text{ кг/см}^2$.

При розгляді міжфазної взаємодії на межі адгезив–субстрат необхідно мати на увазі, що молекулярне поле твердої (рідкої) поверхні простягається на більш значну відстань, ніж кілька Å. Отже, тверда поверхня впливає на структуру і властивості прилеглих шарів другої фази, тобто проявляється так званий пристінний ефект, викликаний дальною дією поверхневих молекулярних сил.

Теоретичними розрахунками показано, що молекулярні сили на межі розділу можуть забезпечити достатньо високу адгезійну міцність. Коли міцність не висока, це означає, що не були використані потенційні можливості системи або є причини зменшення зв'язку.

Першим актом при контакті адгезиву з субстратом є адсорбція полімеру. Реально тверді поверхні характеризуються неоднорідністю в геометричному і енергетичному відношенні, наявністю дефектів і різних поверхневих домішок. Це обумовлює різноманітність різних центрів адсорбції і її форми.

Основними факторами, що впливають на адсорбцію полімерів, є молекулярна маса полімеру, структура і склад полімеру, температура, властивості субстрату і характеристики її поверхні, а також концентрація розчину, тип розчинника (якщо адгезив наноситься у вигляді розчинів).

При адсорбції полімеру з розчину залежно від природи розчинника («поганий» або «хороший»), концентрації розчину змінюються: структура адсорбційного шару, його товщина, а також конформація макромолекул полімеру.

Необхідно також відзначити, що при адсорбції полімеру з розчину адсорбується і розчинник, тобто протікають два конкуруючих між собою процеси. Швидкість встановлення адсорбційної рівноваги залежить від природи полімеру і розчинника, типу адсорбента, але стадією, що визначає швидкість адсорбції, є дифузія полімеру до поверхні адсорбенту і в його пори.

З урахуванням процесу дифузії швидкість адсорбції залежить також від розміру макромолекул, від схильності макромолекул до зміни конформації і до утворення надмолекулярних структур, їх форми і розмірів.

Адсорбційно-молекулярна теорія адгезії. Ця теорія є найбільш поширеною і розглядає адгезію як результат прояву сил молекулярного взаємодії між контактуючими молекулами адгезиву і субстрату.

Тому важливо, щоб адгезив і субстрат були полярні функціональні групи, здатні до взаємодії. До цієї теорії повною мірою відноситься правило полярності: «Висока адгезія не може бути досягнута між полярним субстратом і неполярним адгезивом або між неполярним субстратом і полярним адгезивом».

Дана теорія адгезії ділить процес утворення адгезійного зв'язку на дві стадії:

I. Підготовча стадія. «Транспортування молекул адгезиву до поверхні субстрату».

Існують фактори, які полегшують перебіг I стадії і сприяють досягненню контакту між молекулами адгезиву і субстрату, це:

- а) підвищення температури і тиску;

- б) введення пластифікатора;
- в) застосування розчинників.

Змочування і розтікання адгезиву по поверхні субстрату супроводжується поверхневою дифузією і міграцією молекул адгезиву поверхнею субстрату.

II. Стадія міжмолекулярної взаємодії. Ця стадія починається тоді, коли відстань між молекулами стає меншою 5 Å. За цієї умові між молекулами адгезиву і субстрату починають діяти молекулярні сили: водневі, вандерваальсова сили. Це цілий спектр сил, починаючи від дисперсійних порядку 10² кал/моль до водневих зв'язків порядку 10⁴ кал/моль. Поступово досягається адсорбційна рівновага.

Найбільш істотне досягнення у вивченні адгезії – встановлення чіткого взаємозв'язку між кількістю функціональних груп в адгезиві і значенням адгезійної міцності.

При вивченні адгезії полімерів вінілового ряду до целофану був встановлений кількісний зв'язок між адгезійною міцністю адгезиву і концентрацією карбоксильних груп в адгезиві

$$A = k [\text{COOH}] n,$$

де k і n – константи; $[\text{COOH}]$ – концентрація карбоксильних груп в полімері.

При вивченні великої кількості різних об'єктів було виявлено, що залежність адгезійної міцності від вмісту в адгезиві функціональних груп має максимум. Екстремальна залежність значення адгезійної міцності від кількості функціональних груп можна пояснити поступовим зниженням рухливості сегментів макромолекул адгезиву при збільшенні вмісту в ньому полярних груп. Це є причиною збільшення жорсткості ланцюгів полімерів, знижується ймовірність контакту функціональних груп адгезиву і субстрату.

Адсорбційно-молекулярна теорія розвивається, але ряд явищ вона не може пояснити:

- 1) Залежність опору розшарування від швидкості розшаровування;
- 2) «Високі» значення адгезійної міцності, що спостерігаються при руйнуванні адгезійних з'єднань;
- 3) Причини високої адгезії між неполярними адгезивами і полярними субстратами;
- 4) Причини, за якими, як правило, відбувається руйнування не на межі розділу адгезив – субстрат, тобто молекулярні сили між адгезивом і субстратом не визначають опір розриву.

Першим актом при контакті адгезиву з субстратом є адсорбція полімеру.

1.3. Адгезія і сили, що її обумовлюють

Слід розрізняти сили, що викликають адгезію, і міцність з'єднання. Для того щоб вникнути в суть склеювання, необхідно досить добре уявляти собі дію міжмолекулярних сил, які впливають на адгезію і когезію. Однак міцність клейового з'єднання залежить не тільки від цих сил, а й від залишкових напружень, що виникають при затвердінні, температурі, розмірах, кількості і розташуванні повітряних включень, тріщин або інших дефектів. Міцність з'єднання істотно залежить від технології склеювання, оскільки саме в процесі склеювання можуть виникнути слабкі ділянки клейового шару; вони сприяють утворенню дефектного з'єднання, міцність якого значно нижча за теоретичну. Руйнування такого з'єднання, як правило, відбувається на межі між клеєм і субстратом [24]. Таке руйнування раніше часто називали адгезійним, оскільки вважали, що воно обумовлене слабкою адгезією. На нашу думку, саме тому, що адгезія невелика, можна говорити про адгезійне руйнування.

З елементарної фізики відоме співвідношення між енергією U , силою F і відстанню l , яке виражається рівнянням:

$$F = \frac{dU}{dl}. \quad (1.3)$$

Це співвідношення можна зобразити кривою Ленарда–Джонса, яка є типовою кривою залежності енергії від відстані (рис. 1.1), при цьому

$$U = -\frac{A}{2} \left(\frac{2}{r^6} - \frac{r_0^6}{r^{12}} \right), \quad (1.4)$$

де A – константа; r_0 – рівноважна міжмолекулярна відстань.

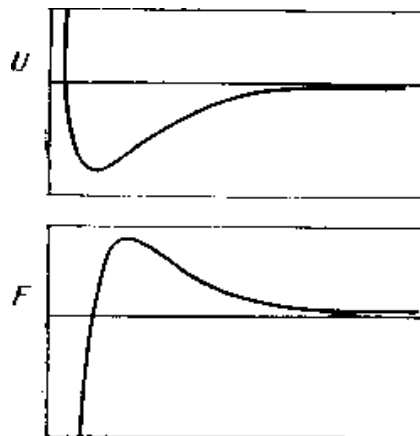


Рисунок 1.1. Криві Ленарда–Джонса

Якщо $r = r_0$, то

$$U_0 = A/2r_0^6. \quad (1.5)$$

Сила, яка діє в системі, визначається співвідношенням

$$F = -\frac{dU}{dr} = 6A \left(\frac{1}{r^7} - \frac{r_0^6}{r^{13}} \right). \quad (1.6)$$

Максимальну величину F_m ми отримали як другу похідну співвідношення (1.6) для точки перегину на кривій, з якої розрахуємо

$$r_{F_m} = r_0 (13/7)^{1/6} = 1,1087. \quad (1.7)$$

Після підстановки в рівняння (1.6) отримаємо:

$$F_m = 1,345(A/r_0^7); \quad (1.8)$$

$$F_m = 2,690(U_0/r_0). \quad (1.9)$$

За даними інших авторів:

$$F_m = 1,46(U/r); \quad (1.10)$$

$$F_m = 1,61(U/r). \quad (1.11)$$

За цими співвідношеннями можна судити про теоретичну міцність, яка визначається енергією системи. Правда, цю енергію точно визначити дуже важко, тому що невідомо, який внесок дають різні хімічні зв'язки і міжмолекулярні сили, енергії (кДж/моль) які наведені нижче [23]:

Хімічні зв'язки

іонні	580–1050
ковалентні	60–710
металеві	110–350

Міжмолекулярні зв'язки

водневі	до 50
діполь-діпольні	до 20
дисперсійні	до 41,8
індуковані дипольні	до 2

Крім перерахованих, проявляються ще й сили Ван-дер-Ваальса (8–16 кДж/моль). Важливі також: поверхневий натяг на межі поділу фаз, такі

процеси, як адсорбція, абсорбція тощо. Часто вони мають негативний вплив, викликаючи виникнення слабких сполучних шарів, наприклад в результаті сорбції вологи, жиру, газу тощо на поверхні матеріалу, який треба склеїти [22].

З практики відомо, який вплив чинить змочування поверхні на результати склеювання. Якщо на поверхні субстрату не присутні речовини, які впливають на змочування, то на якість клейового шва впливає поверхневий натяг рідини (клею) на межі з субстратом [22]. Данні про поверхневий натяг деяких рідин (γ_L), полімерів (γ_S) і полімерних клеїв наведено в табл. 1.1. Велика частина органічних клеїв має γ_L , менше, ніж вода, і більше, ніж більшість полярних розчинників. При контакті з металами або оксидами металів в більшості випадків $\gamma_S > \gamma_L$, навпаки, у випадку неметалевих субстратів $\gamma_S \leq \gamma_L$. У першому випадку, якщо поверхня чиста, вона завжди буде добре змочуватись клеєм, у другому – вибір клею або розчинника (який є компонентом клею) особливо важливий.

Т а б л и ц я 1.1

Поверхневий натяг рідин, клеїв і полімерів

Рідини	γ_L , (Н/м)·10 ³	Клеї	γ_L , (Н/м)·10 ³	Полімери	γ_S^* , (Н/м)·10 ³
Вода	2,8	Фенольні, затверднені кислотами	78	Полігекса- фторпропілен	16,5
Гліцерин	63,4	Сечовино- формальдегідні	71	Політетра- фторетилен	18,5
Формамід	58,2	Феноло- резорцинові	48	Полідиме- тилсилоксан	24
Бромнафталін	44,6	Казеїнові	47	Полівінілі- денфторид	25
Нитробензол	43,9	Епоксидні	47–30	Поліізобутілен	27
Анілін	42,9	Клей тваринного походження	43	Полівініл- фторид	28
Рідини	γ_L , (Н/м)·10 ³	Клеї	γ_L , (Н/м)·10 ³	Полімери	γ_S^* , (Н/м)·10 ³
Трикрезилфосфат	40,9	Полівініл- ацетатна дисперсія	38	Поліпропілен	29
Гексахлор- бутадиєн	30,0	Нітроцелюлозні	26	цис- Поліізопрен	31
трет-Бутил- нафталін	33,7			Поліетилен	31
Хлорбензол	33,2			Полістирол	33
Бензол	28,9			Поліфор- мальдегід (гомополімер)	36
Толуол	28,4			Полівініл- ацетат	37

Закінчення табл. 1.1

Рідини	γ_L , (Н/м)·10 ³	Клеї	γ_L , (Н/м)·10 ³	Полімери	γ_S^* , (Н/м)·10 ³
<i>n</i> -Гексадекан	27,6			Полівініловий спирт	37
Хлороформ	27,1			Поліхлоропрен	38
Етилацетат	28,9			Полівініл-хлорид	39
Ацетон	23,7			Поліетилен-терефталат	43
Метиловий спирт	22,6			Поліамід 6,6	46
Етиловий спирт	22,3				
<i>n</i> -Октан	21,8				
<i>n</i> -Гексан	18,4				

Примітка. * γ_S – критичний поверхневий натяг, який визначається екстраполяцією з гомологічного ряду рідин, причому до уваги береться можлива різниця між рідиною і твердою речовиною.

Співвідношення між роботою адгезії і поверхневим натягом на межі субстрат – клей виражається рівнянням [24]:

$$W_A = \gamma_S^0 + \gamma_{LV}^0 - \gamma_{SL}, \quad (1.12)$$

де W_A – робота адгезії; γ_S^0 – рівноважний поверхневий натяг на межі тверда поверхня – повітря; γ_{LV}^0 – рівноважний поверхневий натяг між рідиною і повітрям; γ_{SL} – поверхневий натяг на межі між твердою речовиною і рідиною.

Поверхня твердої речовини дуже швидко адсорбує пари рідини (розчинника), які важко видалити.

Тому стверджується, що в цьому випадку робота адгезії при змочуванні буде меншою (на частку витраченої енергії адсорбції), і відношення (1.12) перетвориться таким чином:

$$W_A^x = \gamma_{SV}^0 + \gamma_{LV}^0 - \gamma_{SL}, \quad (1.13)$$

де γ_{SV}^0 – поверхневий натяг або вільна поверхнева енергія твердої речовини на межі з парами в стані рівноваги.

Отже, змочування прямо впливає на виникнення міцного або слабого з'єднувального шару. Однак з наведених даних випливає, що поки ще недостатньо аргументів, які доводили б однозначний вплив різних явищ на виникнення і значення адгезії. З'єднання, як правило, не руйнується по межі субстрат – клей, а отже, при розриві не долаються міжмолекулярні сили, що зумовлюють адгезію.

Руйнуванню з'єднання передують деформація всієї системи, на що теж необхідна певна енергія. Отже, робота, яку треба витратити на руйнування клейового з'єднання, витрачається не тільки на подолання міжмолекулярних сил. Таким чином, основна теза молекулярної теорії, яка зазначає, що сума міжмолекулярних сил відповідає міцності з'єднання (або силі, необхідній для його руйнування), тобто $U = f_m$ (де f_m – міцність клейового з'єднання), взагалі не дійсна.

Як доказ молекулярної теорії часто наводять той факт, що силове поле близько макромолекули поліетилену, який може мати вуглеводневі бічні відгалуження, слабкіше, ніж поле по близьку ланцюга, що містить групи ОН або СООН в бічних гілках. Випробування з розгалуженим поліетиленом показали, що добавка полярних речовин до розплаву не підвищує міцності з'єднання на клеях різної полярності. При розчиненні ПЕ при нагріванні в ксилолі і подальшому осадженні утворювався порошок ПЕ, практично повністю неполярний. При склеюванні такого ПЕ (з заходами щодо запобігання появи слабого з'єднувального шару) була досягнута більш висока міцність, ніж при склеюванні полярного ПЕ.

Часто описуються процеси склеювання ПЕ за допомогою клеїв з великою кількістю полярних груп (наприклад, епоксидних). При цьому під дією підвищеної температури або сильних окислювальних агентів на поверхні ПЕ повинен утворюватися полярний шар. Однак, навіть якщо ми врахуємо утворення такого полярного шару, не можна однозначно стверджувати, що він є головною причиною підвищення міцності клейового з'єднання. Мабуть, в дійсності усувається шар забруднень, які викликали б виникнення слабого з'єднання, що, ймовірно, більш важливо, ніж поляризація поверхні. Добавка масляної кислоти до ПЕ вже в кількості 0,1 % різко знижує адгезію попри те, що полярність при цьому повинна була зрости.

Поверхневий натяг впливає на утворення з'єднання, але його роль в теорії адгезії спірна, як це випливає з таких міркувань. Робота, яку необхідно зробити для руйнування з'єднання, визначається поверхневою енергією системи. Ця теза, по суті, ілюструє співвідношення (1.12) і (1.13). Їх можна перетворити:

$$\Delta W = \gamma_2 + \gamma_3 - \gamma_{23}, \quad (1.14)$$

де ΔW – зміна вільної поверхневої енергії на одиницю площі, яка відбудеться при руйнуванні з'єднання точно по межі субстрат – клей, завдяки чому вийдуть дві нові поверхні, які межують з повітрям: γ_2 – вільна поверхнева енер-

гія клею (на одиницю поверхні); γ_3 – вільна поверхнева енергія субстрату (на одиницю поверхні); γ_{23} – вільна поверхнева енергія межі клей – субстрат.

Якщо ці величини неможливо точно виміряти, то як допоміжний засіб скористаємося рівнянням Юнга [22,24].:

$$\gamma_3 = \gamma_{23} + \gamma_2 \cos \theta_r, \quad (1.15)$$

де θ_r – рівноважний крайовий кут змочування.

Підставивши рівняння Юнга, отримаємо:

$$\Delta W = \gamma_2 (1 + \cos \theta_2). \quad (1.16)$$

Як відомо з основ теорії змочування, $\cos \theta_2$ для всіх рідин (отже, і рідких клеїв) повинен бути близьким до 1, так що $1 + \cos \theta_2 = 2$, і, отже

$$\Delta W = 2\gamma_2. \quad (1.17)$$

γ_2 для полімерної клейової речовини дорівнює $3 \cdot 10^{-3}$ мДж/см². Це означає, що робота, яка необхідна для руйнування з'єднання, повинна становити близько $6 \cdot 10^{-3}$ мДж/см²; цього може бути недостатньо при зсуві.

1.4. Механізм адгезії

Існуючі теорії адгезії не дають задовільної відповіді на питання про формування і властивості клейових з'єднань. Виняток становить реологічна теорія, яку ми спробуємо використовувати при опису механізму адгезії.

За Бікерманом, з'єднання бувають слабкими в тому випадку, коли виникають слабкі адгезійні зв'язки (або недостатнє число зв'язків), і міцними, утвореними міцними зв'язками. Він вважає, що на поверхні матеріалів швидко утворюється шар адсорбованих газу і вологи, який має гарну адгезію до субстрату, але механічно значно слабкіший за нього. Цей шар разом з низькомолекулярними продуктами з клею утворює слабку зону, яка обумовлює малу міцність шву. Іноді ці шари називають перехідними. Клей необхідний для витіснення цього слабого шару і одночасно для вирівнювання поверхневих нерівностей субстрату.

При оцінці якості поверхні субстрату можна відзначити періодичні зміни уздовж поверхні і перпендикулярно до неї. Уздовж поверхні це можуть бути геометричні зміни, анізотропія фізичних і фізико-механічних властивостей (області з різними щільністю, кристалічною структурою, жорсткістю тощо);

зміни, зумовлені домішками і різними зовнішніми впливами. Перпендикулярно до поверхні з'являються поверхневі адсорбовані і поверхнево-окислені або хімічно модифіковані шари, а також спостерігаються зміни складу, щільності, жорсткості матеріалу, електропровідності, пористості тощо [22, 24].

Експериментально доведено, що поверхні, оброблені до абсолютної гладкості, прикладені одна до одної і притиснуті навантаженням P , можна відірвати силою F , яка більша P , тобто $F/P > 1$. Якщо цю операцію провести у високому вакуумі, який викличе десорбцію слабких шарів, то $F/P \sim 10^5$. Це відноситься до з'єднання двох твердих матеріалів без клеючої речовини. З'єднання з клеєм слід розглядати як систему, що складається з п'яти шарів: субстрат 1, перехідний (пограничний) шар 1, клей, перехідний шар 2 і субстрат 2. Правильно сформованим, міцним з'єднанням вважається з'єднання, перехідні шари якого настільки міцні, що руйнування проходить поза ними. Слабке з'єднання – це таке, руйнування якого відбувається в приграничному шарі, який назовемо слабким приграничним шаром.

Для одержання міцного з'єднання необхідно замінити слабкі приграничні шари міцними. Міцний приграничний шар можна одержати, повністю усунувши слабкий шар, що досягається різними способами. При деяких способах слабкий шар не усувається повністю, а тільки вдавлюється в поверхню субстрату.

До виникнення слабких пограничних шарів призводить присутність адсорбованих газів і рідин, частинок твердих речовин на поверхні тощо. Слабкий шар може виникнути у випадку неправильного вибору клею або його рецептури (полімерної основи, розчинника, їх співвідношення, добавок тощо), порушення режиму тверднення або технології нанесення клею.

Слабкі шари дуже часто виникають, коли клей погано змочує субстрат і при нанесенні утворюються повітряні бульбашки, які зберігаються і після застосування клею. Такі бульбашки на межі розділу фаз, як правило, дуже важко виявити. Легко їх визначити тільки в разі прозорих клеїв або прозорих субстратів, наприклад при бічному (косому) освітленні. Оскільки вода гірше змочує субстрат, ніж органічні розчинники, слабкий шар частіше утворюється при використанні клеїв, що містять воду. Крім того, існують матеріали, які практично не змочуються, наприклад політетрафторетилен (ПТФЕ), поліетилен, поліпропілен та ін.

Відомі спроби уникнути утворення слабких верств шляхом проведення склеювання у вакуумі (з використанням вакуумних насосів). Однак у цьому випадку часто залишаються сильні забруднення маслом. Але якщо клей містить відповідний розчинник такого масла, то виходять гарні результати.

Отже, що для одержання міцного з'єднання необхідно усунути всі слабкі примежові шари, як на субстраті, так і в клеї. По суті, мова йде про вибір такого клею, який рівномірно покриє всю поверхню, що склеюється, й усуне слабкий примежовий шар (повітря або масло), а також про поверхневу обробку субстрату. При цьому не можна забувати про те, що невдача будь-якого методу обробки може залежати від відносної вологості повітря. Однак, навіть якщо ми виключимо цей вплив, все одно міцність з'єднань залежить від способу підготовки поверхні субстрату, як це видно з табл. 1.2.

При виборі способу очищення металів слід брати до уваги їх корозійну стійкість по відношенню до застосовуваних реагентів. Таким чином, поверхнева обробка усуває слабкі примежові шари, утворення яких обумовлене забрудненнями або якістю поверхні. Інша причина виникнення слабких примежових шарів, як ми вже сказали, повітряні включення. Вони видаляються при нанесенні клею, але для цього клей повинен добре змочувати субстрат.

Ступінь змочуваності можна кількісно виразити кутом змочування, який називається крайовим кутом (рис.1.2). Визначити точно значення крайового кута неможливо через труднощі, які обумовлені поверхневими властивостями, формою поверхні і технологічною передісторією субстрату, тому використовується рівноважний крайовий кут θ [22].

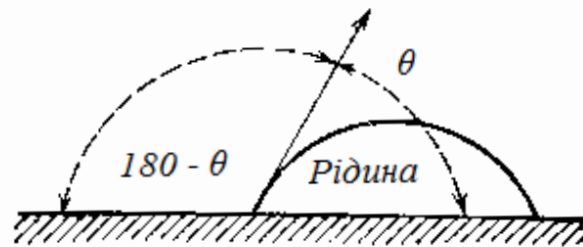


Рисунок 1.2. Кут змочування

Необхідно згадати і про гістерезис змочування – явище, яке пов'язане з тим, що на однаковій основі краплі може перебувати різний об'єм рідини, а отже, крайовий кут буде різний (рис.1.3). Гістерезис змочування проявляється, як правило, на нерівній поверхні, оскільки на ній крайовий кут буде іншим, ніж на ідеально гладкій (рис. 1.4).

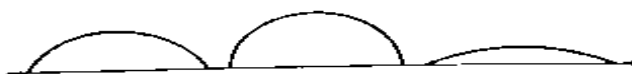


Рисунок 1.3. Гістерезис змочування

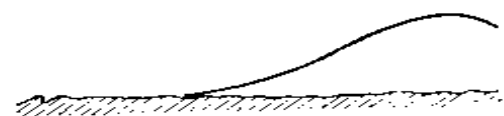


Рисунок 1.4. Гістерезис змочування на нерівній поверхні

Крім гістерезису змочування, важливим фактором є швидкість змочування, яка визначається поверхневим натягом, в'язкістю рідини і розміром капілярів. Виходячи з рівняння Лапласа для капілярного тиску:

$$P_c = \gamma (1/R_1 + 1/R_2), \quad (1.18)$$

де P_c – капілярний тиск; γ – поверхневий натяг; R_1 і R_2 – радіуси кривизни на межі рідина – пар), можна прийти до таких висновків:

1) в'язкість клею має бути в момент нанесення такою низькою, щоб час заповнення капілярів і порожнин був досить малим у порівнянні з часом наростання в'язкості клею в процесі затвердіння;

2) доброго змочування можна досягти, якщо рівноважний крайовий кут дорівнює нулю або близький до нуля;

3) оскільки на величину крайового кута впливають забруднення (а також нерівності поверхні і викликаний цим гістерезис змочування), неможливо априорі стверджувати, що поверхня A буде добре змочуватися рідиною L , оскільки забруднення можуть стати цьому на заваді і там, де ми цілком виправдано чекали доброго змочування;

4) повітряні включення зазвичай легше усунути, якщо клей містить розчинник з низьким поверхневим натягом, однак гарантувати їх повне видалення неможливо;

5) нерівності на поверхні не роблять істотного впливу на видалення повітря, доти, поки в них не потрапить клей (розчинник);

б) крім швидкості змочування, велике значення має тривалість контакту клею з поверхнею; контакт можна поліпшити, застосовуючи тиск (рис. 1.5).

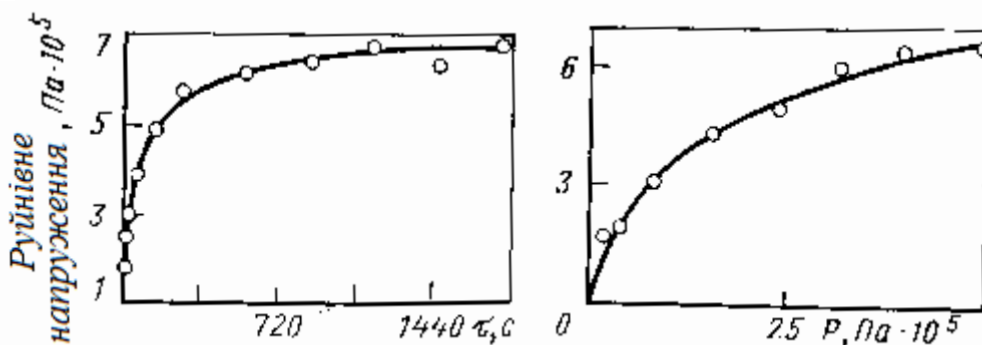


Рисунок 1.5. Залежність руйнівного напруження від тривалості контакту і контактного тиску

Таким чином, застосування розчинників з низьким поверхневим натягом, клеїв з низькою в'язкістю, підвищення температури, використання тиску,

збільшення тривалості контакту – головні передумови отримання міцного з'єднання. Все це слід мати на увазі при виборі клею, технології його нанесення і затверднення. Дані про зв'язок змочуванням, спосіб обробки поверхні і міцність шва наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Залежність між змочуванням, способом обробки поверхні і міцністю клейового шва

Обробка	Крайовий кут, град	Міцність при зсуві, %	Нерівність поверхні, мкм
Обробка розчинниками			
Вихідний матеріал	77	28	0,254–0,381
Толуол	59	93	0,254–0,381
Гептан	51	93	0,254–0,381
Метилетилкетон	47	94	0,254–0,381
Етилацетат	43	100	0,254–0,381
Трихлоретилен, 5 хв	35	110	0,254–0,381
Метилхлороформ + ультразвук			
13 хв	34	114	0,254–0,381
20 хв	34	113	0,254–0,381
Механічна обробка (знежирення, механічна обробка, знежирення)			
Знежирення	42	100	0,254–0,381
Полірування сизалем 30 с	42	103	0,127
Полірування 60 с (механічне)	41	108	0,254
Опіскоструєння 60 с	36	125	2,032–2,540
Полірування м'яким колом 60 с	44	103	0,254–0,381
Опіскоструєння 60 с	36	125	2,032–2,540
Механічна обробка (знежирення, механічна обробка, знежирення)			
Знежирення	42	100	0,254–0,381
Хромова кислота			
pH = 0,6–0,8	42	101	0,254–0,508
pH < 0,1	38	111	0,254–0,508
Соляна кислота, 50%-ва			
1 хв	38	104	0,254–0,508
3,5 хв	37	110	0,254–0,508
7 хв	35	113	0,254–0,508
Азотна кислота, 50%-ва			
1 с	38	115	0,254–0,508
5 с	35	128	0,254–0,508
10 с	35	130	0,254–0,508
Суміш сірчаної кислоти і солей хрому			
0,5 хв	34	105	0,635–0,762
2 хв	34	104	1,016–1,270
5 хв	34	108	1,524–1,778

Закінчення табл. 1.2

Обробка	Крайовий кут, град	Міцність при зсуві, %	Нерівність поверхні, мкм
Фтористоводнева кислота 1 хв 1,5 хв	29 29	112 115	0,254–0,381 0,254–0,381
Лужне травлення рН = 12,6; 10 хв; 82 °С	36	119	0,254–0,508

Примітки. Матеріал – сталь SAE 1010; нерівність поверхні 10–15 мкм; епоксиполіамідний клей Епон 828 (100 мас. ч.), версамід 115 (20 мас. ч.), метилендіамін (22,5 мас.ч.); режим затверднення 48 год при кімнатній температурі + 3 ч при 121 °С; одинарне з'єднання внахлестку стандартних розмірів; випробування на зрушення при розтягуванні $135 \cdot 10^5$ Па на машині Inston tester; швидкість 0,127 см/хв.

Поверхневий натяг має велике значення не тільки для змочування, але і прямо пов'язаний з когезією матеріалу. Зі співвідношення:

$$\Delta F_c = -2\gamma, \quad (1.19)$$

де F_c – вільна енергія когезії чистого субстрату; γ – питома вільна поверхнева енергія чистого субстрату.

Впливає висновок, який можна виразити залежністю:

$$-\Delta F_c \approx \sigma_c \cdot \Delta_z. \quad (1.20)$$

Наприклад, когезійна міцність води, розрахована за цим рівнянням, складає $1,4 \cdot 10^3$ МПа. Якщо виходити зі значень вільної поверхневої енергії твердих металів, ця залежність дала б значення теоретичної міцності при розтягуванні чорних металів близько $7 \cdot 10^4$ МПа.

Орован запропонував уточнити теорію, виходячи з синусоїдальної залежності, яка з урахуванням закону Гука визначає залежність для ідеальної когезійної міцності:

$$\sigma_c = (E\gamma/Z_0)^{1/2}, \quad (1.21)$$

де E – модуль пружності при розтягуванні.

Зі співвідношення (1.21) впливає, що якщо ми знаємо E , то можна обчислити поверхневий натяг і, навпаки, якщо E і γ виміряні, то можна визначити ідеальну когезійну міцність. Залежність деформації – напруга досліджуваних матеріалів має характер не синусоїди, а потенційної функції. Отже, здавалося б,

що недоліки теорії Полянї – Орована можна усунути, якщо ввести в міркування вже відомий вираз для потенціалу Ленарда – Джонса [24]:

$$U = A/r^6 + B/r^{12} \quad (1.22)$$

(A і B див. нижче, у рівнянні (1.23) C_1).

Практична перевірка цієї залежності подана на рис. 1.7, на якому показано, які сили тяжіння діють між двома паралельними пластинами у вакуумі. Крива підпорядковується рівнянню

$$\sigma_c = 2C_1/3\sqrt{3} \cdot Z_0^3, \quad (1.23)$$

яке є основою для розрахунку σ_c . У цьому рівнянні

$$C_1 = 2 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot A_{12}/6, \quad (1.24)$$

де $n = 6 \cdot 10^{23}$; $A = 400 \cdot 10^{-6}$ Дж/см⁶; $B = 15/2 \cdot A \cdot Z_0^6$ (при $Z = Z_0$).

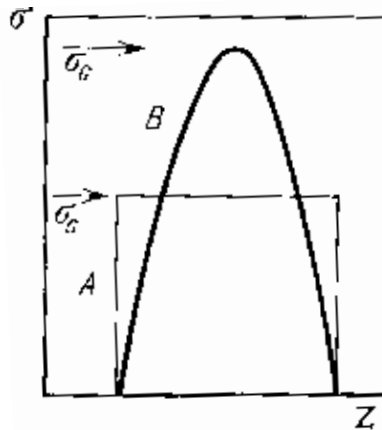


Рисунок 1.6. Функція когезійної міцності за Полянї (крива A) і за теорією Орована (крива B)

Сила, що діє при поділі двох частинок або паралельних поверхонь, досягає максимуму при їх відриві, тобто при досягненні когезійної енергії твердої речовини або адгезійної енергії (сили) на кордоні поверхонь. Це має місце при $Z_{\text{макс}} = 6\sqrt{3} \cdot Z_0 = 1,20 Z_0$. Припустимо, що розсування пластин ми проводимо, наприклад, в атмосфері азоту. В такому випадку слід враховувати і його діелектричну проникність. При невеликому зазорі між пластинами в нього не може проникнути жодна молекула середовища, при великому – відбувається адсорбція середовища, яка пов'язана з її діелектричною проникністю.

З рівняння 1.4 досить складно можна вивести залежність між когезією і модулем пружності:

$$\sigma_c = 0,064 \cdot E, \quad (1.25)$$

яка являє собою ідеальну когезійну міцність як функцію навантаження при розтягуванні.

Рівняння потенціалу Ленарда – Джонса можна сформулювати в більш узагальненому вигляді [24]:

$$U = -A/r^n + B/r^m, \quad (1.26)$$

де n і m – константи, які не повинні мати значення 6 і 12 відповідно.

Перетворюючи відношення (1.26) так само, як і (1.4) при виведенні (1.26)], отримаємо:

$$\sigma_c = \left(\frac{n-3}{m-3} \right)^{(n-3)/(m-3)} \cdot \frac{E}{m-3}. \quad (1.27)$$

Подальші перетворення з урахуванням співвідношення (1.21) дадуть:

$$\gamma = E \cdot Z_0/32. \quad (1.28)$$

Це співвідношення добре узгоджується з результатами, які підтверджені рис. 1.7 і табл. 1.3 та 1.4.

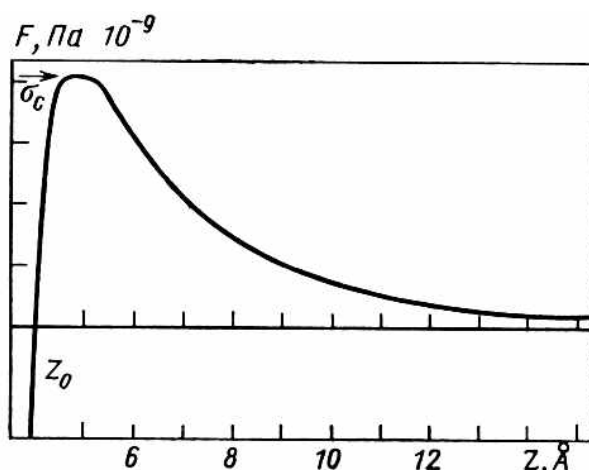


Рисунок 1.7. Взаємодія двох паралельних пластин у вакуумі відповідно з потенціалом Ленарда – Джонса

Т а б л и ц я 1.3

Молекулярні і деформаційні характеристики деяких матеріалів

Матеріал	$E \cdot 10^{-3}$, МПа	Z_0 , Å ⁰	γ , Н/м	
			розраховані *	експериментальні **
Поліетилен (лінійний)	1,1	4,3	14	33–36
Політетрафторетилен	0,45	4,8	7	24
Мідь	150	2,28	800	2000

Примітки: * – за рівнянням (1.28); ** – екстрапольовані зі значень при високих температурах.

Розраховані значення ідеальної когезійної міцності σ_c

Матеріал	σ_c , МПа		
	$\sigma_c = 0,006 E$	$\sigma_c = (32/9 (3)^{1/2}) (\gamma/Z_0)$	$\sigma_c = (E\gamma/Z_0)^{1/2}$
Поліетилен(лінійний)	$7 \cdot 101$	$16 \cdot 101$	$30 \cdot 101$
Політетрафторетилен	$3 \cdot 101$	$10 \cdot 101$	$15 \cdot 101$
Мідь	$1,0 \cdot 104$	$1,8 \cdot 104$	$4 \cdot 104$

Згідно з наведеним міркуванням і розрахункам, на основі експериментів і даних можна зробити висновок про залежність між вільною адгезійною і вільною когезійною енергіями системи [24].

$$-\frac{\Delta F_a}{(\Delta F_{c1}\Delta F_{c2})^{1/2}} \equiv \varphi \equiv \frac{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_{12}}{2(\gamma_1\gamma_2)^{1/2}}. \quad (1.29)$$

З (1.29) можна вивести залежність для поверхневого натягу на межі поділу фаз (міжфазний натяг):

$$\gamma_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - 2\varphi(\gamma_1\gamma_2)^{1/2}. \quad (1.30)$$

Співвідношення для ідеальної адгезії між двома фазами має вигляд:

$$\frac{-\Delta F_a}{2(\gamma_1\gamma_2)^{1/2}} = \varphi. \quad (1.31)$$

Його перетворення дає:

$$\varphi(\gamma_1\gamma_2)^{1/2} = \int_{Z_{01,2}}^{\infty} \sigma_{12} dz. \quad (1.32)$$

Ці розрахунки провів Ханстбергер при виведенні критерію (критерій Ханстбергера), за допомогою якого можна розрахувати, в яких умовах відбувається адгезійне або когезійне руйнування. Якщо $\varphi = 1$, то $\sigma_{c1} < \sigma_{a12} < \sigma_{c2}$, тобто ідеальна адгезійна міцність знаходиться в інтервалі між значеннями ідеальної когезійної міцності обох фаз. Якщо ідеальна адгезійна міцність менша ідеальної когезійної міцності більш слабкої фази, то для адгезійного руйнування має діяти умова $\sigma_{a12} / \sigma_{c1} < 1$ і навіть $\sigma_{a12} / \sigma_{c1} < 1$, тобто критерій Ханстбергера для адгезійного руйнування повинен мати вигляд:

$$\varphi < (\gamma_1\gamma_2)^{1/2} \frac{(Z_{0,1} + Z_{0,2})}{2Z_{0,1}}. \quad (1.33)$$

При $\phi = 1$ адгезія між фазами більша, ніж міцність певної фази, а отже, руйнування когезійне і станеться в найбільш слабкій фазі.

Гуд і співробітники застосували ці висновки до системи поліетилен – залізо і отримали величину $\phi \approx 0,11$. Однак, оскільки формується в дійсності не система поліетилен – залізо, а тільки поліетилен – оксид заліза, вони припустили, що γ для оксиду заліза знаходиться в інтервалі 500–1000; тоді $\phi = 0,17–0,24$. Правда, немає даних про передбачення якості шва таким способом для більшості матеріалів.

Необхідно нагадати, що мова йдеться про ідеальну адгезійну міцність, що можлива тільки тоді, коли слабкі адгезійні шари повністю усунені. Однак це залежить і від досконалості технології, як це впливає з експерименту Ханстбергера (рис. 1.8).

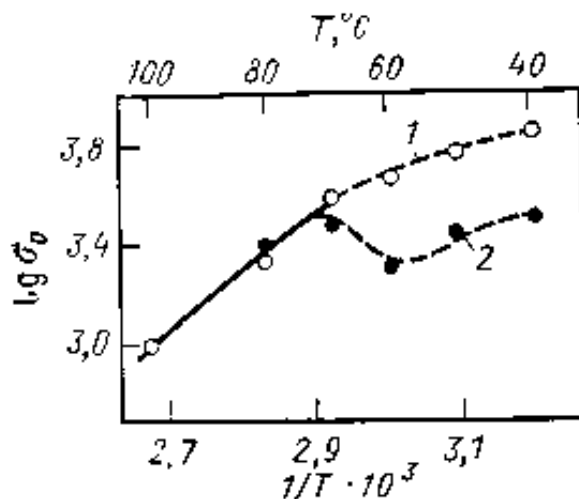


Рисунок 1.8. Залежність напруження при відшаруванні (σ_0) від зворотної величини абсолютної температури для системи сталь – полібутилметилакрилат (швидкість відшаровування 2-3 мм/хв):

1 – зразок затверджували 1 год. при 150 °C; 2 – зразок затверджували 1 год при 100 °C; суцільна крива – когезійне руйнування; пунктир – руйнування на межі або у приграничній зоні

Після нанесення клею в процесі склеювання починають протікати фізичні і хімічні процеси, результатом яких є зростання когезійної міцності системи. Ці процеси іноді можуть протікати і в подальшому, при експлуатації з'єднання, однак міцність асимптотично наближається до певного значення, яке відповідає так званій кінцевій міцності клейового з'єднання. Кінцева міцність з'єднання залежить від локальних значень міцності, тобто від міцності в місцях, де руйнування настане раніше, ніж по всій площі з'єднання. При дії руйнівного

навантаження, як правило, оцінюють не тільки кінцеву міцність, але і характер процесу руйнування, яке може відбуватися в субстраті, в адгезиві (клеї) і на межі клей-субстрат.

На думку Бікермана і деяких інших авторів, руйнування на межі субстрат – клей відбувається настільки рідко, що для вивчення поведінки клейових систем воно не має ніякого значення. Це аргументується тим, що між субстратом і клеєм не існує чіткої межі внаслідок дифузійних, кристалізаційних, а іноді і хімічних процесів, які протікають між фазами. Ці процеси мають місце і в разі несумісних матеріалів, хоча і в різному ступені, що було доведено за допомогою люмінесценції. В результаті цих процесів виникає перехідна зона, що складається з декількох шарів, в яких співвідношення проникаючих один в одного матеріалів різне. Оскільки заперечується наявність різкого розмежування між двома фазами, то не може існувати й істинно адгезійного руйнування. Руйнування може бути тільки когезійним: при руйнуванні на обох поверхнях в різних частинах шва і в різному співвідношенні знаходяться залишки протилежної фази.

Бікерман стверджує, що навіть тоді, коли можна припустити наявність різкого розмежування між двома фазами (наприклад, в системі скло – поліетилен), руйнування вздовж цієї межі не відбувається. Це твердження ілюструє рис. 1.9. Припустимо, що нам вдасться докласти навантаження в поєднанні точно по межі перпендикулярно до площини шва. Тріщина почне розширюватися в площині межі. Але вже після руйнування перших зв'язків (молекулярних чи атомних) тріщина може поширюватися, розгалужуючись між молекулами субстрату або клею. Найбільш ймовірно, таким чином, що тріщина проростає від ділянки клейового шва, де за рахунок нерівності поверхні утворюється більш товстий шар клею (див. область Q на рис. 1.9). Тріщина може поширюватися в трьох напрямках, причому ймовірність поширення в прямому напрямку становить $(1/3)^2$ (якщо тріщина поширюється між трьома атомами). Якщо тріщина поширюється між $n + 1$ атомами, то ймовірність прямого поширення буде $(1/3)^n$, якщо $n = 10$, то ймовірність складе $1 : 59000$, тобто розірветься тільки один з 59000 зв'язків між молекулами субстрату і клею. При переході від площини в просторову сферу ймовірність поширення тріщини в площині шва буде тільки $(1/7)^n$. Цей розрахунок дійсний тільки за умови, що міцність зв'язку субстрат – клей дорівнює когезійній міцності субстрату і клею. Якщо адгезія (тут мається на увазі ідеальна адгезійна міцність) хоча б в деяких місцях слабкіша, то тріщина найімовірніше буде поширюватися в напрямку найменшої міцності.

Це відповідає і розрахункам за допомогою критерію Ханстбергера (рівняння (1.29)–(1.32)).

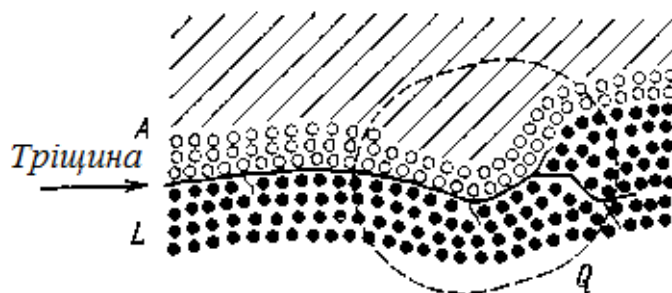


Рисунок 1.9. Руйнування на межі між двома фазами (A – субстрат, L – клей, Q – область, в якій руйнування за клеєм є наслідком нерівності поверхні)

На зауваження подібного характеру Бікерман відповідає наступними міркуваннями, які спираються на молекулярну теорію адгезії і когезії. Якщо ми відокремлюємо від субстрату клей, то легше визначається кілька молекул, ніж ціла макромолекула. В цьому випадку тріщина, яка піде через макромолекулу, буде направлятися в новому напрямку і проникне в простір, заповнений макромолекулами, тобто відійде від площини межі між двома фазами.

У з'єднаннях метал – полімер зв'язок метал – полімер має бути міцнішим, ніж будь-який інший. Отже, під дією молекулярних сил відбувається когезійне, а не адгезійне руйнування.

На практиці завжди мова йдеться про когезійне руйнування за клеєм, навіть якщо виключається виникнення слабого примежового шару. Доказом цього може бути експеримент, здійснений в роботі (рис. 1.10).

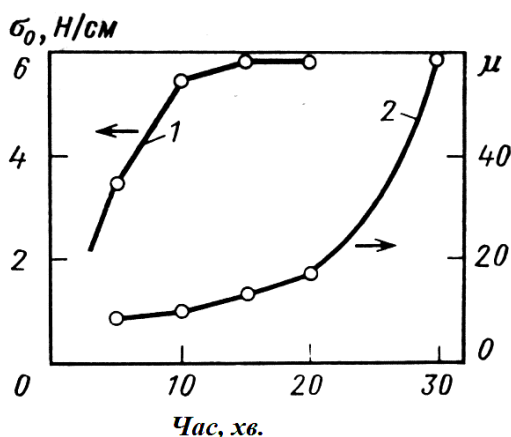


Рисунок 1.10. Залежність міцності при відшаруванні (σ_0) і товщини залишкового на субстраті шару клею від довготривалості контакту (μ – один мономолекулярний шар клею товщиною 30 нм)

Поліпропілен ($M = 30000$), мічений радіоактивним вуглецем, розчиняли в гарячому бензолі. Цим розчином просочували скловолокно і після випаровування розчинника отримували смужку армованого поліпропілену. Цю смужку протягом часу t при температурі T притискали до субстрату, а потім відділяли і вимірювали напругу при віддірі. Крім того, вимірювали радіоактивність субстрату і визначали кількість поліпропілену, який залишився на поверхні.

Дана система була обрана тому, що для неї характерна мінімальна ймовірність взаємної дифузії компонентів і виникнення перехідних шарів. З рис. 1.10 слідує, що при наявності 15 (і більше) мономолекулярних шарів міцність при віддірі стає постійною. При руйнуванні з'єднання на субстраті завжди залишаються сліди клею [22-24].

1.5. Реологічні явища в клейовому шві

Завжди руйнування клейового з'єднання відбувається по клею і міцність шва має бути пропорційною когезійній міцності найбільш слабкого компонента системи. При цьому необхідно враховувати механічні та реологічні властивості цих компонентів [24-26]. Крім цього слід брати до уваги внутрішні напруження, які виникають при затвердненні, кристалізації, коливанні температури та ін. У результаті дії цих напруг в клейовому шві утворюються порожнечі і тріщини різної форми. Їх кількість і розміри теж мають велике значення. Для точного обліку цих чинників необхідний великий і складний математичний апарат.

На практиці деякі реологічні властивості клеїв простіше оцінити за допомогою модуля пружності при розтягуванні і зсуві. Основне правило – модулі пружності всіх компонентів клейової системи мають бути якомога ближче один до одного. Це досягається приготуванням різних клейових композицій, що являють собою суміші твердих, еластичних або пластичних компонентів, що дозволяє регулювати жорсткість і пружність клейового шва залежно від умов експлуатації.

Додаткові дані про поведінку матеріалу дає визначення відношення відносною молекулярної маси полімеру до рівноважного модуля пружності. На підставі моделей Максвелла і Кельвіна – Фойгта було виведено рівняння [24]:

$$E_c = (3\rho RT/M_c)(1 - 2M_c/M), \quad (1.34)$$

де E_c – рівноважний модуль пружності при дії навантаження протягом часу; ρ – густина клейової композиції; R – універсальна газова постійна; T – температура; M – середня відносна молекулярна маса незшитого полімеру; M_c – середня відносна молекулярна маса при даній температурі.

Для ізотропних нестискуваних полімерів співвідношення модулів пружності при розтягуванні і зсуві виражається зазвичай ставленням

$$E = 3G. \quad (1.35)$$

Реологічні властивості клейового шва не можуть визначатися тільки властивостями полімеру [27], оскільки, по-перше, іноді клей – це суміш полімерів, а, по-друге, необхідно враховувати молекулярну когезію, внутрішню напругу, концентрацію напружень, геометрію з'єднання, наявність пустот та інших дефектів у з'єднанні. Якісний взаємозв'язок цих факторів сформулював Бікеоман:

$$\xi = (\alpha f_m + s) \beta, \quad (1.36)$$

де ξ – молекулярна когезія; f_m – міцність з'єднання; s – внутрішня напруга; α – коефіцієнт, що відображає відмінності механічних властивостей субстрату і клею; β – коефіцієнт, що відображає структурну неоднорідність твердого тіла (клею), наявність в клеї дефектних місць, їх форму і кількість; коефіцієнт часто називають фактором концентрації напруги, він залежить від геометрії з'єднання.

При теоретичному визначенні концентрації напружень біля отворів [29], виходять з того, що затверднений клей в певних умовах поводить себе як пружне тіло, підкоряючись закону Гука, і що шар матеріалу, в якому є порожнина, для спрощення можна вважати плоским (двовимірним).

Якщо на плівку клею діє сила $F = f \cdot \omega \cdot \delta$, причому $\omega > \delta$ (δ – товщина субстрату), то напругу на коло порожнини можна подати відношенням

$$\sigma_p = 0,5 f [(1 - p^2) + (1 - p^2 + 3p^4) \cos 2\varphi], \quad (1.37)$$

де $p = r_0 / r$ (r – відстань якоїсь точки в плівці від центральної порожнини); φ – кут між напрямком дії напруги і радіусом, що з'єднує центр кола з точкою, для якої діє рівняння (1.28); якщо $r = r_0$, а $p = 1$ і $\varphi = 0$, то вона знаходиться у зв'язуючому стані.

Ясно, що сила не може бути додана в порожнині. Напруга стосовно контуру колової порожнини 0 буде подана рівнянням

$$\sigma_{\varphi} = 0,5f \left[(1 + p^2) - (1 + 3p^4) \cos 2\varphi \right]. \quad (1.38)$$

Ця напруга буде нульовою, якщо $\varphi = 0$ і при $p = 0$, тобто далеко від порожнини. На межі, тобто при $p = 1$,

$$\sigma_{\varphi} = f(1 - 2\cos\varphi). \quad (1.39)$$

І з правого, і з лівого боку від порожнини (рис. 1.11) напруга буде в три рази більшою середньої, тобто

$$\sigma_{\varphi} = 3f. \quad (1.40)$$

Відношення (1.40) свідчить про те, що коефіцієнт β з виразу (1.36) дорівнює 3. Це підтверджує давно відомий факт істотної концентрації напружень по краях клейового з'єднання.

