

Форма № Н-9.02

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет конструювання та дизайну
УДК 681.533.-027.45

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
надійності техніки
(назва кафедри)

доц. Новицький А.В.
(підпис) (ПІБ)
“ ” 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

На тему «Оцінка технічного стану та відновлення допоміжного обладнання підприємств технічного сервісу конструкторсько-технологічними методами»

Спеціальність 133 - «Галузеве машинобудування»
(код і назва)

Спеціалізація -

Магістерська програма «Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва»
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

Д.Т.Н., проф.
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Ловеїкін В.С.
(ПІБ)

Керівники магістерської роботи

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Новицький А. В.
(ПІБ керівника)

(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Кульпін Р.А.
(ПІБ керівника)

Виконав

(підпис)

Плаксієв Д.В.
(ПІБ студента)

Форма № Н-9.01

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет _____ конструювання та дизайну _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри надійності техніки

К.Т.Н., доцент Новицький А.В.

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)

“ ” _____ 2025 ____ року

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
СТУДЕНТА**

Плаксію Дмитру Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

(код і назва)

Спеціалізація _____

(назва)

Магістерська програма «Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва»

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи **«Оцінка технічного стану та відновлення допоміжного обладнання підприємств технічного сервісу конструкторсько-технологічними методами»**

затверджена наказом ректора НУБіПУ від «16»12.2024 р. №2268 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 25.05.2026 р.
(рік, місяць, число)

Вихідні дані магістерської роботи: допоміжне обладнання підприємств технічного сервісу; способи відновлення обладнання водо- та теплопостачання підприємств технічного сервісу; зносостійкі композиційні матеріали.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Конструкція допоміжного обладнання підприємств технічного сервісу.
2. Умови використання та характерні відмови деталей обладнання водо- та теплопостачання підприємств технічного сервісу.
3. Технології відновлення деталей обладнання водо- та теплопостачання.

Перелік графічного матеріалу (за потреби) 1. Актуальність, предмет,

об'єкт і методи дослідження. 2. Мета і задачі дослідження. 3 Аналіз
характерних відмов деталей обладнання водо- та теплопостачання. 4.
Конструкторсько-технологічні методи відновлення працездатності деталей. 5.
Технологічний маршрут відновлення деталей водо- та теплопостачання
підприємств ТС металополімерними матеріалами. Висновки

Дата видачі завдання «16» грудня 2024 р.

Керівники магістерської роботи

(підпис) Новицький А.В.
(прізвище та ініціали)

(підпис) Кульпін Р.А.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(підпис) Плаксі́й Д.В.
(прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	10
1.1 Дефекти та способи їх усунення допоміжного обладнання підприємств технічного сервісу	10
1.2. Композиційні матеріали та їх застосування для відновлення допоміжного обладнання підприємств технічного сервісу	18
1.3 Аналіз композиційних ремонтних матеріалів	28
1.4. Висновки до розділу	29
РОЗДІЛ 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	30
2.1. Методи дослідження адгезійної міцності з'єднань «полімер метал»	30
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	37
3.1 Методика дослідження адгезійної міцності зносостійких композиційних матеріалів	37
3.2 Програма і методика досліджень застосування композиційних матеріалів під час відновлювальних робіт ОВТП	39
4. ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ВІДНОВЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ З ДОПОМОГОЮ РЕМОНТНИХ КОМПОЗИТИВ	41
4.1 Технологічні основи застосування композиційних матеріалів під час відновлювальних робіт	41
4.2. Методи усунення основних видів дефектів композиційними матеріалами	54
4.3. Обґрунтування комплексу заходів з охорони праці та техніки безпеки при впровадженні ремонтних металополімерних технологій	58
ВИСНОВКИ	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	61
ДОДАТКИ	67

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

ЖКГ – житлово-комунальний комплекс;

ЖКП – житлово-комунальні підприємства;

ЗРКМ – зносостійкі ремонтні композиційні матеріали;

ІРКМ – ізоляційно-ремонтні композиційні матеріали;

МЕЗ – мобільні енергетичні засоби;

ОВТП – обладнання водо- та тепlopостачання;

РКМ – ремонтні композиційні матеріали;

РВТ – ремонтно-відновлювальні технології;

ТС – технічний сервіс;

ХЗ – холодне зварювання.

ВСТУП

Сучасний етап розвитку підприємств технічного сервісу та промислового виробництва характеризується критичним рівнем зносу основних засобів, серед яких вагому частку становить технологічне та допоміжне обладнання. Особливо гостро ця проблема постає для систем водо- та теплопостачання, які забезпечують життєдіяльність як промислових об'єктів так і сектору підприємств технічного сервісу. Рівень фізичного та морального зносу зазначеного обладнання в останні роки наближається до критичної позначки у 70 %, що безпосередньо загрожує техногенній та економічній безпеці виробничих процесів.

В умовах інтенсивної експлуатації елементи водорозподільних і теплових мереж – такі як перекачувальні насоси, запірно-регулююча арматура (засувки, заслінки), фітинги різноманітних конструктивних модифікацій та типорозмірів – піддаються комплексному деструктивному впливу. Основними чинниками руйнування виступають абразивне, корозійне та кавітаційне зношування.

Традиційно використовувані у практиці ремонтних служб методи ліквідації дефектів – зварювання, наплавлення та термічне напилення – мають низку суттєвих недоліків. Вони характеризуються високою вартістю, значною енергоємністю, потребою у демонтажі обладнання та складному інструментальному забезпеченні, а в багатьох випадках є технологічно неможливими або неефективними.

У зв'язку з цим виникає об'єктивна необхідність у розробці та впровадженні інноваційних, ресурсозберігаючих конструкторсько-технологічних методів відновлення. Найбільш перспективним напрямком вирішення цієї науково-технічної задачі є застосування сучасних зносостійких композиційних матеріалів (зокрема, металополімерів холодного затвердіння), які дозволяють виконувати високоякісний, оперативний та локальний ремонт без залучення значних енергетичних і трудових ресурсів. Створення нових методологічних підходів до оцінки технічного стану та обґрунтування

параметрів технологій холодного зварювання для ремонту допоміжного обладнання зумовлюють високу актуальність теми магістерської роботи.

Мета дослідження – підвищення ефективності та оперативності ремонтно-відновлювальних робіт, а також подовження міжремонтного ресурсу допоміжного обладнання підприємств технічного сервісу шляхом розробки та впровадження прогресивних конструкторсько-технологічних методів оцінки технічного стану та відновлення з використанням зносостійких композиційних матеріалів.

Об'єкт дослідження – процеси зношування, оцінки технічного стану та конструкторсько-технологічного відновлення допоміжного обладнання підприємств технічного сервісу, систем водо- та теплопостачання.

Предмет дослідження – закономірності зміни експлуатаційних властивостей деталей допоміжного обладнання, відновлених за допомогою зносостійких полімерних композиційних матеріалів, та технологічні параметри процесів їх нанесення (на прикладі матеріалів «Chester Molecular»).

Методи досліджень. У магістерській кваліфікаційній роботі використано комплексний підхід, що базується на: методах системного аналізу та узагальнення; фізико-механічних випробуваннях; методах математичного моделювання та інженерних розрахунків; методах техніко-економічного