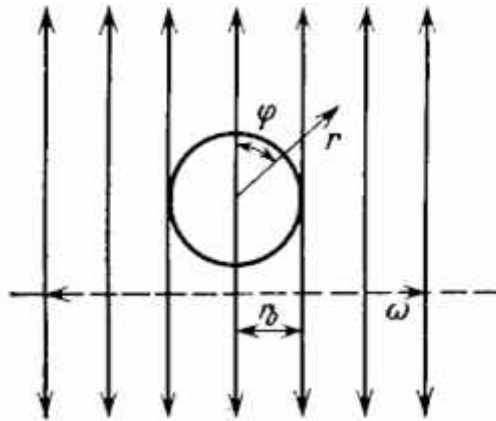


Рисунок 1.11. Концентрація напружень біля круглого отвору:

ω – ширина шару клею; r_0 – радіус порожнини; $\omega/r_0 \geq 5$;
 r – відстань до точки, в якій діє напруга

Якщо r_0 тільки незначно менше, то

$$\beta = 3\omega/(\omega - \omega_0). \quad (1.41)$$

Для напруги при зрізі Савін та деякі інші автори вивели співвідношення:

$$\tau = 0,5 \cdot f \cdot (1 + 2p_2 - 3p_4) \cdot \sin^2\varphi, \quad (1.42)$$

яке дорівнює нулю уздовж кола порожнини, його найбільше значення досягається при $\sin 2\varphi = 1$, тобто при $\varphi = 45^\circ$ і $p = \sqrt{1/3}$ і, отже, при $r = 1,73 \cdot r_0$.

Набагато більша напруга виникає в разі еліптичних порожнин, при цьому:

$$\sigma_{\psi} = f(1 + 2 a/b); \beta = 1 + 2 a/b, \quad (1.43)$$

де a і b – осі еліпса.

При наявності квадратних порожнин найбільша напруга відзначається в кутах цих порожнин, причому значення β залежить від гостроти кутів; якщо кути прямі, то β залежить від співвідношення ширини і довжини порожнини.

У разі двох круглих пустот напруга буде залежати від їх взаємного розташування і від напрямку дії зовнішніх сил (рис. 1.12). Якщо напруга діє в напрямку осі y , то дві порожнини послаблюють шов більше, ніж одна, але різниця дуже незначна, якщо $\lambda > 1,5$. При $\lambda = 1,5$ величина β досягає максимуму, рівного 3,26, а при $\lambda = 2,0$ значення $\beta = 3,02$, що практично дорівнює його значенням при $\lambda = \infty$. Якщо сила діє паралельно осі x , то дві колові порожнини менш небезпечні, ніж одна, бо утворюють еліпс. В цьому випадку максимальне значення $\beta = 2,57$ при $\lambda = 1$.

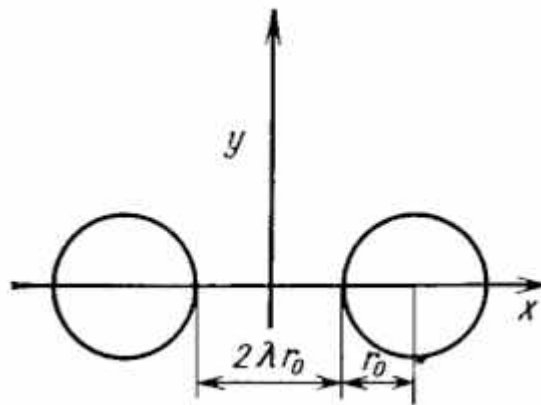


Рисунок 1.12. Напруження у шарі з двома круглими отворами

Порожнини, які виникають у плівці клею, безпосередньо впливають на деформаційні і міцнісні властивості шва, у зв'язку з чим необхідно вживати відповідних заходів, щоб обмежити їх появу (вакуумування клею, підвищений тиск і температура при затвердненні, відсутність нерівностей на поверхні і т. ін.).

У рівнянні (1.36) крім коефіцієнтів α і β є ще одна величина, яка впливає на поведінку з'єднання при навантаженні і пов'язана вона з реолоічними властивостями. Йдеться про заморожені внутрішні напруження, що виникають внаслідок зміни структури, наприклад, при затвердненні, при нагріванні і подаль-

шому охолодженні, що пов'язано зі зростанням усадки і зменшенням об'єму. З урахуванням цього показника відношення (1.36) можна перетворити на:

$$f_m = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\xi}{\beta} - s \right), \quad (1.44)$$

де f_m – руйнівне напруження; s – «заморожена» внутрішня напруга.

Рівняння (1.44) справедливе для якісного з'єднання, тобто для з'єднання без слабких місць.

Внутрішня напруга, викликана усадкою, залишається незмінною тільки доти, поки отверднений клей не відчує дії зовнішнього навантаження, тобто поки концентрація напружень не змінилася під дією зовнішніх сил [24-26].

Вважаємо товщину шару клею, який заповнює простір між паралельними площинами з'єднання, постійною і позначимо її h_0 . Якщо при затвердненні не діють зовнішні сили, то клей після затверднення буде мати товщину h_1 , причому $h_0 > h_1$ (тобто зовнішні сили мають бути діяти проти усадки). Якщо співвідношення $(h_0 - h_1)/h_0$ менше, ніж загальне відносне подовження клею, то шар клею не зруйнується (можливе руйнування поблизу межі розділу трьох фаз). Далеко від торця шва, тобто в області, де приховані внутрішні напруги діють перпендикулярно зклеюваної поверхні, їх значення в затвердженій плівці клею становить:

$$s = \frac{E_2 (h_0 - h_1)}{h_0}. \quad (1.45)$$

Тут E_2 – модуль пружності клею (виходимо з припущення, що клей у отвердненому стані поводить себе по закону Гука, що насправді є спрощенням).

Тріщина в клейовому шві не утворюється, якщо s менше кінцевої міцності клею при розтягуванні, але допустимі напруги мають бути меншими за цю величину.

Якщо при розтягуванні шару клею без внутрішньої напруги (f_m) він буде деформуватися за законом Гука, то для руйнування клейового шва, в якому існують внутрішні напруження, необхідно прикласти напругу:

$$f_m = f_m - \frac{E_2 (h_0 - h_1)}{h_0}. \quad (1.46)$$

Часто в процесі старіння шва f_m повільно зростає; якщо клей містить пластифікатор, це зростання відбувається трохи швидше. Це приписується релаксації внутрішніх напружень, в результаті чого величина s зменшується.

Контрольні запитання

1. Що означає термін «адгезія»?
2. Які теорії адгезії існують на теперішній час?
3. Які сили обумовлюють адгезію?
4. Розкажіть про механізм адгезії.
5. Які реологічні явища існують у клейовому шві?

ТЕХНОЛОГІЯ СКЛЕЮВАННЯ

2.1. Технологічний процес склеювання

Технологічний процес склеювання (ТПС) – виробничий процес, спрямований на утворення клейового з'єднання. Цей процес відноситься, як правило, до типових технологічних процесів тому, що більшість технологічних операцій і переходів незалежно від обраного клею, типу матеріалів, що сполучаються, конструкції виробів, масштабів виробництва однакові. ТПС деталей з пластмас і полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), а також з інших матеріалів незалежно від їх природи, складається з таких операцій і/або переходів [27, 31]:

- 1) зберігання клеїв або їх компонентів, ґрунтів і допоміжних матеріалів;
- 2) приготування клею;
- 3) підготовка поверхонь, що з'єднуються;
- 4) нанесення клею;
- 5) відкрита витримка;
- 6) монтаж деталей, що склеюються;
- 7) формування клейового шару;
- 8) контроль якості клейового з'єднання.

2.1.1. Зберігання клеїв або їх компонентів, ґрунтів і допоміжних матеріалів

Тара, або упаковка, в якій зберігаються готові клеї або їх компоненти, і умови зберігання повинні бути безпечними для їх технологічних властивостей і відтворення основних показників експлуатаційних властивостей клейового з'єднання. Рідкі клеї або їх компоненти зберігаються в умовах, що виключають їх забруднення, зволоження, нагрів, опромінення, видалення летких компонентів (розчинників, пластифікаторів, твердників і т. ін.). Зручною формою збереження готових до вживання клеїв є затарювання їх в туби з м'якої жерсті, а перед нанесенням шприцюванням – затарювання в полімерні, картонні та інші склянки (патрони). У загальному випадку приміщення, де зберігаються клеї, має відповідати умовам зберігання зв'язних, препрегів і інших хімічних речовин, які використовуються при формуванні деталей з ПМ і ПКМ. Температура

в приміщенні має бути в межах 15-25 ° С. Дотримання правильності зберігання контролюється вхідним контролем матеріалів на відповідність паспортним даним (в'язкість, вміст летких або сухий залишок, активність твердників, однорідність суміші тощо) [28].

2.1.2. Приготування клею

Для склеювання різних матеріалів бажано використовувати клеї, виготовлені в умовах спеціалізованого виробництва. Однак це не завжди можливо через обмежену життєздатність клеїв. Багато клеїв, наприклад епоксидні, поліуретанові, поліефірні та ін., необхідно готувати безпосередньо перед застосуванням. Від способу приготування клеїв в значній мірі залежить якість клейового з'єднання, тому при приготуванні клеїв необхідно неухильно дотримуватися всіх вимог технічної документації [27-28]. Необхідно також:

1) ретельно дотримуватися рекомендованого співвідношення компонентів, це особливо важливо для твердників та каталізаторів;

2) переконатися, що температура компонентів відповідає температурі приміщення, оскільки на охолоджених продуктах може утворитися конденсат, що погіршує властивості клею;

3) для приготування клеїв, що мають невелику життєздатність, доцільно використовувати ємності з подвійними стінками, між якими заливають охолоджуючий агент;

4) для приготування клеїв, що містять велику кількість розчинників, необхідно використовувати ємності, що закриваються.

Для приготування клеїв можна використовувати настільні змішувачі різної ємності (0,3; 0,6 і 1,5 л). Так, продуктивність змішувача місткістю 0,6 л становить 1 кг/год, споживана потужність 0,28 кВт.

Застосування механізованого перемішування клеїв дозволяє підвищити міцність клейових з'єднань на ~10 % у порівнянні з ручним перемішуванням. Вельми ефективним є використання для приготування клеїв, особливо що містять наповнювач, ультразвукового диспергатора УЗДН-1; при цьому міцність клейових з'єднань підвищується на 20 % у порівнянні з ручним перемішуванням.

В сучасних виробництвах клеї надходять до споживача у вигляді двох (рідше трьох) упаковок. Основне правило при змішуванні компонентів клею або упаковок на місці його використання – введення затвердника або прискорювача затвердження безпосередньо перед нанесенням клею. Важливо встанов-

лення допустимого відхилення співвідношення компонентів – наприклад, відхилення на $\pm 0,03$ % у двопакувальних поліуретанових клеїв може істотно вплинути на якість клейового з'єднання. Точність дозування компонентів клею можна підвищити шляхом використання більш коротких еластичних транспортуючих шлангів і зниження гідравлічного опору дозуючих вентилів. Бажано також, щоб обидва компонента клею мали однакову або близьку в'язкість. Велике значення має і рівномірність змішування компонентів, яка поліпшується при використанні автоматизованих установок для дозування і змішування компонентів.

Простим і продуктивним методом оцінки рівномірності змішування компонентів клеїв фахівцями з «Technische Hochschule» (Аахен, Німеччина) вважається вимір електропровідності наважки клею, наприклад, в п'яти різних напрямках. Фахівці фірми «Ciba Geigy AG» (Базель, Швейцарія) рекомендують здійснювати технологічний контроль співвідношення компонентів клею також виміром його електропровідності, оскільки результати вимірювань однозначно характеризують рівномірність змішування.

Попередня обробка клею механічними ультразвуковими коливаннями (до 10 с.) сприяє кращому диспергуванню твердника, знижує в'язкість композиції, прискорює процес подальшого затверднення, підвищує міцність з'єднання.

Сучасною тенденцією в технології склеювання при складанні виробів машинобудування є застосування готових клеїв. У цьому випадку необхідність в операції приготування клею відпадає.

Клеї-розплави виготовляють періодичним способом в реакторах з Z-подібними лопатями і розвантажувальним шнеком, у плавильних котлах, у системах, що складаються з плавильного резервуара, насоса і кінцевого змішувача для змішування розплавів, а також валковим способом без спеціального підігріву на дво- або тривалкових установках. При безперервній схемі використовуються двошнекові екструдери з одночасним пропорційним дозуванням твердих і рідких компонентів, їх плавленням, гомогенізацією і подальшим вивантаженням і формуванням.

2.1.3. Нанесення клею

При нанесенні клею вирішують три завдання: дозування клею, рівномірний його розподіл, забезпечення контакту клею з поверхнями, що сполучаються. Вибір способу нанесення, дозування і забезпечення контакту клею з підложкою залежать від стану клею (рідкий, пастоподібний, твердий, плівковий

або порошкоподібний), а також від характеру деталей (з великою площею поверхонь, що склеюються, великогабаритні конструкції з обмеженою площею поверхонь, що з'єднуються, переміщення яких утруднено, або малогабаритні деталі, що легко транспортуються).

При нанесенні клеїв на поверхні, що підлягають склеюванню, дуже важливо, щоб шар клею був рівномірний і строго певної товщини. Товщина шару клею повинна бути в межах 0,1–0,2 мм. При товщині шару до 0,1 мм залежність міцності клейового з'єднання при зсуві від товщини шару клею відповідає логарифмічному закону. Максимально допустима товщина шару залежить від типу клею. Наприклад, показано, що при збільшенні шару поліуретанового клею ВІЛАД-ПК від 0,2 до 7 мм міцність клейових з'єднань знижується з 19 до 5–6 МПа.

Вибір способу нанесення клею визначається його в'язкістю, конфігурацією і розмірами поверхонь, що склеюються, та типом обладнання [27-28].

Рідкі клеї наносять розмазуванням кистями і шпателями, напиленням, видавлюванням з пістолетів, шприців та екструдерів, технікою друку за допомогою шпателів і валків, поливом. Для поліпшення якості нанесення і зменшення витрати клею розпилення проводять в електростатичному полі, де заряджені негативно частинки клею рухаються до зарядженої позитивно поверхні деталі та рівномірно на ній осідають. Цей метод дозволяє автоматизувати процес склеювання і знизити втрати клею до 5–10 %. Метод використовується, зокрема, для нанесення фенолокаучукових клеїв на спеціальній механізованій установці УНК-6.

Поширеним способом нанесення клею є занурення деталей в клей або розпилення клею. При використанні останнього способу необхідно враховувати можливість шкідливого впливу на працюючих туману, що утворюється при розпиленні клеїв, тому необхідно обладнати робоче місце вентиляційною системою. Розпиленням наносять клеї, які мають в'язкість за ВЗ-1 не більше 30 с і не утворюють при нанесенні ниткоподібних пластівців. При розпиленні, однак, 40–50 % клею не потрапляє на поверхні, що склеюються [28].

Пастоподібні клеї наносять шпателем. Часто використовують дірчасті валики; при цьому маса клею, нанесеного на поверхню, залежить від розміру осередків валика, в'язкості клею і його концентрації. Іноді клеї наносять за допомогою зворотного валика. Даний спосіб найбільш раціональний при нанесенні клею на плоскі листові матеріали і плівки, які мають велику ширину; він забезпечує максимальну продуктивність і отримання шару клею рівномірної товщини. Для нанесення клеїв по заданому рисунку використовують шовкові трафа-

рети. При нанесенні клеїв-розплавів застосовують соплові головки, валки і ножові пристрої.

При нанесенні плівкових клеїв їх слід ретельно прикатувати до склеюваних поверхонь. При нанесенні клеїв, що містять велику кількість розчинника на поверхні, контакт яких з цим розчинником погіршує їх властивості, використовують так званий *метод відбитку*. Клей попередньо наносять на поліетилен або фторопласт, дають відкриту витримку для видалення більшої частини розчинника, після чого клей переносять на поверхню, що склеюється, прикладаючи до неї плівку з попередньо нанесеним клеєм.

Плівкові клеї вирізають за розміром ділянок, що склеюють, укладають на нанесений точками рідкий клей або підігріту поверхню і накочують валками.

Липкі плівки можна прикатати холодним валком. При нанесенні плівкового клею на торці сот після укладання плівки можна зробити ІЧ-нагрів і обдув підігрітим повітрям.

Механічний вплив на клей при нанесенні забезпечує його контакт з подложкою і вирівнювання його товщини.

Акрилатні клеї можна наносити так званим методом «А + Б», при якому на одну з поверхонь, що з'єднуються, наносять компонент, що містить твердник (ініціатор), а на іншу – компонент, що містить прискорювач затвердіння. Одним з основних правил при цьому є нанесення рідкого клею на обидві поверхні, що сполучаються. При двосторонньому нанесенні епоксидного клею інтервал часу між змішуванням його компонентів або нанесенням і приведенням поверхонь в контакт може становити до 60 хв (в межах періоду збереження клею), що не позначається на міцності з'єднання. При односторонньому ж нанесенні клею міцність при зсуві зразків з алюмінію знижується з 27 до 7 Н/мм² при адгезійному характері руйнування, якщо зазначений інтервал становить всього 30 хв.

Для нанесення порошкоподібних клеїв використовують метод напесовки. Цей метод можна з успіхом використовувати в тих випадках, коли слід нанести клейовий шар строго певної товщини з великою швидкістю (наприклад, при склеюванні кільцевих поверхонь). Для нанесення клеїв використовують спеціальні прес-форми. Нанесення клею методом напесовки сприяє підвищенню показників міцності характеристик клейових з'єднань – міцність підвищується на 80–110 %. Застосування цього методу забезпечує також поліпшення санітарних умов праці, оскільки клей наносять при кімнатній температурі, при якій не відбувається виділення летких частинок. Процес нанесення клею легко автоматизувати.

При нанесенні клею на поверхні в нього потрапляє повітря, що призводить до утворення клейового шва з повітряними включеннями. Для видалення буль-

башок повітря з шару клею після його нанесення доцільно використовувати ультразвукову обробку. Для цього можна рекомендувати ультразвуковий генератор УЗГ-5-1,6/22 в поєднанні з магнітострикційним перетворювачем ПМС-15А-18,3 [27-28]. Оптимальними параметрами технологічного процесу при нанесенні епоксидного клею на основі смоли ЕД-20 є:

Інтенсивність ультразвукових коливань, Вт/см ²	20
Швидкість переміщення деталі в ультразвуковій установці, мм/хв	50
Зазор між поверхнею деталі і перетворювачем ультразвукового генератора, забезпеченим спеціальним інструментом, мм	0,15
Кут нахилу формуючого інструмента до поверхні деталі, град	30

При всіх способах нанесення клеїв слід дотримуватися норм витрати клею, що рекомендуються.

Після нанесення клею в багатьох випадках потрібна відкрита витримка для видалення з клею розчинника, а в деяких випадках – для зниження плинності клею. Температура, при якій проводять відкриту витримку, залежить від використаного в клеї розчинника і його властивостей. Так, для фенолокаучукових клеїв, в яких як розчинник використовують бутилацетат або етилацетат, відкрити витримку проводять при кімнатній температурі протягом 20–30 хв з подальшим нагріванням при 60–65 °С протягом 1,5 год.

При використанні рідких епоксидних клеїв, що тверднуть при підвищених температурах, частина клею в процесі склеювання може витікати, що призводить до зниження міцності з'єднання. Недовгий прогрів таких клеїв після нанесення на поверхню (наприклад, при 80 °С протягом 0,5 год) сприяє зменшенню плинності і підвищенню міцності з'єднань – в деяких випадках на 70 %. Температура відкритої витримки в даному випадку має бути ретельно підібрана.

При необхідності дозування клею користуються тюбиками з досить складною конструкцією. Кількість клею, що видавлюється з тюбика забезпечується спеціальним ковпачком, при обертанні якого відбувається точне дозування вмісту. При закручуванні ж ковпачка здійснюється одночасно очищення транспортуючих каналів і герметизація вмісту тюбика.

У зв'язку з розширенням застосування клеїв-розплавів цілий ряд фірм багатьох країн пропонує пристрої для нанесення цих клеїв. З урахуванням невисокої термостабільності розплавів термоплавких клеїв більш раціональною в порівнянні з шнековою є поршнева конструкція матеріального циліндра для плавлення і подачі клею, в якому плавлення клею відбувається лише в тонкому

шарі, притиснутому холодним поршнем до нагрітої філь'єри. Сьогодні в промисловості є пристрої, що створюють клеї-розплави не тільки у вигляді точок або валиків, але і з можливістю по з'єднувальній поверхні з утворенням тонкого рівномірного шару з поверхневою щільністю 40–60 г/м², а іноді і до 4–8 г/м². Випускаються апарати, за допомогою яких розпорошення розплавленого клею проводиться струменем гарячого повітря (температура повітря може становити залежно від апарата 200 або 100–230 °С). Схеми нанесення регулюються в широких межах: від точкового (при масі клею, що наноситься близько 0,1 г) до смуги довжиною від 100 мм при ширині від 2 до 200 мм як дуже тонким шаром, так і шаром товщиною, вимірюваною міліметрами. При чому немає необхідності очищення сопла розпилювача після закінчення роботи, оскільки при повторному включенні залишений в ньому клей знову плавиться і використовується за призначенням. Маса апарата, наприклад, марки TR-60.2 фірми «Reka» (Німеччина) – 1200 р, у пристроях для нанесення спінених клеїв проводиться попереднє змішування розплавів з інертним газом.

Елементи пристроїв, призначених для нанесення клеїв, які затверджуються під впливом вологи, повинні бути попередньо просушені нагрітим азотом або повітрям.

В установках для нанесення клеїв швидкість переміщення пристрою, що наносить клей, не повинна перевищувати швидкості дозування клейового валика з метою збереження його неперервності.

Задовольнити вимоги строго контрольованого нанесення клеїв в автомобілебудуванні можуть повністю автоматизовані, в тому числі роботизовані пристрої. До цих вимог належать: час циклу до 10 с, швидкість нанесення – до 500 мм/с, висока продуктивність подачі клею (діаметр клейового валика до 10 мм).

Сучасні роботизовані системи, що складаються з блока управління і робота для нанесення клеїв і герметиків, відрізняються високою швидкістю переміщення, швидкодією і точністю позиціонування робочої руки навіть при русі по дуже викривленій траєкторії. Витрата екструдованого клею може бути постійною або регулювати за спеціальною програмою. Загальна маса дозуючої системи може складати всього 5 кг при об'ємі 500 см³. Такі системи вже використовуються в автомобілебудуванні.

Нанесення клеїв-розплавів на поверхні, що склеюються методами екструзії або розпилення, пов'язане з великими труднощами через їх високу в'язкість у розплавленому стані. Щоб виключити ймовірність передчасного затверднення нанесеного розплаву клею на підложці, останні підігрівають. Температура піді-

гріву залежить від природи підложки, температури склування або плавлення клею, температури навколишнього середовища. Так, наприклад, при використанні клею-розплаву на основі суміші СЕВА і бітуму, що наноситься при температурі 220 °С, підігрів деталей зі сталі та алюмінію доводять до температури 90 °С, з чавуну, ПП і ПЕ – 80 °С, з ПВХ – 65 °С.

Є пристрої для неперервного автоматизованого нанесення клеїв-розплавів на гнучкі підложки з досить високою в'язкістю з однорідною товщиною, якими є, наприклад, папір і різні плівки. При проходженні таких плівок крізь ванну з розплавом клею і калібруючу фільтру: на їх поверхню наноситься рівномірний шар клею з точністю до $\pm 1 \text{ г/м}^2$. Для нанесення низьков'язких клеїв на підложку з неоднорідною товщиною призначено пристрій, в якому клей із заданою витратою видавлюється та безпосередньо на поверхню підложки, що рухається, або переноситься на неї за допомогою проміжного обертального барабану. Два пристрої, що випускаються, наприклад, фірмою «Beta Tec» (Швейцарія), відрізняються компактністю, малою енергоємністю і зручністю при очищенні вузлів від залишків клею. Вони дозволяють наносити клеї на підложки шириною від 500 до 4280 мм зі швидкістю до 420 м/хв. Для швидкого переналагодження пристроїв при переході на підложки іншого типу і розмірів деякі вузли виготовляють змінними і швидкознімними.

В електроніці часто потрібно наносити клей у вигляді точок. Оптимальним відношенням діаметра краплі нанесеного клею до її висоти вважається 1,0–1,5. Така умова виконується не тільки підбором клею, але і застосуванням відповідних клейонаносних пристроїв. Установки, що випускаються західними фірмами, дозволяють наносити краплі об'ємом від 0,01 до 30 мм³ і протягом від 0,005 до 30 с. Так, установка марки HS-180 К може наносити до 18 000 клейових точок в одну годину.

Строго дозоване нанесення потрібно не тільки через вимоги мініатюризації, а й при використанні дорогих клеїв, до яких належать, наприклад, ціанакрилатні клеї. Величина дози клею регулюється тривалістю операції і тиском стисненого повітря в клейонаносному соплі.

Контроль кількості клею, що наноситься можна здійснювати різними методами. Одним з таких методів може бути вимір інтенсивності відбитого світлового потоку, якщо в клеї є певна кількість рівномірно розподіленої флуоресціюючої речовини. У оптоелектронній сенсорній системі для відстеження якості смуги клею наносяться кільцевий датчик, змонтований на соплі, що задає клей, він контролює, незалежно від напрямку, правильність укладання смуги

клею по належній траєкторії і точність заданої ширини смуги. Система також перевіряє відсутність напливів клею і пошкоджень підложки.

2.1.4. Тверднення клею

Для досягнення необхідної міцності клейових з'єднань практично для всіх клеїв (крім липких стрічок) необхідне затвердіння. Процес затверднення проводять після нанесення клею на склеювані поверхні [27-28].

Важливими чинниками при затвердненні клеїв є температура і тиск. Температура затверднення клеїв може бути від кімнатної до 315 °С.

Оскільки всі полімери і більшість наповнювачів, що використовуються для отримання клеїв, мають низьку теплопровідність, затвердіння і подальше охолодження супроводжуються виникненням в клейовому з'єднанні великих температурних градієнтів. Температурні градієнти ще більшою мірою зростають, якщо затверднення супроводжується термічним ефектом, що тягне за собою появу незворотних деформацій і, як наслідок цього, – залишкових напруг. Регулюючи швидкість зміни температури при проведенні склеювання, можна впливати на залишкові напруги і міцність клейових з'єднань. У процесі затвердіння при підвищеній температурі дуже важливо, щоб нагрівання було рівномірним по всій склеюваній поверхні, в іншому випадку можуть виникнути локальні внутрішні напруги. Охолоджувати клейові з'єднання після затверднення слід повільно.

Як нагрівальні прилади можна використовувати печі (термостати), нагрівальні преси, ІК-лампи, неізолювані нагрівачі та ін. Неізолюваний нагрівач являє собою нагрівальну електричним струмом металеву пластину, яка має більший опір; він дуже зручний, наприклад, при ремонтних роботах. Замість неізолюваних нагрівачів можна використовувати дріт з великим опором, наприклад, ніхром, хромель. Температуру в процесі затверднення можна контролювати термопарою.

До теплових способів відносяться також резисторний і індукційний нагрів; можна застосовувати ультрафіолетове, електронне, лазерне, плазмове і рентгенівське опромінення і енергію коливань (ультразвук, високочастотні коливання, нагрівання за допомогою мікрохвиль). При застосуванні електронного та УФ-опромінення ефективно використовується відповідно 5 і 10 % енергії, в той час як при нагріванні в печі – тільки 1 % енергії.

Режим затвердіння істотно впливає на характеристики клейових з'єднань. Так, затверднення клейової композиції на основі діанового епоксидного оліго-

меру і 4,4-діамінодифенілметану при невисоких температурах призводить в основному до утворення лінійного полімеру з рідкими поперечними зв'язками і низькою температурою склування. З підвищенням температури затверднення утворюється сітчастий полімер з високою температурою склування, і міцність клейових з'єднань зростає. Для клейових з'єднань з одинарною нахлесткою спостерігається когезійне руйнування при ступені тверднення 70–90 % і адгезійне – при 90–100 %. Для з'єднань з подвійною нахлесткою адгезійне руйнування спостерігається завжди, при цьому міцність з'єднань зі ступенем тверднення 70–90 % становить $26,4 \pm 2,6$ % від міцності з'єднань зі ступенем тверднення 90–100 %.

Для деяких клеїв, наприклад, на основі полігетероариленив, після затверднення потрібна термообробка. На прикладі поліімідного клею NR-150 показано, що проведення термообробки при 316 °С протягом 16 год приводить до підвищення міцності клейових з'єднань титанового сплаву (при 316 °С) в 1,5–2 рази. Міцність при зсуві клейових з'єднань, не підданих додатковій термообробці, становила 18 і 10,2 МПа при 20 і 316 °С, після додаткової термообробки – відповідно 24,5 і 15,8 МПа.

Застосування деяких з перелічених вище способів нагріву ефективно з точки зору економії енергії. Наприклад, в разі електронних і УФ-променів ефективно використовується відповідно 5 і 10 % енергії, в той час як при твердненні клеїв в термостатах – тільки 1 %. При виборі способу тверднення клеїв необхідно враховувати економічну доцільність застосування кожного конкретного способу.

Процес твердіння значно прискорюється в полі струмів високої частоти (СВЧ) напругою 150–500 В/см при частоті 20–27 МГц. Після обробки в полі СВЧ протягом 30–90 с підвищуються температура склування і міцність у порівнянні з аналогічними характеристиками, отриманими, наприклад, після тверднення епоксидних клеїв при кімнатній температурі протягом 24 год і подальшій обробці при 60–80 °С в протягом 24–32 год. Дані рентгенографії свідчать про те, що термічна обробка в полі СВЧ призводить до перебудови надмолекулярної структури полімеру – зростає ступінь її упорядкованості. Клей ВК-9, що твердіє при кімнатній температурі за 24 год з утворенням 82,3 % нерозчинних продуктів, в полі струмів високої частоти твердіє за 1 хв 45 с з утворенням 96,8 % нерозчинних продуктів.

Для склеювання можна використовувати установки СВЧ, наприклад, типу ВЧИ-25/440. Досить ефективно застосування цього способу при склеюванні інструменту, при цьому міцність клейових з'єднань і ударна в'язкість при зсуві

підвищуються. Так, міцність при зсуві (стисненні) і ударна в'язкість клейових з'єднань сталі 45 (твердий сплав Т15К6), виконаних таблетованим клеєм КТИ-1 на основі епоксिनволачної смоли, складають 63 МПа і 18,9 кДж/м² при твердненні в термостаті при 180 °С протягом 3 год і 75 МПа і 23,4 кДж/м² при твердненні на установці СВЧ 1 – 2 с.

Тверднення в полі СВЧ використовують головним чином при склеюванні металів або металів з непровідниками (зі склом, полімерними матеріалами). При склеюванні непровідників в клей додають феромагнітний порошок, наприклад оксиди металів.

При склеюванні клеями-розплавами деревини також можна використовувати високочастотний нагрів (сила струму 0,4 А, частота 40,6 Гц). Міцність склеювання в значній мірі визначається вмістом води в деревині.

Як джерело радіочастотного випромінювання при склеюванні клеями на основі фенолоформальдегідних смол і таніну можна використовувати генератори потужністю 6 кВт. Напругу при склеюванні підтримують рівною 3,6–4,0 В/см².

При твердненні під дією ультразвуку підвищується плинність клеїв, знижуються залишкові напруги і збільшується міцність клейових з'єднань. Однак це стосується тільки склеювання однорідних термопластичних матеріалів. Склеювання цим методом різнорідних термопластів неефективне, а термореактопластів – взагалі неможливе. Введення між шарами пластиків різних плівкових клеїв призводить до підвищення міцності з'єднань [28].

При використанні різних плівок міцність склеювання різна: максимальна міцність при зсуві (8,3 МПа) і найменша тривалість обробки ультразвуком (1 с) для пари поліфеніленсульфід – фенольний пластик отримані при тиску 2 МПа при використанні як основи клею кополімеру етилену з вінілацетатом; для пари поліфеніленсульфід – поліацеталь екстремальні значення міцності (6,5 МПа) і тривалості обробки (2 с) при тиску 2 МПа отримані в разі використання клею на основі фенокисмол. Клеї на основі кополімерів етилену з вінілацетатом є також кращими для пари поліфеніленсульфід – ударотривкий полістирольний пластик.

Найкращим матеріалом для склеювання поліфеніленсульфіду з алюмінієм є клей на основі фенокисмол.

Для тверднення акрилових клеїв використовують УФ-випромінювання. Для генерування радикалів під дією УФ-світла в клеї вводять різні добавки, наприклад карбонільні сполуки, сірковмісні органічні сполуки та ін. Тверднення під дією УФ-променів проводять при більш низьких температурах, ніж звичай-

не термічне тверднення. Це є суттєвою перевагою даного методу перед іншими традиційними способами тверднення, оскільки, по-перше, знижуються енергетичні втрати, а по-друге, усуваються проблеми, пов'язані з чутливістю деяких матеріалів, що склеюються при підвищеної температурі. Однак цей спосіб досить дорогий, тому що вартість УФ-лампи велика, а розрахунковий час її роботи 2000 ч. Крім того, пропускну здатність різних матеріалів по відношенню до УФ-променів різна, що призводить до нерівномірного тверднення. Склад побічних продуктів, що утворюються при УФ-твердненні клеїв, а також ступінь їх небезпеки поки не з'ясовані.

Радіаційне тверднення клеїв також має ряд переваг. Перш за все – це можливість швидкого тверднення при кімнатній температурі під тиском; використання однокомпонентних клеїв; застосування клейових композицій, що мають при кімнатній температурі практично необмежений термін зберігання; відсутність термічних напруг, що часто виникають в конструкціях при склеюванні при високих температурах; менша витрата енергії, а також велика монолітність клейового шару.

Під дією прискорених електронів твердіють конструкційні клеї на основі ненасичених полієфірних смол, продуктів взаємодії акрилових мономерів з епоксидами та ін. На прикладі трьох клеїв, отриманих на основі дивінілбензолу (два подвійних зв'язків в молекулі), триалілціанурату (три подвійних зв'язків) і стиролу (один подвійний зв'язок), було показано вплив кількості подвійних зв'язків в молекулі на термостійкість клейових з'єднань після радіаційного тверднення. В міру збільшення вмісту подвійних зв'язків в молекулі клеючої речовини підвищується міцність клейових з'єднань, особливо при підвищеній температурі випробування. Подвійні зв'язки в різних сполученнях мають різну активність при впливі прискорених електронів. Так, при твердненні клею на основі поліетиленглікольмалеїнатметилтетра-гідрофталату навіть при дозі 20 Мрад залишається 60 % непрореагованих подвійних зв'язків, і ця величина при подальшому твердненні не змінюється, а при твердненні поліетиленглікольфумаратметилтетра-гідрофталату подвійні зв'язки поведуться активніше.

Кінетика тверднення клеїв на основі ненасичених сполук під дією прискорених електронів суттєво відрізняється від кінетики тверднення звичайними методами (за допомогою пероксидів та УФ-випромінювання). При класичному твердненні ненасичених полієфірів радикали утворюються поступово, гелеутворення відбувається поступово і, нарешті, настає повне тверднення системи. При активації електронним променем радикали утворюються відразу і у великій кількості, композиція твердне за 1/300–1/3000 с.

У деяких випадках радіаційне тверднення призводить до утворення клейових з'єднань з низькою міцністю. Так, міцність з'єднань, виконаних поліімідним клеєм, після радіаційного тверднення становила 2,5–3,2 МПа, що, мабуть, пов'язано з підвищеною крихкістю поліімідного клею після радіаційного тверднення.

При твердінні клеїв можна використовувати постійне магнітне поле. Залежно від хімічної природи клею і типу поверхонь, що склеюються, міцність клейових з'єднань може підвищуватися від 35–40 % до 1,5–2,8 раз. На адгезійну міцність впливають також напруженість поля і тривалість обробки. Найімовірніше, магнітне поле впливає на характер адгезійного контакту, сприяючи виникненню більш упорядкованої структури і надаючи зміцнюючий вплив на полімер.

Важливим технологічним чинником є тиск склеювання, який визначається типом використовуваного клею, розміром клейових з'єднань, якістю їх підгонки.

Тиск не тільки фіксує положення поверхонь, що склеюються, а й сприяє поліпшенню змочуваності клеєм субстрату і, отже, заповненню мікронерівностей поверхні. Крім того, тиск перешкоджає виділенню летких продуктів, які з'являються в процесі твердіння клею, що виключає утворення пористого нетривкого клейового шва.

Тиск – важливий параметр технологічного процесу склеювання, який регламентується технічною документацією на клеї. Як правило, при твердненні рідких і пастоподібних клеїв потрібен незначний тиск – тільки для фіксації поверхонь, що склеюються. Так, при твердненні пастоподібних епоксидних клеїв тиск може складати всього 0,01 МПа. При використанні плівкових клеїв тиск потрібен для поліпшення плинності клею; він повинен бути в межах від 0,3 до 1,4 МПа. Для того щоб виключити утворення пористого клейового шва при використанні клеїв, що тверднуть за механізмом поліконденсації (з виділенням газоподібних продуктів), тиск може бути підвищено до 2 МПа. Тиск ніколи не повинен бути вище зазначеного в документації на клей, оскільки це може спричинити витікання клею і утворення «голодного» клейового з'єднання [28].

Існує ряд клеїв, при склеюванні якими тиск не потрібен. До них належать липкі клеї, при використанні яких контакт і фіксація здійснюються шляхом накопчення роликком. Іноді в клеї, що призначені для приклеювання декоративно-оздоблювальних і теплоізоляційних матеріалів, спеціально вводять сполуки, які забезпечують їх липкість, для того щоб без тиску наклеювати ці матеріали на поверхні.

Для забезпечення тиску в процесі формування клейового з'єднання можуть бути використані різні вантажі, струбцини, гідравлічні преси, гідравлічні та вакуумні мішки, автоклави. Необхідно пам'ятати, що преси можна використовувати тільки для склеювання плоских поверхонь. При склеюванні у вакуумі в деяких випадках може утворитися пористий клейовий шов, а при склеюванні в автоклаві – спотворюватися форма склеюваного виробу.

Радіаційне затвердіння використовують для клеїв, що містять сполуки з подвійними зв'язками.

Для ремонту стільникових конструкцій з алюмінієвих сплавів і полімерних композиційних матеріалів В. С. Віленць розробив переносну установку моделі УРП-2М (ОСА-3М), застосування якої дозволяє забезпечити необхідні температуру, час і тиск при склеюванні.

Як правило, для рідких клеїв, при затвердненні яких відбувається полімеризація компонентів, тиск потрібен незначний (тільки для фіксації поверхонь, що склеюються). Так, наприклад, при затвердненні пастоподібних епоксидних клеїв досить тиску 0,01 МПа. При використанні плівкових клеїв зі зниженою плинністю потрібен тиск 0,3–1,4 МПа, оскільки це підвищує плинність клею, сприяє поліпшенню змочування клеєм субстрату і забезпеченню необхідної міцності клейових з'єднань.

Для того щоб виключити можливість утворення пористого клейового шва при використанні клеїв, що твердіють з виділенням газоподібних продуктів, може знадобитися тиск до 2 МПа.

Склеювання при зниженому тиску може призвести до утворення пористого клейового шва. Загальною вимогою до обладнання є рівномірність переданого тиску.

2.2. Обладнання для приготування та нанесення клеїв

2.2.1. Пристрої для приготування клею

Оскільки клеї в більшості випадків складаються з декількох компонентів (смола, розчинник, твердник, наповнювач, пластифікатор і т. ін.), то процес приготування клею зводиться до точного дозування цих компонентів і перемішування їх. Дозування компонентів виконують за допомогою ваг (вручну) або ваговимірювальними і об'ємними дозаторами (мірниками). Для перемішування клеїв часто використовують механічні клейомішалки з бачками різної ємності.

Бачки і лопаті мішалок виконують з нержавіючої сталі або покривають захисним шаром, оскільки багато клеїв чинять на метал корозійний вплив. Крім того, деякі клеї, наприклад резорцинові, в процесі приготування і подальшого застосування розігріваються [29]. Тому при незадовільних умовах тепловідведення температура клею досягає значення, при якому відбувається його швидке загустіння. У зв'язку з цим ємності, в яких знаходиться понад 2–3 кг клею, повинні охолоджуватися. Охолодження – найважливіший прийом при продовженні життєздатності клею. Для охолодження бачки клейомішалок забезпечуються «оболонкою» (мають подвійну стінку), в якій циркулює холодна вода. Витрата води залежно від пори року регулюється таким чином, щоб температура клейової композиції не перевищувала 15–18 °С.

Іноді клейомішалки забезпечуються холодильним агрегатом, наприклад мішалки фірми «Бюркле» (Німеччина). Перемішувачим механізмом клейомішалки служать один або кілька лопатевих, пропелерних та інших валів, з'єднаних з приводом. Лопаті мішалок обертаються з частотою 50–80 хв⁻¹.

Підвищення частоти обертання проти зазначеного значення не рекомендується, щоб уникнути спінювання клею. У деяких випадках, наприклад у виробництві фанери, спеціально готують спінений клей, і в цьому випадку частота обертання лопатей досягає 200–300 хв⁻¹.

Для підвищення продуктивності і поліпшення якості перемішування лопатевий вал встановлюють зі зміщенням, похило по відношенню до осі бачка клейомішалки або забезпечують планетарний рух вала в бачку. Клеємішалки з планетарним рухом вала рекомендуються для рівномірного і швидкого перемішування компонентів клеїв з порошкоподібним твердником (ФР-12, ФРФ-50, ФР100, ДФК-1АМ, ДФК-14). Щоб уникнути осадження твердника його спочатку можна перемішати з невеликою кількістю смоли, а потім в клейомішалку додати решту смоли. При відносно невеликих кількостях готувати клеї можна з використанням знімних портативних клейомішалок з використанням як привід ручний електрифікований інструмент (гайковерти, шуруповерти т. п.). Лопатевий вал з'єднують з інструментом, підвішують на блоці з противагою. Під час приготування в ємність з клеєм опускають лопаті інструмента і при їх обертанні здійснюють кругові рухи інструментом, чим і забезпечується планетарне перемішування клею. Операції з подачі компонентів клею в клейоготувальних відділеннях зважування та завантаження компонентів клею в клейомішалки, з вантаження клею і подачі його до робочих місць мають бути максимально механізовані. Частина обладнання, що стикається з клеєм, мають бути легко-

доступними для очищення, а місця очищення мають бути забезпечені гарячою і холодною водою, спеціальними сливами і відстійниками. Приготування великих кількостей клею слід проводити в ізольованому, добре вентиляваному приміщенні. Лопатевий вал клейомішалки встановлюють з можливістю видалення його з бачка, тобто він може підніматися щодо бачка. У деяких клейомішалках по висоті переміщують бачок. Завантаження компонентів в бак здійснюється через кришку або люк, які забезпечені сітчастими фільтрами, що попереджають потрапляння в бак грудок, обривків тканини, паперу і т. п. Завантаження компонентів зазвичай починається зі смол, потім вводять твердник і після короткочасного перемішування (2–3 хв) вводять наповнювач та інші компоненти [29].

2.2.2. Клейоготувальні пристрої періодичної дії

Клейомішалки марок КМ40-10 і КМ75-10 застосовуються для приготування клейових розчинів з синтетичних компонентів. Клейомішалка має бачок з водяною «оболонкою». Усередині бачка поміщений лопатевий вал, який може здійснювати планетарний рух щодо центральної осі бачка з частотою 40 хв^{-1} і одночасно навколо своєї власної осі з частотою 50 хв^{-1} . Висока якість перемішування маси забезпечується в клейомішалках з планетарним приводом. Лопатеві вали в таких клейомішалках обертаються з частотою $n = 20\text{--}60 \text{ хв}^{-1}$, здійснюючи планетарне обертання навколо нерухомої шестерні редуктора з частотою $10\text{--}20 \text{ хв}^{-1}$. Плавне регулювання обертів забезпечується гідродвигуном, а підйом і опускання лопатей в бак – гідроциліндром. Іноді підйомною роблять платформу для бака [29].

Т а б л и ц я 2.1

Технічні характеристики клейомішалок

	КМ40-10	КМ75-10
Об'єм робочої ємності для клею, л	40	75
Частота обертання лопатевого вала, хв^{-1}	30	30
Потужність електродвигуна, кВт	1.1	2.8
Габарити, мм:		
довжина	590	2390
ширина	835	1160
висота	1340	1120
Маса, кг	210	600

Клейомішалки з шнековими змішувачами. Клейомішалка включає завантажувальну воронку 1 (рис. 2.1), встановлену співвісно з ємністю 6, що має форму циліндра або зрізаного конуса. Ємність встановлена в підшипникових опорах і може обертатися за допомогою електропривода щодо своєї осі. У ємності паралельно з нею встановлено кілька шнеків 3, 5, з'єднаних з індивідуальними приводами. На дні ємності встановлені ребра 4 для направлення переміщуваного матеріалу до стінок. У великих ємностях ребра можуть бути замінені лопаттю, що обертається в площині дна.

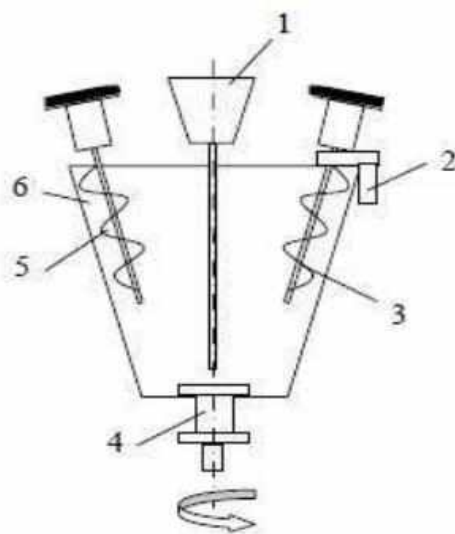


Рисунок 2.1. Клейомішалка зі шнековими змішувачами

Шнек 3 забезпечений патрубком 2 для розвантаження ємності. Перемішувальний пристрій змонтовано на поворотній рамі, яка при розвантаженні ємності може повертатися в сторону розвантажувального патрубка. При роботі клейомішалки компоненти клею завантажують в ємність 6 через лійку 1. Включають приводи ємності і шнеків. При цьому шнеки 3 і 5 переміщують матеріал, який переміщується вниз і очищають стінки ємності від налиплих частинок. Для розвантаження ємності привід шнека 3 реверсують, і шнек починає переміщати клей вгору до розвантажувального патрубка 2. У мішалках з великими ємностями кількість перемішувальних шнеків може бути збільшено до 4-х і більше. Серед шнекових змішувачів заслуговує на увагу змішувач японської фірми Ніппон екусуран коге К.К. (рис. 2.2). Змішувач має перфоровану спіральну лопатку, закріплену на приводному валу 2 і вміщену в змішувальному баку 1. Бак має «оболонку», в якій циркулює холодна вода. Для завантаження і розвантаження бак забезпечений патрубками 3 і 4.

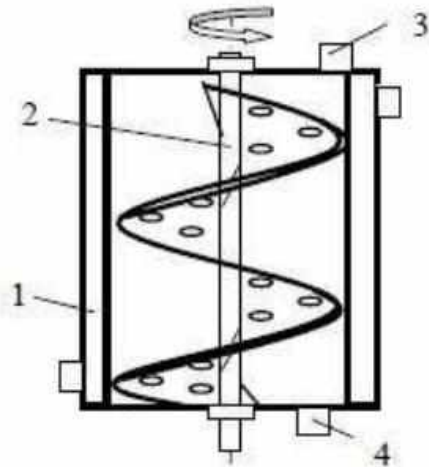


Рисунок 2.2. Шнековий змішувач

Основні розміри шнекового змішувача можуть бути встановлені за такими співвідношеннями:

$$D \geq d - zd; \quad (1)$$

$$d = (0,7 \dots 0,99) D; \quad (2)$$

$$d_o \leq 2,0 d; \quad (3)$$

$$t = (0,5 \dots 3,0) d, \quad (4)$$

де D – внутрішній діаметр змішувача бака, мм; d – зовнішній діаметр змішувача лопатки, мм; d_o – діаметр отворів в поверхні лопатки, мм; z – кількість отворів в площині, перпендикулярної осьовому напрямку змішувального бака; t – крок змішувальної лопатки, мм.

Так при $d = 400$ мм, $d_o = 60$ мм та $z = 2D = 560$ мм, $t = 30$ мм. Висота бака $h = 1,5t = 450$ мм. Об'єм бака $V = 57$ л. Частота обертання лопатки $n = 10 \dots 20$ хв⁻¹.

При роботі змішувача переміщуваний лопаткою клей піднімається вгору і під дією сили тяжіння спрямовується вниз по її спіральній поверхні через зазори між лопаткою і баком. Компоненти клею при такому русі інтенсивно перемішуються.

Установка для спінювання клею. Для економії ненаповнених карбамідних клеїв при склеюванні фанери і зменшення небезпеки просочування їх через тонкі шари та зменшення кількості введеної в пакет вологи клей спінюють. Для цього в смолу вводять такі поверхнево-активні речовини, як пілоподібний альбумін, сапонал, некаль та ін., в кількості 0,2–1,0 % від маси смоли [29].

На рис. 2.3 показаний спінювальний апарат, який включає резервуар 2 для клею, забезпечений оболонкою 8, мішалку 1 з кількома ґратчастими лопатками на привідному валу, з'єднаному ремінною передачею 9 з електродвигуном 11. Лопатевий вал має частоту обертання 250–300 хв⁻¹. Резервуар 2 має завантажу-

вальний люк, зливний кран 10, з'єднаний з трубопроводом стисненого повітря 7, забезпеченим манометром 3, краном 4, редуктором 5, масловідділювачем 6.

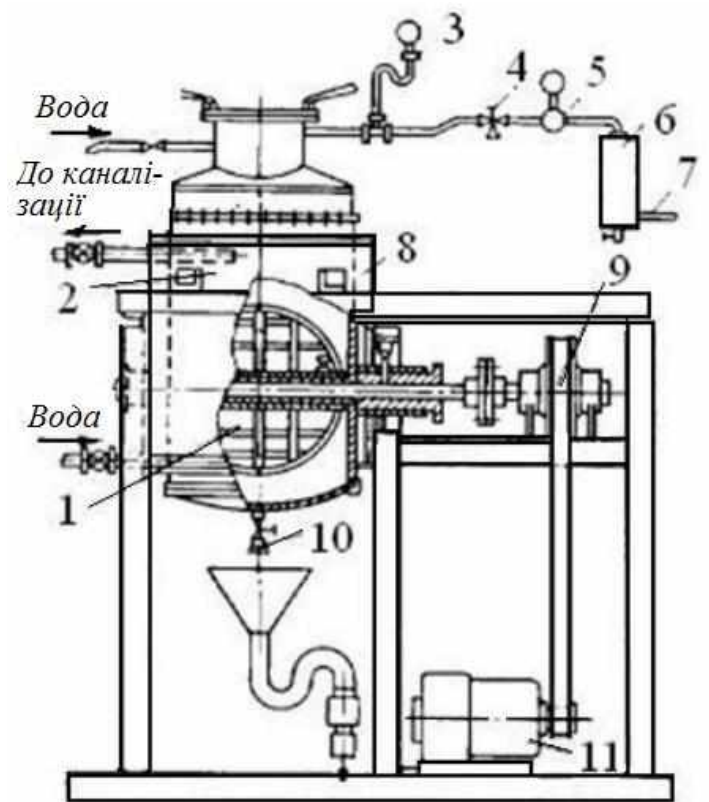


Рисунок 2.3. Спінювальний апарат

Після завантаження в апарат смоли і альбуміну перемішують компоненти протягом 5–10 хв. Відбувається збільшення об'єму піноподібної смоли в 3–5 разів. Після цього в неї додають твердник і знову перемішують протягом 5–10 хв. Стійкість піни, що виходить зазвичай досягається не менше, ніж через 8 год. Якщо клей має $\text{pH} < 6,5$, то спінювання здійснюють під тиском 0,15–0,2 МПа протягом 15–30 хв. Спінювати клей можна також, пропускаючи через нього стиснене повітря. Спінювання клею зменшує його витрати на 10–15 %.

Наповнені клеї спінюють для рівномірного розподілу в ньому наповнювача.

Автоматичні клеєготувальні установки. Установки застосовуються для приготування великих об'ємів клею, наприклад, у виробництві деревостружкових плит. Створюються вони для полегшення праці робітників, підвищення точності дозування компонентів клею. Така установка в загальному випадку має платформні ваги, на яких розташований бак з мішалкою [29].

Бак забезпечений трубопроводами для подачі смоли, води і твердника. Доза кожного компоненту, що подається, обмежується відповідними електромагнітними клапанами, встановленими на трубопроводах і керованих вагах.

Для цього на стрілці 15 головки ваг передбачені прапорці, які по досягненні заданої маси компонента в баку перекидають фотоелементи, в результаті чого послідовно один трубопровід закривається, а інший відкривається. Відведені дози компонентів перемішуються в баку мішалкою, а потім клейовий розчин перекачується насосом у витратні баки, теж забезпечені мішалками.

Недоліки установок періодичної дії. Описані клейоготувальні установки знаходять застосування на виробництві, однак вони мають ряд недоліків. По-перше, всі клейомішалки мають рухомі частини (лопатеві вали), які контактують з клеєм. Клей потрапляє в підшипникові опори, сальники, затверджується в них і викликає їх абразивний знос. По-друге, багато виробництв мають неперервний процес з безперервним використанням клею, в той час як останній готується періодично з запасом на деякий проміжок часу. Це породжує нову проблему – продовження життєздатності клею.

Для цього клейоготувальні і витратні баки забезпечені охолоджувальними пристроями. Труднощі зі зберіганням клею поглиблюються при вимушених аварійних зупинках технологічного потоку. В цьому випадку в клей доводиться вводити добавки, що перешкоджають його полімеризації. Клейоготувальні баки, витратні ємності мають великий об'єм – до 100–800 л. На їх стінках прилипає багато клею, який періодично необхідно видаляти шляхом промивання. Після промивання в ємностях і трубопроводах залишається вода, кількість якої важко врахувати, а тому перша порція приготовленого клею часто відбраковується. Втрати клею на установках періодичної дії значні. Крім того, ємності з готовим клеєм необхідно закривати, захищати від попадання пилу. Установку доводиться постачати витяжним пристроєм, через те, що клей виділяє шкідливі пари. Зазначені недоліки обумовлені самою схемою установки періодичної дії.

2.2.3. Клейоготувальні пристрої безперервної дії

Клейоготувальні установки неперервної дії призначені для роботи в безперервно діючих технологічних потоках з великим об'ємом споживаного клею. В останні роки для цих цілей в світовій практиці повсюдно розробляються змішувачі статичної дії, які не мають рухомих частин і прості за конструкцією. Відомо багато схем статичних змішувачів. Одна з них наведена на рис. 2.4. Змішувач виконаний у вигляді прохідного лабіринту з завантажувальними патрубками, наприклад, для смоли, розчинника, твердника і вихідним патрубком для готового клею. Рідкі компоненти клею, проходячи під тиском через лабіринт, інтенсивно перемішуються в усьому обсязі [29-30].

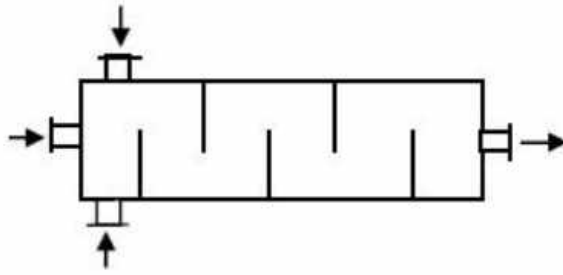


Рисунок 2.4. Схема змішувача статичної дії

Якщо вказаний лабіринт виконати не прямим, а таким, що розходиться по спіралі, то вийде компактний і простий за конструкцією змішувача. Вітчизняна промисловість випускає клеєготувальну установку з лабіринтовим змішувачем неперервної дії марки ДКС-1. Змішувач установки показаний на рис. 2.5. Він включає корпус 3, кран 1, зворотні клапани 4, 5, ніпелі 2, 12, 11 для подачі розчину смоли, твердника до лабіринтового каналу і готового клею до споживачів. Лабіринтовий канал утворений системою отворів, наявних в дисках 7, 8, затиснутих між кришками 6, 10 і прокладкою 9 [29-30].

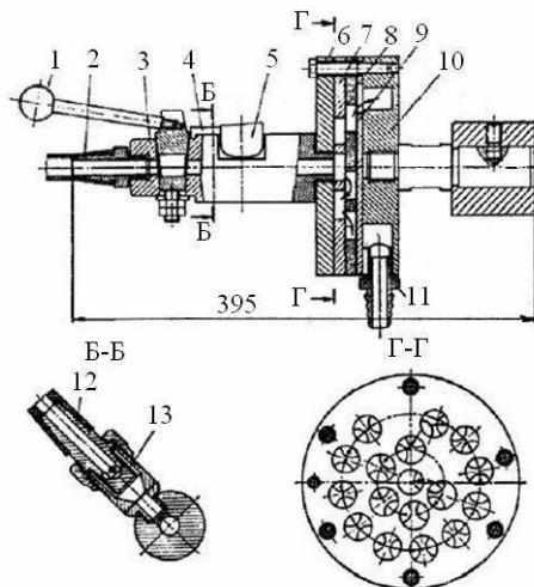


Рисунок 2.5. Лабіринтовий змішувач ДКС-1 28

Усі отвори дисків однакового діаметра. Ширина проміжків між суміжними отворами дорівнює близько $1/4$ діаметра отворів. Проміжки одного диска розташовуються приблизно коло центрів отворів іншого диска так, що суміш компонентів може перетікати через утворену діафрагму з отвору одного диска в суміжний отвір іншого диска. Завдяки багаторазовим звуженням, розширенням і 27 поворотам потоку компоненти клею досить добре перемішуються, утво-

рюючи однорідний клей. З останнього отвору диска 8 отриманий клей через єдиний отвір прокладки 9 потрапляє в кільцеву камеру кришки 10, з якої через ніпель 11 надходить до споживачів. Кран 1 змішувача служить для контролю роботи насосів, а також для промивання змішувача. Всі деталі змішувача, що стикаються з компонентами і готовим клеєм, виконані з нержавіючої сталі. Габаритні розміри змішувача: 290 × 290 × 395 мм, маса – 20 кг. Змішувач для зручності експлуатації встановлюється на стійці, на ній же кріпляться ротаметр і контрольний фільтр з манометром.

Технічна характеристика установки ДКС-1

продуктивність, л/хв	3–16;
кількість відводів для приєднання споживачів	4;
потужність електродвигунів насосів, кВт	2,47;
габаритні розміри установки (без насосів), мм	550 × 460 × 1260;
маса, кг	285.

Установка ДКС-1 є надійною, простою і найбільш дешевою. У ній немає автоматичних кранів, сигналізаційних датчиків і інших пристроїв, що вимагають постійного догляду. Установка забезпечує постійний контроль не тільки роботи насосів-дозаторів, а й якості вихідних компонентів. Все це дозволяє скоротити більш ніж в 2 рази кількість обслуговуючого персоналу і знизити вимоги до його кваліфікації. Одним з факторів надійності установки є відсутність у змішувача обертових частин, ущільнень і опор, яких працюють у важких умовах змащення клеєм, а не маслом. Лабіринтовий змішувач працює за проточним принципом, в ньому немає тупиків, тому на його стінках не утворюються відкладення. Якщо з будь-яких причин відбудеться відкладення клею на стінках лабіринтового каналу, то змішувач легко розбирається, і його деталі можуть бути очищені від клею. Лабіринтовий змішувач оснащений певним гідравлічним опором, величина якого залежить від в'язкості смоли, що подається, і утворення клею. Якщо при роботі установки з яких-будь причин змінюються властивості подачі смоли і твердника або знижуються продуктивність насосів-дозаторів, то внаслідок зміни перепаду тиску в змішувачі показання відхилення у манометрі установки зміняться. Це послужить сигналом для усунення неполадок. Догляд за установкою нескладний. Так, перед пуском через кран 1 продувають змішувач стисненим повітрям, тим самим виключається розведення клею промивною водою. Для промивання змішувача при тривалій зупинці через кран 1 пропускають теплу, а потім холодну воду. Насоси-дозатори установки можуть монтуватися на складі і, крім дозування компонентів, в цьому випадку вони забезпечують їх подачею зі складу. Таким чином відпадає необ-

хідність у спеціальних системах подачі компонентів в клейоготувальні відділення. Гумова трубка 13 на ніпелі 12 утворює зворотний клапан, який виключає мимовільне перетікання компонентів по магістралях. Завдяки цьому витратні баки компонентів можуть встановлюватися не тільки нижче насосів-дозаторів, а й вище їх. Це дозволяє легко прив'язувати установку до існуючої компоновки обладнання в цеху. Установка працює під тиском, і тому вона герметизована, що зменшує виділення шкідливих для здоров'я робітників парів. Витрати на вентиляцію приміщень при використанні установки скорочуються. В установці практично не відбуваються втрати клею. Змішувач має малий об'єм (близько 0,2 л), в результаті чого запас приготованого клею становить 1–2 л. Установка може бути використана для приготування швидкотверднучих клеїв [29-30].

Контрольні запитання

1. З яких технологічних стадій складається технологічний процес склеювання?
2. Які умови зберігання клеїв, їх компонентів та допоміжних матеріалів?
3. Як готується клей?
4. Назвіть способи нанесення клею.
5. Які способи тверднення клею ви знаєте?
6. Яке обладнання для приготування та нанесення клею використовується?

ПІДГОТОВКА ПОВЕРХНІ ПІД СКЛЕЮВАННЯ

3.1. Підготовка поверхонь, що з'єднуються

Склеювання на непідготовлених поверхнях проводиться рідко, оскільки вони можуть бути покриті речовинами з низькою поверхневою енергією і/або з низькою когезійною міцністю (жирами, пластифікаторами, низькомолекулярними продуктами полімеризації або поліконденсації та ін.), навіть самий хороший клей може не спрацювати [31-33]. Чужорідні тіла (всілякий пил, стружка, тирса тощо) перешкоджають досягненню повного контакту клею з поверхнею, що має гетерогенний характер. У товстостінних деталях поверхневий шар може мати більш високий ступінь активності ПМ по відношенню до клею. Крім того, поверхневий шар ПКМ, збагачений полімерною фазою в якій, поступово накопичуються дефекти, може викликати руйнування конструкції, що склеюється.

Підготовка поверхонь до склеювання полягає в підгонці їх однієї до одної і обробці для очищення і/або модифікування. Хороша підгонка і рівний характер поверхонь, що сполучаються, необхідні для формування тонкого і рівномірного за товщиною клейового прошарку. Особливо ретельна підгонка поверхонь має проводитися при використанні клеїв, які в момент виконання монтажних робіт мають велику плинність. Якість прилягання поверхонь, що з'єднуються, контролюється за допомогою щупів. При клейовій збірці тришарових стільникових панелей зазор між поверхнями, що сполучаються, деталей полиць каркаса зі стільниковим заповнювачем, з одного боку, і притиснутими до них обшивками, з іншого боку, має бути не більше 0,1 мм, щоб виключити вигин обшивок і напруги, що з'являються в результаті відшаровування [34].

Спосіб обробки поверхонь перед склеюванням залежить від типу ПМ, передісторії деталей, що з'єднуються, природи клею і вимог до якості з'єднання. Основний спосіб підготовки ПМ, в тому числі і ПКМ, на основі реактопластів – механічна обробка, наприклад, струменева обробка (опескоструєння), механізована (наприклад, за допомогою пристроїв типу натирача або дрилі зі спеціальними насадками) або ручне шліфування наждачним папером середньої (120/140) зернистості (склопластики) або з розміром зерна не менше 280 (карбoplastики). Абразивна обробка струменевими методами використовується для деталей товщиною не менше 3 мм. Як абразив при струменевій обробці слу-

жать корунд, пісок, чавунна крихта. Критерієм якості обробки слід вважати видалення глянцю з поверхні і відсутність ворсистості.

Якщо умови зберігання деталей з ПКМ перед склеюванням не контролюються, то ефективним методом підготовки поверхонь є видалення з ділянок, що з'єднуються, технологічних, так званих «жертвних», шарів з тканин – поліетилентерефталатної (наприклад, лавсанової фільтрувальної, артикул 56208) або поліамідної.

Для високоякісного клейового з'єднання важливо не тільки видалити з поверхні чужорідні тіла, але і виключити повторне її забруднення.

Однак деталі зі склопластиків з підготовленими поверхнями, навіть якщо вони загорнуті в папір, до виконання наступної операції можуть зберігатися обмежений час (до двох тижнів при 20 °С і відносній вологості 50 %). Збереженню активності поверхні сприяє нанесення ґрунтів. Як ґрунт можна використовувати сильно розбавлений клей, за допомогою якого здійснюється збірка виробів, або спеціально створені композиції, що містять кремнійорганічні сполуки типу амінопропілтриетоксисілан або гліцидоксипропілтриметоксисілан.

Обробка поверхонь термопластів так само, як і обробка поверхонь деталей з реактопластів, проводиться механічним, хімічним, фізичним або комбінованими способами. Обробкою наждачним папером і знежиренням можна обмежитися при склеюванні аморфних термопластів – поліакрилатів, жорсткого полівінілхлориду, полістиролу. Щоб виключити утворення рисок, деталі з поліакрилатів і полістиролу в деяких випадках перед склеюванням піддаються термообробці при температурі, близькій до температури склування термопласта. Розчинник для знежирення не має викликати набухання термопласта [35-36].

Для прискорення очищення на розчинник можна чинити вплив ультразвуковими механічними коливаннями протягом декількох хвилин.

Однак надання шорсткості шляхом механічної обробки не у всіх випадках призводить до підвищення міцності з'єднання, яка зростає зі збільшенням площі контакту між клейовим шаром і поверхнею, якщо клей повністю заповнює нерівності, що утворилися після обробки. Бульбашки повітря, залишившись на поверхні, не тільки знизять площу контакту, але і послужать концентраторами напружень у шві.

Поверхня деталей з полікарбонату перед склеюванням знежирюється гасом, гептаном, ізопропіловим спиртом, метанолом або водою з миючим засобом. Для видалення вологи деталі піддаються термообробці при 120 °С. Міцність з'єднання підвищується після шліфування або струменевої обробки поверхні.

Для обробки перед склеюванням фторопластів і термопластичних композиційних матеріалів нового покоління пропонується багато різних методів. Один з них – дублювання зі склотканиною або з іншими армуючими матеріалами, що виконуються на пресах з нагрітими плитами або на каландрі. Покриття поліамідів тканинами проводиться за допомогою, наприклад, розчину поліаміду в суміші резорцину і спирту таким чином, щоб тканина не піддавалася наскрізному просоченню. У ті ділянки деталей із фторопласту 4, які підлягають склеюванню, вводяться наповнювачі – оксиди заліза і хрому, кварцова мука, цемент, порошки металів, металеві сітки. На поверхню поліетиленової плівки екструзією наноситься шар полімеру (полівініловий спирт, кополімери етилену), що володіють більш високою, ніж у поліетилену, поверхневою енергією. На поверхні поліамідів міцно утримується підслоя з затвердненого феноло (резорцин)-формальдегідного зв'язного або фурилового лаку [24,27].

Склади ванн і режими хімічної обробки термопластів перед склеюванням залежать від типу матеріалу. Фахівці продовжують роботи зі створенню клеїв, які не вимагали б складної і дорогої підготовки поверхонь. Такий двоупаковочний акрілатний клей під маркою «3M Scotch_Weld DP 8005» для з'єднання поліетилену і поліпропілену без будь-якої підготовки їх поверхонь пропонує фірма «3M Deutschland» (Німеччина).

Досягнута міцність з'єднання знаходиться на рівні міцності матеріалів, що з'єднуються.

Оскільки поверхневий натяг поліефірефіркетону (ПЕЕК) (40 Мн/м) нижче поверхневого натягу, наприклад, епоксидних клеїв (42–55 мН/м), то одного лише очищення або легкої абразивної обробки поверхні вуглепластика типу APC-2 на основі ПЕЕК недостатньо для отримання міцного з'єднання зазначеними клеями. За даними фірми «Lockheed California Co» (США), хромово-сірчане травлення APC-2 при кімнатній температурі протягом 30 хв за ефектом дещо поступається плазмовій обробці в атмосфері O_2 (міцність з'єднання при зсуві відповідно 27,8 і 30,3 МПа), а за даними фірми «One Space Park» (США), навпаки, полум'яне травлення в суміші $CF_4 + O_2$ забезпечує підвищення міцності з'єднання до 41,6 МПа в порівнянні з 19,2 МПа після травлення вуглепластика в хромовій кислоті.

До переваг плазмового травлення відносяться більш тривале, ніж після інших методів обробки, збереження активності поверхні і здатність робочого середовища під час травлення проникати навіть у вузькі щілини з розкриттям всього в декілька мкм. Але воно має і недоліки, найважливіші з яких – висока вартість обладнання, обмеженість розмірів деталей розмірами робочої камери,

нерівномірність дії плазми і неможливість безперервного ведення процесу. Обробка плазмовим пістолетом позбавлена деяких недоліків плазмової обробки у вакуумній камері і особливо придатна для поліпшення адгезійних властивостей поверхні фасонних деталей і профілів, в тому числі в неперервному процесі.

У роботах організації «Fraunhofer – Institut fuer Lasertechnik» (Аахен, Німеччина) показана більш висока ефективність лазерної обробки ПКМ в порівнянні з традиційними методами. Товщина шару, що видаляється незначно впливає на міцність клейового з'єднання і визначається довжиною хвилі лазерного випромінювання, потужністю імпульсу, тривалістю обробки і може складати від менш 1 мкм до 30 мкм при тривалості від 10 нс до 30 мкс. Переваги лазерної обробки поверхні ПКМ полягають в екологічній чистоті способу, якісній очистці та мінімальній пошкодженості поверхневого шару. Вихідна міцність при зсуві з'єднань внапуск виготовлених після лазерної обробки склеюваних поверхонь вуглепластика, становила 26 МПа, а після витримки у воді при температурі 70 °С протягом 40 діб – 19 МПа, після механічної обробки – 19 і 16, після обробки коронним розрядом – 20 і 15, при використанні шарів, що здираються – 18 і 12 МПа відповідно [24,27].

3.2. Вибір методів підготовки поверхні

Міцність клейових з'єднань залежить не тільки від якості і властивостей клею, який використовується для склеювання, але також і від того, наскільки ретельно підготовлена поверхня під склеювання. Забруднюючі поверхню речовини можуть з'являтися на ній з різних причин. На поверхні металів вони можуть утворитися в результаті окиснення, операцій вальцювання або кування. На поверхні оксиду металу, як правило, знаходиться шар адсорбованих органічних молекул, які поглинаються з повітря, а також з'являються за рахунок використання мастила при операції прокатки. При високій відносній вологості навколишньої атмосфери на поверхні металів може також знаходитися шар води. Шар забруднень на необробленій поверхні може мати товщину близько 0,025 мм і більше [24,35].

Аналогічний стан поверхні можна спостерігати і для полімерних матеріалів. До складу їх рецептур, як правило, входять пластифікатори, антиоксиданти та інші компоненти, які можуть випотівати на їх поверхні і створювати ослаблений шар. Поверхня промислових пластиків може містити антиадгезійні роз-

ділові мастила, які утворюють слабкі граничні шари і негативно впливають на утворення агезійного зв'язку.

Підготовка поверхні під склеювання – це будь-який хімічний, електрохімічний або механічний процес, який змінює поверхню субстрату, роблячи її більш активною при контакті з клеєм.

Метою підготовки поверхні, по-перше, є видалення з поверхонь, що склеюються, забруднень, а також ослабленого міжфазного шару, що має низьку молекулярну масу. По-друге, необхідно підвищити поверхневу енергію таким чином, щоб вона виявилася вище величини поверхневого натягу використовуваного клею. По-третє, повинна бути поліпшена геометрія поверхні, щоб в разі металів збільшити фактичну поверхню склеювання, а в разі пластиків забезпечити клею капілярний ефект [38].

Адгезія на межі поділу клей-субстрат виникає в межах шару молекулярної товщини, і міцність з'єднання може бути зведена до нуля при наявності на поверхні забруднень, які самі по собі слабо з нею зчеплені і, крім того, перешкоджають контакту клею з субстратом.

Багато полімерних матеріалів володіють низькою поверхневою енергією, і більшість клеїв, що володіють достатньою для склеювання міцністю, мимоволі не змочують їх поверхні.

Ефективність застосування клеїв в значній мірі залежить від способу підготовки склеюваної поверхні, що в свою чергу визначається характером цієї поверхні. Погана підготовка поверхні під склеювання призводить до зниженої адгезії, а в деяких випадках і до руйнування клейового з'єднання. Навіть незначне відхилення від параметрів технологічного процесу підготовки поверхонь під склеювання може спричинити зниження адгезійних властивостей клею. Обраний спосіб підготовки поверхні повинен забезпечувати не тільки максимально можливу міцність клейових з'єднань безпосередньо після склеювання, а й їх стійкість в умовах експлуатації.

У процесі підготовки поверхні відбувається видалення всіх забруднень, і поверхня набуває рівномірну по всій площі шорсткість. Важливим параметром, що визначає якість клейових з'єднань, є змочування субстрату клеєм. Якщо клей не змочує поверхню субстрату, то навіть при ретельному дотриманні всіх інших параметрів процесу склеювання неможливо отримати клейові з'єднання з оптимальними властивостями. При ідеальній підготовці поверхні руйнування клейових з'єднань відбувається за шаром клею або матеріалу, що склеюється (когезійне руйнування), а не по межі поділу клей – субстрат [27,36].

На жаль, відсутні теоретичні уявлення, які пояснюють все різноманіття процесів, що виявляються при підготовці поверхонь під склеювання, а також вплив цих процесів на утворення адгезійного контакту між клеєм і субстратом. Тому вибір оптимального способу підготовки поверхонь проводиться експериментальним шляхом з урахуванням природи матеріалів, що склеюються, і клею, умов експлуатації клейових з'єднань і можливості здійснення того чи іншого способу в умовах серійного виробництва. Так, широко застосовуються для підготовки поверхні металів під склеювання анодування, оксидування та інші електрохімічні способи, але вони зовсім не придатні для таких матеріалів, як декоративні плівки, дерево, пластики та ін. Одним з ефективних способів підготовки поверхонь алюмінієвих сплавів є анодне оксидування, оскільки одночасно воно може бути використано і для захисту сплавів від корозії. Однак деякі епоксидні клеї не мають адгезії до таких поверхонь або зривають анодну плівку, тому використання крихкого епоксидного клею при такому способі підготовки поверхні не рекомендується.

Цілком очевидно також, що способи підготовки поверхні металів, як правило, не можуть бути використані для неметалічних матеріалів.

Важливим фактором при виборі способу підготовки поверхні є можливість забезпечення працездатності та довговічності клейових з'єднань. Різні способи підготовки поверхонь під склеювання, забезпечуючи однаково міцність клейових з'єднань безпосередньо після склеювання, можуть по-різному позначатися на експлуатаційних надійностях конструкцій, що склеюються. Хімічно оброблені поверхні мають високу активність і можуть легко поглинати вологу, яка міститься в повітрі, і забруднюючі домішки, що погіршують якість склеювання. У зв'язку з цим часовий проміжок між операціями підготовки поверхні і склеювання має бути мінімальним, що не завжди можливо. Для його збільшення застосовують спеціальні адгезійні ґрунти.

Підготовка поверхні під склеювання є одним з основних технологічних процесів, від якого залежить працездатність конструкцій, і до неї слід ставитися дуже уважно.

Правильно обраний спосіб підготовки поверхні повинен забезпечувати отримання відтворюваної поверхні і стабільної міцності клейових з'єднань як безпосередньо після склеювання, так і в процесі експлуатації.

При гарній підготовці поверхні забезпечуються:

- 1) необхідна міцність клейових з'єднань безпосередньо після склеювання;
- 2) висока довговічність клейових з'єднань, тобто збереження вихідних властивостей або їх незначне зниження протягом всього терміну експлуатації;

- 3) збереження властивостей субстратів при їх обробці під склеювання;
 - 4) можливість застосування в конкретних виробничих умовах.
- Підготовка поверхонь під склеювання складається з двох етапів:
- 1) очищення і знежирення поверхонь, що підлягають склеюванню;
 - 2) обробка поверхонь.

3.3. Очищення і знежирення поверхні перед склеюванням

Мета цієї операції – видалення з склеюваних поверхонь різних забруднень, що викликають зниження міцності клейових з'єднань. Рівень зниження міцності залежить від природи речовини, що забруднює поверхню, її концентрації на поверхні, а також від складу матеріалу, що склеюється, і застосовуваного клею.

Максимально допустима концентрація забруднень, що не позначається на адгезії, становить від 0,01 до 1 мг на 1,5 см² площі поверхні [24,27].

Для знежирення поверхонь, що підлягають склеюванню, застосовують органічні розчинники, водні миючі засоби, лужні препарати і спеціальні лужні склади.

3.3.1. Знежирення в органічних розчинниках

Як органічні розчинники для знежирення металевих поверхонь широко використовують бензин-розчинник – Нефрас С2-80/120 (Нефрас «нафтовий розчинник») – збірна назва рідин, що є продуктами перегонки нафти, таких як бензин, гас, уайт-спірит та інших, які використовуються на виробництві та в побуті як розчинники для розведення фарб, промивання деталей, видалення консервуючих покриттів і забруднень. НЕФРАС являє собою прозору маслянисту рідину з характерним запахом нафтопродуктів. Легко спалахує. Токсична [28].

Властивості НЕФРАС регламентуються ГОСТ 26377-84. Розчинники нафтові. Стандарт поділяє НЕФРАС на кілька типів за їх вуглеводневим складом: С – розчинники змішаного складу, в яких присутні вуглеводні всіх класів; А – розчинники з переважанням аліфатичних вуглеводнів і зниженим вмістом ароматичних вуглеводнів (не більше 2,5 %); І – ізопарафінові розчинники; П – суміші нафто-парафінів; Н – з переважанням нафтоених вуглеводнів.

Позначення нефрасу формується за такими правилами: після слова «нефрас» через дефіс вказується його тип відповідно до стандарту, а потім через пробіл зазначаються два числа, розділених знаком «/», відповідні температури початку і закінчення перегонки в градусах Цельсія. Приклад: Нефрас-С2 80/120,

Нефрас-С4 155/200) і ацетон. Для знежирення поверхонь полімерних матеріалів і гум вибирають розчинники, інертні до цих матеріалів.

Розчинники для знежирення поверхні при підготовці до склеювання:

- полімерних матеріалів – диметилкетон (ацетон), нефрас, суміш етанол – нефрас, тетрахлоретилен, пропан-2-ол (ізопропіловий спирт), трихлоретилен;
- металів – нефрас, диметилкетон (ацетон);
- гум-тетрахлоретилен, трихлоретилен, пропан-2-ол (ізопропіловий спирт), нефрас.

Після обробки розчинником поверхні сушать на повітрі протягом 10–15 хв.

При використанні методу протирання поверхні розчинниками можна домогтися тільки неповної очистки, тобто забруднення лише переміщуються по обробленій поверхні.

Органічні розчинники не можна застосовувати:

1) для видалення забруднень, що містять мила, шліфувальну пасту, пил і тому подібне, тобто вони розчиняють тільки жир, а неорганічні залишки не видаляються повністю з поверхні металу;

2) для знежирення вологих поверхонь, тобто вони не змішуються з водою і на зволжених ділянках не проникають до поверхні металу.

Поверхні більшої частини пластиків абсорбують розчинники, тому після знежирення поверхні слід дати достатню відкриту витримку до повного видалення розчинника або провести прискорену сушку, інакше можливе утворення пористого клейового шва при подальшому склеюванні.

Органічні розчинники легко спалахують. З метою зниження пожежонебезпеки в їх склад вводять антистатичні присадки, наприклад Сігбол (ТУ 38.101741-78). Присадка є 32–40 % розчином металовмісних сполучень органічних кислот і полімерного компонента в толуолі (ГОСТ 14710-69) або ксилолі (ГОСТ 9410-7), який додають до розчинника в кількості 0,002 мас. %.

Знежирення металевих поверхонь (за винятком титанових сплавів) краще проводити в парах розчинників, наприклад трихлоретилену або тетрахлоретилену. Через різницю температур між парами розчинника і металом пари розчинника конденсуються на металевих деталях, розчиняючи забруднення. Багато установок для знежирення в парах забезпечені пристосуванням для кроплення деталей чистим розчинником. У парах трихлоретилену знежирюють сталь, вольфраміві, магнієві і молібденові сплави, в парах тетрахлоретилену – алюміній, алюмінієві, вольфраміві, магнієві і молібденові сплави. Тривалість обробки 0,5–5 хв. На жаль, ці продукти досить дорогі і токсичні, що стримує їх застосування.

3.3.2. Знежирення у водних лужних розчинах

Для знежирення металевих поверхонь можна використовувати водні миючі засоби. Їх склад досить складний. Вони містять ПАР емульгатори, компоненти, що сприяють утворенню комплексних сполук з забрудненнями, піногасники, інгібітори корозії та інші компоненти. При обробці поверхонь в таких складах забруднення утворюють дисперсії або суспензії. Щоб уникнути повторного забруднення поверхні при обробці водними миючими складами потрібна ретельна промивка у воді, переважно знесоленій. Досить ефективним є миючий розчин ТМС-31 (ТУ 38.40740-71), який є водним розчином суміші ПАР, моноетаноламіна, олеїнової кислоти, спирту і триетаноламіна [28].

Як миючий розчин також можна використовувати склад, що містить фосфат натрію (16 г/л) і емульгатор «Сінтамід-5» (2 г/л), який може бути утилізований шляхом біологічного розкладання.

Знежирення водними розчинами миючих засобів проводять за такою технологією: промивка зануренням у водний розчин миючого засобу при температурі 70–80 °С протягом 3–15 хв; послідовна промивка в гарячій 60–70 °С і холодній 15–20 °С проточній воді. Для запобігання корозії металеві поверхні після промивання у воді обробляють холодним водним 0,5 % розчином дихромату калію і сушать при температурі 110–120 °С. Така обробка поверхні рекомендується для сталі, мідних, титанових, алюмінієвих і магнієвих сплавів.

Поєднання водних миючих розчинів і ультразвуку дозволяє підвищити якість знежирення. Для цих цілей можна використовувати ультразвукові установки типу УЗУ-0,25 з вихідною акустичною потужністю 230 Вт і частотою 18 кГц, установки типу ОД продуктивністю 30–48 м²/ч і установки типу УОФ-1 і УОФ-2М. Інтенсивність ультразвукових коливань $(1-3) \cdot 10^{-4}$ Вт/м².

3.3.3. Знежирення емульсійними складами

Для знежирення поверхонь можна використовувати лужні препарати, які зазвичай складаються з солі лужного металу, миючого і ПАР. Для підвищення ефективності очищення склади зазвичай підігрівають.

Після знежирення проводять промивання проточною водою з температурою 15–60 °С до нейтральної реакції промивної води. Промивання слід проводити безпосередньо після операції знежирення, оскільки якщо цього не зробити, луг буде продовжувати взаємодіяти з поверхнею металу, погіршуючи його властивості. Для промивання слід використовувати демінералізовану воду. Для

більшості металів поверхні потім обробляють інгібітором корозії (водний 0,5 % розчин дихромату калію) при 20–25 °С протягом 30 с, після чого сушать при температурі 15–30 °С шляхом обдування стисненим повітрям або в сушильних шафах до повного видалення рідкої фази з поверхні, що склеюється. Ця операція також має важливе значення, оскільки для деяких металів вода, яка залишилась на поверхні, є джерелом появи корозії [28].

Знежирення водними розчинами синтетичних миючих речовин на ультразвукових установках типу УОФ-1 і УОФ-2М використовують для підготовки поверхні фольги при виготовленні стільникового заповнювача. При цьому строго регламентують концентрацію і температуру розчину, а також час знаходження фольги в розчині, що досягається оптимальною швидкістю переміщення фольги. На установці УОФ-1 вона становить до 1 м/хв, на установці УОФ-2М до 4 м/хв.

Досить ефективним способом видалення забруднень з поверхні, що склеюється, є газоплазмове видалення, наприклад, аргоноплазмова обробка. Її проводять з використанням установки потужністю 20 Вт при швидкості струменя 50 см³/хв протягом 10–60 хв. Газоплазмова обробка підвищує адгезію клейової композиції до обробленої поверхні. При цьому об'ємні властивості субстратів не погіршуються, оскільки впливу піддається лише поверхневий шар глибиною не більше 10 мкм. Така обробка покращує змочуваність поверхні, контактний кут змочування водою знижується до 0°. Вибір газу і тривалості обробки плазмою залежить від типу поверхні, що склеюється, і забруднень.

3.4. Обробка поверхні

3.4.1. Обробка ручним і механічним інструментом

Для обробки поверхні використовують фізичні (механічні, абразивні), хімічні і фізико-хімічні, електрохімічні способи. Слід зазначити, що найбільш високу міцність клейових з'єднань вдається отримати після хімічної обробки поверхні. Після піскострумінної обробки поверхні клейові з'єднання мають низьку стійкість до комбінованої дії підвищених температур і вологості. Для підвищення протикорозійної стійкості на поверхні, що склеюються, доцільно наносити захисні покриття (хроматні покриття, анодні плівки та ін.). Склеювання деталей зі свіжопідготовленими поверхнями, як правило, підвищує міцність і довговічність клейових з'єднань [27-28].

До фізичних (механічних) способів обробки поверхні під склеювання належать абразивна обробка струминними методами і зачистка поверхонь шліфувальними шкурками. Ці способи застосовують для підготовки поверхні металів, склопластиків, композиційних матеріалів, кераміки і гум. Процес шліфування струминними методами використовують для деталей товщиною не менше 3 мм з використанням електрокорунду, кварцового піску або карбиду кремнію. При товщині деталей менше 3 мм застосовують зачистку шліфувальними шкурками.

3.4.2. Обробка сухим і гідроабразивом

Для вуглецевих сталей найбільш доцільно використовувати струменево-абразивну обробку сталевим дробом, для нержавіючих сталей, алюмінієвих і титанових сплавів – електрокорундом [27-28].

При абразивній обробці матеріалів важливу роль відіграють форма і розміри частинок абразивного матеріалу (табл. 3.1).

Т а б л и ц я 3 . 1

Розміри частинок абразивних матеріалів, які використовуються для дробоструйної обробки різних матеріалів

Метал	Спосіб обробки	Розмір частинок абразивного матеріалу, мкм
Мідь	Сухе обдування	80–100
Алюмінієві сплави	Вологе обдування	140–325
Нержавіюча сталь	Вологе обдування	140–325

Параметри процесу струменевої обробки:

тиск стисненого повітря, МПа	0,3–0,5
діаметр сопла, мм	8–12
кут нахилу сопла до оброблюваної поверхні	45–65
відстань сопла від поверхні, мм	80–200

Струменеву обробку використовують для підготовки поверхні вуглецевих і корозійностійких сталей (з подальшим пасеруванням) для деталей товщиною не менше 3 мм.

При проведенні абразивної обробки слід враховувати ступінь забруднення поверхні: якщо на поверхні є мастило або інші подібні забруднення, абразивний засіб може впровадити мастило глибше в нерівності поверхні, тому перед абра-

зивною обробкою необхідно проводити знежирення поверхонь. Після абразивної обробки також проводиться операція промивання для видалення залишків абразиву.

Гідропіскоструменеву обробку проводять під тиском 0,3–1 МПа суспензією такого складу, г/л:

карбонат натрія	4–6
нітрит натрія	18–20
абразивний матеріал	200–500

Після гідропіскоструменевої обробки поверхню металевих деталей промивають при 60–80 °С протягом 2–3 хв антикорозійним складом, що містить, г/л:

нітрит натрія	100–150
карбонат натрія	10

Гідропіскоструменеву обробку використовують для підготовки поверхні вуглецевих і корозійностійких сталей, титанових сплавів.

Природа абразивного матеріалу, що застосовується при дробоструйній обробці, робить істотний вплив на змочуваність поверхні металу клеєм і його адгезію. Проведено порівняльні експериментальні дослідження міцності клейових з'єднань сталі марки 17 ГС, поверхня якої була одробоструєна із застосуванням електрокорунду (ГОСТ 28818-90) (електрокорунд (в американській літературі – алунд, від лат. Alundum) – вогнетривкий і хімічно стійкий надтвердий матеріал на основі оксиду алюмінію (Al_2O_3)). Являє собою штучно синтезований синтетичний корунд (88–99 % Al_2O_3). Отримують плавкою в електричних печах бокситу з відновником (залізни ошурки). Застосовується як абразивний, вогнетривкий матеріал для виготовлення ливарних форм і стрижнів, конструктивних елементів радіоламп, абразивних кіл і тому подібне.

Залежно від особливостей вмісту оксиду алюмінію та технології виготовлення розрізняють такі різновиди електрокорунду.

Нормальний – марки: 16А, 15А, 14А, 13А, що містить 93–96 % Al_2O_3 і виплавляється відновною плавкою з бокситів. Завдяки високому вмісту оксидів алюмінію і незначному числу домішок в корунді, його кристали крупніше. Має підвищену в'язкість, тому використовується при виготовленні абразивного інструменту для шліфування в'язких матеріалів з великим опором розриву, для абразивної обробки зі змінними навантаженнями, а також для важких обдирних робіт і для піскострумінного шліфування.

Залежно від кількості і складу домішок змінюється колір електрокорунду (від світлого до темно-коричневого кольору). Розміри кристалів виплавленого корунду складають 0,6–0,8 мм. Наприклад, для виготовлення обдирних кіл використовують нормальний полікристалічний електрокорунд з розмірами кристалів приблизно 50 мкм.

Білий – (марки: 25А, 24А, 23А), з вмістом Al_2O_3 не більше 99 %. Отримують з глинозему, абразив вищого сорту (25А), він має високу твердість, міцність, термостійкість, високу крихкість і високу ріжучу здатність, він має незначну кількість домішок і більш однорідний за складом. Він більше підходить для шліфшкурки та інших виробів з абразивним покриттям, для виготовлення інструменту, який застосовується для обробки загартованих твердих сталей, також застосовується для піскоструменевого шліфування. Оскільки це абразивний матеріал, такі його властивості, як міцність, твердість, крихкість і термостійкість, можуть регулюватися в процесі його отримання. Введенням в розплав різних хімічних елементів, що утворюють з ним тверді розчини, отримують абразивні матеріали із заданими властивостями, наприклад, хромовий, титанистий електрокорунд та ін.

Хромовий електрокорунд – отримують при введенні оксиду хрому в розплав глинозему. Має забарвлення рубіну. Інтенсивність забарвлення залежить від кількості оксиду хрому, розчиненого в корунді. При введенні оксиду хрому до 2 % підвищується абразивна здатність зерна хромистого електрокорунду і його механічна міцність.

Титанистий електрокорунд – виплавляють з глинозему з полуторним оксидом титану Ti_2O_3 . Забарвлення титанистого електрокорунду має сіро-синій відтінок. Наявність твердого розчину титану в корунді значно підвищує абразивну здатність зерна в порівнянні з зерном білого електрокорунду. Інструмент з нього використовують для шліфування з високими навантаженнями загартованих сталей.

Хромотитанистий електрокорунд – електрокорунд (марки: 95А, 94А) виробляють плавкою в електричній дуговій печі глинозему з додаванням легуючих компонентів (оксидів хрому і титану). Легирування двома компонентами дає можливість поліпшити абразивні властивості матеріалу. Шліфувальні матеріали з хромотитанистого електрокорунду завдяки своїм високим абразивним властивостям і механічній міцності витіснили на ряді відповідальних операцій абразивної обробки шліфувальні матеріали з хромистого електрокорунду, який сьогодні не проводиться. Область застосування – виробництво абразивного інструменту, шліфувальні шкурки, обробка вільними абразивними зернами.

Цирконієвий електрокорунд – електрокорунд (марка: 38А) являє собою різновид електрокорунду, що отримується при плавці в електричній дуговій печі шихти, до складу якої входить сировина, що містить глинозем і оксид цирконію. Густина цирконієвого електрокорунду 4,05–4,15 г/см³, мікротвердість 22,6–23,5 ГПа.

Монокорунд – абразивний матеріал, різновид електрокорунду з вмістом в зерні 97–98 % Al₂O₃. Монокорунд складається з плоскогранних ізометричних зерен монокристалічного корунду з невеликим вмістом домішок (2–3 %). Монокорунд виплавляють з бокситу з сірчистим залізом і відновлювачем з наступним виділенням монокристалічного корунду. Абразивні інструменти з монокорунду використовуються для шліфування важкооброблюваних жароміцних, конструкційних і кислототривких легованих сталей і сплавів.

Хромотитанистий електрокорунд (марки: 95А, 94А) використовується для виготовлення інструменту на керамічних і бакелітових зв'язках для шліфування сталевих загартованих і незагартованих заготовок і для виготовлення інструменту для шліфування з великим зніманням металу і обдирного шліфування.

Цирконієвий електрокорунд (марка: 38А) використовується у виробництві обдирних кругів. Коефіцієнт шліфування інструменту з цирконієвого електрокорунду на обдирних операціях щонайменше в 10–40 разів перевищує цей показник для інструменту з нормального електрокорунду.)

І купер шлак (*Купершлак*) – абразивний порошок, який отримують із гранульованих шлаків мідеплавильного виробництва. У різних галузях промисловості купершлак знають під різними найменуваннями. Це – мінеральна дріб, шліфзерно, купершлак. Купершлак – найбільш поширений вид абразиву для абразивоструменевого очищення на сьогоднішній момент. Існує аналогічний абразив, що виготовляється з гранульованих шлаків нікелевого виробництва – нікельшлак, його відрізняє більш висока твердість, а в іншому він схожий з купершлаком.

Виробництво – Мідні шлаки є синтетичними мінералами для струменевого очищення. Утворюються з шлаків, отриманих шляхом плавлення міді зазвичай з використанням механічного дроблення у воді, потім сушаться і відсіваються. [2] І в своєму підсумковому складі не мають частинок міді, оскільки її витягли промисловим способом з мідовмісної руди. Найбільший розмір частинки купершлаку відповідно до стандарту ISO 11126 не повинен перевищувати 3,15 мм, а пропорція частинок розміром менше 0,2 мм (пил) така: частинка міді не повинна перевищувати 5 %.

Властивості – Гранули купершлаку мають високу твердість (6,5 за шкалою Мооса) і гостру незграбну форму, що дозволяє досягти ступеня очищення Sa 3 згідно зі стандартом ISO 8501-1 (чистий метал без домішок іржі і старих покриттів) при абразивоструменевому очищенні. Купершлак добре профілює поверхню (шорсткість поверхні 20–140 мкм), що сприятливо позначається на адгезії. Купершлак не містить кварцу в чистій формі, що оберігає від силікозу, професійного захворювання абразивоструйщиків. Фракційний склад гранул абразиву коливається в межах 0,1–3,5 мм, і за бажанням замовника виробник виготовляє будь-який фракційний склад в зазначеному інтервалі. Купершлак має високу питому масу. Через те що питома густина частинок купершлаку вища в порівнянні з більшістю абразивних матеріалів, то і кінетична енергія удару частинок об поверхню більша.

Рекуперація абразиву може досягати до 5 разів, але при цьому розмір часток буде зменшуватися, а кількість домішок буде збільшуватися, що призводить до зниження якості чистки.

Т а б л и ц я 3 . 2

Властивості купершлаку

Властивості	Значення	Метод перевірки
Розмір частинки, мм	0,2–2,4	ISO 11127-2
Питома густина, кг/дм ³	3,3–3,9	ISO 11127-3
Насипна густина, г/см ³	1,5	ISO 11127-3
Твердість по Моосу, од.	не менше 6	ISO 11127-4
Вологість, %	не більше 0,2	ISO 11127-5
Питома провідність, мСм/м	не більше 25	ISO 11127-6
Водорозчинні хлориди, %	не більше 0,0025	ISO 11127-7

Примітка: Купершлак призначений для видалення старих покриттів, окалини і іржі з металевих, цегляних, бетонних, кам'яних поверхонь перед нанесенням захисного покриття, а також для видалення старих покриттів, видалення зруйнованих і розморожених ділянок при ремонті, а також перед фарбуванням. Купершлак найбільш затребуваний при агресивних видах очищення для профілювання і видалення глибокої корозії, для повсякденного очищення. Менша фракція купершлаку підійде для очищення м'яких металів, таких як алюміній. Обробка поверхонь купершлаком може здійснюватися як звичним абразивоструменевим методом, так і гідроабразивним (подача води до абразивного струменя через спеціальне сопло) або полум'яно-абразивним методом.).

Режими обробки поверхні ідентичні для обох абразивних матеріалів: тиск повітря 0,5 МПа (5 атм), витрата повітря 7 м³/хв, розмір абразивних частинок 50–300 мкм. Елементний склад абразивів наведено в табл. 3.3.

Випробування клейових з'єднань, отриманих із застосуванням сталевих зразків, опескоструєних із застосуванням електрокорунду і Купершлаку, показали, що при використанні останнього міцність клейових з'єднань значно вища. Це пов'язано з тим, що крайові кути змочування поверхні металу епоксидною композицією істотно розрізняються. Вони складають: для необробленої сталі 52°, обробленої електрокорундом при 37°, Купершлаком при < 18°.

Поверхні деталей нежорстких конструкцій, а також з товщиною стінок менше 1 мм обробляють шліфувальною шкуркою зернистістю 10–50 мкм, а алюмінієву фольгу – шкуркою зернистістю 5–10 мкм.

При зачистці поверхні наждачним папером використовують папір № 12–25. При склеюванні склопластиків обробка поверхні механічним шляхом (зашкурювання або зачистка) забезпечує руйнування клейового з'єднання по субстрату. Для зачистки поверхні можна використовувати пристосування типу натирачів. Пил, що утворюється при такій зачистці, видаляють шляхом обдування деталей стиснутим повітрям або за допомогою пирососів. До механічних способів підготовки поверхні належить і фрезерування. Його використовують для підготовки поверхні деревини безпосередньо перед склеюванням.

Велике значення для отримання якісного клейового з'єднання має дотримання допустимого розриву в часі між операціями механічної зачистки і нанесення клею. Склеювання деталей з алюмінієвого сплаву проводять не пізніше, ніж через 6 год, вуглецевих сталей через 12 год, нержавіючих і титанових сплавів – через 24 години після підготовки поверхні.

Т а б л и ц я 3.3

Елементний склад абразиву, мас. ч

Абразив	Електрокорунд	Купершлак
81	–	100
Рс	–	83
А1	100	14
Са	<1	12
С	–	12
Си	–	< 1
Zn	< 1	< 1

До збільшення міцності адгезійного з'єднання приводить використання механохімічного способу, тобто проведення механічної обробки в середовищі деяких реагентів (наприклад, мономера; розчинника, родинного клею; клею та ін.). Цей спосіб застосовується для обробки поверхні полімерних матеріалів. Обробка сприяє поліпшенню змочування полімеру клеєм і підвищенню міцності клейових з'єднань. Тривалість обробки становить 5 хв при частоті зворотно-поступального руху наждачного паперу 100 хв^{-1} . При механічній обробці поверхні поліетилену високого тиску по шару епоксидного клею зареєстровано наявність хімічно пов'язаного шару клею, який не видаляється при промиванні розчинником [24,27].

Можлива заміна механічної (піскоструменевої) обробки поверхні більш прогресивним способом – обробкою іонами аргону. Застосування цього способу для обробки поверхні корозійностійкої сталі дозволило підвищити міцність клейових з'єднань (при склеюванні епоксидним клеєм) в три рази. Іншою перевагою цього способу є те, що якість поверхні не знижується при тривалому терміні зберігання: склеювання може бути виконано через кілька годин або місяців після підготовки поверхні без зниження міцності клейового з'єднання.

3.4.3. Травлення

До хімічних (електрохімічних) способів підготовки поверхні належать травлення і анодне оксидування. При хімічних способах підготовки поверхні змінюються її хімічні і фізичні властивості, підвищується адгезійна здатність. Для кожного металу потрібні специфічні способи хімічної обробки. При взаємодії з хімічним реагентом на поверхні металу відбувається утворення оксиду або підбурювання металу, можливий також одночасний перебіг цих процесів [27-28].

Травлення застосовують для підготовки поверхонь металів, гум і матеріалів, що важко склеюються. Для підготовки поверхні металів використовують розчини, до складу яких входять сірчана, азотна, хлористоводнева (соляна) і фосфорна кислоти.

Вельми часто для підготовки поверхні алюмінієвих сплавів використовують розчин такого складу, мас, ч.:

H_2SO_4 (концентрована)	22,5
$\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	7,5
H_2O	70,0

Після травлення обов'язкова промивка деталей проточною холодною водою до нейтральної реакції промивної води. Сушку деталей після промивання

проводять в приміщенні обдуванням стисненим повітрям, нагрітим до 50 °С для алюмінієвих сплавів і до 110 °С для інших металів.

Після травлення поверхні деталей можна зберігати до склеювання від 4 год до 10–14 діб. При більш тривалому зберіганні підготовлених до склеювання деталей міцність клейових з'єднань знижується. Особливо різко знижується міцність при розшаруванні: після зберігання підготовленої поверхні до 30 діб цей показник може знизитися на 80 %. При зберіганні деталей їх слід обернути пергаментним або крафт-папером для захисту від забруднень.

Для підготовки поверхні гуми використовують 80–93 % H_2SO_4 . Тривалість витримки при обробці поверхні залежить від типу гуми і концентрації сірчаної кислоти. Так, наприклад, при обробці поверхні гуми на основі НК 93 % H_2SO_4 витримка становить 2–3 хв, при концентрації кислоти 80 % – 5–10 хв. При обробці поверхні гуми на основі синтетичного каучуку використовують концентровану азотну кислоту (96–98 %), при цьому тривалість витримки становить 4–8 хв.

Використовуючи кислоту і тонкоподрібнений порошок діоксиду кремнію (аеросил), готують тиксотропну пасту. Пасту наносять на поверхню, що склеюється, і залишають на 10–20 хв, потім змивають водою.

Обробка поверхні гуми кислотами найбільш ефективна для товстостінних виробів, тому що при такій обробці міцність гуми знижується на 20–30 %, поверхня стає жорсткою, погіршується товарний вигляд гум. Даний спосіб абсолютно не придатний для обробки тонких гумотехнічних виробів.

Більш прогресивним є бромовання поверхні гуми «іонним» способом, який відрізняється простотою застосування, не вимагає складного апаратурного оформлення і практично не впливає на міцність гуми.

3.4.4. Фосфатування

Поверхню металів під склеювання можна готувати фосфатуванням – обробкою розчинами однозаміщених солей ортофосфорної кислоти. Найбільш високі міцності клейових з'єднань досягаються при склеюванні епоксидним клеєм при фосфатуванні 15%-м розчином ортофосфорної кислоти протягом 50 хв при 23–25 °С [36].

Для підготовки поверхні алюмінієвої фольги під склеювання застосовують хімічне оксидування в розчині фторсилікату натрію і хромового ангідриду.

Одним з найбільш широко використовуваних способів підготовки поверхні під склеювання конструкційними клеями є анодне оксидування. Анодна плівка,

поряд з високими адгезійними властивостями, володіє хорошими захисними властивостями. При анодному оксидуванні деталі занурюють в електроліт і з'єднують з позитивним полюсом джерела струму. Алюміній, що піддається обробці, є анодом в гальванічному елементі. Катод може бути поміщений у ванну у вигляді гальванічного елемента або в ролі катода використовуються стінки ванни. Під час проходження струму через електроліт на аноді виділяється активний кисень, який взаємодіє з алюмінієм, утворюючи анодну плівку. Зі збільшенням товщини анодної плівки її захисні властивості зростають, але міцність зменшується.

3.4.5. Анодування

При анодному оксидуванні найчастіше деталі є анодами і повинні бути повністю занурені в електроліт і не стикатися зі стінками ванни. Щоб уникнути місцевого перегріву електроліт повинен добре перемішуватися.

Анодування можна проводити в кислотному або в лужному середовищі, але, як правило, на практиці зазвичай використовують кислотне середовище. На початковій стадії техпроцесу обов'язковою операцією є знежирення. В іншому випадку забруднення, наявні на поверхні металу, будуть потрапляти у ванну анодування, робити її склад нестабільним а процес анодування невідтворюваним. Незважаючи на те, що анодування є основною операцією обробки поверхні, операції попереднього видалення оксидів з поверхні (лужне знежирення і травлення) необхідні для того, щоб позбутися будь-яких оксидів невідданого складу, що утворилися на ній перед введенням металевої деталі у ванну для анодування. В результаті використання цих операцій електрохімічний стан ванни стає відтвореним [28,35-36].

При анодуванні в кислому середовищі оксид алюмінію знаходиться в метастабільному стані і розчинний при нормальних умовах, але не розчиняється при додаванні електрохімічного потенціалу. На початковій стадії операції анодування на поверхні металу утворюється «бар'єрний» шар. Цей «бар'єрний» шар є тонким, щільним і не має різко виражених особливостей.

Застосовуються три способи анодного оксидування деталей: сірчаноокислотний, хромовокислотний і фосфорнокислотний.

Основна відмінність між структурами оксидів, одержаних при використанні цих способів, полягає в товщині оксидної плівки, розмірі пір і хімічному складі. Анодування в сірчаній кислоті призводить до утворення оксиду, який

має велику товщину, пористість і містить значну кількість сульфатів. Оксид, який утворився в результаті анодування в хромовій кислоті, має дещо меншу товщину, ніж оксид, отриманий при анодуванні в сірчаній кислоті, і більш високу пористість. При ретельному регулюванні процесу анодування і використанні ступеневого режиму підйому напруги може бути отримана надзвичайно пориста оксидна поверхня. Оксид, отриманий при анодуванні в хромовій кислоті, являє собою практично чистий Al_2O_3 , багато в чому схожий на оксид, що утворюється в процесі травлення. Анодування в фосфорній кислоті призводить до отримання більш тонкої, ніж в двох попередніх випадках, анодної плівки, що має дуже пористу структуру з відкритими порами і містить значну кількість фосфатних іонів.

Найбільш хорошими захисними властивостями володіє анодна плівка, що утворюється при сірчаноокислотному способі. Однак вона є самою тендітною і неміцною, товщина плівки 5–8 мкм: міцність клейових з'єднань при зрушенні становить не більше 25 МПа (при більш високій міцності відбувається відрив анодної плівки). Крім того, при такій підготовці поверхні спостерігається знижена водостійкість клейових з'єднань з адгезійним характером руйнування, тобто має місце проникнення вологи по анодній плівці.

Склад, в якому проводиться анодування, необхідно охолоджувати до 10–15 °С, що також викликає додаткові труднощі. Сірчаноокислотне анодування може бути рекомендовано тільки як метод підготовки поверхні під склеювання нежорсткими клеями (наприклад, феноло-каучуковими).

Анодне оксидування в хромовій кислоті забезпечує більш високі міцності клейових з'єднань. Анодна плівка є більш щільною і більш активною, але має гірші захисні властивості, ніж плівка, що утворюється при сірчаноокислотному анодуванні, оскільки її товщина становить 3–5 мкм. Анодне оксидування в хромовокислотному електроліті гарантує отримання високих стабільних міцносних клейових з'єднань як у початковому стані, так і після впливу експлуатаційних факторів. Цей спосіб підготовки поверхні дозволяє отримувати клейові з'єднання алюмінієвих сплавів, що володіють у 3–5 разів більшою водостійкістю в порівнянні з клейовими з'єднаннями, сформованими після підготовки поверхні в сірчаноокислотному електроліті. Недоліком цього способу анодування є дефіцитність і висока токсичність електроліту, а також більш низькі, ніж при сірчаноокислотному анодному окисненні, захисні властивості покриття, а також токсичність електроліту, який містить іони Cr^{6+}

3.4.6. Промивання і сушка поверхні

Сушку виробів після промивання проводять в сушильних камерах при температурі 60–150 °С або обдуванням стисненим повітрям за ГОСТ 9.010-73 протягом 5–20 хв.

Контрольні запитання

1. Якими способами здійснюється знежирення і очищення поверхні субстратів?
2. Якими пристроями здійснюється механічна обробка поверхні субстрату?
3. Що таке процес травлення поверхні субстрату і для чого він потрібний?
4. Як здійснюється процес фосфатування та анодування і для чого?
5. Які режими промивання і сушіння поверхні субстрату?

ПІДГОТОВКА ПОВЕРХНІ МЕТАЛІВ

4.1. Підготовка поверхні сталі

Для підготовки поверхні алюмінієвих, магнієвих і титанових сплавів, нержавіючих і вуглецевих сталей, вольфраму, міді, молібдену та інших металів використовують травлення в розчинах, що містять сірчану, азотну, соляну і ортофосфорну кислоти.

Для підготовки поверхні алюмінієвих сплавів, наприклад, рекомендується розчин, що містить 22,5 мас. ч. H_2SO_4 (конц.), 7,5 мас. ч. $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ і 70 мас. ч. води. Після травлення деталі обов'язково треба промити проточною холодною водою до нейтральної реакції промивної води. Сушать деталі, обдуваючи стисненим повітрям (при температурі приміщення 15–30 °С), нагрітим не вище 50 °С (у разі алюмінієвих деталей) або 110 °С (для інших металевих деталей).

Після травлення деталі можна зберігати до склеювання від 4 год. до 10–114 діб. При більш тривалому зберіганні підготовлених до склеювання деталей міцність клейових з'єднань знижується. Особливо різко знижується міцність при розшаруванні – після зберігання підготовленої поверхні до 30 діб. цей показник може знизитися до 80 %. При зберіганні деталі слід обгортати крафт-папером для захисту від забруднень.

Поверхню металів можна обробляти розчинами однозаміщених солей ортофосфорної кислоти (фосфатування). Перед фосфатуванням поверхня повинна бути ретельно очищена. Найбільш високі показники міцності клейових з'єднань при склеюванні епоксидним клеєм забезпечуються при фосфатуванні в 15%-му розчині ортофосфорної кислоти протягом 50 хв при 23–25 °С; при цьому руйнування відбувається по клею і міцність з'єднання приблизно на 25 % вища, ніж при склеюванні нефосфатованих зразків [27-28].

Одним з найбільш широко використовуваних методів підготовки поверхні металів є *анодне оксидування*. В такому разі анодна плівка, що утворюється, дає не тільки високу адгезію, а й хороші захисні властивості. При анодному оксидуванні деталі занурюють в електроліт і з'єднують з позитивним полюсом джерела струму. Під час проходження струму через електроліт на аноді виділяється кисень, який взаємодіє з алюмінієм з утворенням оксидної плівки. Зі збільшен-

ням товщини плівки захисні властивості її поліпшуються, але міцність зменшується.

Існують три способи анодного оксидування деталей: сірчаноокислотний, хромовоокислотний і фосфорноокислотний. Режими анодування для кожного з цих способів подані в табл. 4.1.

Т а б л и ц я 4.1

Способи анодного оксидування деталей

Параметри процесу	Спосіб анодування		
	Сірчано-кислотний	Хромово-кислотний	Фосфорно-кислотний
Електроліт	Сірчана кислота	Хромово-кислота	Фосфорна кислота
Вміст електроліту, г/л	180–200	50–55	90–100
Температура електроліту, °С	10–15	39±2	13–25
Густина струму, А/дм ²	1–1,5	1	–
Тривалість анодування, хв	20–25	60	10–20
Товщина анодної плівки, мкм	5–8	3–4	–

Анодна плівка, що утворюється при сірчаноокислотному способі, має найкращі захисні властивості, однак, вона сама тендітна і нетривка. При міцності клейових з'єднань при зсуві близько 20 МПа відбувається її відрив від поверхні металу. Крім того, при сірчаноокислотному анодуванні спостерігається знижена водостійкість клейових з'єднань (волога проникає крізь оксидну плівку). Склад, в якому проводиться анодування, потрібно охолоджувати до 10–15 °С, що пов'язано з додатковими труднощами. Сірчаноокислотне анодування може бути рекомендовано тільки як метод підготовки поверхні при склеюванні нежорсткими клеями (наприклад, фенолокаучуковими), на яких міцність клейових з'єднань при зсуві не перевищує 20 МПа.

Анодне оксидування в *хромовій кислоті* забезпечує більш високу міцність клейових з'єднань, утворюється більш щільна оксидна плівка, але її захисні властивості гірші за властивості плівки, що утворюється при сірчаноокислотному анодуванні. Недоліком цього способу є висока токсичність, а також дефіцитність електроліту.

Найбільш ефективним способом підготовки алюмінієвих сплавів є анодування у *фосфорній кислоті*. Цей спосіб має переваги перед іншими: підвищену міцність клейових з'єднань і незначну її зміну при коливаннях напруги, температури ванни і тривалості анодування, більш високу водостійкість та ін.

Промивати деталі після анодного окиснення водою неприпустимо, оскільки оксидні плівки легко гідролізуються і утворюються гідроксиди, які служать центрами початку руйнування клейових з'єднань. Сушити деталі слід теплим сухим повітрям, очищеним від масла і пилу. Зберігання деталей після анодного окиснення призводить до зниження адгезії анодної плівки і міцності клейових з'єднань, тому склеювання слід проводити безпосередньо після підготовки, поверхні. Допускається зберігання деталей після анодного окиснення до трьох діб при суворому дотриманні умов зберігання, що виключають їх забруднення. Іноді для підвищення міцності клейових з'єднань при підготовці поверхні поєднують різні методи. Так, при підготовці поверхонь вуглецевих сталей ефективно травлення за піклінг-процесом з наступним фосфатуванням. При цьому між фосфатним покриттям і реакційноздатними групами основи клею утворюються хімічні зв'язки. Така підготовка поверхні забезпечує стабільність властивостей клейових з'єднань в процесі зберігання [1].

На прикладі поліуретанового клею ВІЛАД-6К при склеюванні фосфатованої сталі з полівінілхлоридною плівкою доказано, що між поверхнею фосфатованої сталі та ізоціанатними групами поліуретану утворюються хімічні зв'язки.

Адгезійна міцність з'єднання залежить від товщини (маси) аморфного фосфатного шару. Найкращі адгезійні характеристики отримані при масі 1,5–3,5 мг/дм².

4.1.1. Підготовка поверхні вуглецевої сталі

При травленні відбувається зміна матеріалу, його розмірів, мікроскопічної і субмікроскопічної структури поверхні. При травленні зростає вільна поверхнева енергія за рахунок утворення певного шару при взаємодії субстрату з травильним розчином. Ці шари мають, як правило, полярний характер. Травлення – важливий спосіб обробки поверхні субстратів, в основному металів. В результаті травлення видаляються залишки жирів, які могли залишитися на поверхні, шари оксидів, утворюються активні центри з полярними групами, досягається дуже тонке і рівномірне шорсткування поверхні під дією травильного розчину. В результаті дії травильного розчину на поверхні субстрату має утворитися шар, що володіє високою адгезією до вибраного клею. Товщина, пористість і хімічний склад цього шару залежать від складу, концентрації і тривалості дії травильного розчину. При використанні звичайних засобів на поверхні утворюється шар оксиду, який при подальшій промивці водою гідратується. Товщина і структура гідратованого шару залежать від температури, часу і рН

при промиванні і сушінні. Активність оксидних слоїв, що утворилися, дуже часто нетривала, тому треба відразу після травлення зробити промивання і сушку. Якщо технологічний процес цього не дозволяє, то необхідно захистити шар, що утворився, адгезійним ґрунтом [27,35-36].

Процес 1: знежирення в трихлоретилені, сушка; травлення 10 хв при 68 °С. Склад розчину: 32 мас. ч. дистильованої води, 10 мас. ч. H₂SO₄ (густина $d = 1,84$ г/см³), 1 мас. ч. біхромату натрію (Na₂Cr₂O₇); промивання водою; сушка (струменем повітря при температурі 40 °С).

Процес 2: знежирення в трихлоретилені, сушка; травлення 15 хв при 49 °С (30 мас. ч. насиченого розчину біхромату натрію Na₂Cr₂O₇, 100 мас. ч. H₂SO₄ (густина $d = 1,84$ г/см³); промивання водою; сушка.

Процес 3: лужне знежирення складом, який складається з 15 г/л NaOH, 15 г/л Na₂CO₃, 83 г/л метасилікату натрію, 4 г/л смоляного мила і 4 г/л наконалу NR; сушка: травлення 2–4 хв при 15–22 °С (10 мас. ч. H₂SO₄ з густиною $d = 1,84$ г/см³, 10 мас. ч. HNO₃ з $d = 1,42$ г/см³ і 80 мас. ч. дистильованої води; ретельне промивання холодною водою; травлення 0,5–1 хв при 20–30 °С (50–60 мас. ч. HCl з $d = 1,26$ г/см³, 2 мас. ч. 30%-ю H₂O₂, 38–48 мас. ч. дистильованої води від загальних 100 мас. ч.); промивання холодною водою; сушка.

Процес 4: лужне знежирення як в процесі 3; ретельне промивання холодною водою; травлення 10 хв при 60 °С (50 мас. ч. HCl з $d = 1,26$ г/см³, 2 мас. ч. 30%-ю H₂O₂, 10 мас. ч. 37%-го формальдегіда, 45 мас. ч. води); промивання теплою водою; ретельна сушка.

Процес 5: знежирення 10 хв у лужної ванні при 88 °С (21 мас. ч. силікату натрію Na₂SiO₃, 11 мас. ч. метафосфату натрію Na₄P₂O₇, 11 мас. ч. NaOH, 3,5 мас. ч. лужного миючого засобу, 910 мас. ч. води); промивання: травлення 10 хв при 88 °С (10 мас. ч. щавелевої кислоти, 10 мас. ч. H₂SO₄ з густиною $d = 1,84$ г/см³, 80 мас. ч. дистильованої води; промивання водою; повторення процесу; травлення 10 хв при кімнатній температурі (15 мас. ч. 48%-ї плавикової кислоти, 10 мас. ч. H₂SO₄ з густиною $d = 1,84$ г/см³, 25 мас. ч. дистильованої води); промивання холодною водою, потім гарячею водою або паром; сушка на повітрі.

Процес 6: опіскоструювання; травлення 10 хв при 60 °С або 2 год. при кімнатній температурі: (10 мас. ч. 88%-ї ортофосфорної кислоти H₃PO₄ 10 мас. ч. метилового спирту); промивання холодною проточною водою при одночасному видаленні чорного нальоту, який виділився.

4.1.2. Підготовка поверхні нержавіючої сталі

Процес 1: знежирення у лужній ванні (рН = 12,65) 10 хв при 60–70 °С (85 мас. ч. силікату натрію Na_2SiO_3 , 40 г метафосфату натрію $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, 40 г NaOH , 15 г миючого засобу (ПАР), 4 л води); промивання гарячою водою; травлення при 60–70 °С і рН 0,6–0,8 (200 г хромової кислоти, 4 л дистильованої води); промивання холодною водою; сушка.

Процес 2: знежирення в парах трихлоретилену; травлення 10 хв при 70–80 °С (2 мас. ч. Na_2SiO_3 , 1 мас. ч. NaOH , 0,3 мас. ч. наконалу NR, 100 мас. ч. дистильованої води).

Процес 3: знежирення кислим розчином; травлення 10 хв при 65 °С (100 мас. ч. HCl з $d = 1,26 \text{ г/см}^3$, 4 мас. ч. 30%-ю H_2O_2 , 20 мас. ч. 40%-го розчину формальдегіду, 90 мас. ч. води); промивання; сушка у повітрі [35-36].

4.1.3. Підготовка поверхні оцинкованої сталі

Процес 1: лужне знежирення; промивання теплою водою; занурення на 1–2 хв в 15%-й розчин ортофосфорної кислоти H_3PO_4 при 65 °С; промивання холодною водою; промивання гарячою водою; сушка [35-36].

4.2. Підготовка поверхні алюмінію і його сплавів

Найбільш ефективним способом підготовки під склеювання алюмінію є *оксидування* алюмінію і його сплавів. Розроблено велику кількість процесів, з яких найбільш поширеним є травлення в розчинах солей хрому і сірчаної кислоти. Ці основні речовини входять у різні рецептури і лише небагато способів використовують травлення іншими речовинами. Найбільш відомим процесом оксидування алюмінію і його сплавів є піклінг-процес [27,35-36].

Утворювана анодна плівка, разом з високими адгезійними властивостями, має гарні захисні властивості. При *анодному оксидуванні* деталі занурюють в електроліт і сполучають з позитивним полюсом джерела струму. Алюміній, що піддається обробці, є анодом в гальванічному елементі. При анодному оксидуванні найчастіше деталі є анодами і мають бути повністю занурені в електроліт і не стикатися із стінками ванни. Щоб уникнути місцевого перегріву, електроліт повинен добре перемішуватися. Катод може бути зануреним у ванну у вигляді

гальванічного елемента або в ролі катода використовуються стінки ванни. Під час проходження струму через електроліт на аноді виділяється активний кисень, який взаємодіє з алюмінієм, утворюючи анодну плівку. Із збільшенням товщини анодної плівки її захисні властивості зростають, але міцність зменшується.

Анодування можна проводити в *кислотному* або в *лужному* середовищі, але, як правило, на практиці зазвичай використовують кислотне середовище. На початковій стадії технологічного процесу обов'язковою операцією є знежирення, інакше забруднення, що є на поверхні металу, потраплятимуть у ванну анодування, робитимуть її склад нестабільним, а процес анодування невідтворним. Не дивлячись на те, що анодування є основною операцією обробки поверхні, операції попереднього видалення оксидів з поверхні (лужне знежирення і травлення) необхідні для того, щоб позбутися від тих речовин, які утворилися на ній в процесі виготовлення оксидів невизначеного складу перед введенням металеві деталі у ванну для анодування. В результаті використання цих операцій електрохімічний стан ванни стає відтворним.

При анодуванні в *кислотному* середовищі оксид алюмінію знаходиться в метастабільному стані і є розчинним за нормальних умов, але нерозчинний при додатку електрохімічного потенціалу. На початковій стадії анодування на поверхні металу утворюється «бар'єрний» шар. Цей «бар'єрний» шар є тонким, щільним і таким, що не має різко виражених особливостей.

Поверхню алюмінію під склеювання можна готувати *фосфатуванням* – обробкою розчинами однозаміщених солей ортофосфорної кислоти. Найбільш високі міцності клейових з'єднань при склеюванні епоксидним клеєм забезпечуються при фосфатуванні 15%-м розчином ортофосфорної кислоти впродовж 50 хв при 23–25 °С.

Для підготовки поверхні алюмінієвої фольги під склеювання застосовують хімічне оксидування в розчині фторсилікату натрію і хромового ангідриду.

Алюмінієві зразки (пластини або зразки у вигляді «грибка») обробляють абразивною шкуркою № 12–16.

Поверхню алюмінієвих зразків протирають тампоном, який змочують у ацетоні і залишають у витяжній шафі впродовж 15–20 хв для видалення розчинника.

Алюмінієві зразки після механічної обробки та знежирення органічними речовинами піддають знежиренню водними розчинами миючих засобів.

Склад засобу для знежирення (мас. ч):

Гідроксид натрію.....	15
Сода.....	15
Метасилікат натрію (рідке скло)	23
Каніфольне мило	4
Поверхнево-активна речовина (ОП-7, ОП-10).....	4
Приготування каніфольного мила.	

Склад каніфольного мила (мас. ч):

Каніфоль.....	100
Гідроксид калію.....	12
Вода (дистильована).....	70

В підігріту воду додають гідроксид калію і після його розчинення при перемішуванні та нагріванні малими порціями додають каніфоль (температура топлення 100–140 °С). Цей процес проводять до отримання однорідної маси. Після приготування каніфольного мила готують водний розчин знежирювального засобу, який буде застосовано для знежирення поверхні металу. Водний розчин знежирювального засобу нагрівають до температури 70–80 °С і промивають зразки впродовж 3–15 хв. Далі проводять промивання зразків гарячою водою (60–70 °С) впродовж 3–5 хв. Промивають зразки холодною водою (15–20 °С) впродовж 5 хв.

Для оксидування алюмінію та його сплавів розроблено велику кількість процесів, із яких найбільш поширеним є травлення в розчинах солей хрому і сірчатої кислоти. Ці основні речовини входять у різні рецептури і тільки деякі способи використовують для травлення інші речовини [27-28].

Процес 1: знежирення парами трихлоретилену (або перхлоретилену); промивання водою 20 хв при 60 °С; дворазове промивання холодною водою (по 5 хв); травлення 20 хв при 60 °С (27,3 мас. ч. H_2SO_4 з густиною $d = 1,84 \text{ г/см}^3$, 7,5 мас. ч. $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 65,2 мас. ч. дистильованої води); дворазове промивання гарячою водою (60 °С, 0,5 хв); сушка у повітрі при 60 °С протягом 30 хв.

Процес 2: травлення проводять впродовж 30 хв при температурі 50–54 °С у розчині такого складу: 65,5 мл 96%-ї сірчаної кислоти, 37,5 г хромовокислого калію, 38,4 мл дистильованої води, потім йде промивання зразків проточною водою (дистильованою) до нейтральної реакції промивних вод ($\text{pH} = 7$) і сушка на повітрі.

Процес 3: знежирення в парах трихлоретилену; травлення 30 хв при 65–70 °С (22 мас. ч. H_2SO_4 з густиною $d = 1,84 \text{ г/см}^3$, 7,5 мас. ч. $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, 70 мас. ч. дистильованої води).

Процес 4: знежирення ацетоном (тампоном); травлення 30 хв при 50–54 °С (65,5 мл 96%-ї H_2SO_4 , 37,5 г $K_2Cr_2O_7$, 38,4 мл дистильованої води); промивання проточною дистильованою водою; сушка у повітрі.

Після процесу травлення алюмінієві поверхні зразків для запобігання корозії поверхні обробляють холодним водним 0,5%-м розчином «хромпіку».

Склад «хромпіку» (мас. ч.):

Сірчана кислота ($d = 1,84$ г/см ³)	22,5
Хромовокислий калій	7,5
Вода (дистильована)	70

Після повного розчинення хромовокислого калію у воді обережно невеликими порціями, при перемішуванні додають сірчану кислоту. Готують 0,5%-й розчин «хромпіка», в якому промивають металеві зразки впродовж 1–2 хв. Зразки сушать при 110–120 °С впродовж 20–30 хв. Після цього охолоджені зразки придатні до склеювання.

4.3. Підготовка поверхні магнію і його сплавів

Підготовка поверхні магнієвих сплавів перед склеюванням специфічна, оскільки ці сплави легко піддаються корозії. Перед склеюванням на поверхні магнієвих сплавів обов'язково має бути створена захисна плівка. Проте захисні плівки, що отримуються хімічним шляхом, мають меншу адгезію до металу, ніж клей до захисної плівки, що призводить до утворення клейових з'єднань з невисокою міцністю. Підготовлені таким чином деталі можна склеювати не більше ніж на два тижні. Найвища початкова міцність досягається на окисдованих поверхнях магнію (перед склеюванням). На цьому засновані способи підготовки поверхні сплавів магнію [27, 36].

Зразки магнію (пластини або зразки у вигляді «грибка») протирають ватним тампоном, який змочують у трихлоретилені і залишають у витяжній шафі на впродовж 15–20 хв для видалення розчинника.

Процес I: знежирення органічним розчинником (ацетоном, перхлоретиленом); лужне травлення (зануренням) 10 хв при 70–85 °С (2 мас. ч. Na_2SiO_3 , 1 мас. ч. $Na_4P_2O_7$, 0,3 мас. ч. лужної поверхнево активної речовини наконалу NR, 100 мас. ч. дистильованої води); ретельне промивання; травлення 3 хв при кімнатній температурі (16,6 мас. ч. хромової кислоти, 20 мас. ч. нітрату натрію,

105 мас. ч. крижаної оцтової кислоти, 100 мас. ч. дистильованої води); промивання водою; сушка струменем повітря при 40 °С.

Цей процес, хоча і забезпечує високу початкову міцність при склеюванні епоксидними клеями, але не гарантує достатньої корозійної стійкості (клеїві з'єднання в соляній камері руйнуються).

Процес 2: знежирення трихлоретиленом; сушка; занурення в 2–3%-й розчин NaOH на 1 хв; промивання холодною водою; травлення 3–5 хв при 21–33 °С (15–20 % CrO₃, 2,5–3,5 % NaNO₃); промивання холодною водою і швидке перенесення на 30 хв в киплячу ванну (3 % сульфату амонію (NH₄)₂SO₄, 1,5 % біхромату амонію (NH₄)₂Cr₂O₇, 1,5 % біхромату натрію або калію, 0,27 % водного розчину аміаку з $d = 0,88$ г/см³ і розведення до 100 % водою); промивання в проточній воді при 50 °С; швидка сушка повітрям (до 50 °С).

Процес 3: знежирення трихлоретиленом; сушка; травлення 10 хв при 80 °С (6 мас. ч. Na₂SiO₃; 3 мас. ч. Na₄P₂O₇; 1 мас. ч. лужної поверхнево-активної речовини, 300 мас. ч. дистильованої води); промивання холодною проточною водою; травлення 15 хв при 65 °С в 20%-му розчині CrO₃ у воді; триразове промивання в холодній дистильованій воді; триразове промивання киплячою дистильованою водою; сушка повітрям (до 50 °С).

Процес 4: травлення 60 хв при 60 °С 10%-м розчином CrO₃ в дистильованій воді; промивання гарячою і холодною водою; травлення 10 хв 2–3%-м розчином NaOH в дистильованій воді; кип'ятіння; промивання гарячою водою; травлення 5 хв при кімнатній температурі (1 мас. ч. HF, 2 мас. ч. H₂O), промивання холодною водою; пасирування у насиченому розчині Na₂Cr₂O₇·2H₂O, кип'ятіння 30 хв; промивання гарячою водою; сушка.

Процес 5: травлення 10 хв у 2–3%-му розчині NaOH у воді, кип'ятіння; промивання гарячою водою; травлення 5 хв при кімнатній температурі (1 мас. ч. HF, 2 мас. ч. дистильованої води); промивання холодною водою; пасирування 30 хв у насиченому розчині K₂Cr₂O₇, кип'ятіння; промивання гарячою водою; сушка.

Для обробки магнію і його сплавів можна використовувати анодування. Прикладом є рецептура DOW 17 фірми «Dow Chemical Co.»: лужне знежирення або знежирення в парах органічного розчинника; анодування змінним струмом протягом 3–5 хв при густині струму 5–50 А/дм² і при 70–80 °С (900 г NH₄F, 385 г Na₂Cr₂O₇, 315 г 85%-ї H₃PO₄, вода – доповнити до 4 л); промивання спочатку холодною, потім гарячою водою; сушка при 50 °С.

При використанні цього методу виходять гарні результати, в тому числі при роботі з'єднань в екстремальних умовах. Однак при цьому вимоги, що ставляться до точності дотримання параметрів процесу дуже високі. Склад ванни, час, температура та інші параметри мають контролюватися автоматично. Кінцеве покриття має бути яскраво зеленим, що свідчить про утворення потрібного тонкого шару. Утворення товстих шарів більш темного кольору небажано. Якщо таким чином підготовлені поверхні склеюють не відразу, а після тривалого зберігання, їх необхідно за 6 год до склеювання знежирити.

Перед склеюванням магнієвих сплавів клеями на основі модифікованих фенольних смол (наприклад, рідакс або FM 47, які являють собою фенольні смоли, модифіковані вініловими полімерами) рекомендується такий процес: знежирення в парах (трихлоретилен, ацетон); травлення 5–15 хв при 65–80 °С (283 г NaOH, 3,7 л води); промивання водою з температурою 10–18 °С; травлення 5–15 хв при 20–22 °С (680 г хромової кислоти $H_2Cr_2O_4$, 885 г нітрату кальцію $Ca(NO_3)_2$, 3,7 л дистильованої води); промивання водою кімнатної температури; сушка на повітрі при температурі до 90 °С.

Для травлення магнію іноді використовуються такі ж процеси, що і при травленні хрому.

Процес б: спочатку проводять занурення зразків в 2–3%-й розчин їдкого натру на 1 хв, потім відбувається промивання холодною водою. Травлення зразків триває впродовж 3–5 хв при температурі 21–23 °С в розчині такого складу: 15–20 % оксиду хрому (III), 2,5–3,5 % нітрату натрію. Далі іде промивання зразків холодною водою та швидке переведення на 30 хв в киплячу ванну. Розчин у ванні має такий склад: 3 % сульфату амонію, 1,5 % біхромату амонію, 1,5 % біхромату натрію або калію, 0,27 % водного розчину аміаку з густиною 0,880 г/м³ з розбавленням до 100 % водою). Потім триває промивання зразків в проточній воді при температурі 50 °С і швидка сушка в термошафі при температурі до 50 °С.

Після знежирення поверхні зразків магнію для запобігання корозії обробляють холодним водним 0,5%-м розчином «хромпіку».

Склад «хромпіку» (мас. ч.):

Сірчана кислота (густина 1,84 г/см ³).....	22,5
Хромовокислий калій	7,5
Вода (дистильована).....	70

Після повного розчинення хромовокислоного калію у воді обережно, невеликими порціями, при перемішуванні додають сірчану кислоту. Готують 0,5 % –ий розчин «хромпіка», в якому промивають зразки магнію впродовж 1–2 хв. Зразки сушать при 110–120 °С впродовж 20–30 хв. Після цього охолоджені зразки придатні до склеювання.

4.4. Підготовка хромованих поверхонь

Підготовка до склеювання хромових або хромованих деталей відрізняється деякою специфікою. Якщо деталі склеюють відразу після хромування і вони не забруднені, рекомендується тільки помірне шорсткування поверхні перед склеюванням. Якщо ж треба отримати високу міцність, необхідно проводити травлення [27,36].

В цьому випадку можна використовувати деякі з описаних нижче процесів.

Процес 1: травлення 1–5 хв при 90–95 °С (17 мас. ч. 37%-ї HCl, 20 мас. ч. води); промивання холодною, а потім гарячою водою; сушка гарячим повітрям (60 °С).

Процес 2: травлення 2–5 хв при 85–90 °С (50 мас. ч. конц. HCl, 50 мас. ч. дистильованої води); промивання холодною дистильованою водою; сушка теплим фільтрованим повітрям.

Інші аналогічні процеси відрізняються тільки температурою (різниця не більше 5–10 °С) і способом промивання і сушки.

Процес 3: хромовані зразки (пластини або зразки у вигляді «грибка») піддають травленню впродовж 1–5 хв при температурі 90–95 °С в розчині такого складу: 17 мас. ч. 37%-го розчину соляної кислоти і 20 мас. ч. дистильованої води. Потім проводять промивання холодною та гарячою водою до нейтральної реакції промивних вод. Сушка зразків відбувається в термошафі при температурі 60 °С.

4.5. Підготовка поверхні нікелю і його сплавів

Нікель і його сплави належать до матеріалів, які важко склеювати, проте склеювання є найбільш доцільним способом їх з'єднання. Травлення нікельованих деталей слід проводити дуже обережно протягом нетривалого часу. Поверхню не можна обробляти шорсткуванням; рекомендується використовувати адгезійні ґрунти, головним чином силани [27,36].

Процес 1: знежирення органічним розчинником в парах або тампоном; травлення 4–6 с при кімнатній температурі в чистій конц. HNO_3 ; промивання холодною дистильованою водою; сушка теплим фільтрованим повітрям.

Процес 2: придатний для деталей, травлення яких не можливо проводити зануренням; знежирення спочатку лужне, потім ацетоном (тампоном); травлення 60–80 с при кімнатній температурі тампонами зі скляної вати або тканини на основі казеїнових волокон (15 мас. ч. CrO_3 , 20 мас. ч. конц. HCl); промивання дистильованою водою; сушка повітрям при 55–60 °C (найкраще в печі).

Процес 3: деталі з нікелю і його сплавів слід занурювати на 4–6 с у концентровану азотну кислоту при кімнатній температурі, а потім промивати холодною водою і сушити при 20–25 °C. Рекомендована також обробка сумішшю з хромового ангідриду і соляної кислоти. Необхідно відзначити, що нікельовані деталі не можна піддавати піскострумінню. Їх рекомендується протирати миючим засобом, які не містять хлору, промивати дистильованою водою і сушити при 59 °C. Після такої обробки слід відразу ж заґрунтувати або склеїти деталі.

Зразки нікелю (пластини або зразки у вигляді «грибка») протирають ватним тампоном, який змочують у ацетоні, і залишають у витяжній шафі впродовж 15–20 хв для видалення розчинника.

Травлення зразків проводять при кімнатній температурі в концентрованої азотної кислоті протягом 4–6 с. Потім слідує промивка зразків холодною дистильованою водою до нейтрального середовища промивних вод і їх сушка в термошафі при температурі 30–40 °C.

Для деталей з нікелю, травлення яких не можна проводити зануренням, цей процес ведуть шляхом обробки поверхні ватним тампоном, змоченим сумішшю 15 мас. ч. оксиду хрому (VI) і 20 мас. ч. концентрованої соляної кислоти.

4.6. Підготовка поверхні титану і його сплавів

Для звичайних силових конструкцій з титану і його сплавів достатньо лужного знежирення. При більш високих вимогах, головним чином за теплостійкістю, рекомендується травлення.

Відоме також ефективне анодування в сірчаній кислоті. Рекомендована обробка поверхні титанових сплавів сумішшю водного розчину азотної і фторо-

водородної кислот при кімнатній температурі. Для збільшення адгезії титанових сплавів пропонується наносити на поверхню металу фторидне покриття шляхом обробки при кімнатній температурі протягом 5–25 с в розчині, що містить фтористий калій і фтороводородну кислоту [27,36].

Якщо деталі з титанового сплаву не можна обробити будь яким з перерахованих способів (із-за великих розмірів або з інших причин), їх поверхню можна злегка обробити наждачним папером, протерти миючим засобом, що не містить хлору, промити демінералізованою водою і просушити. Такий процес рекомендується проводити при дрібному ремонті в польових умовах. Оброблені деталі після сушки слід якнайскоріше покрити склеювальним ґрунтом або склеїти.

Титанові зразки (пластини або зразки у вигляді «грибка») обробляють абразивною шкуркою № 12–16.

Поверхню титанових зразків протирають тампоном, який змочують у бензині або ацетоні і залишають у витяжній шафі на впродовж 15–20 хв для видалення розчинника.

Процес 1: опіскоструювання; знежирення органічним розчинником (тампоном); сушка повітрям; травлення 1 год. при кімнатній температурі (20 мас. ч. конц. HNO_3 , 5 мас. ч. 40%-ї фтороводорóдної кислоти, 75 мас. ч. дистильованої води); промивання холодною водою; обдування воздухом.

Цей процес можна використовувати і для сталі, легованої титаном, і для інших марок нержавіючої сталі.

Процес 2: знежирення трихлоретиленом; сушка; травлення 15 хв при 50 °С (35 мас. ч. насиченого розчину $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1000 мас. ч. H_2SO_4 з $d = 1,84 \text{ г/см}^3$; промивання холодною водою (до нейтральної реакції); промивання киплячою водою; сушка обдувом повітрям (до 90 °С).

Процес 3: знежирення ацетоном; обробка віденським вапном (тампоном); промивання холодною водою; сушка; травлення 15 хв при 20–25 °С (1 мас. ч. конц. HNO_3 , 1 мас. ч. конц. HF); занурення в концентрований розчин хромової кислоти; промивання холодною дистильованою водою; сушка.

Травлення проводять протягом 15 хв при 50 °С таким складом: 35 мас. ч. насиченого розчину біхромату натрію і 1000 мас. ч. концентрованої сірчаної кислоти. Потім проводять промивання холодною водою (до нейтральної реакції), а потім киплячою водою. Сушка зразків здійснюється обдуванням гарячим повітрям (до 90 °С).

4.7. Підготовка поверхні міді, бронзи, латуні та їх сплавів

Перед склеюванням мідних, бронзових, латунних і покритих ними поверхонь, головним чином в електроніці, можна рекомендувати спосіб обробки, званий хімічним чорнінням. При цьому на поверхні утворюється тонкий суцільний шар оксиду, який перешкоджає подальшому окисненню повітрям до склеювання. Для обробки використовують склади на основі суміші фосфорної і азотної кислоти. Мідь, бронзу і латунь також обробляють піскоструминним апаратом і потім знежирюють. Рекомендовані також кислотні ванни, що складаються з концентрованої сірчаної кислоти, кристалічного сульфату заліза і води. Деталі занурюють, а потім промивають водою і ретельно висушують. Відомий спосіб обробки поверхні мідних сплавів із застосуванням розчину персульфату амонію або з використанням хлорного заліза [27,35-36].

Поверхню зразків протирають тампоном, який змочують у трихлоретилені і залишають у витяжній шафі впродовж 15–20 хв для видалення розчинника.

Процес 1: Травлення зразків проводять впродовж 2–4 хв в травильному розчині при температурі 20 °С. Склад травильного розчину такий: 15 мас. ч. 42%-го водного розчину хлориду заліза (III), 30 мас. ч. азотної кислоти концентрованої та 197 мас. ч. дистильованої води. Потім проводять промивання зразків холодною і гарячою водою, а також їх сушку при кімнатній температурі.

Процес 2: лужне знежирення; промивання водою; сушка; травлення 1 год. при 20–25 °С: (3,3 мас. ч. FeCl₃, 22 мас. ч. конц. HNO₃; 100 мас. ч. дистильованої води); ретельне промивання теплою водою (до 50 °С); швидка сушка (обдування повітрям до 50 °С).

Процес 3: (для травлення бронзи): знежирення ацетоном (або метилетилкетонем); сушка; травлення 2–3 хв при 20 °С (5,5 мас. ч. 90%-ї H₂SO₄, 5 г K₂Cr₂O₇, 84 мас. ч. дистильованої води); промивання; якщо поверхня почорніла, знову обробити ацетоном (тампоном) і продовжувати травлення ще 30–60 с; промивання теплою водою; сушка.

Перед склеюванням мідних і покритих міддю поверхонь, головним чином в електроніці, можна рекомендувати спосіб обробки, званий хімічним чорнінням. При цьому на поверхні утворюється тонкий суцільний шар оксиду, який перешкоджає подальшому окисненню повітрям до склеювання. Для обробки використовують склади на основі суміші фосфорної і азотної кислоти.

Перед склеюванням латуні модифікованими фенольними клеями рекомендується такий процес: опіскоструювання або очищення щіткою; знежирення

(в парах); травлення 10 хв при 65 °С (450 г Fe₂(SO₄), 340 г, 95%-ї H₂SO₄, 3 л води); промивання водою (10–15 °С); травлення при кімнатній температурі до отримання чистої блискучої поверхні (200 м K₂Cr₂O₇, 400 г 95%-ї H₂SO₄, 3,4 л води); промивання холодною водою; занурення в концентрований аміак на 1–3 с; промивання холодною водою; сушка струменем повітря (не вище 40 °С).

4.8. Підготовка поверхні рідких металів

При травленні металів необхідно пам'ятати таке: в процесі травлення треба усунути залишки забруднень, які не були усунені при механічній обробці і знежиренні; необхідно створити поверхневий шар, який має високу адгезію до основи, що містить функціональні групи, здатні до взаємодії з субстратом, мінімально можливої товщини, та гарну корозійну стійкість і т. ін.

Сьогодні, коли склеювання проникло в електроніку, космічну техніку та ряд інших галузей науки і техніки, перед конструктором часто встає проблема склеювання рідкісних металів, таких як, наприклад, германій, берилій, вольфрам, і дорогоцінних – платини, золота, срібла [35-36].

4.8.1. Підготовка поверхні берилію

Процес 1: знежирення в парах розчинника; в 20%-му розчині NaOH в дистильованій воді; 3–4 хв при 75–80 °С; промивання проточною холодною водою; сушка в печі 10–15 хв при 135–160 °С.

Процес 2: знежирення в трихлоретилені; в розчині 20–30 мас. ч. NaOH в 170–180 мас. ч. дистильованій воді; 5–10 хв при 20 °С; промивання проточною водою і дистильованою водою; сушка 10 хв при 120–175 °С.

Процес 3: знежирення в парах трихлоретилену; в розчині 6 мас. ч. 69%-ї HNO₃ ($d = 1,42 \text{ г/см}^3$), 1 мас. ч. 60%-ї HF, 10 мас. ч. 93%-ї H₂SO₄ ($d = 1,84 \text{ г/см}^3$) і 3 мас. ч. дистильованої води + кілька крапель конц. H₂O₂; 1–5 хв при 20 °С; промивання дистильованою водою; сушка повітрям (75–80 °С) 15 хв.

4.8.2. Підготовка поверхні вольфраму

Процес 1: знежирення ацетоном (метилетилкетонем); в розчині 30 мас. ч. конц. HNO₃, 50 мас. ч. конц. H₂SO₄, 5 мас. ч. HF і 15 мас. ч. дистильованої води; 2–5 хв при кімнатній температурі; промивання дистильованою водою; сушка повітрям (65–80 °С) 15–25 хв.

4.8.3. Підготовка поверхні кадмію

Процес 1: знежирення трихлоретиленом; механічна очистка; гальванічне нікельовання або сріблення; травлення (як для нікелю) або знежирення (як для срібла).

4.8.4. Підготовка поверхні цинку

Процес 1: знежирення трихлоретиленом, ацетоном (метилетилкетон); механічна очистка; травлення 10–20 мас. ч. 37%-ю HCl (HCl можна замінити крижаною оцтовою кислотою), 90–80 мас. ч. води; промивання гарячою дистильованою водою; сушка на повітрі (65–70 °C) 30 хв.

Контрольні запитання

1. Як здійснюється підготовка поверхні різних видів сталі?
2. Як здійснюється підготовка поверхні алюмінію та його сплавів?
3. Наведіть спосіб підготовки поверхні магнію та його сплавів.
4. Наведіть спосіб підготовки хромових поверхонь.
5. Як готуються поверхні нікелю, титану та їх сплавів?
6. Наведіть способи підготовки поверхні міді, бронзи, латуні та їх сплавів.
7. Наведіть способи підготовки поверхні рідкісних металів.

ПІДГОТОВКА ПОВЕРХНІ ПЛАСТМАС, СКЛА, КЕРАМІКИ І ГУМ

5.1. Підготовка поверхні пластмас

Підготовка пластикових поверхонь під склеювання є однією з найважливіших операцій в технології склеювання. Вона полягає в підготовці їх один до одного до спеціальної обробки або очищення. Рівні, добре підігнані поверхні склеюваних матеріалів необхідні для отримання тонкого рівномірного за товщиною клейового прошарку.

Спосіб обробки поверхні залежить від типу пластмаси і природи клею. Композиційні пластики і пластмаси на основі затверділих реактопластів перед склеюванням обробляють переважно механічним способом. При цьому не тільки збільшується площа склеювання і на поверхні матеріалу оголюються частинки наповнювачів, які легко склеюються, але і видаляються різні забруднення, мастила і т. п.[27-28].

Перед нанесенням шару клею поверхні промивають розчинником (кетон, бензин) або протирають тампоном, змоченим в розчиннику, і сушать при 20–25 °С впродовж декількох хвилин.

Разом з механічною обробкою для деяких типів затверділих реактопластів застосовують хімічну обробку. Наприклад, феноласти обробляють ацетоновим розчином оксипохідних бензолу та інших ароматичних сполук.

Ефективний спосіб підвищення міцності склеювання – нанесення підшарів (грунтів) з розбавлених розчинів полімерів.

Одним з сучасних способів підготовки поверхні пластиків, зміцнених волокнистим наповнювачем, є нанесення перед формуванням деталі на ділянки, що підлягають склеюванню, шарів тканини з термопластів або скляної тканини, покритої фторопластом або кремнійорганічним полімером, і видалення цього шару безпосередньо перед нанесенням клею. Ці захисні шари, звані іноді «жертвовними», захищають пластик на стадіях переробки перед склеюванням і сприяють створенню шорсткого рельєфу поверхні.

Застосування клеїв, які адсорбують жирові і масляні забруднення, виключає з технологічного процесу операції очищення.

Обробку поверхонь термопластів також проводять механічним, хімічним, фізичним або комбінованими способами.

До фізичних методів обробки поверхонь перед склеюванням належать: електрична обробка, зокрема найбільш ефективний її різновид – обробка електронно-збудженим інертним газом, ультрафіолетове і радіоактивне поромінювання.

5.1.1. Підготовка поверхні різних неметалевих матеріалів

Підготовка поверхні неметалевих матеріалів має ряд особливостей у порівнянні з підготовкою металів. По-перше, для багатьох неметалевих матеріалів виключається операція знежирення, оскільки при механічній обробці з поверхні видаляється верхній шар і забруднення, що містяться в ньому. Крім того, при обробці поверхні пластиків органічні розчинники можуть адсорбуватися і знижувати міцність клейових з'єднань. Властивості деяких матеріалів (наприклад, органічного скла) можуть істотно погіршуватися при обробці органічними розчинниками .

Для підготовки поверхні пластиків і композиційних матеріалів використовують захисні шари, що видаляються і не можуть бути застосовані для металів. Як захисні шари застосовують склотканини та інші тканини (наприклад, нейлонова), які попередньо обробляють спеціальними речовинами для полегшення видалення їх з поверхонь, що склеюють. Крім того, більшість неметалів, особливо плівкові матеріали, мають невисоку поверхневу енергію, яка нижча, ніж у розчинників або клеїв, а це, в свою чергу, може запобігати ефективному змочуванню субстрату клеєм і досягненню високої адгезійної міцності. У зв'язку з цим застосовують специфічні хімічні й фізичні способи обробки поверхні таких матеріалів для активації адгезії за рахунок надання поверхні субстрату більш високої енергії .[27-28].

На поверхні склотекстолітів і композиційних матеріалів можуть перебувати різні речовини, що застосовуються як розділові шари при формуванні цих матеріалів. Більшість з цих сполук надає поверхням антиадгезійні властивості, в зв'язку з чим перед склеюванням їх слід видаляти. Для цього поверхню зашкурюють, піддають дробеструменевій обробці та ін. Як правило, така обробка поверхні в подальшому призводить до руйнування по субстрату. Як відомо, рельєф поверхні та її шорсткість впливають на міцність склеювання. Зі збільшенням шорсткості поверхні різко знижується швидкість досягнення рівноваж-

ної змочуваності її клеєм, і ця швидкість може виявитися нижчою швидкості тверднення клею. У цьому випадку на межі контакту з'являються бульбашки повітря, і якість з'єднання різко знижується.

Шорсткість поверхні можна надати не тільки травленням, але і в процесі пресування шляхом передачі рисунка склотканини, яка застосовується як проміжний (що видаляється) шар.

Для підвищення адгезії клеїв до поверхні формованих виробів, отриманих з використанням розділових мастил, на їх поверхню наносять емульгуючі, диспергуючі або змочуючі речовини. Наприклад, для поліуретанових виробів використовують лаурилсульфонат, адукти оксиду алкілену і лауриловий спирт, дибутилнафталінсульфонат та ін. Ці ж сполуки можуть бути введені і до складу розділового мастила. Так, при нанесенні на поверхню формованого поліуретану, отриманого з використанням як розділове мастило розчин воску в трихлоретані 10%-го водного розчину оксиетилованого олеїнового спирту, міцність клейового з'єднання при розшаровуванні підвищується приблизно в чотири рази.

Для підготовки поверхні пластмас під склеювання застосовують також хімічне модифікування поверхні. Наприклад, фенопласти обробляють ацетоновим розчином гідрокси-похідних бензолу та інших ароматичних з'єднань. Перед склеюванням затверднених реактопластів на основі кремнійорганічних полімерів на поверхні, що склеюються, наносять як підшарок з'єднання типу етоксисілану або обробляють їх розчином окислювача, наприклад, сірчаною кислотою.

Поліпшити адгезійні властивості полістирольних пластиків можна, напиляючи на їх поверхню мідне покриття (гальванохімічне покриття). Адгезійна міцність клейового з'єднання ударотривкого полістиролу, виконаного епоксидним клеєм на основі смоли ЕД-20, після такої обробки зросла в 2,5 рази.

Міцність склеювання склотекстолітів залежить також від ступеню затверднення зв'язного – при меншому ступеню тверднення склотекстоліту міцність клейового з'єднання збільшується. На прикладі склеювання епоксидних скло-текстолітів клеєм ВК-9 доказано, що міцність клейового з'єднання при рівно-мірному відриві збільшується з 23,7 до 29,5 МПа при зменшенні ступеня затверднення зв'язного з 98 до 74 %.

Властивості поверхневого шару, що утворюється при формуванні термопластів, впливають на міцність клейових з'єднань. Для одержання однорідної

поверхні без оболонки, що являє собою область дрібних деформованих утворень або неструктурний на оптичному рівні шар, необхідно ретельно вибирати режим формування.

5.1.2. Підготовка поверхні виробів з полікарбонату

Полікарбонат склеюється легше, ніж інші кристалічні термопласти, що пояснюється його доброю розчинністю в деяких органічних сполуках. Підготовка полікарбонатів до склеювання проста і полягає в усуненні забруднень і точній підгонці склеюваних поверхонь, оскільки із-за високого модуля пружності нерівномірний клейовий шов може призвести при дії зрушуючих зусиль до відшарування. Полікарбонати очищають знежирюючими засобами, які не розчиняють субстрат та не містять ароматичних сполук, наприклад фракціями бензину або водними розчинами ізопропанолу. Розчинники, такі як метиленхлорид, етиленхлорид із-за їх високої леткості використовують для склеювання невеликих площ. Їх наносять і витримують 5–10 с, після чого склеювані поверхні складають і в зафіксованому вигляді пресують під тиском 0,3–1 МПа при 80–90 °С протягом 6 год. При кімнатній температурі кінцева міцність досягається через 120 год; підвищення температури до 120 °С скорочує цей час до 5 год. Якщо склеювання проводили при кімнатній температурі, то шов тривалий час чутливий до ударів. Це має місце і при використанні клеїв, які є 8%-ми розчинами полікарбонату у вказаних розчинниках. Міцність отриманих таким чином з'єднань близька до міцності субстрата. Як розчинники можна використовувати також хлороформ, діоксан і тетрахлоретан. З їх допомогою полікарбонати можна склеювати з іншими розчинними пластмасами. Ароматичні вуглеводні, їх вищі етери і інші похідні для склеювання полікарбонатів непридатні. Кетон, етери, спирти і аліфатичні вуглеводні діють як осаджувачі або викликають розтріскування субстрата під навантаженням і придатні тільки як знежирюючі засоби [35-36].

Поверхню зразків (пластини або зразки у вигляді «грибка») протирають тампоном, який змочують ізопропіловим спиртом, гептаном або бензином і залишають у витяжній шафі впродовж 15–20 хв для видалення розчинника.

Зразки полікарбонату обробляють наждаковим папером на тихорецькій основі № 200. Потім поверхню зразків протирають тампоном, який змочують у миючому засобі, що не містить хлор, ретельно промивають дистильованою водою і просушують при кімнатній температурі.

5.1.3. Підготовка поверхні виробів з фторопласту

Фторопласти – найбільш інертні матеріали з високою стійкістю до всіх хімічних реагентів. Ці матеріали можна склеювати тільки після активації поверхні, що у цьому випадку дуже складна [35-36].

Поверхню зразків (пластини або зразки у вигляді «грибка») протирають тампоном, який змочують ацетоном або метилетилкетонем і залишають у витяжній шафі впродовж 15–20 хв для видалення розчинника.

Зразки фторопласту обробляють наждаковим папером № 200.

Травлення проводять шляхом занурення зразків на 10–90 с при кімнатній температурі у розчин такого складу: 46 г металевого натрію (стружка, дріт або стрічка), 128 г нафталіну і 1 л тетрагідрофурану (дія розчину прискорюють його перемішуванням). Потім триває нейтралізація ізопропіловим спиртом (це дозволяє видалити перед промиванням у воді маленькі частинки натрію, які залишилися на деталі) та прополіскування дистильованою водою і просушення зразків при 43–49 °С.

Якщо деталь оброблена правильно, то вона здобуває колір: від ясно-коричневого до темно-коричневого залежно від часу обробки і ступеня якості розчину. При неякісній обробці поверхні процес при необхідності повторюють.

5.1.4. Підготовка поверхні виробів з полівінілхлориду

При склеюванні полівінілхлориду варто брати до уваги деякі його специфічні властивості, насамперед (у випадку матеріалів, що містять пластифікатори) можливість міграції пластифікаторів на поверхню. Для запобігання цього найкраще протирати поверхні, що склеюють, тампоном, змоченим трихлоретиленом, бензином або сумішшю бензину зі спиртами, іноді з кетонами [35-36].

Поверхню зразків (пластини або зразки у вигляді «грибка») протирають тампоном, який змочують трихлоретиленом і залишають у витяжній шафі впродовж 15–20 хв для видалення розчинника.

Зразки обробляють наждаковим папером № 200. Потім поверхню зразків протирають тампоном, який змочують трихлоретиленом, протирають м'якою марлею і залишають у витяжній шафі на впродовж 15–20 хв для видалення розчинника.

5.1.5. Підготовка поверхні виробів з поліетилентерефталату

Полиетилентерефталат – це лінійний полімер, який не розчиняється у звичайних органічних розчинниках. Він розчиняється в нітробензолі, формаміді, фенолах та їхніх сумішах, причому розчинність зростає з температурою. При склеюванні деталей з поліетилентерефталату потрібна попередня хімічна обробка поверхні. Можна використати обробку розчином такого складу: 86 % трихлороцтової кислоти, 10 % оксиду хрому (безводного) і 4 % сапонату. Така обробка рекомендується при склеюванні каучуковими клеями. Обробка 20%-м розчином NaOH (80 °C, 5 хв) з наступною сенсibiliзацією в 1%-му розчині ZnCl₂ доцільна перед склеюванням епоксидними клеями – немодифікованими та модифікованими, нітрильними каучуками. Епоксидні клеї, модифіковані силіконами, рекомендується наносити після попередньої обробки силановими грунтами [35-36].

Поверхню зразків (пластини або зразки у вигляді «грибка») протирають тампоном, який змочують ацетоном або метилетилкетонем і залишають у витяжній шафі впродовж 15–20 хв для видалення розчинника.

Зразки поліетилентерефталату занурюють на 10 хв при 70–95 °C в розчин 2 мас. ч. їдкого натра в 8 мас. ч. дистильованої води. Потім зразки промивають в дистильованій воді і просушують протягом 20–30 хв при 50–60 °C в термошафі.

5.1.6. Підготовка поверхні виробів з фенопластів або амінопластів

Підготовка амінопластів до склеювання не відрізняється від підготовки фенопластів – головним чином це знежирення та механічна обробка. Фенопласти обробляють ацетоновим розчином гідроксипохідних бензолу та інших ароматичних сполук [35-36].

Поверхню зразків (пластини або зразки у вигляді «грибка») протирають тампоном, який змочують ацетоном або метилетилкетонем і залишають у витяжній шафі впродовж 15–20 хв для видалення розчинника.

Зразки фенопласту або амінопласту обробляють наждаковим папером № 200. Потім поверхню зразків протирають м'якою марлею, змоченою миючим засобом, який не містить хлору, промивають дистильованою водою і просушують протягом 20–30 хв при 50–60 °C в термошафі.

5.1.7. Підготовка поверхні виробів з поліуретанових пластиків

Поліуретанові пластики зазвичай перед склеюванням піддають знежиренню та механічній обробці з повторним знежиренням. За для знежирення використовують найбільш часто ацетон або метилетилкетон, а механічну обробку здійснюють різноманітним наждаковим папером.

Поверхню зразків (пластини або зразки у вигляді «грибка») протирають тампоном, який змочують ацетоном або метилетилкетоном і залишають у витяжній шафі впродовж 15–20 хв для видалення розчинника.

Зразки поліуретану обробляють наждаковим папером № 200. Потім поверхню зразків протирають тампоном, який змочують ацетоном або метилетилкетоном, протирають м'якою марлею і залишають у витяжній шафі впродовж 15–20 хв для видалення розчинника [35-36].

5.1.8. Підготовка поверхні виробів з поліолефінів

Дослідження показали, що погана адгезія клеїв до поліолефінів – є наслідком не тільки їхньої неполярності, але й наявності в них антиоксидантів (стабілізаторів), слідів змащення на поверхні виробів, домішок низькомолекулярних продуктів. Для поліпшення адгезійних властивостей поверхню поліолефінів обробляють різними способами. Найпоширеніший – травлення хромовою сумішшю. Після обробки поверхні сумішшю протягом 2 хв виріб промивають водою до видалення слідів кислоти та ретельно висушують. У результаті хімічні властивості поверхні змінюються рівномірно і на тривалий час. Поліолефіни недобувають здатність склеюватися феноло-формальдегідними, резорциновим, поліуретановим та іншими клеями, температура затвердіння яких нижче температури їх топлення. Треба мати на увазі, що цей спосіб небезпечний у зв'язку із застосуванням кислоти. Обробляють поліолефіни і сильними розчинниками. На відміну від попереднього способу, при якому відбувається хімічна зміна поверхневого шару, під дією розчинників відбуваються фізичні зміни: поверхневий шар набухає та стає шорсткуватим. Найбільш ефективні розчинники – трихлоретилен і толуол. Іноді обробляють поверхню поліолефінів парами розчинника. Недоліком цього способу є обмежений час (близько 48 год.), протягом якого зберігається ефект обробки. Поліолефіни також склеюють звичайними каучуковими клеями, попередньо обробляючи їх поверхню при 60 °С у розчині синтетичного каучуку в трихлоретилені, толуолі або бензолі. Широко розпо-

всюджений спосіб підготовки поліолефінів до склеювання за допомогою піско-струминної обробки поверхні.

Поверхню зразків (пластини або зразки у вигляді «грибка») протирають тампоном, який змочують ацетоном або метилетилкетонем і залишають у витяжній шафі впродовж 15–20 хв для видалення розчинника.

Зразки поліолефіну занурюють на 2–3 хв у нагрітий до 65–71 °С розчин 15 мас. ч. біхромату натрію і 250 мас. ч. концентрованої сірчаної кислоти в 25 мас. ч. дистильованої води. Потім зразки промивають дистильованою водою і просушують 15–30 хв при 43–49 °С [35-36].

5.1.9. Підготовка поверхні виробів з акрилових пластиків

Поліакрилатні пластики зазвичай перед склеюванням піддають знежиренню та механічній обробці з повторним знежиренням. Для знежирення використовують найчастіше ацетон або метилетилкетон, а механічну обробку здійснюють різноманітним наждаковим папером.

Поверхню зразків (пластини або зразки у вигляді «грибка») протирають тампоном, який змочують метиловим спиртом і залишають у витяжній шафі впродовж 15–20 хв для видалення розчинника.

Зразки акрилатних пластиків обробляють наждаковим папером № 200. Потім поверхню зразків очищають від пилу обдуванням чистим повітрям або пилососом [35-36].

5.1.10. Підготовка поверхні виробів з поліаміду

Поліаміди належать до полімерних субстратів, що важко склеюються, які перед склеюванням необхідно піддавати хімічній обробці. Доцільне травлення піклінг-розчином при кімнатній температурі протягом декількох секунд (інакше він викликає деструкцію полімеру). Рекомендується також занурення виробів, які склеюють, на кілька годин у силанові апрети та склеюють ізоціанатами, каучуками та епоксидами, модифікованими силіконами.

Поверхню зразків (пластини або зразки у вигляді «грибка») протирають тампоном, який змочують ацетоном або метилетилкетонем і залишають у витяжній шафі впродовж 15–20 хв для видалення розчинника.

Зразки поліаміду протирають абразивним миючим розчином, який не містить хлору та промивають дистильованою водою з подальшим сушінням при температурі не вище 65 °С [35-36].

5.1.11. Підготовка поверхні виробів з полістиролу

Деталі з полістиролу перед склеюванням обов'язково знежирюють і роблять шорсткуватими, іноді проводять травлення поверхні.

Поверхню зразків (пластини або зразки у вигляді «грибка») протирають тампоном, який змочують метиловим або ізопропиловим спиртом і залишають у витяжній шафі впродовж 15–20 хв для видалення розчинника.

Зразки полістирольних пластиків обробляють наждаковим папером № 200. Потім занурюють на 2–3 хв у нагрітий до 100–110 °С розчин 10 мас. ч. біхромату натрію і 90 мас. ч. концентрованої сірчаної кислоти з подальшим промиванням дистильованою водою і просушуванням 15–30 хв при 43–49°С [35–36].

5.2. Підготовка поверхні плівкових матеріалів

При склеюванні плівкових матеріалів виникають особливі труднощі, через те, що більшість з них інертні по відношенню до клеїв. Найбільш важко склеюються поліетилен і фторопласт. Найпростішим методом підготовки поверхні термопластів, що кристалізуються, наприклад, фторвміщуючих полімерів, поліолефінів, поліамідів до склеювання є дублювання їх зі склотканиною, скловолокном або з іншими подібними матеріалами. Дублювання можна проводити в пресах, на каландрах або прогладжуванням звичайною праскою, нагрітою до певної температури [28].

Для поліпшення здатності склеюватися деталі з фторопласту-4 виготовляють, вводячи в полімер на ділянках, які будуть склеюватися, наповнювачі (оксиди заліза і хрому, кварцеве борошно, цемент, порошки металів). Склеювання інертних матеріалів можливе тільки після спеціальної обробки поверхні, наприклад, в натрійнафталіновому комплексі. Так, клейові з'єднання необробленого фторопласту, виконані епоксиполіамідним клеєм, мають міцність при зсуві 0,61 МПа, в той час як після обробки в натрійнафталіновому комплексі міцність досягає 8,22 МПа. Для обробки можна використовувати також дисперсії натрію в рідкому аміаку, натрійантраценовий комплекс або розплавлений ацетат калію.

Поверхню поліетилентерефталатної плівки перед склеюванням можна обробити 30%-м розчином NaOH при 80 °С протягом 3 хв, при цьому міцність

при нерівномірному відриві клейових з'єднань, виконаних епоксиполіамідним клеєм, збільшується з 0,4 до 2,7 МН/м.

Адгезію пентапласту можна підвищити, обробляючи його поверхню окисною пастою з наступним нанесенням підшару з 7-амінопропілтриетоксисілану (продукт АГМ-9). Пасту готують, розчиняючи в 1 л води 40 г біхромату калію і 100 г сірчаної кислоти (густина 1820 кг/м³) з наступним перемішуванням 91 мас. ч. розчину з 9 мас. ч. аеросилу. Такою пастою можна обробляти не всю поверхню, а тільки деякі ділянки, наприклад, в разі великогабаритних виробів. Обробку пастою проводять при 20–22 °С протягом 15 хв, потім оброблену поверхню ретельно промивають водою, сушать при 60 °С протягом 1 год. і обробляють 5%-им розчином АГМ-9 в толуолі.

Поверхню поліетилену перед склеюванням можна обробляти у ванні, що містить 95,0 мас. ч. сірчаної кислоти, 4,6 мас. ч. біхромату натрію і 7,2 мас. ч. дистильованої води. У цій ванні вироби витримують протягом 1–2 с при 120 °С. Недоліком такої підготовки поверхні є зхрупчування плівок.

Для поліолефінів і фторопластів ефективним є простий і доступний спосіб, названий механохімічним способом склеювання. Суть методу полягає в механічній обробці поверхні полімеру після нанесення клею. Для цього використовують звичайне метало- та деревообробне обладнання (шліфувальні, полірувальні, токарні верстати, цикльовочні машини тощо).

При механічній дії відбувається руйнування хімічних зв'язків у полімері, що склеюється, з утворенням вільних макрорадикалів. У результаті хімічних реакцій цих макрорадикалів на поверхні субстрату з'являються полярні групи і ненасичені зв'язки, а при взаємодії з компонентами клею і щеплені кополімери.

На прикладі клейових з'єднань поліпропілен + поліпропілен, поліетилен + алюмінієвий сплав, поліетилен + поліетилен, виконаних епоксидним клеєм на основі смоли Епон 828 і твердника версамід 140 (1 : 0,1), показано, що міцність при зсуві зразків, поверхня яких оброблена шорсткуванням на повітрі перед нанесенням клею значно нижча, ніж в разі активації шорсткуванням в присутності клею (табл. 5.1).

Ще більш ефективна обробка поверхні, зокрема склопластиків, на основі ненасиченого полієфірного зв'язного, в присутності мономеру, родинного зв'язного склопластику. Слід зазначити, що після зберігання клейових з'єднань протягом декількох місяців їх міцність знижується.

Міцність при зсуві клейових з'єднань після обробки поверхні
різними способами

Матеріали, що склеюються	Руйнівна напруга при зсуві при 20 °С після обробки поверхні, МПа	
	шорсткуванням	механохімічно
Поліпропілен + поліпропілен	3,8 + 0,4	6,3 ± 0,4
Поліетилен низької густини + алюмінієвий сплав	4,8 + 0,6	6,9 ± 0,4
Поліетилен низької густини + Поліетилен низької густини	5,0 ± 0,3	7,1 + 0,3

Поверхню поліетилену перед склеюванням можна обробити протягом 10 с полум'ям пропанового пальника (до легкого помутніння поверхні). Міцність клейових з'єднань обробленого таким чином поліетилену зростає приблизно в 2 рази у порівнянні з міцністю зразків, поверхня яких була оброблена в концентрованій H_2SO_4 з добавкою 5 мас. ч. біхромату калію.

Поліетиленові, фторопластові і поліетилентерефталатні плівки обробляють коронним розрядом у високочастотному пристрої при частоті струму 20 кГц. Напруга струму при обробці, а також відстань між електродами впливають на адгезійну міцність, при цьому зі збільшенням напруги ефективність обробки підвищується тим сильніше, чим менше відстань між електродами. Так, на прикладі поліетиленової плівки з поліетилену низької густини марки 10802-020 і акрилатного клею медичного призначення визначено, що при величині зазору між електродами 0,5 мм ефективність обробки настільки висока, що при напрузі не більше 8 кВ клей не вдається відшарувати від поліетиленової плівки. При постійній напрузі між електродами 10 кВ і зазорі 2 мм поліетиленову плівку можна обробляти при швидкості її переміщення від 10 до 60 м/хв. У цьому випадку міцність при відшаруванні плівки зменшується з 900 до 250 МН/м. Ефективність обробки плівки залежить і від її товщини; обробку більш товстих плівок слід проводити при більш високій напрузі [28].

Склеювання поверхонь треба проводити безпосередньо після обробки їх коронним розрядом. Якщо цього зробити не вдається, то перед склеюванням слід провести повторну активацію при невисокій постійній напрузі 7–8 кВ.

При обробці поверхонь різних матеріалів коронним розрядом на них утворюються озонідні та пероксидні групи, які і сприяють підвищенню адгезії.

Однак ці групи швидко перетворюються в карбоксильні, що призводить до зниження поверхневої енергії та міцності склеювання. Методом рентгенівської фотоелектричної спектроскопії й іншими методами на поверхні обробленої коронним розрядом поліетиленової плівки виявлені групи COOH і $C = O$.

При обробці коронним розрядом (частота струму розряду 20 кГц, напруга 16 кВ) поліетилентерефталатної плівки на її поверхні утворюються активні центри.

Обробку поверхонь інертних матеріалів можна проводити в тліючому розряді при напрузі 1100 В, густини струму $0,6 \text{ мВ/см}^2$ і тиску $2-10^{-2}$ мм рт. ст. Така обробка дозволяє підвищити полярність поверхні пентапласту, знизити крайовий кут змочування водою. Оптимальна міцність склеювання досягається при тривалості обробки в тліючому розряді 30 хв. Нижче наведені дані про міцність при зсуві (в МПа) з'єднань алюмінієвого сплаву Д16АТ з пентапластом, виконаних клеями ПУ-2 і ВК-9:

	ПУ-2	ВК-9
Знежирювання поверхні толуолом	0	0
Зашкурювання шліфувальною шкуркою	4,2	1,8
Обробка окислювальною пастою	4,6	5,0
Обробка окислювальною пастою + АГМ-9	7,2	9,0
Обробка в тліючому розряді	13,4	14,0

Для поліпшення гідрофільності й адгезійних властивостей поверхні поліолефінових плівок їх піддають впливу електромагнітних хвиль високої частоти (13,56 МГц) в атмосфері кисню (плазмовій обробці). Адгезійні властивості залежать від тривалості обробки, часу між обробкою і склеюванням та ін. При обробці поверхні поліетилену, наприклад, в атмосфері кисню електромагнітними хвилями з частотою 13,56 МГц і потужністю 50 Вт протягом 10 хв міцність склеювання епоксидним клеєм збільшується з 2 до 14 МПа.

Порівнюючи міцність і характер руйнування клейових з'єднань фторопластової плівки, обробленої різними способами в різних умовах, слід зазначити, що кращі показники мають з'єднання, виготовлені з застосуванням плівки, поверхня якої оброблена оцтовокислим калієм або тліючим розрядом (табл. 4.9).

Адгезію поліетиленових, фторопластових і поліетилентерефталатних плівок можна також підвищити при електронному та УФ-опроміненні. При УФ-опроміненні поліетилену тривалість обробки становить 8–10 хв. Обробку фто-

ропласту прискореними електронами проводять протягом 30 с при тиску 0,05 мм рт. ст., при цьому міцність клейових з'єднань при склеюванні епоксиполіамідним клеєм становить 8 МПа (в разі необробленої поверхні – 0,61 МПа). Міцність клейових з'єднань підвищується внаслідок утворення водневих зв'язків між функціональними групами полімеру (основи клею) і полярними групами, що утворилися на склеюваній поверхні при її обробці.

Адгезію клеїв до поверхні інертних матеріалів можна підвищити і шляхом її металізації. Найбільш міцні з'єднання поліетилену і фторопласту утворюються при нанесенні на їх поверхню (термічним випаровуванням у вакуумі) Fe, Ni та Ti.

Одним зі шляхів підвищення адгезії клеїв до інертних матеріалів є прищеплена кополімеризація. Так, поверхню поліетиленової плівки можна модифікувати різними мономерами. Для такого щеплення можна використовувати найрізноманітніші сполуки, наприклад N-вінілпіролідон-2, 4-вінілпіридин, сірчаний ангідрид та рідкі полібутадієнові каучуки марок СКДЖ і СКД-1А. При цьому фізико-механічні властивості поверхневого шару практично залишаються незмінними, і значна частина функціональних груп бере участь в утворенні адгезійних зв'язків. Максимальній адгезійній міцності відповідає суворо визначений вміст функціональних груп. Реакційну суміш, що являє собою розчин мономеру і каучуку, наносять на поверхню поліетилену, потім проводять його обробку в атмосфері азоту при тиску 0,1 МПа на прискорювачі з енергією електронів 0,5 MeV при швидкості руху поліетилену 1 м/хв і дозі випромінювання 8 Мрад. Міцність клейових з'єднань після такої обробки підвищується в 2–3,5 рази.

Для збільшення адгезії клеїв до поліпропілену на його поверхню можна прищеплювати метилметакрилат і стирол. Таке щеплення проводиться з газової фази під впливом прискорених електронів з енергією 0,5 MeV і щільністю струму, що дорівнює 0,66 мА/см². Потужність дози опромінення становить 0,375 Мрад/хв.

При обробці плівок сірчаним ангідридом відбувається окиснення полімеру і побічна реакція – сульфонування з утворенням на поверхні груп SO₃H. Модифікація проходить на глибину від 11,4 до 18,2 мкм (за даними мікроструктурного аналізу). Утворення кислотних груп на поверхні надає поліетиленовій плівці гідрофільності, що сприяє поліпшенню її адгезійних властивостей. Міцність при зсуві з'єднання плівки з епоксифенольним пластиком збільшується в 3,5 рази (з 3,04 до 10,7 МПа).

Ефективна модифікація поверхні, наприклад фторопласту, активними молекулами або атомами. Так, сильний вплив на фторопласт надає атомарний фтор. Сутність такого способу обробки поверхні полягає в тому, що полімер пропускають між електродами при електролізі електролітів, дисоціюючих на іони активних по відношенню до нього елементів (лужних металів, фтору та ін.). Так, міцність клейового з'єднання плівки фторопласту завтовшки 100 мкм, яку пропускали між електродами в розплаві KF в процесі електролізу при температурі 120–140 °C протягом 2 хв, збільшується на 50–60 %.

У разі щеплення стиролу оптимальна міцність досягається при щепленні 2,5–4 % (мас.) цього мономеру.

Адгезію плівок, наприклад поліетиленових, можна підвищити, вводячи до їх складу сполуки, що мають одночасно як акрилові, так і епоксидні групи; при цьому стійкість поліетилену до термоокислювальної деструкції не погіршується. Прикладом такого з'єднання може служити олігомер НЕО-20А – продукт взаємодії акрилової кислоти і епоксидіанової смоли ЕД-20. Олігомер вводять в поліетилен низької густини в процесі вальцювання (15 хв) при 140 °C. Потім проводять пресування при 150 °C протягом 10 хв і тиску 5 МПа. Оптимальний вміст НЕО-20А – 3 %.

Адгезію пентапласту можна підвищити шляхом його модифікації гідропероксидом, зокрема гідропероксидом ізопропілбензолу. При введенні в полімер 1 % гідропероксиду шляхом обробки порошкоподібного матеріалу розчином гідропероксиду і подальшого пресування вдається значно поліпшити його адгезію, ймовірно, за рахунок поліпшення текучості розплаву і прискорення мікрореологічних процесів на межі полімер-метал. При цьому механічні та структурні характеристики матеріалу змінюються незначно.

5.3. Підготовка поверхні гум

При виборі способу підготовки поверхні гуми під склеювання необхідно враховувати, що багато з компонентів гуми здатні мігрувати на поверхню гуми, утворюючи слабкі межові шари, за якими в процесі експлуатації руйнується клейове з'єднання [27-28].

Спосіб підготовки поверхні гуми залежить від складу гуми і товщини її шару. Для сирої гуми, вулканізацію якої проводять одночасно зі склеюванням,

спеціальних методів підготовки поверхні не потрібно. Вулканізовану гуму в більшості випадків піддають механічній обробці (абразивна обробка, зачистка щіткою і наждачною шкіркою, обдув абразивним зерном, мокра піскоструменева обробка) і обробці концентрованою сірчаною кислотою (80–93%-ю). Залежно від типу гуми і концентрації сірчаної кислоти вибирають тривалість обробки. Так, гуми, на основі натурального каучуку обробляють 93%-ю кислотою протягом 2–10 хв, 80%-ю – від 5 до 10 хв. При обробці поверхні гуми із синтетичних каучуків використовують концентровану азотну кислоту, тривалість витримки становить 4–8 хв.

Кислоту можна використовувати в поєднанні з тонкоподрібненим порошком діоксиду кремнію (аеросилом). З них готують тиксотропну пасту, яку наносять на склеювані поверхні і залишають на 10–20 хв, а потім змивають водою. У всіх випадках після обробки кислотами поверхні ретельно промивають дистильованою водою і висушують при кімнатній температурі. Для нейтралізації кислоти гуму перед промиванням водою можна занурити на 5 хв в аміачну воду 5–10%-ї концентрації. Потім гуму вигинають, в результаті чого на її поверхні з'являються дрібні тріщини, які сприяють підвищенню адгезії.

Обробка кислотами абсолютно непридатна для тонкостінних гумових технічних виробів. Міцність обробленої таким способом гуми знижується на 20–30 %, поверхня її стає жорсткою, погіршується товарний вигляд.

Більш прогресивним є бромовання поверхні гуми так званім іонним способом, який дуже простий, не вимагає складного апаратурного оформлення і практично не впливає на вихідну міцність гуми.

Іонний спосіб підготовки поверхні гуми полягає в наступному: гуму занурюють в розчин бромистих солей (КВг і КВгОз) з мінеральним окислювачем. Час витримки в розчині становить від 60 до 120 с, визначається типом і складом гуми і підбирається експериментальним шляхом. Іони бромю, що знаходяться в розчині, взаємодіють з молекулами каучуку з утворенням поверхні, активної по відношенню до клеїв. Потім гуму видаляють з розчину, промивають і висушують.

Бромовання іонним способом забезпечує високий ступінь модифікації поверхні гуми, оскільки поряд з реакціями приєднання за подвійних зв'язків йдуть реакції заміщення водню в метильних групах і навіть у фенільному кільці.

Особливим прийомом зміни клеючих властивостей гуми є введення до її складу добавок, здатних мігрувати на поверхню гуми і підвищувати міцність клейових з'єднань. Прикладом такого з'єднання є бензотрихлорид.

5.4. Підготовки під склеювання гумових поверхонь з натурального каучуку

Гумові зразки (пластини або зразки у вигляді «грибка») обробляють абразивною шкуркою № 12–16.

Поверхню гумових зразків протирають тампоном, який змочують у толуолі або етиловому спирті і залишають у витяжній шафі впродовж 15–20 хв для видалення розчинника [35-36].

Занурюють гуму на 5–10 хв у концентровану сірчану кислоту до утворення на її поверхні тендітного шару, ретельно прополіскують в дистильованій воді і просушують при кімнатній температурі. Потім згинають зразки, щоб на поверхні утворилися дрібні тріщини, які сприяють виникненню гарного з'єднання, тому що при склеюванні гуми важливо механічне зчеплення.

Можлива обробка поверхні гуми без занурення. У цьому випадку готують тиксотропну пасту змішуванням концентрованої сірчаної кислоти з дрібнодисперсним аморфним двоокисом кремнію (кебосил). Пасту наносять на поверхню гуми і витримують впродовж 10–20 хв. Потім ретельно прополіскують, просушують і згинають, щоб утворилися поверхневі тріщини. Залишок кислоти після обробки можна нейтралізувати або зануренням на 5 хв, або змочуванням поверхні 5–10%-м розчином гідрату окису амонію з подальшим повторним промиванням дистильованою водою і сушінням при кімнатній температурі.

5.5. Підготовки під склеювання гумової поверхні з синтетичного каучуку

Гумові зразки (пластини або зразки у вигляді «грибка») протирають тампоном, який змочують у метиловому спирті і обробляють наждаковим папером № 200. Потім поверхню гумових зразків знову протирають тампоном, який змочують у метиловому спирті, і залишають у витяжній шафі впродовж 15–20 хв для видалення розчинника [28,36].

Занурюють гуму на 4–8 хв у концентровану азотну кислоту до утворення на її поверхні тендітного шару, ретельно прополіскують в дистильованій воді і просушують при кімнатній температурі. Потім занурюють гуму на 5–10 хв у 20%-й водний розчин гідроокису амонію при кімнатній температурі,

ретельно прополіскують в дистильованій воді і просушують при кімнатній температурі. Потім згинають зразки, щоб на поверхні утворилися дрібні тріщини, що сприяють виникненню гарного з'єднання, тому що при склеюванні гуми важливо механічне зчеплення.

Можлива обробка поверхні гуми без занурення. У цьому випадку готують тиксотропну пасту змішуванням концентрованої сірчаної кислоти з дрібнодисперсним аморфним двоокисом кремнію (кебосил). Пасту наносять на поверхню гуми і витримують впродовж 10–20 хв. Потім ретельно прополіскують, просушують і згинають, щоб утворилися поверхневі тріщини. Залишок кислоти після обробки можна нейтралізувати або зануренням на 5 хв, або змочуванням поверхні 5–10%-м розчином гідрату окису амонію з наступним повторним промиванням дистильованою водою і сушінням при кімнатній температурі.

5.6. Підготовка поверхні скла і кераміки

Скло та керамічні матеріали, як правило, не мають слабких межових шарів і не вимагають модифікації субстратів. Тому їх обробка здебільшого полягає в очищенні поверхні від яких-небудь забруднень, тобто в обробці розчинниками або, що надійніше, кислотно-хромовими сумішами [27-28].

Поверхню кераміки і скла зазвичай піддають абразивній обробці (зашкурюванню, обдуву водною суспензією карборундових зерен) або травленню. Для травлення поверхні кераміки, наприклад, використовується розчин, що містить 7 мас. ч. біхромату натрію, 7 мас. ч. води і 400 мас. ч. 93%-ї H_2SO_4 . Кераміку занурюють в розчин кімнатної температури на 15 хв.

Можна протравити керамічну і скляну поверхні в концентрованій азотній кислоті протягом 20–30 хв. При такій обробці поверхні міцність клейових з'єднань збільшується на 20–25 %. Мабуть, відбувається окиснення поверхні ситаллу і посилення донорно-акцепторної взаємодії між функціональними групами клею і субстрату.

Змочуваність і адгезію ситаллу підвищують також шляхом легування його оксидами лужних металів. При цьому адгезійні властивості поліпшуються в ряду $BeO-MgO-CaO-BaO$.

При попередній обробці поверхні склотканин, використовуваних для виготовлення шаруватих композиційних пластиків, рекомендується нанесення хлор-

них адгезійних ґрунтів, що помітно збільшує міцність готових з'єднань. Силікатні матеріали (слюда, кварц, дорогоцінні камені) обробляються аналогічно обробці скла.

Контрольні запитання

1. Як потрібно підготувати поверхню поліолефінів під склеювання?
2. Як потрібно підготувати поверхню поліаміду під склеювання?
3. Наведіть приклади підготовки поверхонь під склеювання поліефірів та кополімерів стиролу
4. Як потрібно підготувати поверхню плівкових матеріалів під склеювання?
5. Наведіть приклади підготовки під склеювання поверхонь гуми, скла і кераміки.

РОЗРАХУНОК КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАНЬ

6.1. Практичні результати теорії адгезії

Теоретичні положення, наведені вище, перевіряють на практиці шляхом випробувань досить великих серій дослідних з'єднань в різних умовах. Це треба зробити до випробувань у виробничих умовах. При отриманні в процесі випробувань незадовільних результатів необхідно з'ясувати причини утворення неякісного клейового з'єднання. До таких причин належать низька міцність з'єднання, порушення або неправильний вибір способу отримання клею, технології склеювання, конструкції з'єднання і т. ін. [24,39].

При аналізі якості з'єднання основне питання, на яке необхідно відповісти: де відбулося руйнування – з приграничного шару, за клеєм або за субстратом? Причиною поганої якості можна вважати приграничний шар в тих випадках, коли міцність з'єднання є недостатньою і вона розрахована за відношенням

$$\frac{f_m}{f_M} = \frac{\beta_0(\xi - \beta_s)}{\alpha\beta(\xi - \beta_0 s_0)}, \quad (6.1)$$

яке виходить з рівнянь (1.44) і (6.2):

$$f_M = (\xi_0/\beta_0) - s_0. \quad (6.2)$$

Останнє рівняння виражає міцність клею (тому в ньому відсутній фактор α).

З аналізу рівняння (6.1) слід: велике значення α свідчить про різницю в пружності клею і субстрату або про наявність слабого примежового шару; про те, що значення внутрішніх напружень в з'єднанні близько до значення співвідношення ξ/β [з (1.44)], тобто відносно велике; якщо у одного з матеріалів з'єднання низька молекулярна когезія або якщо в з'єднанні високий коефіцієнт концентрації напруги, то відношення ξ/β низьке.

Якщо утворюються сполучення поганої якості при склеюванні одним і тим же клеєм різних субстратів (металів, скла, фенопластів, еластичних матеріалів), то причина поганої якості – клей. При цьому до уваги беруться велика різниця механічних властивостей затверділого клею і субстрату, а також погана змочуваність клеєм субстрату, або неправильно підібраний склад клею.

Якщо якийсь субстрат утворює сполучення поганої якості з клеями, які з іншими субстратами утворюють міцні з'єднання, то справа, мабуть, в поверхні субстрату.

Якщо з'єднують два різних субстрату, то визначають, за яким з них сталося руйнування, враховуючи, чи утворює даний субстрат і даний клей з іншими клеями і субстратами добрі з'єднання.

Якщо в з'єднанні немає слабкого шару, то руйнування відбудеться когезійно за субстратом або за клеєм. Руйнування за субстратом означає, що проблема міцності системи визначається вибором склеюваного матеріалу (не завжди: внутрішні напруження в клейовому шві можуть призвести до руйнування за субстратом). Руйнування за клеєм означає, що слід вибрати клей з більш високими показниками міцності. При цьому слід керуватися рівнянням (6.1), причому вирішальним є значення відношення f_m/f_M : чим воно вище, тим кращим є клей.

Якість з'єднання залежить також від коефіцієнта α (макроскопічний фактор концентрації напруги), який не повинен набагато перевищувати одиницю. Це означає, що реологічні властивості субстрату і клею повинні бути приблизно однаковими. Якщо ми не можемо підібрати субстрат і клей з необхідними реологічними властивостями, то вплинути на фактор α можна за допомогою відповідного проміжного шару – адгезійного ґрунту. Модуль пружності адгезійного ґрунту повинен бути середнім між модулями клею і субстрату. Іншою можливістю є зміна геометричної форми сполуки (коефіцієнта форми з'єднання).

З відношення (6.1) випливає, що якість клею (f_m/f_M) тим вища, чим менша внутрішня напруга, викликана усадкою клею (s). В даному випадку також можуть бути корисні адгезійні ґрунти. При відповідній конструкції з'єднання усадку можна використовувати так, що вона буде сприяти збереженню міцності з'єднання. Вплив усадки можна зменшити за рахунок зміни товщини клейового шва: чим плівка клею тонша, тим меншій вплив усадки, як це видно з рівняння (1.45). Макроскопічний фактор концентрації напруги α також можна знизити, змінюючи товщину клейового шва, але ефективніше повне усунення повітряних включень, що забезпечується деаерацією клею, його правильним нанесенням і щільною підгонкою поверхонь.

При формуванні з'єднання має бути досягнута максимальна когезійна міцність, що залежить від процесу отвердіння. При цьому важливо, щоб когезійна міцність клею була однаковою по всій товщині з'єднання.

Все попереднє треба враховувати при виборі систем клей-субстрат з тим, щоб запобігти отриманню неякісних з'єднань. Велике значення має правильний вибір клею. Так, в тих випадках, коли склеюють досить забруднені поверхні (наприклад, в побуті), не слід використовувати клеї, які чутливі до забруднень. Клеї з розчинниками не рекомендується застосовувати для склеювання погано

змочуваних поверхонь. Крім того, деякі поверхні швидко адсорбують пари розчинника, що може призвести до утворення слабкого приграничного шару. У разі непористих субстратів клеї з розчинниками застосовують тільки тоді, коли технологія передбачає видалення надлишку розчинника, іноді з використанням методу реактивації висохлого шару клею, наприклад, теплом і т. п.

Якщо поверхні, які склеюються погано знежирені, то слід користуватися таким клеєм, компоненти якого добре сумісні з жирами, або клеєм, що містить розчинники, які розчиняють залишки жирів.

Багато, щоб вибрані клеї і субстрат вели себе однаково в різних умовах (тепло, холод, вологість), мали однакову хімічну і антикорозійну стійкість.

Для споживача важлива кінцева міцність з'єднання, однак цей термін незадовільний, оскільки в певних умовах з'єднання може швидко втратити міцність, тому умови експлуатації з'єднання необхідно враховувати при його проектуванні.

Як вже говорилося вище, велике значення має технологія склеювання. Сьогодні на практиці застосовують контактне склеювання, склеювання з використанням дифузійних (включаючи аутогезійні) і адгезійних процесів.

При *контактному* склеюванні використовуються клеї, чутливі до тиску, що володіють підвищеною липкістю, клейкістю. Якщо зазор між двома площинами заповнити таким клеєм, який змочує обидві поверхні, негайно після заповнення зазору для поділу поверхонь слід докласти певне зусилля. Для утворення з'єднання потрібна невелика сила, необхідна практично тільки для контакту поверхонь, що склеюються.

Ще в 1874 р. Я. Штефан вивів рівняння для визначення сили, необхідної для поділу двох круглих пластин радіусом a , склеєних клеєм з в'язкістю η (h_1 – вихідна відстань між пластинами, h_2 – кінцева, t – час, необхідний для поділу) [24]:

$$F = \frac{1}{t} - \frac{3}{4} \pi \eta a^4 \left(\frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_2^2} \right) \quad (6.3)$$

Сила, яка припадає на одиницю площі за умови, що $h_2 \ll h_1$, може бути представлена рівнянням

$$F = \frac{1}{t} - \frac{3}{4} \eta \frac{a^2}{h_1^2} \quad (6.4)$$

Від в'язкості клею залежить змочуваність субстрату. Якщо клей наносять на добре змочуваний матеріал, міцність прилипання велика; якщо ж матеріал

змочується погано або не змочується взагалі, з'єднання не утворюється. Підтвердженням цього є той факт, що часто після відклеювання клейкої стрічки з клеєм, чутливим до тиску, від металевої або іншої пластини практично весь клей залишиться на стрічці. У разі субстрату, когезія поверхневого шару якого менша когезії контактної клею, відбудеться відрив поверхневого шару субстрату.

Дифузійне склеювання засноване на дифузії клею (розчинника) до матеріалу, що склеюється. При цьому підбирають такий розчинник, в якому склеюваний матеріал набухає, цей процес часто називають *хімічним зварюванням*. Так зварюють ПВХ труби, причому як розчинник застосовується тетрагідрофуран або клеї, в яких він є головним компонентом. Необхідно враховувати, що після контакту з таким клеєм обсяг склеюваного матеріалу збільшується. У набряклому стані взаємно дифундують і матеріали, що склеюються. Через гістерезис набухання обсяг залишається збільшеним після випаровування розчинника.

Цей спосіб дуже схожий на процес аутогезійного з'єднання субстратів однакової природи. При цьому способі міцність шва наближається до міцності шва при аутогезії, тобто максимальна міцність може досягти значення, що дорівнює когезії склеюваного матеріалу. Взаємне проникнення поверхонь субстратів можна підсилити за допомогою зовнішнього тиску. Найбільш придатними для дифузійного склеювання субстратами є деякі пластики і гуми.

При *адгезійному* склеюванні з'єднання утворюється за рахунок адгезійних зв'язків. Це найбільш поширений спосіб склеювання, про який ми вже говорили вище.

На практиці крім контактних, дифузійних і адгезійних з'єднань часто зустрічаються сполучення, які можна назвати когезійними. Вони утворюються в результаті проникнення клею в нерівності на поверхні субстрату; після отвердіння клею виникає механічне з'єднання.

6.2. Напружений стан клейових з'єднань

З практики відомо, що у великій кількості конструкцій використовують з'єднання внахлестку, механічні показники яких можна підвищити, застосовуючи різні накладки і армуючі елементи. Іноді застосовують також з'єднання встик, циліндричні з'єднання внахлестку та ін. Відомо також, що міцність з'єднання залежить не тільки від міцності адгезійного зв'язку, але і від механічних

властивостей матеріалів, що склеюються. Від вибору матеріалу і конструкції шва залежить також розподіл внутрішніх напружень, які в значній мірі впливають на міцність. Розглянемо з цієї точки зору основні типи з'єднань.

Якщо ми маємо два циліндри, склеєних встик, до яких будемо докладати розтягувальне навантаження, то в клейовому шві виникнуть напруги. Ці напруги будуть залежати від механічних властивостей субстрату і клею, зокрема від модулів пружності і зсуву та від коефіцієнта Пуассона.

Відносна лінійна усадка клею в з'єднанні визначається за рівнянням [24,39]:

$$\lambda = \frac{rf}{R} \left(\frac{\nu_2}{E_2} - \frac{\nu_1}{E_1} \right), \quad (6.5)$$

де r – вихідний радіус клейового шва, мм; f – навантаження, що викликає напруження при розтягуванні, МПа; R – радіус дійсного контакту субстрату і клею, мм; ν_1 , E_1 – коефіцієнт Пуассона і модуль пружності субстрату (МПа) відповідно; ν_2 , E_2 – теж для клею.

За допомогою методу фотоупругості було встановлено, що градієнт концентрації напружень в з'єднанні виникає поблизу межі поділу фаз і дорівнює приблизно 3 (концентрація дотичних напружень в цьому з'єднанні залежить в числі інших причин від співвідношення модулів пружності клею і субстрату). В клеї відносно високий градієнт напружень знаходиться на краю і знижується до центра з'єднання. Багато чого залежить від співвідношення товщини клейового шва і загальної поверхні з'єднання (рис. 6.1).

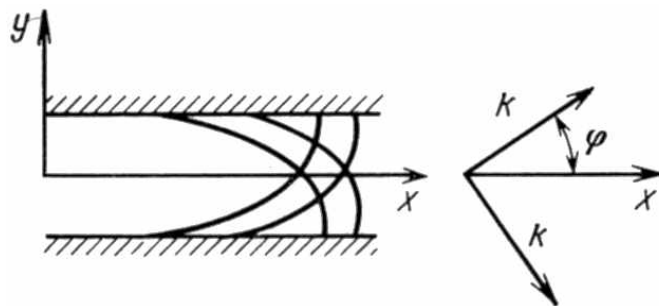


Рисунок 6.1. Зрізаючі напруги в з'єднаннях встик при випробуваннях на рівномірний відрив

Якщо площа з'єднання набагато більша товщини клейового шва, то навантаження з'єднання встик силою, що розтягується, може спричинити виникнення зрізаючих напружень у напрямку до центра з'єднання. З цього випливає, що чим тонше шар клею, тим менші напруги в ньому.

Напругу при зсуві вздовж осі x в даному випадку можна розрахувати за рівнянням:

$$\tau_{xy} = k \cos 2\phi. \quad (6.6)$$

Рівняння для випадку з'єднання двох циліндрів має такий вигляд:

$$f = 2ka/3h_0, \quad (6.7)$$

де a – діаметр циліндрів.

З'єднання внахлестку вельми різноманітні з точки зору як конструкції, так і матеріалів, що склеюються. Ясно, що розподіл напружень в з'єднанні залежить від його конструкції. Для прикладу розглянемо з'єднання пружних матеріалів з одинарною нахлесткою.

При навантаженні з'єднань матеріалів, міцність яких досить висока, може відбуватися їх деформація (рис. 6.2). Напруги в з'єднанні внахлестку розподілені нерівномірно, причому максимальні вони на краях нахлестки, мінімальні – в центрі. Напруги, викликані зовнішньою силою, яка розтягує і що діє уздовж поздовжньої осі з'єднання, будуть діяти в різних напрямках, так що врешті-решт руйнування почнеться внаслідок віддиру, який в точках M і N досягає найбільшого значення. На напруги в з'єднанні будуть впливати не тільки його площа і товщина клейового шару, але і товщина субстрату і його механічні властивості, від яких залежить деформація зразка. Саме зміна форми зразка призводить до зміни величини і характеру напружень, в з'єднанні виникає несприятлива комбінація діючих сил, через що прискорюється руйнування. Деформації можна перешкодити, не тільки збільшуючи товщину і міцність субстрату, але і зміцнюючи з'єднання за допомогою накладок, ребер і т.п. [24,39].

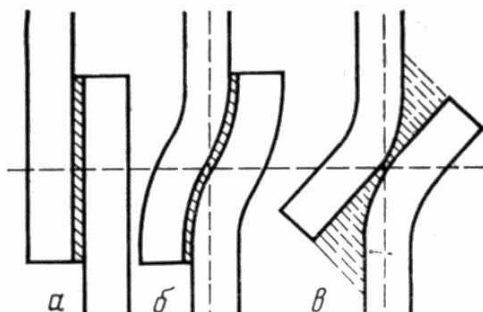


Рисунок 6.2. Деформація одинарного з'єднання внахлестку:

a – без напруги; b – початок деформації субстрату і клейового з'єднання;
 $в$ – залишкова деформація субстрату і клейового шва

Якщо сила, що діє при розтягуванні F_0 , ширина з'єднання ω і довжина перепуску L , то в з'єднанні буде діяти момент M_0 (головним чином на кінцях нахлестки) і напруга V перпендикулярно площині клею. Позначимо σ_f як напругу при розтягуванні в напрямку дії сили F_0 на поверхні субстрату, σ_0 як напругу в клеї перпендикулярно площині з'єднання (напруга при віддірі) і τ_0 як напругу при зсуві в клеї. Слід встановити, який зв'язок між найбільшими значеннями цих напруг і F_0 , який в звичайних умовах випробувань зростає аж до руйнування. Їх зв'язок буде залежати від значення безрозмірної величини:

$$k = 2M_0/F_0\delta, \quad (6.8)$$

де δ – товщина субстрату, мм.

Існує залежність між k і безрозмірною величиною $(L/\delta)(F_0\omega\delta E)^{0,5}$, яка для простоти позначимо ВР (E – модуль пружності субстрату при розтягуванні):

k	1,0	0,61	0,45	0,37
ВР	0	0,2	0,4	0,6

Залежності σ_f , σ_0 і τ_0 від k і, отже, від F_0 – різні, залежно від того, де визначається пружність з'єднання в основному субстраті чи в клеї.

У першому випадку

$$h_0/\delta \ll E_1/E, \quad h_0/\delta \ll G_1/G,$$

де h_0 – товщина клею; E_1, E – модулі пружності при розтягуванні клею і субстрату; G_1, G – модулі пружності при зсуві клею і субстрату.

Розподіл напружень в з'єднанні внахлестку, для якого виконуються наведені вище умови, представлені на рис. 6.3. З рисунка видно, що якщо k знижується, то F_0 зростає. Значення σ_f/f_0 , σ_0/f_0 і τ_0/f_0 , позначені на цьому рисунку β , відкладені на осі ординат. Максимальне значення $\beta = \sigma_f/f_0$, яке відповідає наведеним вище умовам, досягає 4, тобто концентрація напружень може бути в чотири рази вищою, ніж середні напруги. Іншими словами, якщо k зменшується (тобто F_0 зростає), то знижується і концентрація напружень. Однак абсолютні значення напруг при цьому ростуть.

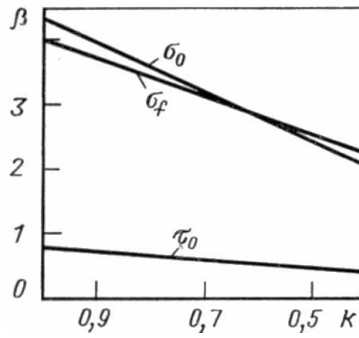


Рисунок 6.3. Концентрація напружень в з'єднанні внахлестку, пружність якого визначається пружністю субстрату

Якщо E , δ і F_0 постійні, то k зростає з довжиною перепуску L . При одинарній нахлестці максимальні значення σ_0 і σ_f на обох кінцях нахлестки однакові.

У другому випадку, коли пружність з'єднання визначається властивостями клею або розмірами з'єднання,

$$h_0/\delta \gg E_1/E, \quad h_0/\delta \gg G_1/G.$$

Розподіл напружень в цьому випадку наведено на рис. 6.4.

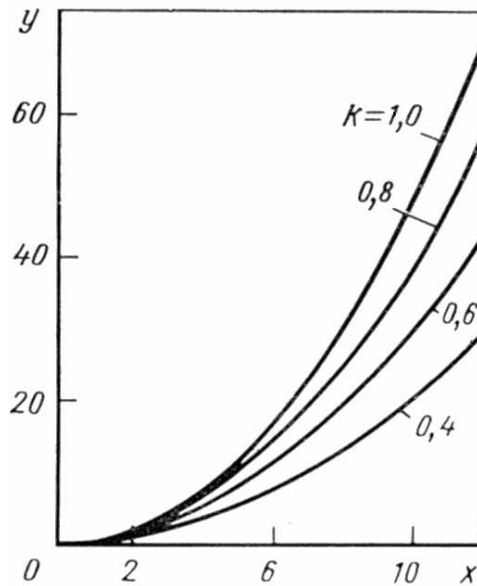


Рисунок 6.4. Концентрація напружень в з'єднанні внахлестку, пружність якого визначається властивостями клею

Максимальна напруга зсуву в клеї при невеликому зовнішньому навантаженні буде:

$$\tau_{\text{макс}} = \frac{f_0 \delta}{L} \left[\left(2G_1 L^2 / E h_0 \delta \right)^{0.5} \coth \left(2G_1 L^2 / E h_0 \delta \right)^{0.5} \right]. \quad (6.9)$$

У з'єднаннях типу одинарної нахлестки відношення $(2G_1L^2/Eh_0\delta)^{0,5}$ (позначимо його A) приблизно дорівнює одиниці, а $\coth 1 = 1,31$.

Отже, можна сказати, що максимальна напруга в клеї при зсуві

$$\tau_{\text{макс}} = 1,31(f_0\delta/L). \quad (6.10)$$

Позначимо максимальну напругу при зсуві в клеї таким чином:

$$\tau_{\text{макс}} = (2G_1\delta/Eh_0)^{0,5} f_0. \quad (6.11)$$

Максимальний фактор концентрації напружень в цьому випадку буде дорівнювати 1,31.

На рис. 6.5 показано вплив довжини нахлестки L на напругу при зсуві. Вплив L на σ_0/f_0 на цьому графіку виявити важко, оскільки хоча k залежить від L , але виявляється, що чим більше L , тим менше σ_0/f_0 . Отже, можна вважати, що максимальна концентрація напружень при зсуві стає пропорційною L . Слід нагадати, що цей висновок є дійсним, якщо зовнішня сила відносно мала.

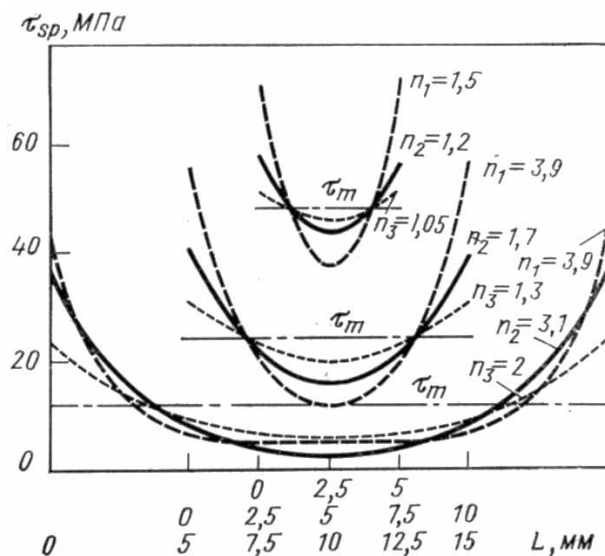


Рисунок 6.5. Залежність напружень при зсуві в з'єднаннях внахлестку від довжини нахлестки:

n_1 – значення, розраховані по Голанду – Рейснеру; n_2 – значення, розраховані по Фолькерсену; n_3 – експериментальні значення

Для порівняння з цією теорією (6.8)–(6.12) Фолькерсен зробив розрахунок з'єднання внахлестку, сконструйованого так, щоб при деформації не змінювалася його форма. Для подвійного з'єднання внахлестку, зображеного на рис. 6.6, він розрахував максимальну напругу при зсуві за рівнянням

$$\tau_{\text{макс}} = (G_1 \delta / 2 E h_0)^{0,5} f_0. \quad (6.12)$$

Величина $\tau_{\text{макс}}$ відповідно до рівняння (6.11) в два рази більша τ . Далі він розрахував середню напругу при зсуві в клеї (ω – ширина клейового шва)

$$\tau_{\text{ср}} = F_0 / \omega L = f_0 \delta / L \quad (6.13)$$

і відношення $\tau_{\text{макс}}$ до $\tau_{\text{ср}}$ (фактор максимальної концентрації напруг):

$$\tau_{\text{макс}} / \tau_{\text{ср}} = (G_1 / 2 E \delta h_0)^{0,5} L. \quad (6.14)$$

При навантаженні з'єднання (рис. 6.6) руйнування відбувається при досягненні кінцевого значення $\tau_{\text{макс}}$ (6.12). З цього рівняння випливає, що зовнішня сила (навантаження при розтягуванні), необхідна для руйнування з'єднання, не залежить від довжини нахлестки L . Однак на практиці сила зростає пропорційно L , а іноді пропорційно $L^{0,5}$. Ці протиріччя свідчать про недоліки наведених теорій, які могли б бути досить точними, якби субстрат і клей підпорядковувалися закону Гука, якщо можна було б не звертати уваги на нормальні напруги (перпендикулярні напрямку зовнішньої сили) і якби в процесі деформації не змінювалася форма з'єднання

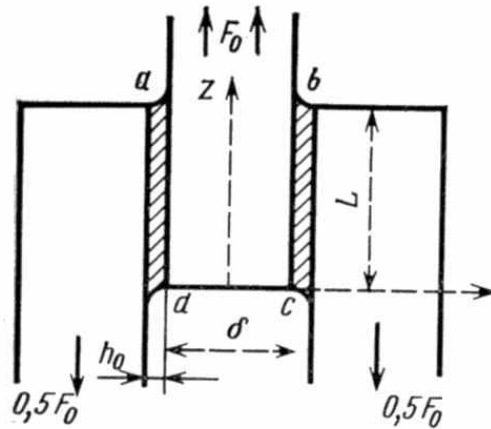


Рисунок 6.6. Подвійне з'єднання внахлестку

Хеннінг порівняв обидві теорії з експериментальними даними і отримав відхилення, які наведені на рис. 6.5.

Фактор концентрації напружень за рис. 6.5 можна виразити відношенням:

$$n = \tau_{\text{макс}} / \tau_{\text{ср}}, \quad (6.15)$$

де $\tau_{\text{ср}} = F_0 / \omega L$ (F_0 – зовнішня сила, ω – ширина субстрату, L – довжина перепуску).

Розраховані і експериментальні значення n залежно від довжини нахлестки наведені нижче:

$L, \text{мм}$	n_1	n_2	n_3
5	1,5	1,2	1,05
10	3,9	1,7	1,30
20	3,9	3,1	2,00

Тут n_1 – фактор концентрації напружень, розрахований за Голландом та Рейснером; n_2 – фактор концентрації напружень, розрахований за Фолькерсеном; n_3 – фактор концентрації напружень, експериментально визначений на конкретному з'єднанні алюмінієвого сплаву на клеї Рідакс 775; розміри з'єднання: ширина 25 мм, товщина субстрату 1,5 мм, товщина клейового шва 0,2 мм. Теоретичне обґрунтування і необхідні висновки є в спеціальній літературі.

Криві залежності міцності з'єднань листових матеріалів внахлестку (зрушення при розтягуванні) від довжини нахлестки наведені на рис. 6.7. Аналогічні залежності спостерігаються і для інших подібних їм з'єднань (вусові, трубні і т. ін.).

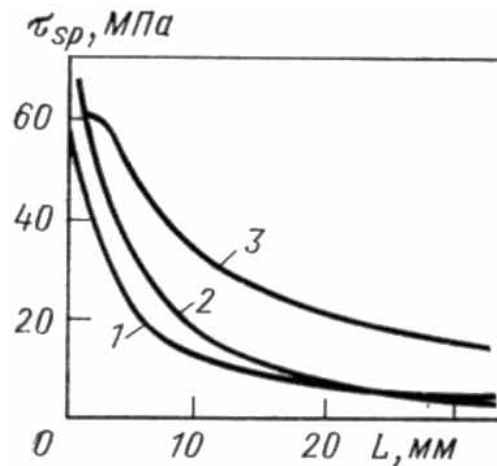


Рисунок 6.7. Залежність міцності одинарного з'єднання внахлестку від довжини нахлестки:

- 1 – розрахунок за теорією Фолькерсена; 2 – розрахунок за відношенням (6.10);
3 – експериментальні дані

6.3. Недоліки клейових з'єднань

Клейове з'єднання – складна система, якість якої залежить від багатьох факторів. Переваги цього способу з'єднання безперечні, однак клейовим з'єд-

нанням притаманні і ряд недоліків. По-перше, це в ряді випадків недостатня міцність, яка обумовлена виникненням слабкого примежового шару. Причини утворення такого шару: неправильна технологія склеювання (відсутність знежирення, неправильний вибір способу нанесення, низька температура в разі клеїв-розплавів і т. ін.); неправильний підбір матеріалів; погана змочуваність субстрату; концентрація напружень в з'єднанні, яка викликана наявністю порожнин в клейовому шарі, що утворилися при нанесенні, зокрема через нерівності поверхні субстрату; нерівномірність клейового шару за товщиною, яка може бути викликана недостатнім тиском при отвердінні, поганим нанесенням, високою в'язкістю клею, нерівномірною дисперсністю наповнювача і т. ін.; невідповідною товщиною клейового шару, яка обумовлена високою або дуже низькою в'язкістю клею, неправильною фіксацією з'єднання; його неправильною конструкцією; прихованими дефектами в матеріалах, що склеюються (порожнини, тріщини, внутрішня напруга і т. ін.) [24,39].

Втрата міцності з'єднання може статися під впливом зовнішніх умов: проникнення в клейовий шов агресивних речовин, дія чинників, що викликають старіння, гідроліз або вилугування клейового шару, розчинення клею, корозія субстрату, крихкість при низьких температурах і т. п.

Низька довговічність клейового з'єднання, тобто зниження міцності в часі при експлуатації може бути пов'язана з технологією склеювання (наприклад, непрореаговані залишки твердників викликають корозію субстрату, а міграція клею до поверхні – виникнення слабкого примежового шару вже в готовому з'єднанні; пластифікатори з субстрату мігрують в клей, що отверділий, і знижують не тільки його адгезію, а й когезійну міцність). У ряді випадків динамічні навантаження викликають передчасну втому з'єднання і його руйнування.

Іноді мають значення і недоліки зовнішнього вигляду. Так, потьоки клею, що отверділий, викликають необхідність додаткової шліфовки. Різниця в кольорі клею і склеюваного матеріалу, непрозорість шва теж можуть бути віднесені до недоліків клейових з'єднань.

До інших недоліків клейових з'єднань процесу склеювання можна віднести: чутливість до швидких змін температури, головним чином при склеюванні субстратів з високою різницею в коефіцієнтах теплового розширення; відносно тривалий час досягнення залишкової міцності; нероз'ємного з'єднання; труднощі ремонту пошкодженого з'єднання; високі вимоги до якості виконуваних робіт і техніки безпеки.

6.4. Способи розрахунку клейових з'єднань

Першим кроком у створенні клейового з'єднання є вибір його конструкції і економічний аналіз. Завдання конструктора – створити з'єднання, яке повинно гарантувати необхідну міцність, надійність і яке можна отримати найбільш простим способом. Конструктор має урахувати всі вимоги, що ставляться до конструкції в умовах її тривалої експлуатації, а також фізико-механічні властивості матеріалів, що склеюються, і клею, характер і величину адгезійних сил на межі субстрату і клею, геометрію з'єднання, концентрацію напружень в ньому, можливість комбінування склеювання з іншими способами з'єднання і т. ін. Конструктор, нарешті, оцінює клейове з'єднання і з точки зору технологічності і навіть його естетичності. При цьому повинен враховуватися економічний аналіз, особливо при використанні склеювання для виробів, в яких раніше застосовували інший спосіб з'єднання. Основні типи клейових з'єднань наведені на рис. 6.8 [24].

Вибір способу склеювання в ряді випадків (при склеюванні невідповідальних деталей) дуже простий; при склеюванні ж, наприклад, крил літака, ротора вертольота або стільникових конструкцій необхідний розрахунок діючих напружень, геометрії з'єднання, параметрів конструкційних матеріалів, що склеюються в умовах експлуатації. У загальному випадку необхідно, щоб конструкція з'єднання забезпечувала найбільшу міцність в області максимальних напружень; площа клейового з'єднання має бути якомога більшою; клейовий шов має бути максимально рівномірним, суцільним і тонким; концентрація напружень має бути мінімальною.

При склеюванні твердих матеріалів необхідно враховувати насамперед час, спосіб застосування, напрямок дії і величину навантаження. Оскільки велика частина конструкційних клеїв характеризується високою міцністю при зсуві, але незначною міцністю при віддірі і нерівномірному відриві, то слід при конструюванні з'єднання запобігати або зводити до мінімуму появу таких деформацій.

Товщина клейового шва дуже важлива, бо впливає на міцність при зсуві: чим тонше шов, тим більше міцність при зсуві. Товстий шов сприяє виникненню напруг відшаровування на краях з'єднання. Тонкий шов обов'язково має бути суцільним. Це залежить від реологічних властивостей клею, поверхневої енергії на межі субстрат – клей, тобто від змочування субстрату клеєм. При

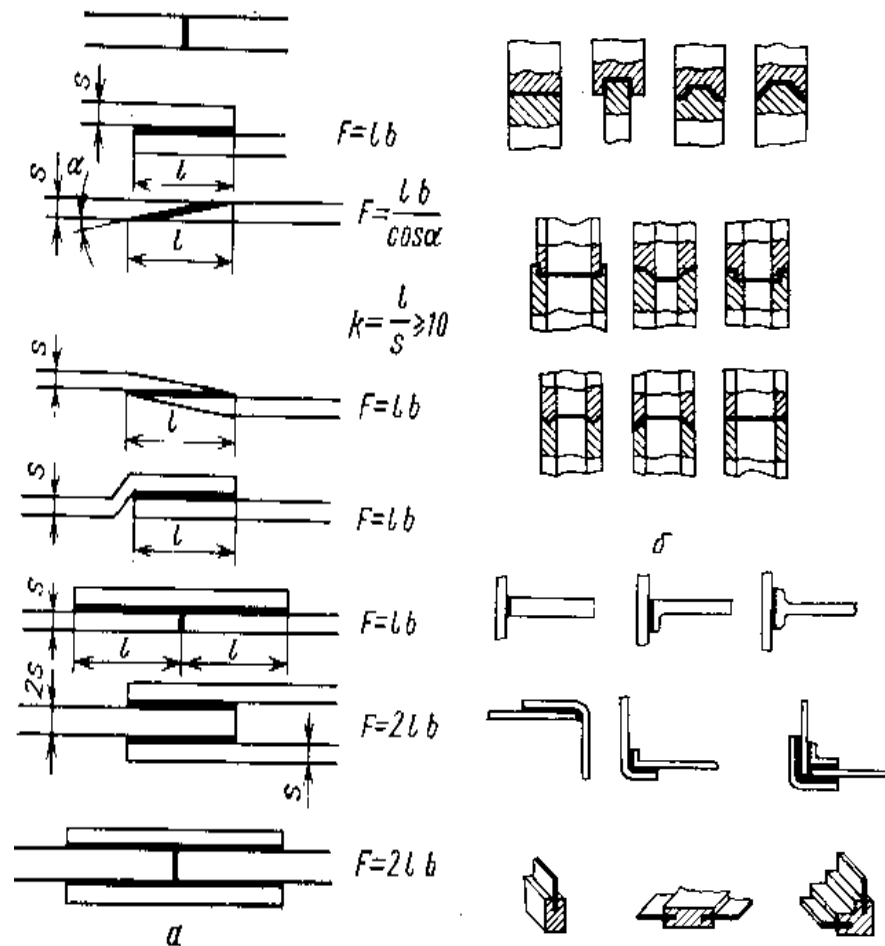


Рисунок 6.8. З'єднання листових матеріалів (а) (b – ширина клейового з'єднання, s – товщина субстрату, l – довжина перепуску, F – площа з'єднання), стрижнів і труб (б) і кутові і пазові з'єднання (в)

цьому важливо підібрати тиск, який забезпечує при склеюванні необхідну товщину клейового шару. Для підвищення міцності з'єднання низьков'язкі клеї або в клеї з великою поверхневою енергією вводять наповнювачі. Наповнювач має потрібні дисперсність і твердість, добре змочуватися клеєм. Товстий клейовий шов підвищує ударну в'язкість з'єднання, а також схильність до повзучості. Товщина шва залежить також від гладкості поверхні субстрату, тому вимоги до обробки субстрату залежать ще і від виду клею.

Досить поширеним клейовим з'єднанням є одинарне з'єднання внахлестку. З рис. 6.9 видно, що на торцях з'єднання виникає концентрація напружень. На торці нахлестки припадає найбільша частина навантаження, що сприяє тому, що навантаження, при якому руйнується шов, значно нижче за очікуване, виходячи з середньої міцності клейового шва.

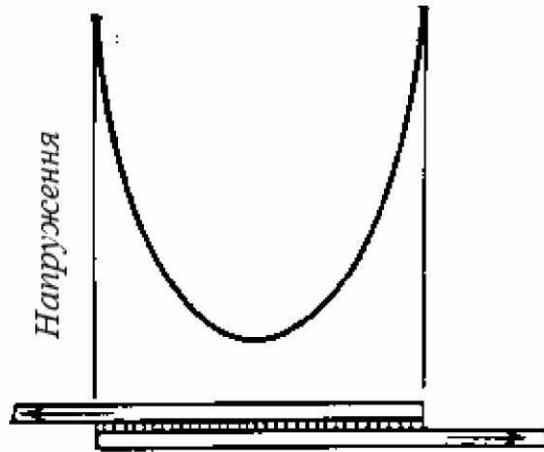


Рисунок 6.9. Розподіл напружень в з'єднанні внахлестку

Міцність з'єднання внахлестку зростає при збільшенні її площі. Площа з'єднання – це множення ширини з'єднання на довжину перепуску. Збільшення міцності з'єднання з довжиною перепуску не виражається лінійною залежністю (рис. 6.10). На відміну від довжини перепуску ширина з'єднання лінійно пов'язана з його механічними властивостями. На рис. 6.11 видно, що з ростом ширини з'єднання зростає руйнівне навантаження, але міцність при зсуві від ширини з'єднання не залежить.

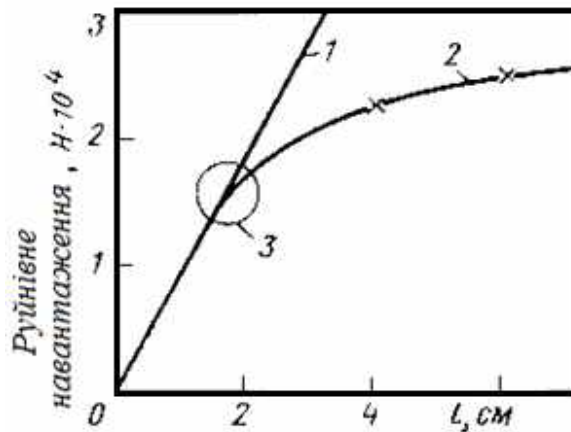


Рисунок 6.10. Залежність міцності з'єднання від довжини нахлестки l :

1 – очікувана міцність; 2 – експериментально визначена;
 3 – область оптимальних розмірів нахлестки

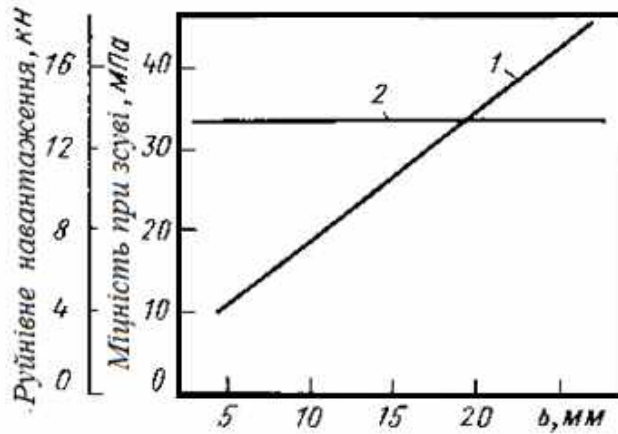


Рисунок 6.11. Залежність руйнівного навантаження при розтягуванні (1) і міцності при зсуві (2) від ширини з'єднання (субстрат – сталевий прокат, опіскоструєний, $s = 2$ мм, $l = 10$ мм, клей епоксидний гарячого твердіння)

Міцність з'єднання визначається не тільки площею нахлестки, але при достатній адгезії міцністю субстрату. З рис. 6.12 випливає, що при даній товщині склеюваного матеріалу міцність з'єднання після перевищення оптимальної довжини нахлестки далі не збільшується. Пряма, що з'єднує точки перегину на кривих залежності міцності з'єднання від товщини субстрату (f), подібна до функції коефіцієнта форми.

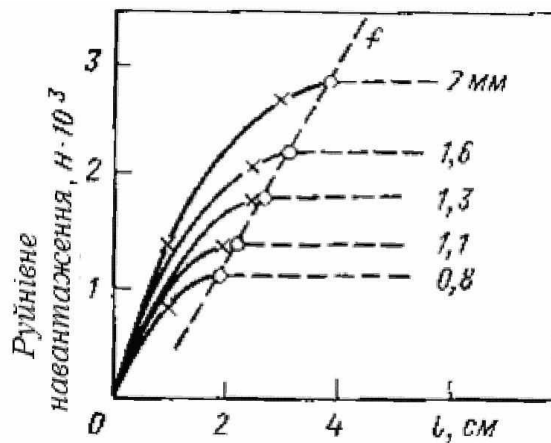


Рис. 6.12. Вплив товщини субстрату (металу) на міцність з'єднання внахлестку (l – довжина перепуску)

На основі теорії Фолькерсена введений коефіцієнт форми сполуки, мм^{-1} :

$$f = \sqrt{s/l}, \quad (6.16)$$

де s – товщина субстрату, l – довжина нахлестки.

Це рівняння дійсно для з'єднань плоских матеріалів (пластини, листи і т. ін.). Залежність міцності з'єднання від коефіцієнта форми (рис. 6.13) в області f від 0 до 0,3 лінійна, тобто міцність з'єднання пропорційна коефіцієнту форми, що необхідно враховувати при конструюванні.

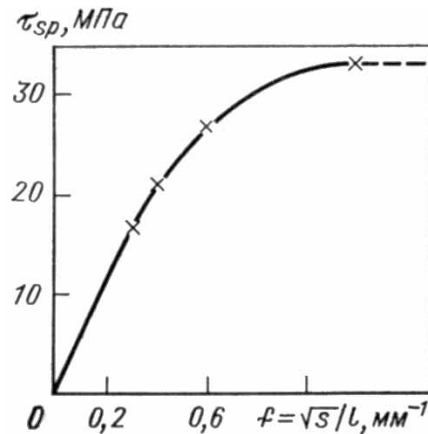


Рисунок 6.13. Залежність міцності клеювого з'єднання при зсуві τ_{sp} від коефіцієнта форми з'єднання

У ряді нормативних документів оптимальна довжина перепуску вважається постійною. Для розрахунку оптимальної довжини перепуски застосовують співвідношення:

$$l = \sigma_k s / r, \quad (6.17)$$

де σ_k – межа плинності субстрату; $r = 1,5\tau$ (τ – середня міцність клеювого з'єднання при зсуві).

Це рівняння може бути застосовано для металів і тих неметалічних матеріалів, у яких на діаграмі руйнування лінійна частина досить велика в порівнянні з необхідною міцністю з'єднання.

Існує кілька способів розрахунку клеювих з'єднань з метою визначення оптимальної довжини перепуски з урахуванням механічних властивостей компонентів з'єднання, розмірів деталей, що склеюються, коефіцієнта форми. Властивості клею вводять в ці розрахунки різними способами.

При визначенні оптимальної довжини перепуски різні автори виходять з рівняння для коефіцієнта форми (6.16), з якого розраховують середню міцність з'єднання при зсуві τ :

$$\tau = a \lg(\lambda f). \quad (6.18)$$

Тут a і λ – константи, що відносяться до властивостей клею, які визначають експериментально).

Запропоновано таке рівняння для міцності з'єднання при зсуві:

$$\tau = b(1 + M \lg f), \quad (6.19)$$

де b – константа, що враховує властивості клею і залежить від межі плинності матеріалу, що, склеюється; M – константа, яка стосується тільки клею.

Автори наводять співвідношення

$$\tau = c\sqrt{f}, \quad (6.20)$$

в якому константа c враховує властивості, і клею і склеюваного матеріалу.

Значення констант, що входять в рівняння (6.18), (6.19), наведені нижче.

Рівняння	Константи (літературне посилання)	
(6.18)	$a = 3,65;$	$\lambda = 63,1$
(6.19)	$b = 6,27;$	$M = 0,55$
(6.20)	$c = 9,4$	

На прикладі одинарного з'єднання внахлестку сплаву Al, Cu і Mg, який склеюється при нагріванні епоксидним клеєм, порівняли рівняння (6.18)–(6.20) і встановили, що з точки зору розрахунку нахлестки вони дуже схожі (рис. 6.14).

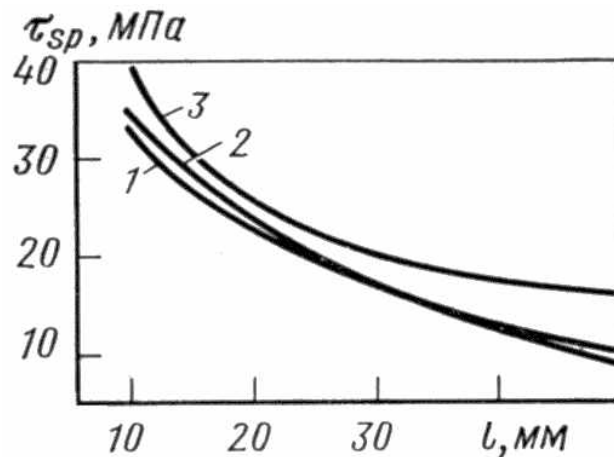


Рисунок 6.14. Залежність міцності з'єднання при зсуві (τ_{sp}) від довжини нахлестки:

1 – за рівнянням (6.18); 2 – за рівнянням (6.19); 3 – за рівнянням (6.20)

Для одинарного з'єднання внахлестку стандартних розмірів було виведено співвідношення:

$$l_{\text{опт}} = m\sigma_k, \quad (6.21)$$

згідно з яким в клейових з'єднаннях певних розмірів при використанні одного і того ж клею оптимальна довжина перепуску залежить від товщини субстрату, оскільки від товщини субстрату залежить розмірний фактор m , як це впливає з рис. 6.15. На основі теоретичних даних і експериментів були складені номограми, які можна використовувати для розрахунку параметрів з'єднання для певних клеїв (рис. 6.16–6.18).

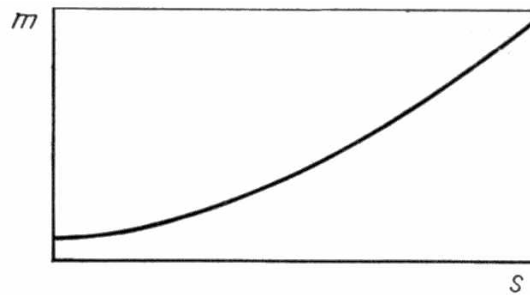


Рисунок 6.15. Залежність розмірного фактора m з'єднання внахлестку від товщини субстрату

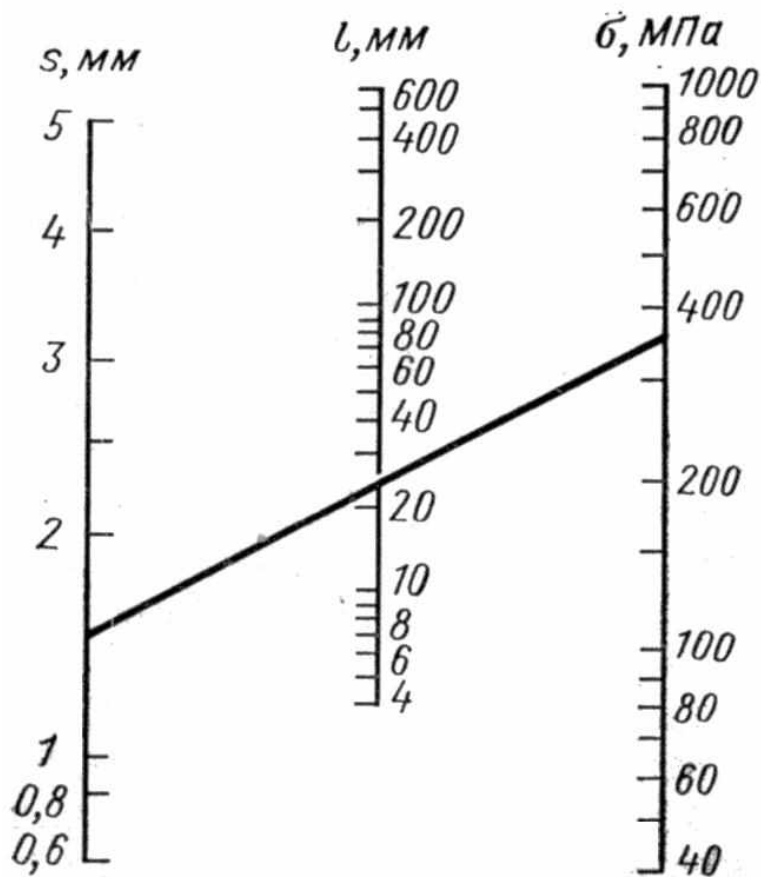


Рисунок 6.16. Номограма для розрахунку з'єднання внахлестку внапуск листових металів (клей-пластофенал N)

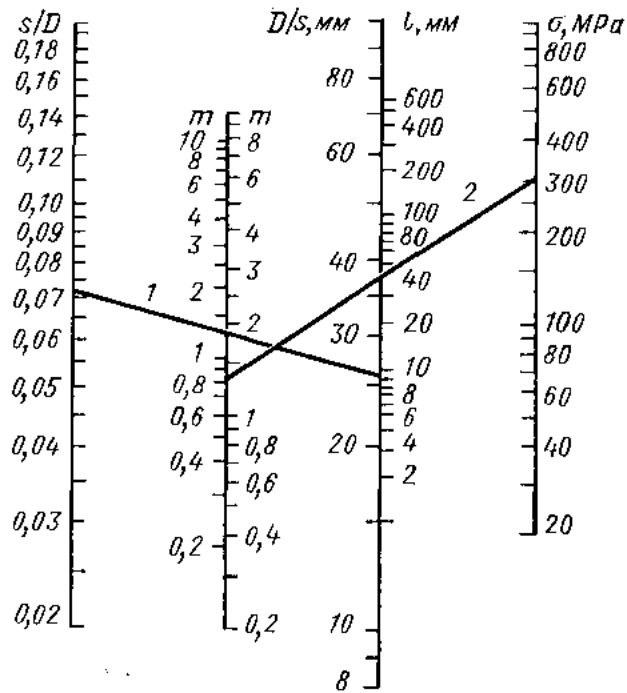


Рисунок 6.17. Номограма для розрахунку з'єднання двох труб втулкою:
 D – зовнішній діаметр труб, s – товщина стінки труби

Приклад розрахунку:

- 1) з'єднуємо $s/D = 0,072$ з $D/s = 26$ і отримуємо $m = 1,3$;
- 2) $m = 1,3$, відкладаємо на шкалі m і з'єднуємо з $\sigma = 300$; отримуємо $l = 40$;
- 3) з'єднання двох труб має мати довжину $2l = 80$ (клей – епілокс EGK 19/НЗ).

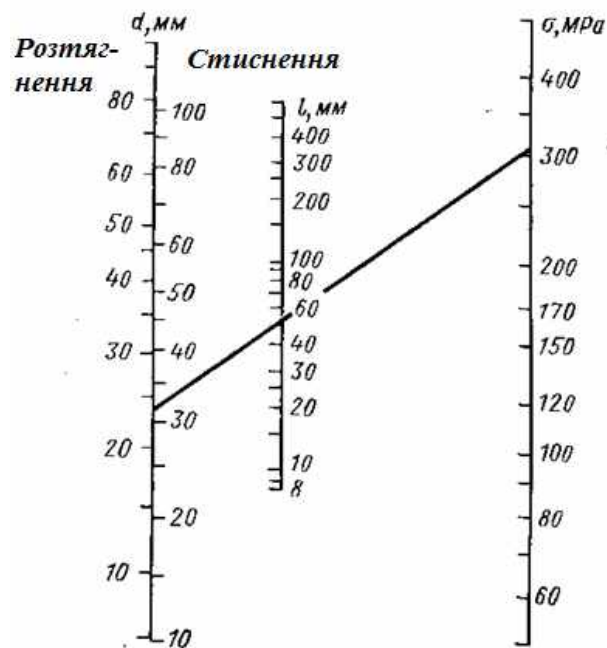


Рисунок 6.18. Номограма для розрахунку допустимого навантаження на круглий стрижень, що вклеваний в отвір (сталь, $\sigma_{СТ} = 250$ МПа), і коефіцієнта безпеки

Приклад розрахунку:

1) розрахунок діаметра стрижня $d = \sqrt{4F}/\pi\sigma = 4 \cdot 50000 / 3,14 \cdot 120 = 23$ мм; допустимі навантаження 50 кН, довжина з'єднання 50 мм, допустимий натяг $\sigma_{\text{доп}} = 120$ МПа;

2) з'єднуємо d і l і, продовжуючи пряму до шкали σ , отримуємо $\sigma = 310$ МПа; ця величина більша, ніж $\sigma_{\text{ст}} = 250$ МПа; розрахунковий коефіцієнт безпеки $\chi = \sigma_{\text{ст}} / \sigma = 250/310 = 0,8$, а в дійсності – $310/120 = 2,6$.

Залежність розмірного фактора m від товщини субстрату [рис. 6.15, рівняння (6.21)] відповідає рівнянню для параболічної функції:

$$m = 0,2(s^2 + 1). \quad (6.22)$$

Вид параболи залежить від товщини і межі міцності (межі плинності) субстрату і клею.

В результаті технологічних випробувань і за допомогою ЕОМ встановлено, що, наприклад, для клею CHS епокси 1210 і листового алюмінію ($\sigma_k = 171,5$ МПа) m визначається з рівняння

$$m = 0,0210 + 0,205s + 0,1067s^2. \quad (6.23)$$

Для цього ж субстрату, але з епоксидним клеєм типу UHU

$$m = 0,2036 + 0,03033s + 0,1260s^2. \quad (6.24)$$

З наведених в табл. 6.1 даних можна отримати уявлення про вплив товщини матеріалу на m :

Т а б л и ц я 6 . 1

Вплив товщини матеріалу на m

Товщина субстрату, мм	За рівнянням (2.8)	За рівнянням (2.9)
1	0,3331	0,3599
2	0,8586	0,7682
3	1,5975	1,4285

З рівняння (6.17) ясно видна залежність між межею плинності і товщиною субстрату. Отже, матеріал з високою межею плинності може бути тоншим. Це впливає і з рис. 6.22.

Наведені вище правила дійсні для ізотропних твердих матеріалів, перш за все металів. Вони не належать до деревини, яка є анізотропним матеріалом. Анізотропія проявляється в тому, що міцність деревини при розтягуванні вздовж волокон в 10 разів більша міцності при розтягуванні поперек волокон. Тому не слід навантажувати з'єднання поперек волокон при рівномірному і нерівномірному (розколюванні) відриві. Вусові з'єднання, що піддаються навантаженню при розтягуванні, мають зазвичай співвідношення 1 : 12. Для з'єднань, що піддаються навантаженню при стисненні, співвідношення не має бути більше 1 : 5.

При склеюванні деревини завжди слід враховувати напрямок річних шарів. Найбільш міцні шви виходять, коли напрямки річних шарів деталей, що склеюються, паралельні.

При склеюванні гуми і пластмас діють ті ж правила, що і для інших твердих ізотропних матеріалів. Для конструкційних з'єднань використовують переважно листи, стрижні і труби.

При склеюванні плівок необхідно враховувати їх відносно низьку міцність. З'єднання двох плівок зазвичай має велику міцність, більшу ніж сума міцностей плівок. Часто доводиться приклеювати плівки до твердої основи. Йдеться про захист за допомогою плівок або про кріплення за допомогою липких стрічок. Ці сполуки зазвичай не є конструкційними.

При склеюванні пластмас і гуми в конструкціях рекомендується нахлестка і накладка, вусове з'єднання застосовують тільки при склеюванні деталей з одного і того ж матеріалу.

На прикладі з'єднання еластичних матеріалів можна продемонструвати напруги, що виникають при навантаженні. На поверхню зразків, що склеюються, перед випробуванням наносять кольорові паралельні лінії перпендикулярно напрямку дії навантаження. Ці лінії при навантаженні деформуються характерним чином. Таким способом, а також за допомогою інших експериментів отримують дані, на основі яких можна спробувати розрахувати сили, що діють в клейовому з'єднанні, а при порівнянні їх з адгезійними силами скласти уявлення про дійсну міцність клейового з'єднання. Однак перш за все слід оцінити фактори, що впливають на міцність з'єднання.

Велике значення має спосіб обробки поверхні субстрату, від якого залежать властивості поверхні. Не менший вплив чинять властивості матеріалів, що з'єднуються. З'єднання матеріалів, що володіють високою міцністю при даному напруженому стані, наприклад, при вигині, мають за інших рівних умов більш

високу міцність при вигині, ніж з'єднання інших матеріалів. Це ілюструє співвідношення,

$$M_{0R} = \sigma_0 W, \quad (6.25)$$

згідно з яким момент опору прямо пропорційний межі плинності матеріалу при даному способі навантаження. Тут M_{0R} – згинальний момент опору, W – момент опору [наприклад, для стрічки $W = bs^2/6$ (b – ширина, s – товщина)], σ_0 – межа плинності субстрату при вигині.

Крім адгезії важливі когезійна міцність і еластичність клею, його коефіцієнт теплового розширення, іноді теплостійкість. Дуже істотна усадка клею при отвердінні, оскільки при усадці можуть виникнути напруги, які знижують міцність з'єднання.

У конструкціях міцність з'єднання повинна бути такою, щоб допустиме навантаження було менше максимальної міцності, досягнутої під час випробування. Співвідношення цих величин дає коефіцієнт (фактор) безпеки:

$$x = \sigma / \sigma_{k \text{ доп}} > 1, \quad (6.26)$$

де σ_k – межа плинності субстрату або руйнівне напруження з'єднання; $\sigma_{\text{доп}}$ – допустиме напруження.

На міцність з'єднань впливають його форма (не слід плутати з коефіцієнтом форми для з'єднання внахлестку, описаним вище), тобто взаємне розташування деталей, що склеюються, форма і розмір склеюваної поверхні. Ця поверхня може збільшуватися, наприклад, при заміні з'єднання встик вусовик, а також при використанні накладок, ефективність яких визначається також їх механічною міцністю.

Вплив на міцність геометричних параметрів в значній мірі обумовлено згаданим вище коефіцієнтом форми. Як випливає з рис. 6.12, абсолютна міцність з'єднання (із заданою шириною), тобто руйнівне навантаження, зростає з довжиною перепуску аж до певного максимуму; питома ж міцність з довжиною перепуску знижується.

Емпірично встановлено, що клейові з'єднання найбільш стійкі до дії навантаження при зсуві, що відноситься головним чином до твердих ізотропних матеріалів (вищі показники міцності, ніж при зсуві, зазвичай досягаються при рівномірному відриві). Із зростанням пружності матеріалу і зниженням його товщини зростає стійкість при вигині і віддірі, що, однак, залежить від еластичності клею, що затверджується. Тому важливо, щоб фізико-механічні константи

клею наближалися до констант субстрату. Статичні навантаження з точки зору довговічності з'єднання більш вигідні, ніж динамічні.

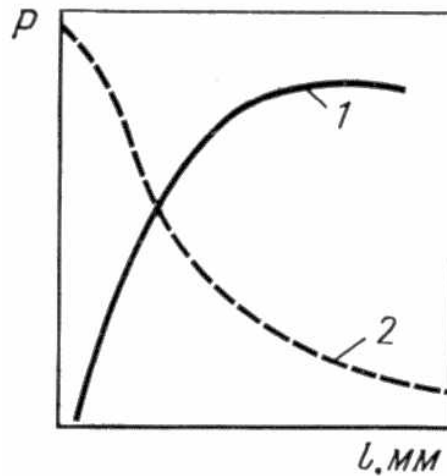


Рисунок 6.19. Залежність руйнівного навантаження при зсуві (1) і питомої міцності (2) від довжини нахлестки:

P – навантаження при постійній ширині з'єднання, l – довжина перепуску

Крім згаданих найважливіших факторів на властивості з'єднання впливають і багато інших. Як правило, ці фактори знижують міцність і довговічність з'єднання. Тому необхідно брати до уваги коефіцієнт безпеки, про який ми говорили вище. Для практичних цілей його зазвичай перетворюють (метод перемноження коефіцієнтів для клейових з'єднань дає спотворені результати в порівнянні з прямим урахуванням дії одночасно декількох факторів):

$$x_d = x k_1 k_2 \dots k_x k_s, \quad (6.27)$$

де x_d – кінцева величина; $k_1 - k_x$ – експериментально встановлені коефіцієнти умов роботи (впливу температури, вологи, хімічного впливу і корозії, динамічного навантаження і т. ін.); k_s – коефіцієнт граничних напружень.

При цьому не слід забувати про максимальні (пікові) граничні напруження, які істотно знижують значення коефіцієнта безпеки. Ці напруги визначають коефіцієнт концентрації напружень (6.28) і коефіцієнт максимальних напружень (6.29):

$$m = \tau_{\text{макс}} / \tau_{\text{ср}}; \quad (6.28)$$

$$k_s = 1/n. \quad (6.29)$$

При одинарних з'єднаннях внахлестку максимальна напруга при зсувних навантаженнях більша на торцях з'єднання, де спостерігається і найбільша деформація. Коефіцієнт максимальних напружень має враховувати, якою мірою максимальні напруги і деформації перерозподіляються і вирівнюються під дією навантажень. Вплив максимальних напружень на деформацію шва показано на рис. 6.20. Розрахунок міцності з'єднання слід експериментально перевіряти і коригувати.

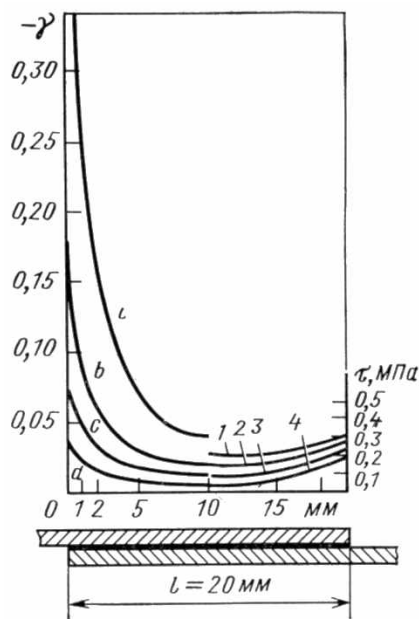


Рисунок 6.20. Вплив максимальних напружень на деформації в клейовому шві:
 γ – деформація (відносно зміщення), мм; клей агомет М;
 матеріал, що склеюється сплав Al, Cu, Mg:

$$n = \tau_{\text{макс}} / \tau_{\text{ср}}; \quad a - \tau_{\text{ср}} = 2,5; \quad b - \tau_{\text{ср}} = 2; \quad c - \tau_{\text{ср}} = 1,5; \quad d - \tau_{\text{ср}} = 1;$$

$$1 - n = 1,2; \quad 2 - n = 1,35; \quad 3 - n = 1,5; \quad 4 - n = 1,9$$

На основі закону подібності геометрично подібні з'єднання, тобто з'єднання з однаковим коефіцієнтом форми f , повинні мати однакову або хоча б близьку міцність. Це дійсно, якщо однакові параметри матеріалів, що склеюються, природа клею, способи поверхневої обробки субстрату. Однак навіть при дотриманні цих умов значення міцності з'єднання можуть відрізнятися до 30%. Такий розкид, тобто неточність закону подібності в результаті дії масштабного фактора і т. п., знижує надійність розрахункових даних, заснованих на використанні коефіцієнта форми.

З урахуванням цих зауважень був розроблений інший метод розрахунку клейового з'єднання. Спочатку емпірично встановлюють залежність міцності з'єднань великої кількості різних матеріалів на різних клеях від багатьох чинників. Результати цих дослідів зведені в номограму (рис. 6.21), яка може

бути гарною підмогою при конструюванні і розрахунку міцності з'єднань. На рис. 6.21 наводиться приклад розрахунку конкретного з'єднання. Першим кроком є визначення міцності клею при зсуві $\tau_{\text{макс}}$, МПа, і модуля пружності при зсуві G , МПа. Для симетричного (подвійна нахлестка) і несиметричного (одинарна нахлестка) з'єднань дійсні рівняння [24].

$$K\tau_g = \tau_{\text{макс}} \sqrt{G} \quad (\text{симетричне}); \quad (6.30)$$

$$K\tau_n = \tau_{\text{макс}} \sqrt{G} \frac{\sigma_{\text{макс}} 10^4}{E} \quad (\text{несиметричне}). \quad (6.31)$$

Поєднуючи $K_{\text{тс}}$ на першій шкалі номограми з величиною $\sigma_a(s)$ і продовжуючи лінію до наступної шкали, ми отримуємо величину коефіцієнта пропорційності α_A . У нашому випадку це 119 Н/мм^{1,75}. Далі продовжуючи пряму від величини α_A через розраховану величину P_B , тобто 300 кН/мм (див. підпис до рис. 6.21), аж до шкали c , отримуємо величину $c = 6,4 \text{ мм}^{-1,5}$. Поєднуючи значення константи c з даною товщиною субстрату (s_1), отримуємо оптимальну довжину перепуску $l_0 = 6,5 \text{ мм}^{-0,5}$ (на шкалі l_0^+). Відклавши цю величину на зворотній шкалі l_0 (по відношенню до l_0^+) і продовживши пряму до осі c , отримаємо графічну величину коефіцієнта форми, яку можна перевірити розрахунком:

$$f = \sqrt{s/l} - \sqrt{l}/6,5 = 0,154.$$

Коментарі до рис. 6.21: подвійна нахлестка; $P_B = F/b^2 = 1200\text{Н}/0,2 \cdot 2 = 300 \text{ кН/мм}$; матеріал – сплав Al, Cu, Mg; $\sigma = 460 \text{ МПа}$; ширина з'єднання 200 мм; товщина з'єднаних деталей $s_1 = 1 \text{ мм}$, $s_2 = 2 \text{ мм}$; допустиме навантаження $F = 120 \text{ кН}$; клей рідакс 775; K_m – константа зсуву несиметричного з'єднання; $K_{\text{тс}}$ – константа зсуву симетричного з'єднання; $\sigma_a(n)$ – міцність при розтягуванні субстрату (для несиметричного з'єднання); $\sigma_a(s)$ – міцність при розтягуванні субстрату (для симетричного з'єднання); α – фактор пропорційності; τ_{sp} – міцність з'єднання при зсуві; F – допустиме навантаження; P_B – руйнівне напруження; b – ширина з'єднання; c – постійна з відношення $\tau_{sp} = c\sqrt{f}$; $l_{\text{опт}}$ – оптимальна довжина перепуску; s – товщина субстрату.

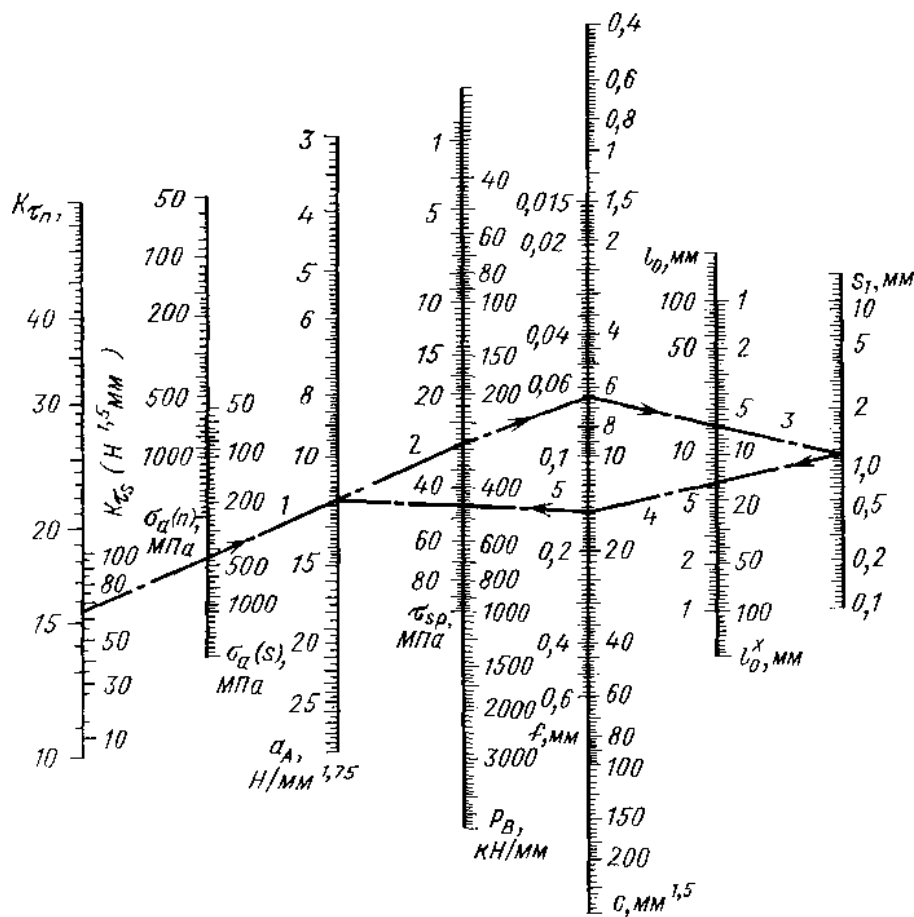


Рисунок 6.21. Номограма для розрахунку з'єднання за Вінтером і Мекелбургом

Останнім кроком є з'єднання графічно отриманої величини f з величиною α_A , визначеної при побудові першої прямої. Точка перетину цієї останньої лінії зі шкалою τ_{sp} відбиває міцність з'єднання, в даному випадку 47 МПа. Правда, на практиці слід додатково враховувати коефіцієнт s безпеки і вплив умов експлуатації. У будь-якому випадку рекомендується контролювати розрахунок експериментальним визначенням міцності з'єднання. Крім того, хоча номограма і є відмінним помічником для розрахунку міцності клейового з'єднання, часто у нас немає необхідних вихідних даних для її використання.

Для визначення оптимальної довжини нахлестки можна використовувати також залежності, наведені на рис. 6.22 і 6.15.

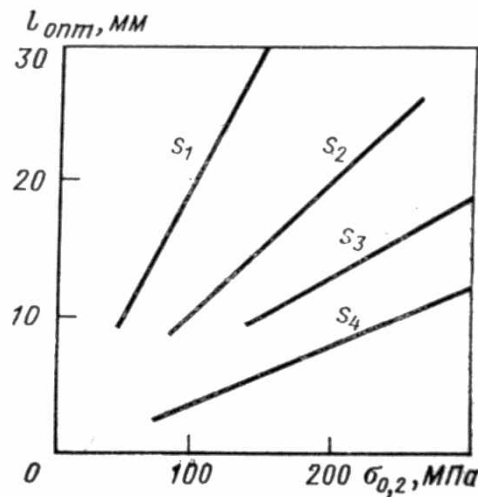


Рисунок 6.22. Визначення розмірного фактору m :

m – кутовий коефіцієнт наведених прямих; $l_{\text{опт}} = m \cdot \sigma_{0,2}$; s – товщина;
 $s_1 = 3$ мм; $s_2 = 2$ мм; $s_3 = 1,5$ мм; $s_4 = 1$ мм

Після визначення коефіцієнта форми $f = \sqrt{s}/l_{\text{опт}}$ ми можемо, нарешті, визначити міцність τ_{sp} з'єднання даних матеріалів. З рівняння коефіцієнта форми і відношення Дебройна і Петронія для оптимальної довжини нахлестки можна отримати залежності для швидкого і орієнтовно задовільного розрахунку міцності з'єднання при зсувних напругах. Коефіцієнт форми f не враховує властивості клею, хоча і передбачає хорошу поверхневу обробку і оптимальну товщину шару клею. Крім того, при цьому не враховуються властивості субстрату. Тому ми скористаємося залежністю для оптимальної довжини нахлестки з'єднань металів:

$$l_{\text{опт}} = \sigma_k s / r, \quad (6.32)$$

де $r = 1,5 p$ (p – максимально досягаєма міцність); σ_k – межа плинності субстрату; s – товщина субстрату.

Рівняння (6.32) враховує крім факторів, потрібних для визначення коефіцієнта форми, також механічні властивості субстрату.

Перетворення дають нам рівняння для міцності шва:

$$f = \sqrt{sr} / \sigma_k s; \quad (6.33)$$

$$r = f \sigma_k s / \sqrt{s}, \quad r = 1,5p; \quad (6.34)$$

$$p = f \sigma_k \sqrt{s} / 1,5 \quad (6.35)$$

або

$$p = s \sigma_k / 1,5l. \quad (6.36)$$

Величина r включає коефіцієнт безпеки, який може мати і інше значення, ніж 1,5.

Однак і це відношення не враховує впливу поверхневої обробки субстрату і якість клею. Для уточнення доповнимо його коефіцієнтами: k_f – фактор дотримання коефіцієнта форми (за деякими даними він може мати значення від 0,7 до 1, тобто розкид до 30 %); k_{pu} – коефіцієнт поверхневої обробки. Різні способи хімічної обробки поверхні призводять до розкиду міцності шва до 20 %. При механічних способах обробки розкид ще більший. Оптимальним значенням k_{pu} можна вважати 0,8–0,9. Кінцеве рівняння для швидкого орієнтовного розрахунку міцності шва (в разі оптимально обраного клею) має вигляд [24]:

$$p = k_f k_{pu} \left(f \sigma_k \sqrt{s} / 1,5 \right) \quad (6.37)$$

або

$$p = k_f k_{pu} \left(s \sigma_k / 1,5l \right). \quad (6.38)$$

Якщо при випробуванні кінцева величина виходить менша 70 % [згідно відношенню (6.38)], необхідно вибрати інший клей. Якщо розкид при випробуванні більш 40 %, то необхідно змінити технологію склеювання. Цей розрахунок дійсний для металів і ізотропних пластмас в області до $f = 0,3$.

Порядок розрахунку:

1) у рівняння (6.32) підставляємо необхідні величини; r визначається з відношення $r = 1,5 p$, де p отримуємо орієнтовно з даних виробника про міцність з'єднання даного матеріалу на даному клеї, або з літератури, або з результатів досліджень.

2) отримане значення l підставляємо в рівняння $f = \sqrt{s} / l$.

3) визначаємо k_f , для цього необхідно визначити площу з'єднання

$$F = b \cdot l, \quad (6.39)$$

де b – ширина, а l – довжина перепуску, і встановити, які похибки можуть виникнути на практиці. Беремо до уваги лише негативні величини, тобто зниження міцності, яке викликане занадто малими l або b .

Ступінь зниження виразимо коефіцієнтом площі, який має бути менше 1:

$$k_{пл} = \text{зменшена площа} / \text{номінальна площа.}$$

Потім виміром розкиду товщини матеріалу, що склеюється, визначимо середнє зниження товщини, яке (виражене в %) віднімаємо з 100 %. Отримана величина є коефіцієнтом товщини:

$$k_f = (k_s) \cdot (kh);$$

k_f не має бути менше 0,7.

Коефіцієнт k_{pu} можна прийняти рівним 0,8 або 0,9 залежно від того, як буде оцінено якість обробки поверхні субстрату.

4) Отримані коефіцієнти підставляємо в рівняння для розрахунку міцності (6.34).

При склеюванні різнорідних матеріалів, особливо якщо при експлуатації з'єднання мають місце коливання температури, слід брати до уваги напруги, які викликані різницею в коефіцієнтах лінійного теплового розширення. Для цієї мети існує просте відношення, яке задовольняє вимоги практики:

$$\sigma_1 = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta t \cdot E \cdot (h_2 / (h_1 + h_2)), \quad (6.40)$$

де σ_1 – напруги в даному елементі з'єднання; α – лінійний коефіцієнт теплового розширення 10^{-6} , $1/^\circ\text{C}$; Δt – перепад температур; E – модуль пружності при розтягуванні; h – товщина елемента з'єднання.

Це відношення слід використовувати для зіставлення обох субстратів між собою і обох субстратів з клеєм. Оцінку розрахованої величини слід розробляти, виходячи з необхідної міцності з'єднання з урахуванням коефіцієнта безпеки. Коефіцієнти теплового розширення деяких конструкційних матеріалів в інтервалі температур 20–100 °C наведені в табл. 6. 2.

Розрахунок міцності з'єднання без точного визначення частки міцності клею в цій величині може бути тільки орієнтовним. Необхідно враховувати емпірично певні допоміжні коефіцієнти і експериментально перевірену відповідність між розрахунком і дійсною міцністю.

Коефіцієнти теплового розширення деяких конструкційних матеріалів

Коефіцієнти теплового розширення $\alpha \cdot 10^6, 1/К$		Коефіцієнти теплового розширення $\alpha \cdot 10^6, 1/К$	
Вуглецева сталь	10–12,3	Не пластифікований ПВХ	80–100
Нержавіюча сталь	17,5	Розгалужений ПЕ	230
Алюмінієві сплави	15–35,0	Лінійний ПЕ	200
Цинк	36,0	Поліпропілен	160
Латунь	15–19,0	Полістирол	80
Олово	29,0	Поліаміди	70
Скло	4,8–8,0	Поліацеталі	130
Кварцеве скло	0,5	Епоксидні смоли	60
Бетон	7,0–10,0	Поліефірні склопластики	25–40

З основних положень адгезії впливає залежність міцності шва від кута змочування на межі субстрат – клей. Багато авторів доводять, що міцність певних сполук залежить від числа ОН-груп (або інших полярних груп) в клеї. Наприклад, визначили міцність з'єднання при зсуві алюмінієвого сплаву на епоксидному клеї за рівнянням (під кількістю ОН груп в клеї мають на увазі їх число в 1 молі):

$$\tau_{sp} = (724,8 [\text{ОН}]^{2/3} + 3180) \cdot 6,895 \cdot 10^3, \quad (6.41)$$

а для з'єднання сталь- формвара за рівнянням:

$$\tau_{sp} = (721,6 [\text{ОН}]^{2/3} + 5367) \cdot 6,895 \cdot 10^3. \quad (6.42)$$

Однак досі неможливо включити дані про міцність адгезійних зв'язків та їх розрахунок в розрахунок міцності клейового з'єднання. Надалі необхідно визначити більш точні характеристики цих сил, перш ніж можна буде використовувати ці дані для розрахунку.

6.5. Практичні розрахунки клейових з'єднань

1. Розрахунок клейових з'єднань на міцність. З'єднання внахлестку. При дії розтягувальної або стискної сили F (рис. 6.23) розрахунок проводять на зсув (зріз) за формулою:

$$\tau_{zc} = \frac{F}{A_{zc}} \leq [\tau]_{zc},$$

де $\tau_{зс}$ і $[\tau_{зс}]$ – розрахункове і допустиме напруження на зсув; $[\tau_{зс}] = 10 \div 25$ МПа для карбонільного клею, $[\tau_{зс}] = 4,5 \div 7,0$ МПа для клею групи БФ; F – навантаження, що діє на з'єднання; $A_{зс}$ – площа зсува (зрізу).

2. В процесі експлуатації клейові з'єднання набувають різних навантажень, які можуть бути приведені до чотирьох основних типів (рис. 6.23).

У табл. 6.3 подано типи конструкцій клейових з'єднань, здатних сприймати різні навантаження.

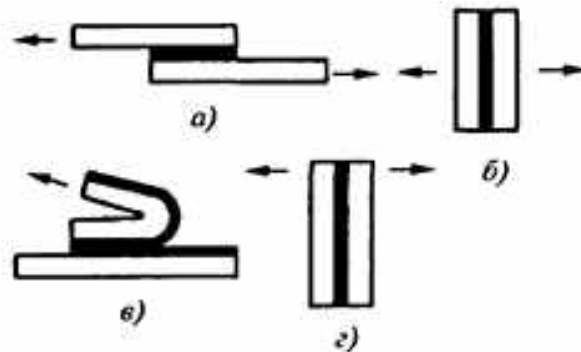

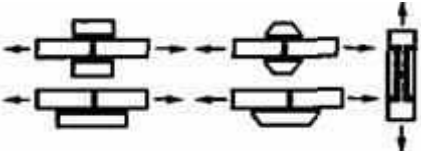
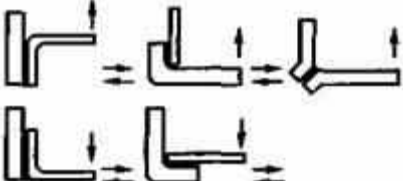
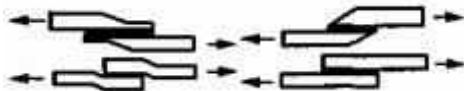


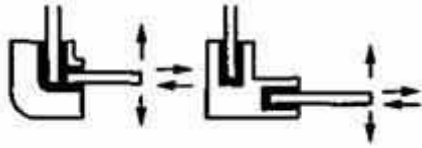


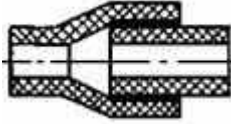
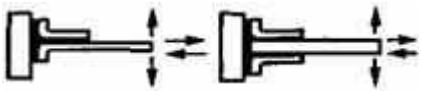
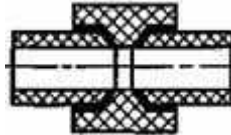

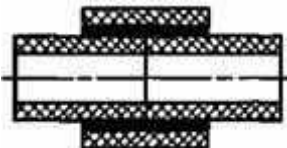


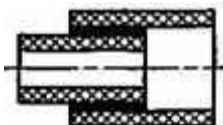
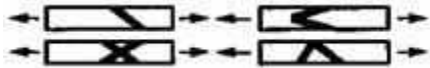
Рисунок 6.23. Основні типи навантаження клейових з'єднань:
a – зсув; *б* – рівномірний відрив; *в* – віддір; *г* – позацентровий відрив

Т а б л и ц я 6.3

Рекомендовані типи конструкції клейових з'єднань залежно від напрямку навантаження

Клейові з'єднання	Клейові з'єднання
 <p>Кутові стикові</p>	 <p>Стикові з однієї і двома накладками</p>
 <p>Кутові із загином кромки</p>	 <p>Стикові нахлесточні</p>

Закінчення табл. 6.3

 <p>Кутові в паз</p>	 <p>З'єднання порожнистих профілів</p>
 <p>Таврові стикові</p>	<p>З'єднання труб</p>  <p>З формованим гладким розтрубом</p>
 <p>Таврові з куточком</p>	 <p>З двохраструбною муфтою</p>
 <p>Таврові в паз</p>	 <p>З гладкою насувною муфтою</p>
 <p>Стикові з нахлестом</p>	
 <p>Стикові в паз</p>	 <p>Різних діаметрів</p>
 <p>Стикові на вус</p>	

Розрахунок клейових з'єднань

Для розрахунку найбільш поширених сполучень користуються наближеними формулами [39]. Діючі напруги при зсуві напускного з'єднання:

$$\tau = F / (b \cdot a),$$

де F – зсувна сила; b , a – ширина і довжина нахлестки.

Для невідповідальних з'єднань довжина перепуску

$$a = (2,5 \dots 5) \cdot s,$$

де s – товщина склеюваних листів.

При динамічних навантаженнях міцність при зсуві приймають рівною 1/3 її значення при статичному навантаженні.

Розрахункові формули для визначення діючих напружень в з'єднаннях на «вус» листів і труб подані в табл. 6.4.

Т а б л и ц я 6.4

Розрахункові формули для визначення напруг
в клейових з'єднаннях на «вус»

Сполучані елементи	Вид деформації	Дотичні напруги τ	Нормальні напруги
Листи	Розтягування Вигин	$\frac{F}{sb} \sin \theta \cos \theta$ $\frac{6M}{s^2b} \sin \theta \cos \theta$	$\sigma_1^* = \frac{F}{sb} \sin^2 \theta$ $\sigma = \frac{6M}{s^2b} \sin^2 \theta$
Труби	Розтягування Вигин	$\frac{F}{2\pi r_0 s} \sin \theta \cos \theta$ $\frac{6M(r_0 + r_1)}{\pi(r_0^4 - r_1^4)} \sin \theta \cos \theta$	$\sigma_1^* = \frac{F}{2\pi r_0 s} \sin^2 \theta$ $\frac{6M(r_0 + r_1)}{\pi(r_0^4 - r_1^4)} \sin \theta \cos \theta$

Примітка: F – сила, що розтягує; M – згинальний момент; θ – кут скосу; r_0 , r_1 – зовнішній і внутрішній радіуси труби; s – товщина листів; b – ширина листа.

Для клейових з'єднань деталей з полімерних, композитних та інших матеріалів з малим модулем пружності уточнені розрахунки слід вести з урахуванням деформації деталей [31, 33].

Епюра питомих навантажень має звичайну вигнуту форму з максимальними значеннями на кінцях.

У разі приклеювання полки лінійно-пружного кутика до жорсткої основи і дей-наслідком відриває навантаження уздовж іншої полиці розподіл тиску в клейовому шарі підпорядковується залежностям для балки на пружній основі.

В реальних конструкціях спостерігається значний розкид показників міцності. Це слід враховувати при проектуванні конструкцій, вводячи коефіцієнт запасу міцності, який призначають в результаті експериментального відпрацювання клейового з'єднання.

Залежно від ступеня відповідальності конструкції і умов її роботи вибирають значення коефіцієнта запасу міцності від 1,5 до 3.

При виборі клею для конкретного призначення і конкретних умов експлуатації клейового виробу необхідно враховувати такі фактори:

1-природу матеріалу, що склеюються; 2-умови експлуатації; 3 рівень необхідної міцності; 4 особливості клеєної конструкції; 5 фізико-механічні та хімічні властивості клею; 6 технологію склеювання.

Основні вимоги, що ставляться до конструкційних клеїв:

1) клей має бути нейтральним по відношенню до склеюваних матеріалів, тобто не викликати корозії і не сприяти її розвитку;

2) отвердіння клею повинно відбуватися без виділення летких речовин;

3) клей має бути не тендітним, володіти стійкістю до різних агресивних речовин в залежності від призначення;

4) клей має мати достатню жізнездатність, хорошу зазорозаповнюємість;

5) клейові з'єднання металів мають володіти високою міцністю, що не залежить від дії змінних температур і інших чинників.

Одним з найважливіших показників конструкційних клеїв є термостійкість. За цією ознакою клеї можна розділити на групи: до 80 °С, до 150 °С, до 200...350 °С, до 700 °С і вище.

Технологічні характеристики деяких клеїв і властивості міцності з'єднаній на цих клеях, що застосовуються для склеювання металів між собою і з неметалевими матеріалами, наведені в табл. 6.5. Для одних і тих же сполучень матеріалів вказано кілька різних за властивостями клеїв, тому вибір конкретного клею в кожному випадку буде визначатися міцністю з'єднань, його стійкістю до експлуатаційних умов, умовами технологічних процесів склеювання і вимогами із забезпечення надійності клеєної конструкції.

Клеї для склеювання гуми між собою і з іншими матеріалами. Для склеювання гумових виробів, гуми до металів, дерева, пластмас, скла та інших матеріалів застосовують клеї на основі різних синтетичних каучуків.

Конструкційні гумові клеї, крім каучуку, містять речовини, які вулканізують.

Залежно від типу використовуваної вулканізуючої речовини клеї затвердівають при кімнатній або підвищеній (140–150 °С) температурі.

Клеї, які не вулканізуються, склеювання яких відбувається в результаті випаровування розчинника, забезпечують відносно невисоку міцність. Основою таких клеїв є натуральний каучук.

Основні властивості, умови застосування і призначення клеїв наведені в табл. 6.6.

Клеї для виготовлення інструменту.

Клеї для таких цілей мають забезпечувати термостійкість до ~ 700 °С; клеї з'єднання мають витримувати ударні навантаження і вібрацію в процесі роботи. Клеї мають бути стійкими до дії мастильно-охолоджуючих рідин, володіти теплопровідністю.

Для виготовлення конкретного типу режучого інструменту клей вибирають відповідно до його фізико-механічних характеристик, термостійкість і технологічних властивостей (табл. 6.7).

Таблиця 6.5

Властивості і призначення конструкційних клеїв

Марка клею, хімічна основа	Фізичний стан	Життєздатність (строк зберігання)	Режим тверднення			Температура робочих інтервалів, °С	Міцність, МПа		Матеріали, які склеюються, призначення і властивості
			T, °С	P, МПа	τ , ч		$\sigma_{\text{срив}}$	σ_p	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
БФ-4, феноло-формальдегідний	Рідкий, плівка	1 рік	140...150	0,5..1,0	–	–60...+85	16...20	–	Кольорові метали, корозійностійкі сталі, пластмаси, кераміка, фарфор, ебоніт, скло, дерево, фібра, шкіра, тканини. Для приклеювання тензодатчиків. Шов пластичний, водо-, бензо-, масло-, грібо-, вібростійкий, обмежено стійкий до спиртів
ЕАФ-2, епоксидний	Рідкий	1,5 ч	20 50...80 0	0,005...0,3	Не менш 4 2...3 Не менш 18	–60...+60	6...8	25...35 35...40 35...40	Метали, пластмаси, пінопласти. отвердіння клею при помірно низьких температурах (–10 °С), у вологих умовах і під водою. Клейовий шов водо-, бензо-, масло-, грібо- стійкий
ПУ-2, поліуретановий	Пасто-подібний	2 год	20 110 75...85	0,1...0,5	24...48 3...4 5...6	–60...+80	4 20 –	– 35 –	Метали, пластмаси, кераміка, скло, дерево, ферити. Шов бензо-, масло-, грібо- і вібростійкий, з'єднання має довготривалу міцність
ВК-41, епоксидний, модифікований	Плівка товщиною 0,22...0,3 мм	3 міс	120	0.3...Д5	3	–60...+80	32	45	Метали, склопластики. Для створення високонавантажених з'єднань, склеювання стільникових конструкцій. З'єднання стійки до дії мінеральних масел, палив, бензину, гідрорідин

Продовження табл. 6.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ціакрин ЕО, акрилатний	Рідкий	6 міс	20	0,01...0,1	24	-60...+100	9	12...15	Метали, скло, дерево, гума та ін. Обмежена водостійкість. Рекомендаційна площа склеювання не більше 20 см ² . Зазор між склеєними поверхнями не більше 0,05 мм. Час схоплювання від декількох секунд до декількох хвилин
КМ-200, КМ-203, акрилатний	Рідкий	6 міс	20	0,01...0,1	24	-196...+125 (КМ-200), -60...+125 (КМ-203)	8	16 (КМ-203), 20 (КМ-200)	Метали, скло, каучуки, пластмаси. Вологостійкі. Час схоплювання – від декількох секунд до декількох хвилин. Зазор між склеєними поверхнями для клею КМ-200 не більше 0,05 мм, для КМ-203 – до 0,3 мм
ТК-200, ТК-201, акрилатний	Теж	6 міс	20	0,01...0,1	24	-60...+130	10...12	25...28	Метали, скло, каучуки, пластмаси. Зазор між склеєними поверхнями для клею ТК-200 не більше 0,05 мм, для клею ТК-201 – 0,3мм. Час схоплювання від декількох секунд до декількох хвилин
ТК-300, ТК-301, акрилатний	Теж	6 міс	20	0,01...0,1	24	-60...+250	10		Метали (сталь, алюміній, латунь з гальванічним покриттям, титан та ін.), каучуки, пластмаси. Для скріплення деталей при збірці вузлів а паратури, що піддаються впливу підвищених температур. Для клею ТК-300 зазор між склеєваними поверхнями не більше 0,05 мм, для ТК-301 до 0,3мм. Час схоплювання від декількох секунд до декількох хвилин
ЕЛ-20, епокси поліамідний	Теж	3...4 год	20, 20, потім 50...70	0,05...0,3	24, 20, потім 4...S	-60...+125	4 8	20...23 30...40	Сталі, алюмінієві і титанові сплави, вольфрам, свинець, кадмій, пластмаси, кераміка, пінопласти. Стійкий в середовищі масел, бензину, спиртів. вологостійкий задовільно

Продовження табл. 6.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
БЕН-85П, БЕН-20П, епоксино- волачний	Плівка товщиною 0,02...0,2мм	18 міс	180 150	0,5 0,5...1	6...7 6	-60...+125	27 34	-	Метали, стільникові конструкції
УП-5-207, епоксидний	Пасто- подібний	1 рік	120...150	0,1...0,5	40 хв	-60...+200	25 (Ст3)	-	Сталь, алюміній, латунь, мідь, пермолой, ковар, золото, кераміка, пластмаси. Відмітна особливість – здатність склеювати замаслені метали. Стійкий до гідростатичного тиску до 10^7 Па
УП-5-240, епоксидний	Тиксо- тропний	6 міс	120...150	0,1...0,5	40 хв	-60...+200	38	-	Збереження міцності 95% вихідної після імітації 12 років зберігання. Стійкий до впливу: тропічних умов, багаторазового термоцикловання в діапазоні -60 ... + 200 °С, вологи, вібрації, розчинників, масел, мастильно-охолоджуючих рідин; стійкий до впливу нерівномірних навантажень
ВИЛАД Пк-1, полурета- новий	В'язка рідина	3...6 год	20 120	Кон- тактне	5 діб 2	-40...+100 До 135 коротко- часно	25...30	-	Метали, скло, кераміка, дерево, пластмаси. Не містить розчинників. Клей може отверднути при мінусовій температурі і під водою. Вібро, водо-, масло- і бензостійкий
УП-5-230, епоксидний	Теж	0,25...0,5 год	20	0,3...0,5	7 діб	-60...+150	28	38	Метали, склопластики; для склеювання деталей різних габаритів
УП-5-245, епоксидний	Рідина	0,3...0,5 год	20	0,3...0,5	7 діб	-60...+150	-	25	Метали, кварц, кераміка, ферит, скло з металом. Для з'єднання різнорідних і крихких матеріалів
УП-5-246, епоксидний	В'язка рідина	3...4 год	20	0,3...0,5	24	-60...+150	24	35	Метали, асбо- і склопластики. Мас підвищену еластичність; ударовібростійкий

Продовження табл. 6.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
БФТ-52, фенолофор-мальдегідний модифікований	Рідина	6 міс	170... 180	0,5...1	20... 30 хв	-60...+250	16	-	Метали, неметалеві матеріали. Приклеювання фрикційних накладок до колодки барабанного гальма. Вологостійкий, масло, бензостійкий
ВК-9, епоксиполіамідний*	Пасто-подібний	2...3 год	20 20, потім 50...70	0,01...0,2	24 20, потім 2...3	-60...+125 До 250 коротко-часно	4 15...20 (Д16)	- 34...40 (Д16)	Сталі, алюмінієві і титанові сплави, вольфрам, свинець, кадмій, пластмаси, кераміка, пінопласти. Стійкий в середовищі масел, бензину, спиртів. Вологостійкість – задовільна. Має підвищену еластичність, не викликає корозії металів
СТИК, поліуретановий модифікований поліефіром. СТИК-К	Рідкий	-	-30...+90	-	1...72	-253...+200	10	-	Метали, полімери, скло, дерево, гума. Склеювання різномірних металів по іржі і нафтопродуктів. Стик-К спіноється, заповнює зазори до 20 мм
АНАТЕРМ-105, акриловий	Теж	12 міс	20	Контактне	24	-60...+150	-	45	Метали. Клей анаеробний. Склеювання і герметизація плоских і циліндричних з'єднань з максимальним зазором 0,3 мм. Високоудароміцний
ВК-13М, фенолофор-мальдегідний, модифікований каучуком	В'язка рідина, плівка	24 ч	160	0,4... 0,8	2	-60...+200	22	-	Метали, склотекстоліт, силікатні скла, асбоскловолоконіт. Вібростійкий, стійкий в середовищі масел, палив, не викликає корозії металів
ВК-32-200	В'язка рідина	24 год	170...180	0,6...2	2	-60...+200	13	16	Метали, склотекстоліт, силікатні скла, Асбоскловолоконіт. Вібростійкий, стійкий в середовищі масел, палив; не викликає корозії металів

Продовження табл. 6.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Еластосил 11-01а, кремнійорганічний	Пасто-подібний	3 міс	20	0,01...0,1	24	-60...+200 в середовищі повітря	-	1,6	Сталь, алюміній, мідь, скло, кераміка, бетон, вулканізовані силіконові гуми. Схоплювання відбувається за 2...3 год. Для отримання максимальної міцності на металевій поверхні попередньо наносять підслою П-11
ВК-18М, фенолоформальдегідний, модифікований	В'язка рідина	-	180...200	0.03...2	3	-60...+500 (до 800 коротко-часно)	17	30	Метали, що працюють при 500 °С. Водо-, волого-, масло-, бензо- і вібростійкий. Має довготривалу міцність під навантаженням
К-300-61, епоксидний, кремнійорганічний	Пасто-подібний	2ч	20 50...60 70...80	0,05...0,3	48 10 4...6	-60...+250 (до 400 коротко-часно)	20...36	19	Метали, асбогекстоліт, асбоцемент, скло-текстоліт, пресматеріал АГ-4, кераміка, слюда, кварцеве скло, теплоізоляційні матеріали. Стійкий до органічних розчинників, кремнійорганічним маслам
К-400, епоксидний, кремнійорганічний	Теж	2ч	200 80	0,3...1	48 4	-196...+250 (до 400 коротко-часно)	20-32	19	Сталі, алюмінієві, магнієві і титанові сплави, латунь, срібло, кераміка, графіт, ситалл, склотекстоліт. Тропкостійкий, стійкий до кремнійорганічних масил
ВК-43М, карборануретановий	Пасто-подібний	3 год	100...120	0,01...0,2	4...6	-60...+400	20; 6 (400 °С)	-	Метали, вуглепластики, графіт, метали і неметалеві матеріали з спецоприттями
ВК-22, кремнійорганічний	Теж	3...4 год	20	Контактне	3...5 сут	-60...+600	25	25	Теплоізоляційні, теплозахисні матеріали з металами
ВК-15, кремнійорганічний	В'язка рідина	-	150	0,1...0,3	2	-60...+700, до 1200 коротко-часно	9	10	Сталі, титанові сплави, склотекстоліт, графіт. Стійкий в середовищі масел, бензину, вуглеводнів. Вібро- і влагомаслостійкий

Закінчення табл. 6.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ВК-20, ВК-20М, полуретан- карборано- вий	Рідкий	5...7 год	150 20 (ВК-20М) 80...90 (ВК-20М)	0,05...0,15	3 сут 3...5 сут 6 сут	-60...+400 До 800 коротко- часно До 1000 коротко- часно	19,7 8...10	-	Сталь, титанові сплави, латунь, склопластики, неметалеві матеріали з металами. Стійкий до дії масел, палив, волог, морського туману, сонячної радіації. водостійкий
ВК-36 епоксидний	Плівка товщи- ною 0,24 мм	3 міс	175	0,5... 1	3	-60...+150	33, 25 (150 °С)	-	Метали, склопластики, композиційні матеріали, стільникові конструкції
ВК-50	Плівка	3 міс	130...140	1...3	3	-60...+200	15	24	Метали, композиційні матеріали, шви газонепроникні, відсутність легких речовин. Віброводостійкий заповнює зазори до 1 мм. Еластичний. Працездатний під постійною напругою 9 МПа більше 1000 ч

Примітка: ВК-9 – застосовується також для виготовлення ріжучого інструменту (розгорток, мітчиків, протяжок, калібрів, абразивного інструменту).

Позначення: T – температура; P – тиск; τ – час затверднення; $\sigma_{зсув}$ – межа міцності при зсуві; $\sigma_{відр}$ – межа міцності при рівномірному відриві.

Властивості і призначення клеїв для склеювання гуми між собою і з іншими матеріалами

Марка клею, хімічна основа	Життєздатність (строк зберігання)	Режим отвердіння		Інтервал робочих температур, °С	Міцність з'єднання		Призначення клею і властивості сполук	
		T, °С	p, МПа		τ, год	σ _р , σ _{откл} , МПа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
88-НП, наіріт	6 міс	20	0,02	24	-40...+70	Гума зі сталлю	2-0 (σ _{откл}) 1,1 (σ _р)	Вулканізовані гуми загального призначення з металами, склом, гумою та ін. матеріалами. Не стійкий до тривалого впливу води і розчинів ки-слот
Лейконаг, ізоцанат	1,5 роки	За ре-жимом вулкані-зації	-	-	-60...+130	Гума П-64а або 3826 з металами	-	Невулканізовані гуми на основі наіритового, нітрильного, стирольного каучуків зі сталлю, алюмінієм, латунню
ЛН, наіріт	1 рік	20	0,02...0,05	24	-60...+120	Гума з металами	2,4 (σ _{откл})	Гуми типу НО-68-1 та інші з металами, пластмасами, деревом та ін. матеріалами
НТ-150-1, наі-ріт	-	20	Контактне	24...48	-50...+60	Гума НО-68-1 зі сталлю	1,2...1,5 (σ _{откл})	Гуми типу НО-68-1 з металами, гуми з гумою хо-лодним способом
51К-41	-	20	Теж	24	-60...+250	-	-	Фторкаучуки та гумовотканинні матеріали
СФ-2а, бутадієнні-рильний	6 міс	20	Теж	24	-60...+80	-	-	Гуми на основі етиленпропіленового каучуку з ме-талами. Рекомендуються замість 88-НП
51-К-34, наіріт	6 міс	20	Теж	24	-40...+70	-	-	Гуми загального призначення між собою та з інші-ми матеріалами.
51-К-36, наіріт	6 міс	20	Теж	24	-50...+70	-	-	Теж
Ціакрін СО-9	8 міс	20	Теж	24	-60...+100	Гума з металом	1,4...4,0 (σ _р)	Всі марки гум, крім силіконових до металів та між собою.
КТ-75"К", кремній-органічний	-	20	Теж	48	-60...+300	Гума ИРП-1401 зі сталлю 30ХГСА	1,8 (σ _р)	Вулканізовані кремнійорганічні гуми до металів, невулканізовані силіконові гуми до металів у про-цесі вулканізації.

Продовження табл. 6.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Еластосіл 11-01 «Б», кремній-органічний	6 міс	20	0,02...0,03	Не менш 2	-60...+200	Гума ІРП-1338 сІРП-1338 Гума ІРП-1266 з алюмінієм	1,96 ($\sigma_{отсл}$) 1,6 ($\sigma_{отсл}$)	Кремнійорганічні гуми між собою та металами
КР-5-18, бутадієнїт-рильний	-	20	Контактне	48	-60...+80	Гума 203Б зі сталлю	4,8 ($\sigma_{отсл}$)	Вулканізовані та невулканізовані гуми на основі нїтрильних каучуків з металами та склотканиною. З'єднання масло- та паливостійкі
88-СА, наїрїт	6 міс	20	Теж	24	-60...+60	Гума 56 зі сталлю, алюмінієм	1,3 (σ_p) 2,5 ($\sigma_{отсл}$)	Гуми загального призначення з металами, склом, ін. матеріалами та гуми з гумами. Рекомендуються замість 88-НП
ВКР-7, бутадієн-нїтрильний	-	20	-	-	-60...+80	Див. призначення клею	12 ($\sigma_{отсл}$)	Вулканізовані гуми на основі нїтрильного та фторкаучуку
51-К-10, наїрїт	6 год	20	-	-	-60...+80	Гума НО-68-1 з алюмінієм	2,5...6,0 ($\sigma_{отсл}$)	Вулканізовані гуми різної хїмічної природи зі сталлю та ін. матеріалами
78-БЦС-П, наїрїт, неопрен	3 міс	20	-	-	-60...+70	Гума з металом	Не менш 1,3 (σ_p) 2,5 ($\sigma_{отсл}$)	Гуми загального призначення з металами та іншими матеріалами
УП-5-247, епоксидний	20 100	20	0,05	3...7 дїб 50 хв	-60...+150	Гума і ІРП-1316	9,8 (σ_p)	Гуми загального призначення та фторорганічні гуми. З'єднання тепло- та маслостійкі
51-К-13, хлор-бутадієновий і метилвініл-церезиновий, каучуки	3 міс	В процесі вулканізації	-60...+70			Гума ІРП-1390 зі сталлю	Не менш 4,0 (σ_p)	Гуми марки ІРП-1390 спільно з праймером 51-К-19 до металу з наступною вулканізацією, для кріплення гум на основі канчуків НК, СКІ, СКМС-10 у процесі вулканізації. З'єднання стійке до динамічним навантаженням

З а к і н ч е н н я т а б л . 6 . 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
51-К-26, 51-К-27, хлор- бутил- каучук	3 міс	В процесі вулканізації	-60...+120			(Див. при- значення клею)	-	Гуми 51-1632, 51-1639 до металу спільно з праймером 51-К-19 і покривним клеєм 51-К-24 з подальшою вулканізацією
51-К-22, натуральний каучук	6 міс	Теж	-60...+90			Полубоніт 51-1629 зі сталлю	Не менш 3,5 (σ_p)	Напівбоніт 51-1629 до металу з подальшою вулканізацією
Еластосил 137-83, кремній- органічний	6 міс	20	0,01...0,1	24	130...+300	(Див. при- значення клею)	1,5 ($\sigma_{отсл}$) 2,0 (σ_p)	Кремнійорганічні гуми до металу. Для склеювання та герметизації виробів зі скла, кераміки, алюмінію, міді та інших матеріалів

Використовується також як конструкційний клей.

П о з н а ч е н н я : T – температура затверднення, вулканізації; P – тиск при затвердненні; τ – час витримки при
зазначених температурі і тиску; $\sigma_{відр}$ – міцність клейового з'єднання при рівномірному відриві; $\sigma_{відш}$ – міцність клейо-
вого з'єднання при відшаруванні.

Властивості і призначення клеїв для виготовлення інструменту

Марка клею, хімічна основа	Фізичний стан	Життє- здатність (строк збе- рігання)	Режим отвердіння			Термо- стійкість, °С	Кт, МПа/°С	Міцність при зсуві, $\sigma_{\text{зсув}}$, МПа	Інструмент, який виготовляється
			T, °С	P, МПа	τ , год				
УП-5-207, епоксидний	Пасто- подібний	1 рік	150	Кон- тактне	0,5	200	–	49 (Ст45 с Т15К6)	Розточні і підрізні різці, фрези, проляжка, зубчасті колеса, свердла, долбяки, розгортки, мітчики
ТКЛ-75, епоксидкремній- органічний	Теж	4 год	20 80 150	Кон- тактне	48 4...6 3	300	0,0794	29	Протягання, розточувальні різці, абразивний і допоміжний інструмент
ВК-2, поліуретан- карборановий	Теж	4...7 год	150	0,03... 0,05	3	До 700 корот- кочасно	0,0333	20	Матеріали надтверді (карбонудо, ельбор та ін.). З малою поверхнею. Виготовлення різців, фрез, свердел, розгорток, мітчиків
ВК-2И, поліуретановий	Теж	8 год	220	0,03... 0,15	3	400, 700 корот- кочасне	0,0117	25	Різці, розгортки, теплонапружені інструменти
КТИ-1, епоксидний	Таблет- ки, по- рошок	1 год	180	Кон- тактне	2	200	0,106	63 (зрушення при стисканні)	Різці розточувальні і з механічним кріпленням, фрези, мітчики, спиральні свердла
ВК-31, епоксидний	Плівка	3 міс	175	0,5...1,0	1,5	150	0,231	72	Штампи, великобаритні інструменти
ВК-28, епоксидний, модифікований карборан, що містить сполуки	В'язка рідина	1 міс	150...200	0,02	1,2	250	–	10...14	Кінцевий інструмент з твердосплавною робочою частиною і сталевими корпусами, розгортки, метчики, різці, калібри та ін.

Позначення: T – температура затверднення; P – тиск при затвердненні; τ – час витримки при зазначених тем-
пературі і тиску; КТ – коефіцієнт температурної чутливості.

Контрольні запитання

1. Як здійснюється аналіз якості з'єднання у виробничих умовах?
2. Як можна підвищити механічні показники з'єднань внахлестку?
3. Які недоліки мають клейові з'єднання?
4. Як обрати спосіб склеювання деталей?
5. Який порядок розрахунку міцності клеєного з'єднання.

ГЕРМЕТИЗАЦІЯ

Герметизація полімерними матеріалами – повна ізоляція окремих частин або виробу від зовнішнього середовища і різних зовнішніх впливів: механічних, електричних та ін. – дозволяє вирішити такі завдання [40]:

- 1) захист апаратури від впливу кліматичних факторів, наприклад підвищеної вологості в поєднанні з високою температурою, інею, роси, негативних температур, пилу, сонячної радіації;
- 2) захист апаратури від впливу біологічного середовища (грибкові цвілі та інші мікроорганізми) і агресивних рідких і газових середовищ;
- 3) захист внутрішньої і зовнішньої електричної ізоляції апаратури;
- 4) захист елементів апаратури від пошкодження внаслідок механічних навантажень – статичного, ударного, вібраційного та ін.

7.1. Герметизуючі матеріали

Як герметизуючі матеріали використовують герметики, компаунди, лаки і емалі [40-41].

Герметики – це рідкі або в'язкотекучі склади з полімерів і мінеральних наповнювачів, здатні при кімнатній температурі перетворюватися в еластичну гумоноподібну масу.

Компаунди – багатокомпонентні суміші, які в момент застосування знаходяться в рідкому стані, а потім отверджуються.

Лаки – розчини природних або синтетичних плівкоутворювальних речовин в органічних розчинниках.

Емалі – суспензії пігментів і наповнювачів в лаках. Після нанесення тонким шаром на підложку і висихання лаки утворюють прозорі, а емалі – непрозорі покриття.

Як полімерні основи для приготування заливних компаундів і герметиків застосовують епоксидні, поліефірні олігомери, кремнійорганічні полімери, поліуретани та ін. В герметизуючі склади вводять наповнювачі, пластифікатори, прискорювачі отвердіння (вулканізації), пігменти. Як наповнювачі застосовують пилоподібний кварцевий пісок, мелене кварцеве скло, порцеляновил пил,

слядяне борошно, оксиди металів та ін. Як отверджувачі гарячого отвердіння – малеїновий ангідрид (МА), фталевий ангідрид (ФА), гексагідрофталевий ангідрид (ГГФА), метилтетрагідрофталевий ангідрид (МТГФА), триетаноламін (ТЕА), метафенілендіамін (МФД) та ін. Для холодного отвердіння – гексаметилендіамін (ГМД), діетілентріамін (ДЕТА), поліетиленполіамін (ПЕПА) та ін.

7.2. Способи герметизації

Герметизація полімерними матеріалами здійснюється різними способами: заливкою, обпресуванням, обгортанням, зануренням, просочуванням та ін. [40-41].

Заливкою – виріб, який герметизується, поміщається в спеціальний кожух. Герметизуючий матеріал заливають в кожух, потім проводять обробку з метою затверднення полімерної заливальної композиції. Після затверднення композиції виріб з кожуха не виймається.

Опресовування – лиття під тиском герметизуючого матеріалу в форму, в яку попередньо встановлюють виріб. Герметизуючий матеріал, заповнює форму і отверджується.

Обволікання – створення на поверхні виробів шару герметизуючого матеріалу. Цим способом не досягається повна ізоляція виробу, деякі частини виробу залишаються негерметизованими. Герметизацію проводять у формах закритого типу.

Занурення – виріб занурюють у посудину з герметизуючим матеріалом, потім виймають і піддають отвердінню. Під час занурення або після нього виріб іноді піддають вібрації, щоб забезпечити більшу рівномірність товщини покриття і запобігти утворенню на нижніх поверхнях потьоків і крапель.

Просочення – заповнення герметизуючим складом пір і капілярів в волокнистих електроізоляційних матеріалах: бавовняних, шовкових, азбестових тканинах, папері, склотканині, картону. При цьому заповнюються проміжки між такими конструктивними елементами, як витки проводу в котушках трансформаторів і дроселів. При просочуванні вироби занурюють на певний час в просочувальний компаунд, нагрітий до заданої температури.

Підготовку металевих поверхонь корпусів під герметизацію проводять тими ж способами, що і при склеюванні.

Незалежно від способу герметизації існує ряд загальних технологічних операцій: підготовка виробів і форм, приготування компаунда, просочення (або заливка), отвердіння герметизуючого матеріалу, завершальні операції.

7.3. Обладнання для герметизації

Якість герметизованих виробів і продуктивність технологічних процесів герметизації багато в чому залежать від застосовуваного обладнання для перемішування вихідних продуктів і вакуумування сумішей компонентів в процесі перемішування і при подальших операціях, від точного дотримання встановлених режимів перемішування, заливки або просочення, отвердіння [40-41].

Устаткування для герметизації виробів полімерними матеріалами включає стандартні і спеціальні пристрої для приготування і перемішування компонентів, сушка та заливання, в тому числі під вакуумом, отвердіння та ін. (рис. 7.1).

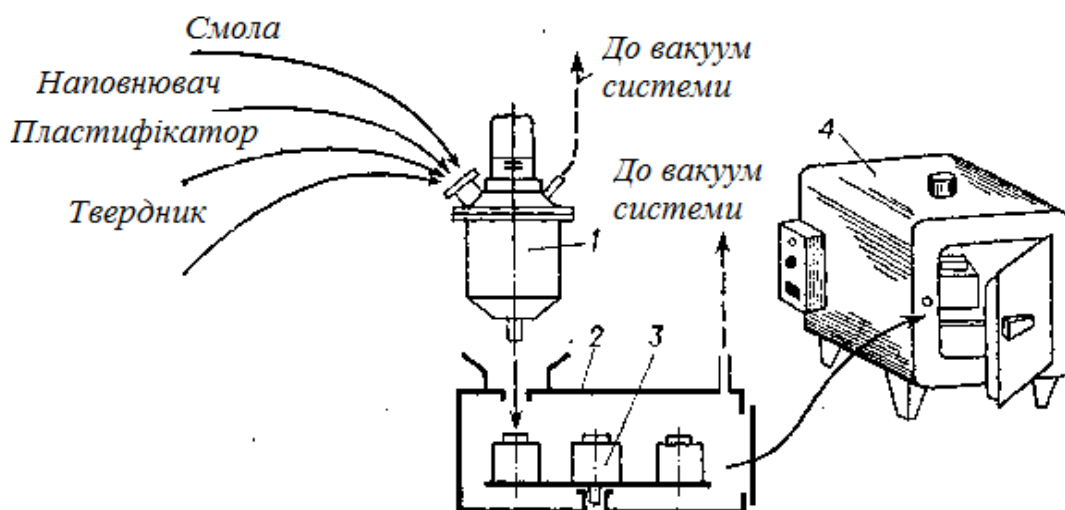


Рисунок 7.1. Схема установки періодичного процесу герметизації:
1 – змішувач; 2 – розливна камера; 3 – виріб у формі; 4 – камера тверднення

Сьогодні в промисловості не випускаються стандартні установки для герметизації виробів полімерними матеріалами. Це пояснюється не тільки відносною новизною відповідних технологічних процесів, а й порівняно невеликими обсягами серій (при широкій номенклатурі) герметизованих виробів. Поки що спеціальне технологічне обладнання виготовляється для кожного підприємства індивідуально, з урахуванням особливостей конкретних виробів. Діючі варіанти

цього обладнання – змішувачі, установки для вакуумного просочення і заливки та ін. – різноманітні. Найбільш широко застосовується зараз періодичний процес, при якому за один технологічний цикл готується і повністю використовується певна кількість компаунда (рис. 7.1).

Послідовність операцій при цьому така. Спочатку визначають необхідну кількість компаунда для заливки одного або декількох виробів; заздалегідь розраховують навішування необхідних компонентів (смола, наповнювач, пластифікатор, твердник та ін.) за умови, що компаунд буде використаний для одноразової заливки у весь, без залишку.

Зі смолою послідовно змішують наповнювач, пластифікатор та інші компоненти. В останню чергу вводять прискорювачі і твердники.

Потім проводять заливку виробів за годину, що визначається життєздатністю компаунда.

Після кожного технологічного циклу усе приладдя, що було в контакті з компаундом, ретельно очищають і готують до наступного циклу.

Такий технологічний процес – універсальний, не вимагає занадто складного обладнання і з успіхом застосовується в дрібносерійному виробництві. Однак він відрізняється низькою продуктивністю і якістю продукції через застосування ручної праці та можливих помилок оператора. Наприклад, при змішуванні компонентів не тільки різним операторам, але і одному робітникові важко забезпечити однакову тривалість для різних технологічних циклів.

Неперервні процеси герметизації, пов'язані з рівнем автоматизації, менш універсальні, але дозволяють повисити техніко-економічні показники, якість продукції. Установки для неперервних процесів включають в себе такі системи: автоматичного дозування, подачі і змішування компонентів, контролю і регулювання температур та ін. (рис. 7.2).

Компоненти щодо ліній живлення з окремих ємностей 1, 2, 4 і 7, проходячи через дозуючі насоси 6 і живильник 8, надходять у змішувач 9, де перемішуються, і готовий компаунд розливається у вакуумній камері 10 у форми 13, які по транспортеру 14 надходять в камеру отвердіння 12.

Подібні неперервні технологічні установки зазвичай підбирають під певний компаунд, а не навпаки. Найбільш складна система тут дозуюча. Принципи дозування можуть бути різними. В одних випадках встановлюють насоси різних типів: шестерні, поршневі, діафрагмні або черв'ячні. Вони бувають відрегульовані на різні співвідношення компонентів і забезпечують різні швидкості

їх подачі. В інших випадках компоненти подають під тиском за допомогою дозуючих циліндрів або з використанням спеціальних дозуючих клапанів. Компоненти видавлюють стисненим повітрям, причому розміри порцій можна змінювати й устанавлювати заздалегідь.

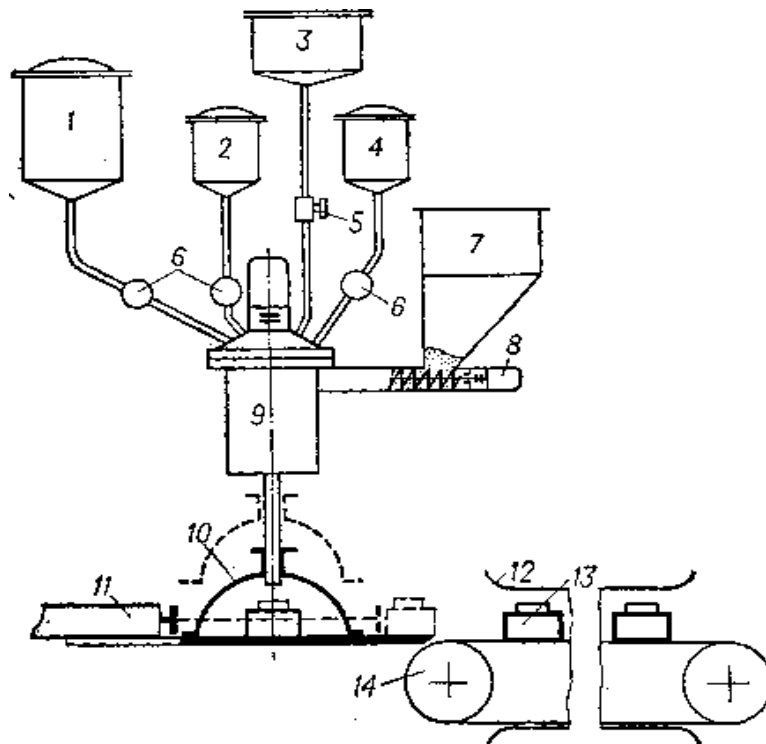


Рисунок 7.2. Схема устанавки неперервного процесу герметизації:

1 – ємність для смоли; 2 – ємність для пластифікатора; 3 – ємність з розчинником; 4 – ємність для отверджувача; 5 – кран дистанційного керування; 6 – дозуючі насоси для подачі смоли, пластифікатора, твердника; 7 – бункер для наповнювача; 8 – дозуючий живильник; 9 – змішувач; 10 – рухома розливна вакуумна камера; 11 – штовхач; 12 – камера неперервної дії для твердіння компаунда; 13 – виріб у формі; 14 – транспортер

Застосування неперервного технологічного процесу особливо доцільно в разі герметизації однотипних масових виробів. Розробка автоматичних установок для герметизації різноманітних виробів є досить складним завданням через відмінності в рецептурах, режимах приготування компаундів, коливань в широкіх межах показників в'язкості і жізнездатності компаундів, різних об'ємів маси, яка заливається та ін.

Обладнання для герметизації має відповідати таким вимогам:

1) деталі обладнання, що контактують з компаундом, повинні мати до нього погану адгезію;

- 2) застосовуються пристрої, що запобігають отвердненню компаунда в змішувачі або дозволяють швидко очистити обладнання від заполімеризованої маси;
- 3) мінімальний знос деталей від абразивної дії і швидка заміна, що вийшли з ладу деталей;
- 4) наявність герметичності системи, підтримання необхідних значень розбавлення і швидкості його досягнення, контроль заданих параметрів;
- 5) надійність і точність використовуваної апаратури для контролю;
- 6) універсальність по відношенню до перероблюваних матеріалів і дотримання дози.

Важко припустити можливість ідеального поєднання всіх зазначених вимог. Але необхідно прагнути до досягнення максимально високої продуктивності устаткування.

7.3.1. Стандартне обладнання

Для будь-яких процесів герметизації полімерними матеріалами (безперервних, періодичних) необхідне стандартне обладнання, а саме [40-41]:

- 1) термостати (сушильні шафи), призначені для смоли, наповнювача, форм, для попередньої сушки виробів, а також для отвердіння герметизуючих матеріалів у виробках;
- 2) муфельні печі для прожарювання неорганічних наповнювачів;
- 3) мірні скляні циліндри, регульовані дозувальні насоси або автоматичні ваги, для швидкого дозування компаундів;
- 4) пристрої для створення вакууму при сушінні і перемішуванні герметизуючого матеріалу, а також у процесі просочення і заливки;
- 5) прилади для регулювання і контролю температур.

Термостати вибирають залежно від номенклатури і габаритів виробів. Максимальна робоча температура цих апаратів 200–250 °С, а перепад температур в робочому об'ємі не повинен перевищувати $\pm 2,5$ °С.

У лабораторних умовах (а також при переробці малих обсягів матеріалу і герметизації малогабаритних виробів) широко застосовують термостати з робочим об'ємом 0,027 м³ і максимальною робочою температурою від 100 до 200 °С, а при герметизації великогабаритних виробів – сушильні шафи: типу СНОЛ, Ш-0,05м, ШС-6.

Муфельні печі застосовують для прожарювання неорганічних наповнювачів, наприклад кварцового піску, з метою видалення вологи, органічних включень та ін. Зазвичай використовуються муфельні печі з максимальною робочою температурою до 1000 °С.

Сушка та просочування, а також заливка виробів може здійснюватися у вакуумних термостатах. При невеликій кількості малогабаритних виробів з успіхом можуть використовуватися вакуумні термостати типу ВШ-0033. Їх максимальна робоча температура 200 °С. Вакуумний термостат ВШ-0033 поставляється в комплекті з форвакуумним насосом типу ВН-461М з фільтром і вакуумметром.

При застосуванні нестандартного обладнання для сушки, просочення, заливки і приготування компаундів, а також для видалення повітря з вакуумованих камер використовуються форвакуумні насоси тину РВН-20, ВН-2МГ, ВН-6Г, ВН-1, ВН-2. Насоси РВН-20, ВН-2МГ рекомендується застосовувати для відкачування невеликих обсягів (0,1–0,5 м³); насоси ВН-1 і ВН-6Г – для відкачування об'ємів 0,5–1,5 м³.

Пропускна здатність вакуумних шлангів або трубопроводів не залежить від продуктивності насосів. Тому діаметр шланга або трубопроводу приймається таким же, як і діаметр отвору всмоктування насоса. Насоси необхідно розташовувати по можливості ближче до об'єкта відкачування. З метою запобігання потрапляння парів води і продуктів виділення компаунда у вакуумному насосі між насосом і об'єктом відкачування зазвичай встановлюють систему фільтрів. Орієнтовна схема вакуумної системи установок для герметизації полімерними матеріалами подана на рис. 7.3.

З'єднання шлангів і трубопроводів між елементами вакуумної системи мають виключати потрапляння зовнішнього повітря в систему. При відкочені системи до рівня залишкового тиску 133 Па (1 мм рт. ст) після перекриття насоса натікання має бути не більше 133 Па (1 мм рт. ст) за 10 хв.

Для нормальної експлуатації вакуумного насоса 1 необхідно через тричотири години роботи промивати насос гарячою олією і заливати свіжим вакуумним маслом.

З конденсаційної колонки 5 через кожні 24 год необхідно зливати зконденсовану вологу; силікагель 6 і фільтруючі прокладки 7 у фільтрах-пастках 8 треба міняти два рази на рік.

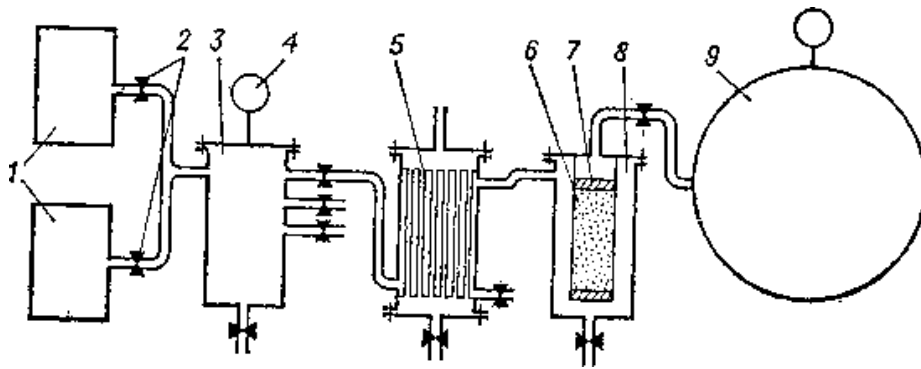


Рисунок 7.3. Орієнтовна схема вакуумної системи установок для герметизації полімерними матеріалами:

1 – вакуумні насоси; 2 – вакуумні крани; 3 – масловідбивальний бачок; 4 – вакуумметр; 5 – колонка для конденсації водяної пари; 6 – силікагель; 7 – повстяні фільтруючі прокладки; 8 – фільтр – пастка; 9 – об'єкт відкачування.

Для установки, регулювання і контролю температур в робочих об'ємах термостатів, сушильних шаф, змішувачів використовуються лабораторні та технічні термометри, а також електронні автоматичні потенціометри і мости. Потенціометри призначені для роботи в комплексі з термометрами стандартних градувань. Електронні автоматичні мости призначені для роботи в комплекті з платиновими і мідними термометрами опору стандартних градувань.

За призначенням і способом відліку вимірюваної величини всі електронні потенціометри і мости поділяють на такі що вказують і самописні (останні є одночасно і і такими, що вказують). Самописні прилади виготовляють із записом температури залежно від часу або в прямокутних координатах на стрічковому діаграмному папері, або в полярних координатах на дисковому папері. Для контролю і регулювання температур рекомендується використовувати прилади типу ЕПВП, ЕПД, ЕПП, ПС і ПСР.

7.3.2. Спеціальне технологічне обладнання

До спеціального технологічного устаткування для герметизації виробів полімерними матеріалами належать змішувачі та камери для просочення і заливки під вакуумом (просочення і заливка зазвичай виконуються на однотипному технологічному обладнанні) [40-41].

Компаунди гарячого отвердіння готують у вакуумних обігріваних змішувачах. Змішувач являє собою герметичну ємність з системою обігріву, здійснюваного за рахунок рідкого теплоносія, шляхом індуктивного нагріву або за до-

помогою електричних нагрівачів. Як рідкий теплоносії використовують масло, водяну пару, органічні рідини. Електрообігрів більш прогресивний, оскільки він дозволяє точніше управляти температурним режимом, характеризується він високим коефіцієнтом корисної дії, великою надійністю.

За конструктивним виконанням мішалки, які найчастіше застосовуються, діляться на листові, пропелерні, якірні та рамні (рис. 7.4). При низкій в'язкості суміші компонентів ефективні будь-які типи мішалок, оскільки здійснюються порівняно високі тангенціальні швидкості суміші під стінками, і отже, поліпшується теплообмін. Якщо в'язкість суміші більше 1 Па·с (10 П), то різко знижується ефективність (погіршується теплообмін) листових і пропелерних мішалок, але вона зберігається для якірних і рамних. При цьому чим менше зазор між лопатями мішалки і стінкою змішувача, тим вище коефіцієнт тепловіддачі.

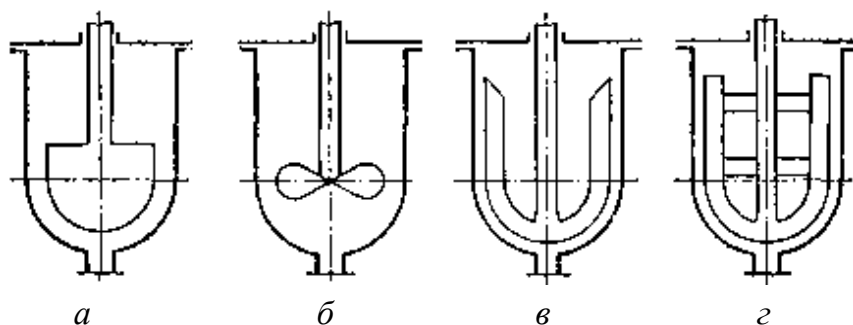


Рисунок 7.4. Типи мішалок:

a – листовая; *б* – пропелерна; *в* – якірна; *г* – рамна

Індукційний нагрів – це різновид електрообігріву. При індукційному нагріванні стінки змішувача є сердечником трансформатора, обмотки якого розташовані навколо змішувача (обмотка має бути добре ізольована від стінок змішувача).

Конструкція корпусу змішувача багато в чому залежить від способу його обігріву. Змішувач обладнується мішалкою для перемішування суміші компонентів. Конструкція мішалки повинна забезпечувати високий коефіцієнт тепловіддачі від стінок змішувача до суміші компонентів, достатню інтенсивність перемішування і мінімальні витрати електроенергії на перемішування.

На практиці, враховуючи в'язкість герметизуючого матеріалу, просочувальні компаунди готують у змішувачах з пропелерними мішалками (рис. 7.5). У таких змішувачах проводять сушку і перемішування компонентів нена-

повнених компаундов. Рекомендована частота обертання мішалки від 100 до 500 об/хв.

Для наповнених заливальних компаундів рекомендується використовувати змішувачі, обладнані якірними мішалками (рис. 7.6). На внутрішній поверхні кришки вакуумного змішувача з якірною мішалкою зміцнюють вертикальні перегородки (пальці) 3. Завдяки невеликим проміжкам між краями лопатей мішалки 4 і стінками змішувача досягається хороше перемішування і вакуумування компаунду. Зазор між мішалкою і стінками змішувача зазвичай становить 3–5 мм. Рівень компаунду в змішувачі не має перевищувати $2/3$ висоти ємності, решта об'єму зазвичай заповнюється піною, що виникає при вакуумуванні. Оскільки піна, що утворилася, перешкоджає видаленню повітря з компаунду при вакуумуванні, доцільно вибирати ємність за можливістю великого діаметра. Частоту обертання якірної мішалки зазвичай вибирають у межах 50–200 об/хв.

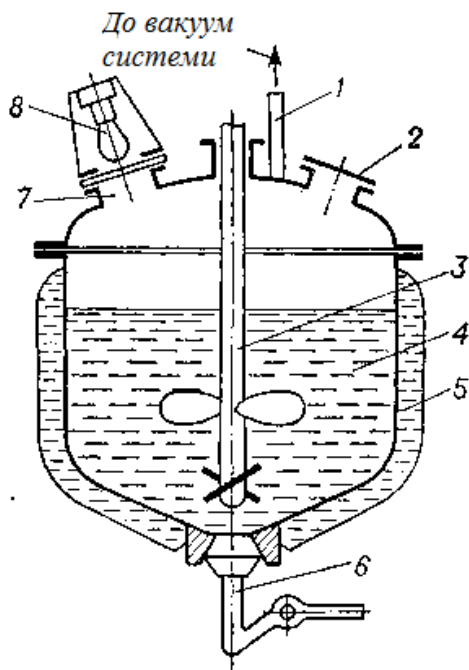


Рисунок 7.5. Схема змішувача з пропелерною мішалкою для ненаповнених компаундів

- 2 – завантажувальне вікно;
- 3 – пропелерна мішалка;
- 4 – суміш компонентів;
- 5 – масляна оболонка;
- 6 – запірний клапан;
- 7 – оглядове вікно;
- 8 – освітлювальна лампа

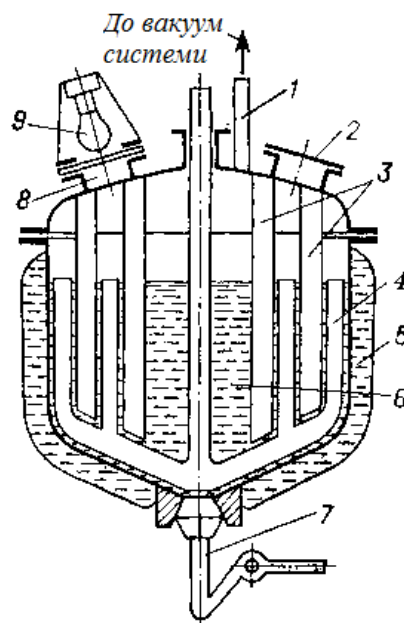


Рисунок 7.6. Схема змішувача з якірною мішалкою для наповнених компаундів

- 2 – завантажувальне вікно;
- 3 – нерухомі перегородки;
- 4 – якірна мішалка;
- 5 – масляна оболонка;
- 6 – суміш компонентів;
- 7 – запірний клапан;
- 8 – оглядове вікно;
- 9 – освітлювальна лампа

Заливку низков'язкими компаундами можна здійснювати при атмосферному тиску. В цьому випадку компаунд зі змішувача розливається безпосередньо в форми.

Змішувачі можна встановлювати, наприклад, на колоні (рис. 7.7) так, щоб було зручно заливати форми самих різних габаритів.

Змішувач, зображений на рис. 7.7, призначений для приготування просочувальних і заливальних епоксидних компаундів. Він має такі технічні характеристики:

Об'єм змішувача, л	3
Максимальна температура суміші компонентів, °С	160
Тривалість нагрівання суміші компонентів від 20 до 160 °С, хв ..	90
Максимальне розбавлення, кПа	до 0,67
мм рт. ст	до 5
Тиск стисненого повітря в змішувачі, МПа	0,2
кгс/см ²	2
Висота підйому змішувача (нижньої частини) від рівня підлоги, мм	700–1300
Габарити змішувача, мм	900 × 400 × 2200

Колона 2 являє собою зварену конструкцію з труби і фланця. Колона закріплюється в стійці 1 так, що має можливість вільно повертатися щодо стійки.

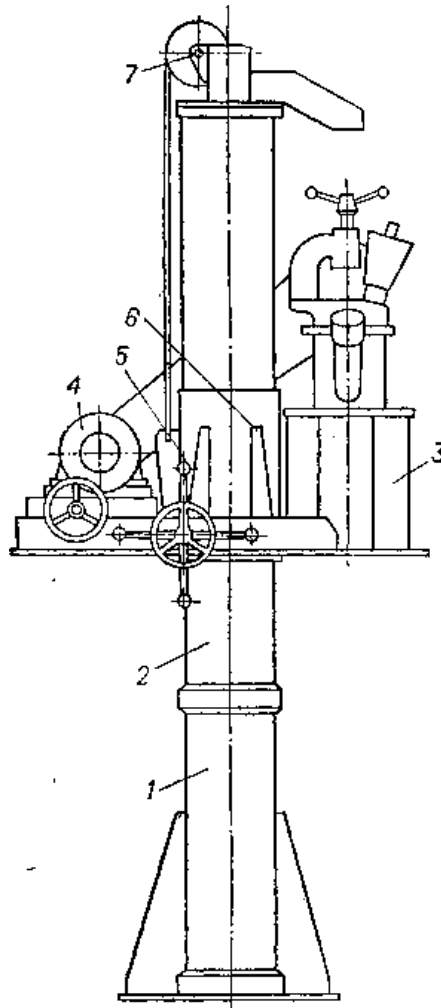


Рисунок 7.7. Поворотний змішувач для низьков'язких компаундів, встановлений на колоні:

1 – стійка; 2 – колона; 3 – змішувач; 4 – привід змішувача;
5 – штурвал; 6 – рухливий корпус; 7 – вилка

У верхній частині колони знаходиться вилка 7, на осі якої закріплена зірочка. Через зірочку перекинтий ланцюг, один кінець якого кріпиться до рухомого корпусу 6, а другий – до протизваги, що знаходиться всередині колони. Корпус 6 може переміщатися уздовж колони і повертатися разом з колоною на 180° . Переміщення корпусу здійснюється за рахунок рейкової передачі. Рейка виконана на колоні, а шестерня – на корпусі і приводиться в обертання штурвалом 5. Після переміщення корпусу на необхідну висоту він кріпиться до колони тангенціальним затискачем, маховичок якого встановлений на осі штурвала. На рухомому корпусі 6 змонтований змішувач 3 для компаунда і привід змішувача 4.

Змішувач 3 призначений для приготування і вакуумування суміші епоксидних смол з отвердниками. Змішувач має індукційний обігрів. Між індуктором

і корпусом ємності розташована масляна оболонка, яка виконана спідбно з корпусом і забезпечує рівномірність нагріву суміші. Суміш компонентів перемішується мішалкою, що обертається з частотою 400 об/хв. Обертання мішалки здійснюється електродвигуном через клиноременну і зубчасту передачі. Змішувач обладнаний оглядовим вікном і світильником для освітлення внутрішньої порожнини ємності. Температура регулюється автоматично.

Компоненти суміші завантажують через люк, розташований в корпусі змішувача. Для охолодження вузла ущільнення штоку мішалки до кришки змішувача підводиться вода (на рис. 7.7 не показано).

Приклад стаціонарно встановленого змішувача з якірною мішалкою, що застосовується в періодичному процесі герметизації виробів полімерними матеріалами (див. рис. 7.1), подано на рис. 7.8. Змішувач дозволяє здійснювати заливку або просочення. Розглянемо на цьому прикладі основні етапи вакуумної заливки.

Компоненти герметизуючого матеріалу поміщають в змішувач 1, а вироби, встановлені у залівальні форми 3, в нижню вакуумну камеру 2. Потім двері і кришки закривають, і система вакуумується. Компаунд в змішувачі перемішується і з нього видаляють леткі продукти. Оператор спостерігає за станом компаунду, який перемішується, в спеціальне оглядове вікно і регулює залишковий тиск. Вважається, що компаунд відвакуумований, коли припинили виділятися бульбашки повітря на поверхні компаунду. Одночасно вакуумується і нижня камера, а встановлені під заливку форми з виробами нагріваються до необхідної температури для прискорення видалення вологи та інших летких. Тривалість вакуумування і сушки зазвичай 10–40 хв залежно від маси форми, температури і складу летких. Переконавшись, що вироби нагріті до потрібної температури і припинилося виділення бульбашок з компаунду, оператор відкриває кран змішувача, під яким знаходиться одна з залівальних форм. Спостерігаючи потім через оглядове скло нижньої камери, оператор обертає поворотний стіл, яким ця камера обладнана, так, щоб заповнити всі форми з встановленими в них виробами. Як тільки всі вироби виявляються залитими, подачу матеріалу зі змішувача припиняють, і вакуум в змішувачі і камері знімають.

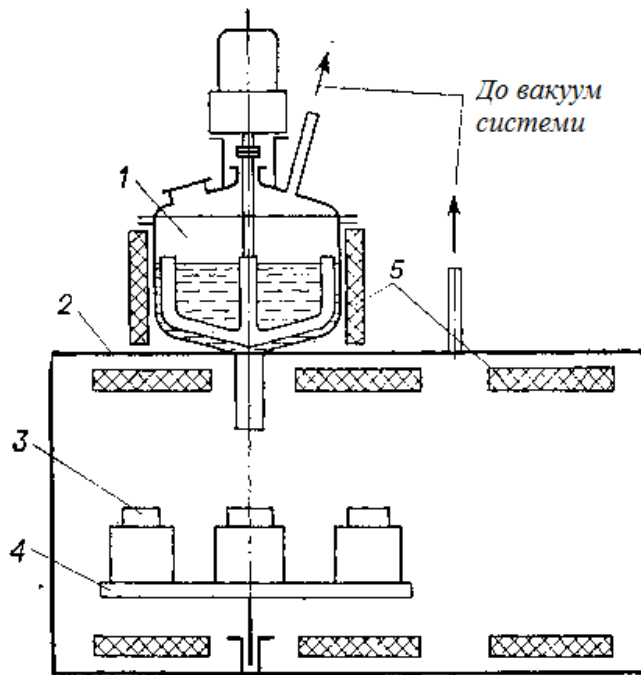


Рисунок 7.8. Стандартно встановлений змішувач з якірною мішалкою:

- 1 – змішувач; 2 – вакуумна камера; 3 – форми з виробами;
4 – поворотний стіл; 5 – нагрівальні елементи

Залиті вироби або залишають в камері при певній температурі, або видаляють з камери і поміщають в сушильну шафу для подальшого твердіння компаунда. Як тільки встановлена чергова партія форм з виробами, що підлягають заливці, і знову наповнений змішувач компаундом, установка вважається готовою до наступного технологічного циклу.

У деяких установках для герметизації змішувач виконаний як автономний апарат, приєднаний до вакуумної камери в момент просочення або заливки. Таке конструкторське рішення доцільно при приготуванні і використанні великих обсягів компаунда. Автономний змішувач з якірною мішалкою, встановлений на пересувній платформі, легко переміщується по цеху, що полегшує його завантаження компонентами (див. рис. 7.8).

У виробничих установках для просочення і заливки часто комбінують вакуумну камеру (в якості якої використовують спеціально обладнаний автоклав) і знімний змішувач (рис. 7.9). Одна з таких установок має такі технічні характеристики:

Внутрішній діаметр змішувача, мм	400
Висота змішувача (оболонки з конусом), мм	626
Об'єм змішувача, л	70

Внутрішній діаметр автоклава, мм	1200
Висота автоклава, мм	1 750
Об'єм автоклава, л	1800
Максимальна робоча температура, °С	
в змішувачі	160
в автоклаві	180
Максимальне розбавлення, кПа	0,4
мм рт. ст	3
Робочий надлишковий тиск, МПа	0,4
кгс/см ²	4
Тип вакуумного насоса	ВН-6Г
Швидкість відкачки в інтервалі тиску 100–0,1 кПа (760–1 мм рт. ст.), л/с	120
Максимальні габарити заливаємих виробів, мм	800 × 1000 × 1000

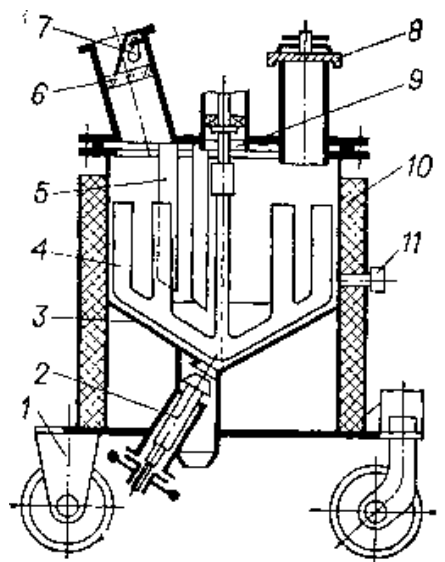


Рисунок 7.9 – Автономний вакуумний змішувач з якірною мішалкою:

1 – візок; 2 – зливний вентиль; 3 – ємність; 4 – якірна мішалка; 5 – нерухомі перегородки (пальці); 6 – оглядове вікно; 7 – освітлювальна лампа; 8 – завантажувальне вікно; 9 – сальник осі мішалки; 10 – індукційний обігрів; 11 – термопара

У робочому об'ємі автоклава, що є вакуумною камерою, може бути створено не тільки знижений, але і надлишковий тиск (рис. 7.10). Автоклав обладнаний системою обігріву, оглядовими вікнами 3 і допоміжними пристроями. Усередині автоклава розташований пристрій у вигляді поворотного столу 5 для подачі форм з виробами для герметизації під залівальну воронку. Залівальна воронка і стіл переміщуються за допомогою штурвалів 6, з'єднаних з системою

передач. Вали штурвалів проходять через спеціальні сальникові пристрої, які забезпечують герметичність.

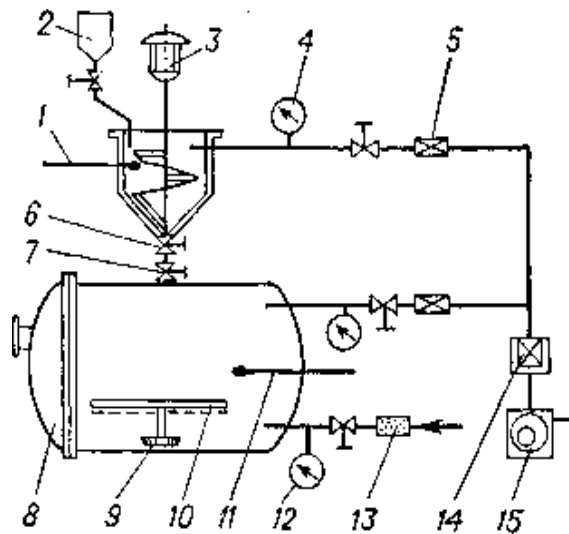


Рисунок 7.10. Установка для просочення і заливки виробів епоксидними компаундами:

1, 11 – термопари, 2 – посудина для розплавлення отверджувача; 3 – привід мішалки; 4 – вакуумметр; 5 – фільтр (пастка); 6 – зливний кран; 7 – кран для заливки; 8 – автоклав; 9 – механізм повороту; 10 – поворотний стіл; 12 – манометр; 13 – осушувач; 14 – конденсатор; 15 – вакуумний насос

Отвердіння компаунда після заливки виробів в подібних установках відбувається в сушильних шафах по заданому температурно-годинному режиму.

Для поліпшення механічних і електричних властивостей герметизуючих матеріалів початкове отвердіння (протягом 4–6 год) рекомендується проводити в тих же автоклавах при надлишковому тиску повітря. Якщо за один технологічний цикл переробляється мала кількість компаунду, то зручніші в роботі і економічніші інші комбіновані установки, виконані теж як автономні апарати, але складаються вони з трьох з'єднаних між собою вузлів: змішувача, розливної камери і термокамери для отвердіння. На рис. 7.11 подана схема такої установки, призначеної для масової заливки дрібних виробів, а також для виробництва одиничних великогабаритних заливок епоксидними компаундами. Таку установку називають установкою вакуумапаратом.

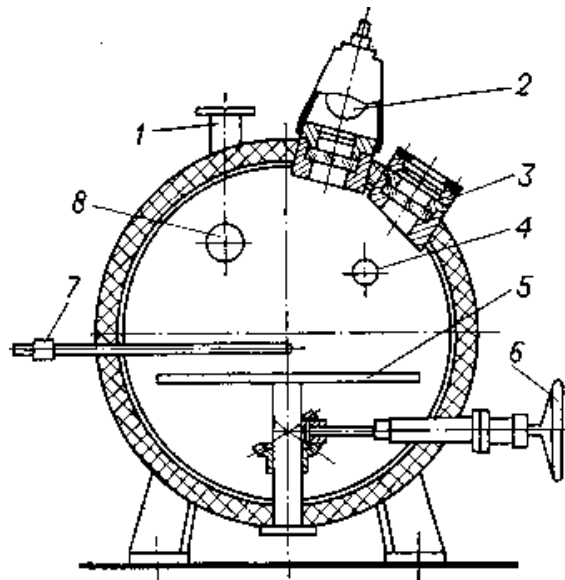


Рисунок 7.11– Вакуумна камера-автоклав:

1 – патрубок вакуумної магістралі; 2 – освітлювальна лампа; 3 – оглядове вікно; 4 – вхідний отвір магістралі надлишкового тиску; 5 – поворотний стіл; 6 – штурвал механізму поворота; 7 – термопара; 8 – вхідний отвір магістралі надлишкового тиску; 9 – вхідний отвір магістралі витяжної вентиляції

У змішувач 7 (рис. 7.12) завантажують через вікно 1 навішувану епоксидну смолу і кварцовий пісок, нагріті до необхідної температури. Суміш піску і смоли перемішується і вакуумується. Перемішування здійснюється якірною мішалкою 6. Привід мішалки складається з електродвигуна 5 і черв'ячної передачі 4. Наважку отверджувача попередньо завантажують в спеціальний пристрій 2, за допомогою якого вводиться отверджувач в змішувач 7. Цей пристрій (рис. 7.13) дозволяє зменшити випаровування отверджувача і скоротити час на його перемішування, що особливо важливо для компаундів з малою життєздатністю. Пристрій (рис. 7.13) складається з обігріваної ємності 1, в якій знаходиться отверджувач, і еластичної мембрани 2, яка герметично закриває ємність. Попередньо розігрітий до рідкого стану отверджувач вводиться в компаунд при відкриванні перепускного крана 6 за рахунок різниці між атмосферним тиском і вакуумом в камері змішувача. Мембрана 2 витісняє рідкий твердник, який через вхідний патрубок і форсунку 7 впорскується в змішувач 7 (див. рис. 7.11).

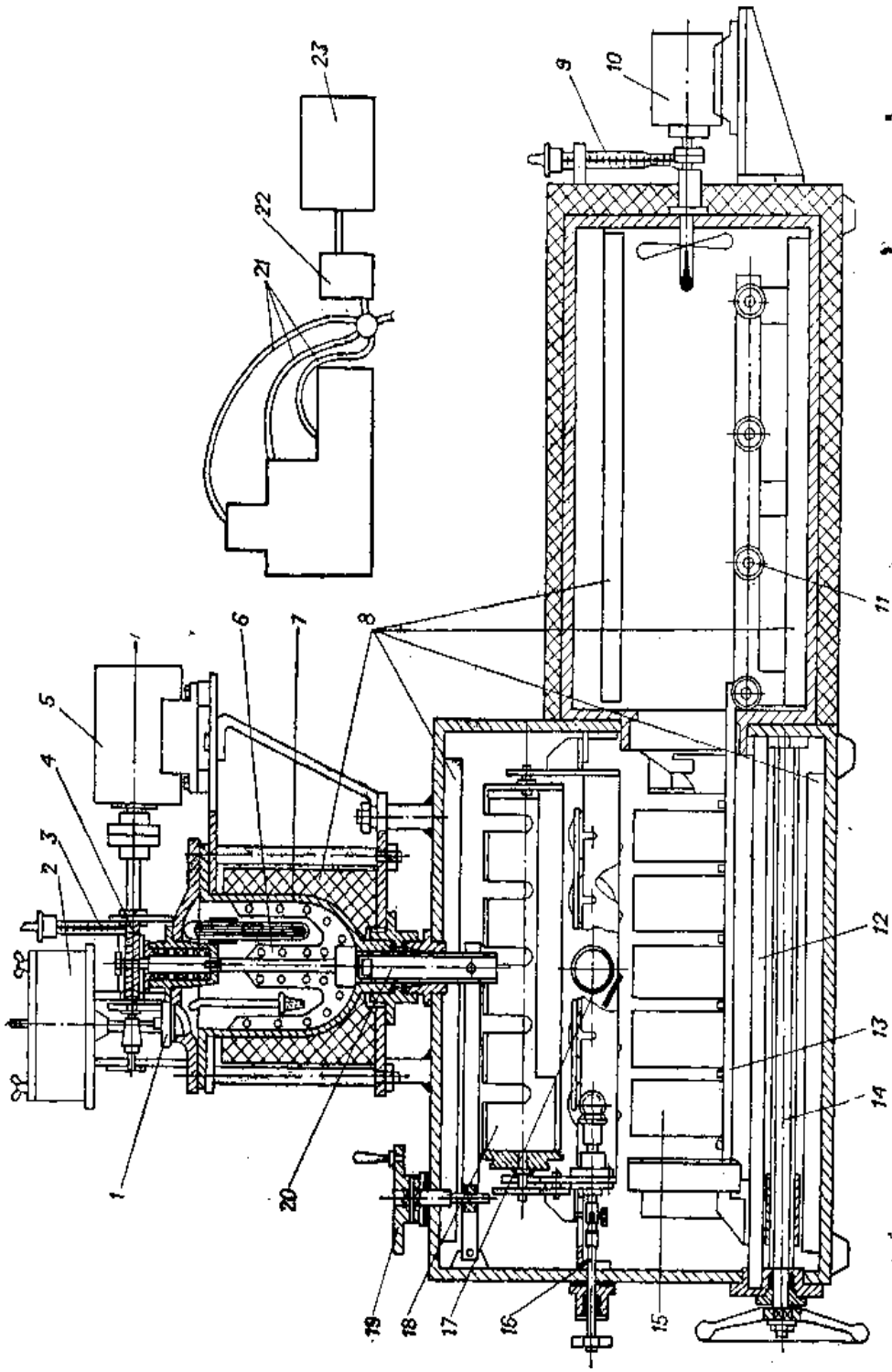


Рисунок 7.12— Комбінована установка для заливки малих кількостей компаунда:

1 – завантажувальне вікно; 2 – пристрій для введення отверджувача; 3, 9 – контактні термометри; 4 – черв'ячна передача; 5 – електродвигун; 6 – якірна мішалка; 7 – змішувач; 8 – електричний нагрівач; 10 – вентилятор камери затверднення; 11 – ролики; 12 – напрямлений шток; 13 – піддон; 14 – гвинтовий механізм; 15 – касетна форма; 16 – дистанційний привід ковші; 17 – нижній ківш; 18 – верхній ківш; 19 – важільно – гвинтовий привід клапана; 20 – клапан; 21 – розвідні шланги; 22 – фільтр; 23 – форвакуумний насос

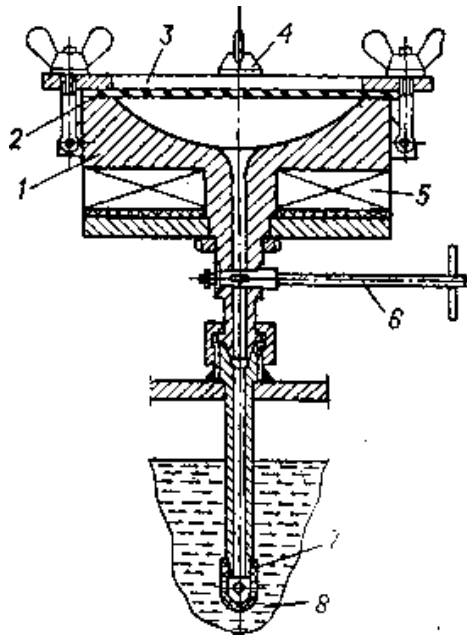


Рисунок 7.13. Пристрій для введення отверджувача:

1 – обігрівана ємність; 2 – еластична мембрана; 3 – кришка; 4 – гвинти;
 5 – електронагрівальний елемент; 6 – кран перепускний; 7 – форсунка;
 8 – суміш компонентів.

Після введення отверджувача компаунд перемішується і вакуується. Розливання здійснюють за допомогою важеля гвинтового пристрою 19 (див. рис. 7.12). Це пристрій відкриває клапан 20.

Клапан 20, що замикає вихід з змішувача, має прорізні вікна, через які рідкий компаунд перетікає і з змішувача в трубу клапана, і в верхній ківш 18 розливного пристрою. Останній складається з рами, на якій змонтований верхній ківш 18 і п'ять нижніх ковшів 17.

Після відкриття клапана 20 заповнюється на початку верхній ківш 18, після чого він повертається за допомогою спеціального дистанційного пристрою 16 на деякий кут і компаунд через прорізи у ковші протікає в нижній ківші 17. За допомогою того ж пристрою 16 ковші 17 повертаються і компаунд попадає в касетні форми 15. Кількість форм для одночасної заливки визначається розмірами розливного пристрою і габаритами заливальних виробів. Для зміни кількості форм необхідно мати змінні ковші з різним числом прорізів. Ковшовим розливним пристроєм всі вироби заливаються одночасно, що дуже важливо при малій життєздатності епоксидних компаундів. Залиті форми за допомогою гвинтового механізму 14 переводяться в камеру отвердіння разом з піддоном 13, який переміщається по штоку 12 і роликах 11. Піддон з касетними формами

15 переміщається в камеру отвердіння, а задня його стінка щільно закриває камеру. Після того змішувальна і розливна камери розгерметизовуються. Ємність змішувача 7, мішалку 6, клапан 20 і розливний пристрій витягують з камер, чистять і готують до подальшої заливки.

При індивідуальних заливках розливний пристрій знімають, і компаунд з камери змішувача надходить прямо в форму, встановлену на піддоні. Всі три камери забезпечені контактними термометрами 3, 9, що дозволяють встановлювати і підтримувати необхідну температуру. Створення вакууму в усіх трьох камерах здійснюється за допомогою форвакуумного насоса 23, фільтра 22 і розвідних шлангів 21. Обігрів камер відбувається за допомогою електричних нагрівачів 8.

Для виробництва виробів з епоксидних та інших отверджуючих герметизуючих матеріалів в умовах дрібносерійного і дослідного виробництва застосовується напівавтоматична установка – універсальна вакуумно-литтєва машина. Установка може бути введена і в потокову виробничу лінію.

Установка складається з литтєвої машини і пульта кнопочного дистанційного керування. Технічні характеристики установки:

Максимальний об'єм змішувача, л5
Об'єм бака для твердника, л2
Об'єм бункера для наповнювача, л	5
Максимальна температура суміші компонентів, °С	150
Максимальне розбавлення в заливальній камері і змішувачі (залишковий тиск), кПа	0,9
мм рт. ст	7
Частота обертання мішалки, об/хв	10–120
Потужність нагрівачів, кВт	
змішувача	2
бака твердника	1
бункера наповнювача	1,5
вакуумної камери	2
Загальна потужність електронагрівачів установки, кВт	1,8
Максимальна настановна потужність, кВт	8,5
Максимальні габарити виробів, що заливаються, мм	300 × 300 × 500
Габарити вакуумно-литтєвої машини, мм	920 × 920 × 425
Маса вакуумно-литтєвої машини, кг	250

Універсальна вакуумно-литтєва машина (рис. 7.14) складається з вакуумної камери 3, змішувача 9 з приводом 12, змонтованим на кришці змішувача, бака для отверджувача 16, бункера для наповнювача 11 з живильником для

його подачі 10, блока дистанційно керованих клапанів 13 і окремо розташованого вакуумного насоса. Ємності 11 і 16 обладнані електронагрівачами і теплоізоляцією. Розраховане на певну порцію герметизуючого матеріалу кількість отверджувача всмоктується за допомогою вакуумної системи через кран в бак 16 (можливе також об'ємне дозування – з контролем по мірним склом на лицьовій стороні бака).

Наповнювач закладають в бункер 11 при відкритій кришці, а в змішувач він подається живильником 10 при неперервному обертанні мішалки і неперервному вакуумуванні суміші.

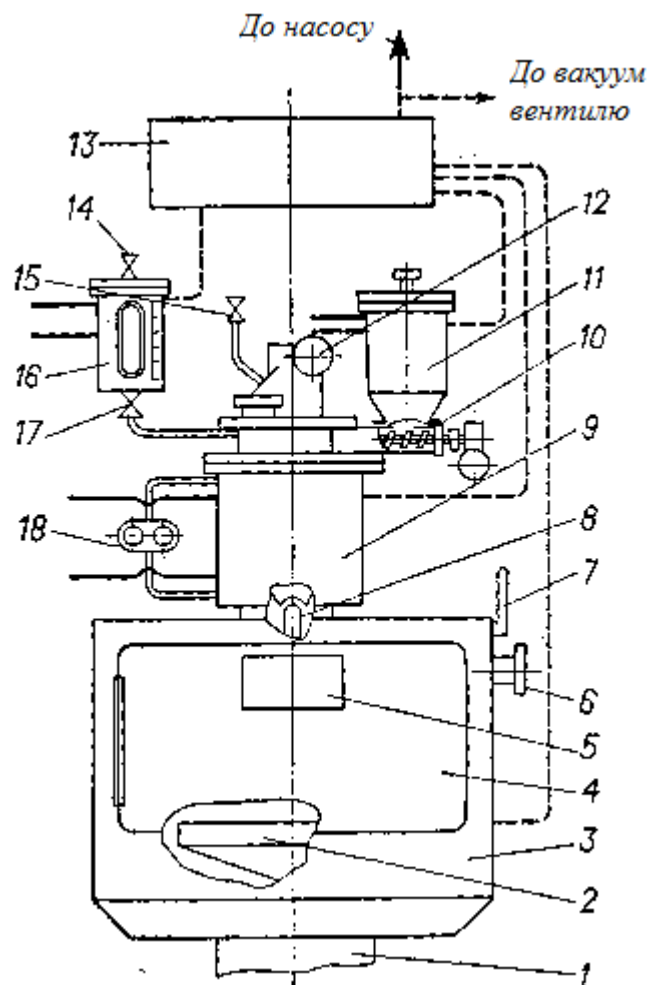


Рисунок 7.14. Універсальна вакуумно–литтєва машина:

1 – підставка; 2 – стіл для установки форм; 3 – вакуумна камера; 4 – дверцята камери; 5 – оглядове вікно; 6 – вентиляційний клапан; 7 – привід заливального крана; 8 – заливальний кран; 9 – змішувач; 10 – живильник для подачі наповнювача; 11 – бункер для наповнювача; 12 – кришка змішувача з приводом; 13 – блок клапанів; 14 – кран; 15 – кран для подачі розчинника; 16 – бак для твердника; 17 – кран; 18 – маслонасоси; _____ лінія подачі води; _____ вакуум лінія

Така технологія дозволяє уникнути насичення суміші повітрям, що міститься в наповнювачі і в змішувачі над поверхнею суміші. Приготовану для заливки форму встановлюють на стіл 2, конструкція якого варіюється залежно від характеру продукції. Для поліпшення рівномірності нагрівання змішувача використовується рідкий теплоносій (масло), примусова циркуляція якого здійснюється насосом 18. Температура нагріву контролюється і автоматично регулюється в заданих межах приладами, вмонтованими в шафу управління. Система обігріву дозволяє застосовувати ступеневий температурний режим нагрівання. Конструкція заливального крану 8 допускає повторне вакуумування суміші.

Машина дозволяє формувати вироби у вакуумованій формі за способом вільної заливки, а також литтям під тиском до 0,5 МПа. Баки і змішувач висвітлюються зсередини і проглядаються через оглядові вікна. Ступінь розбавлення при вакуумуванні регулюється маховичком на пульті управління. Заливальна камера забезпечена теплоізоляцією і вибухобезпечними електронагрівачами.

Закрита система транспортування рідких компонентів і дистанційно керування вентиляція повністю забезпечують безпеку роботи на вакуумно-литтєвій машині. Для підвищення довговічності вакуумних ущільнень баки споряджені охолоджувальними системами.

Процесом змішування керують також дистанційно. В кінці роботи литтєві форми і інші частини машини, дотичні до герметизуючих матеріалів, очищають. Для цього через крани 14 і 15 засмоктується розчинник, пропускається через кран 8 і видаляється для регенерації.

Розглянуті установки для просочення і заливки виробів компаундами (рис. 7.10–7.12, 7.14) працюють, але переривчастим багатоступінчастим циклом: спочатку змішують смолу, наповнювач і пластифікатор і тільки після цього вводять отверджувач і знову проводять змішування компонентів.

Для збільшення продуктивності установок для герметизації застосовуються різні схеми, наприклад такі, що наведені на рис. 7.15. Тут смола, пластифікатор і наповнювач змішуються і вакуумуються в окремому змішувачі великого об'єму, а змішування із отверджувачем проводиться в іншому змішувачі меншого розміру, який розташований безпосередньо над вакуумною камерою.

При такій схемі найдовша операція змішування смоли з наповнювачем і вакуумування цієї суміші можливо поєднати за часом з введенням в компаунд твердника і з заливкою компаунду в форму.

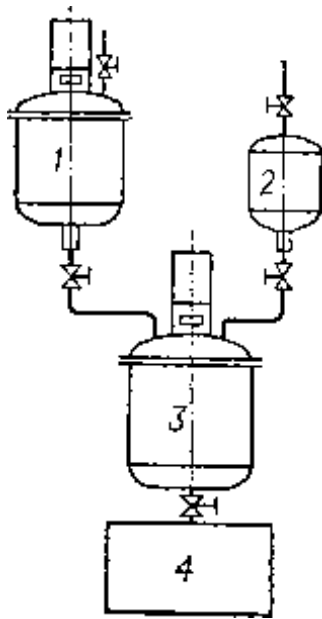


Рисунок 7.15. Схема установки для просочення і заливки з двома змішувачами:

- 1 – змішувач для змішування смоли з наповнювачем і пластифікатором; 2 – ємність з отверджувачем; 3 – змішувач для змішування компаунду з отверджувачем; 4 – вакуумна камера для просочення і заливки

Технологічне обладнання для просочення і заливки герметизуючими матеріалами потрібно виготовляти з хімічно стійких матеріалів, а елементи конструкцій, що знаходяться в контакті з наповнювачем, слід виконувати із зносостійких матеріалів.

Контрольні запитання

1. Які герметизуючі матеріали ви знаєте?
2. Назвіть усі способи герметизації.
3. Яке обладнання використовують для змішування, просоченням і заливки виробів з полімерних матеріалів?
4. Які типи мішалок використовують для змішування полімерних компаундів?
5. Наведіть схему установки для періодичного процесу герметизації.
6. Наведіть схему установки для безперервного процесу герметизації.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Bechold H., Neumann S. // *Angew. Chem.* 1924. Bd. 37. S. 225, 534, 569.
2. Черных П. Я. Историко-этимологический словарь современного русского языка. – Москва : Рус. яз., 1994. – Т. 1. – С. 400.
3. Гельфер Я. М. История и методология термодинамики и статистической физики. – Москва : Высш. шк., 1969. – Т. 1. – С. 14.
4. Энциклопедия полимеров. – Москва : Сов. энциклопедия, 1972. – Т. 1. – С. 29.
5. Allen K. W. In *Aspects of Adhesion* / D. J. Alner, Ed. London: Univ. of London Press, 1969. V. 5. P. 11.
6. Физический энциклопедический словарь. – Москва : Сов. энциклопедия, 1960. – Т. 1. – С. 19.
7. Вакула В. Л. Физическая химия адгезии полимеров / В. Л. Вакула, Л. М. Притыкин. – Москва : Химия, 1984. – С. 12.
8. Притыкин Л. М. // *Химическая энциклопедия* / Л. М. Притыкин, В. Л. Вакула. – Москва : Сов. энциклопедия, 1988. – Т. 1. – С. 35–38.
9. Притыкин Л. М. Мономерные клеи / Л. М. Притыкин, Д. А. Кардашов, В. Л. Вакула. – Москва : Химия, 1988. – С. 8.
10. Физический энциклопедический словарь. – Москва : Сов. энциклопедия, 1960. – Т. 1. – С. 621.
11. Берлин А. А. Основы адгезии полимеров / А. А. Берлин, В. Е. Басин. – Москва : Химия, 1974. – С. 6.
12. Краткая химическая энциклопедия. – Москва : Сов. энциклопедия, 1961. – Т. 1. – С. 1263.
13. Зимон А. Д. Адгезия жидкости и смачивание. – Москва : Химия, 1974. – С. 7.
14. Воюцкий С. С. // *Энциклопедия полимеров*. – Москва : Сов. энциклопедия, 1972. – Т. 1. – С. 22.
15. Дерягин Б. В. Адгезия твердых тел / Б. В. Дерягин, Н. А. Кротова, В. П. Смилга. – Москва : Наука, 1973. – С. 9–17.
16. Wake W. C. *Adhesion and Formulation of Adhesives*. London: Applied Science Publishers, 1982. P. 3.

17. Ли Л.-Х. // Адгезивы и адгезионные соединения. – Пер. с англ. / под ред. Л.-Х. Ли. – Москва : Мир, 1988. – С. 8–48.
18. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. – Пер. с англ. – Москва : Мир, 1979. – 360 с.
19. Wu Souheng. Polymer Interface and Adhesion. New York and Bael: Marcel Dekker, Inc., 1982. P. 337.
20. Васильева Н. В. Термин : Лингвистический энциклопедический словарь. – Москва : Сов. энциклопедия, 1990. – 682 с.
21. Вайсгербер Й.-Л. Родной язык и формирование духа. – Москва, 1993.
22. А.Поциус. Клеи, адгезия, технология склеивания. – Санкт-Петербург : Изд-во Профессия, 2007.
23. Вильнав Ж.-Ж. Клеевые соединения – Москва : Техносфера, 2007, 384 с.
24. Ковачич Л. Склеивание металлов и пластмасс. – М.: Химия, 1985–238 с.
25. Басин В. Е. Адгезионная прочность. – Москва : Химия, 1981. – 192 с.
26. Веселовский Р. А. Регулирование адгезионной прочности полимеров. – Киев : Наукова думка, 1988. – 176 с.
27. Петрова А. П. Клеящие материалы. Герметики / А. П. Петрова, А. А. Донской ; под ред. А. П. Петровой. – Санкт-Петербург : НПО «Профессионал», 2008.
28. Кардашов Д. А. Полимерные клеи / Д. А. Кардашов, А. П. Петрова. – М. : Химия, 1983. – 256 с.
29. И.Т.Глебов. Оборудование для склеивания древесины.-Екатеринбург: УГЛТУ, 2010, 170 с.
30. И.Т. Глебов, В.Г. Новоселов. Оборудование для склеивания древесины. Учебное пособие.-Екатеринбург: УГЛТУ, 2000, 142 с.
31. Комаров Г. В. Соединение деталей из полимерных материалов. – Санкт-Петербург. – Профессия, 2006, 592 с.
32. Волынский В.Н. Технология клееных материалов. Учебное пособие.- Архангельск: Изд-во Арханг. гос.техн.ун-та, 2003, 280 с.
33. Склеивание в машиностроении: Справочник: В 2 т. /Под общ. ред. Г.В. Малышевой. – М.: Наука и технологии, 2005. – 544 с.
34. Д.Р. Ерова, Г.Г. Богатеев, Л.И. Казанская, З.И. Сафина, Н.А. Алексеева, Д.Г. Богатеев. Технология склеивания изделий из композиционных материалов.- Казань, Изд-во ЮНИТУ, 2014, с.132.

35. Шилдз Дж. Клеящие материалы : справочник – Пер. с англ. / под ред. В. П. Батизата. – Москва : Машиностроение, 1980.
36. Кейгл И. Клеевые соединения / пер. с англ. ; под ред. Д.А. Кардашова. – Москва : Мир, 1971. – 296 с.
37. Волков С.С. Сварка и склеивание полимерных материалов. М.: Химия, 2001. 376 с.
38. В.Л. Волков. Механика контактного взаимодействия и физики трения.- М.: Физматлит, 2013, с. 351.
39. Фрейдин А. С. Свойства и расчет адгезионных соединений / А. С. Фрейдин, Р. А. Трусов. – Москва : Химия, 1990. – 256 с.
40. Герметизация полимерными материалами в радиоэлектронике. – Москва : Энергия, 1974. – 303 с.
41. К.Н. Кан, А.Ф. Николаевич, Л.Д. Гинзбург. Герметизация изделий полимерными материалами.-Л.: Химия, 1976, 77 с.
42. Башкирцев В.И., Малышева Г.В., Гладких С.Н. Клеи и герметики для автомобиля.–М.:Астрель,2003.112с.
43. Петрова А.П. Клеящие материалы. Справочник. – М.: Каучук и резина, 2002. – 195 с.

З М І С Т

Вступ	3
Розділ 1. Теоретичні основи адгезії	5
1.1. Адгезія. Основні терміни і визначення	5
1.2. Теорії механізмів адгезії полімерів	9
1.3. Адгезія і сили, що її обумовлюють	21
1.4. Механізм адгезії.....	26
1.5. Реологічні явища в клейовому шві	38
Контрольні запитання	43
Розділ 2. Технологія склеювання	44
2.1. Технологічний процес склеювання	44
2.1.1. Зберігання клеїв або їх компонентів, ґрунтів і допоміжних матеріалів	44
2.1.2. Приготування клею	45
2.1.3. Нанесення клею	46
2.1.4. Тверднення клею	52
2.2. Обладнання для приготування та нанесення клеїв	57
2.2.1. Пристрої для приготування клею	57
2.2.2. Клейоготувальні пристрої періодичної дії	59
2.2.3. Клейоготувальні пристрої безперервної дії	63
Контрольні запитання	66
Розділ 3. Підготовка поверхонь під склеювання	67
3.1. Підготовка поверхонь, що з'єднуються	67
3.2. Вибір методів підготовки поверхні	70
3.3. Очищення і знежирення поверхні перед склеюванням	73
3.3.1. Знежирення в органічних розчинниках	73
3.3.2. Знежирення у водних лужних розчинах	75
3.3.3. Знежирення мультисійними складами	75
3.4. Обробка поверхні	76
3.4.1. Обробка ручним і механічним інструментом	76
3.4.2. Обробка сухим і гідроабразивом	77
3.4.3. Травлення	83

3.4.4. Фосфатування	84
3.4.5. Анодування	85
3.4.6. Промивка і сушка поверхні	87
Контрольні запитання	87
Розділ 4. Підготовка поверхонь металів	88
4.1. Підготовка поверхні сталі	88
4.1.1. Підготовка поверхні вуглецевої сталі	90
4.1.2. Підготовка поверхні нержавіючої сталі	92
4.1.3. Підготовка поверхні оцинкованої сталі	92
4.2. Підготовка поверхні алюмінію і його сплавів	92
4.3. Підготовка поверхні магнію і його сплавів	95
4.4. Підготовка хромованих поверхонь	98
4.5. Підготовка поверхні нікеля і його сплавів	98
4.6. Підготовка поверхні титану і його сплавів	99
4.7. Підготовка поверхні міді, бронзи, латуні та їх сплавів	101
4.8. Підготовка поверхні рідких металів	102
4.8.1. Підготовка поверхні берилію	102
4.8.2. Підготовка поверхні вольфраму	102
4.8.3. Підготовка поверхні кадмію	103
4.8.4. Підготовка поверхні цинку	103
Контрольні запитання	103
Розділ 5. Підготовка поверхонь пластмас, скла і кераміки	104
5.1. Підготовка поверхні пластмас	104
5.1.1. Підготовка поверхні різних неметалевих матеріалів	105
5.1.2. Підготовка поверхні виробів з полікарбонату	107
5.1.3. Підготовка поверхні виробів з фторопласту	108
5.1.4. Підготовка поверхні виробів з полівінілхлориду	108
5.1.5. Підготовка поверхні виробів з поліетилентерефталату	109
5.1.6. Підготовка поверхні виробів з фенопластів або амінопластів	109
5.1.7. Підготовка поверхні виробів з поліуретанових пластиків	110
5.1.8. Підготовка поверхні виробів з поліолефінів	110
5.1.9. Підготовка поверхні виробів з акрилових пластиків	111
5.1.10. Підготовка поверхні виробів з поліамідів	111
5.1.11. Підготовка поверхні виробів з полістиролу	112
5.2. Підготовка плівкових матеріалів	112

5.3. Підготовка поверхні гум	117
5.4. Підготовка гумових поверхонь з натурального каучуку	119
5.5. Підготовка гумових поверхонь з синтетичного каучуку	119
5.6. Підготовка поверхні скла і кераміки	120
Контрольні запитання	121
Розділ 6. Розрахунок клейових з'єднань	122
6.1. Практичні результати теорії адгезії	122
6.2. Напружений стан клейових з'єднань	125
6.3. Недоліки клейових з'єднань	132
6.4. Способи розрахунку клейових з'єднань	134
6.5. Практичні розрахунки клейових з'єднань	152
Контрольні запитання	168
Розділ 7. Герметизація	169
7.1. Герметизуючі матеріали	169
7.2. Способи герметизації	170
7.3. Обладнання для герметизації	171
7.3.1. Стандартне обладнання	174
7.3.2. Спеціальне технологічне обладнання	176
Контрольні запитання	191
Список літератури	192

Навчальне видання

ЧЕРКАШИНА Ганна Миколаївна
АВРАМЕНКО В'ячеслав Леонідович
ПІДГОРНА Лідія Пилипівна
ЛЕБЕДЄВ Володимир Володимирович
ЛАВРОВА Інна Олегівна

ТЕХНОЛОГІЯ СКЛЕЮВАННЯ ТА ГЕРМЕТИЗАЦІЇ

Навчальний посібник

для студентів хіміко-технологічних
спеціальностей закладів вищої освіти

Відповідальний за випуск *проф. Авраменко В. Л.*
Редактори *Єфремова М. П.*

Тех. редактор Гобельовська Л. П.

План 2021 р., поз. 59

Підписано до друку 24.12.2021 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Гарнітура шкільна.
Друк цифровий. Ум. друк. арк. 11,63.
Тираж 50 прим. Зам № 41.



Видавець і виготовлювач ТОВ «Друкарня Мадрид»
через ФОП Гобельовська Л. П.
61024, м. Харків, вул. Гуданова, 18. Тел.: 0800-33-67-62
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
Серія ДК № 4399 від 27.08.2012 р.
www.madrid.in.ua info@madrid.in.ua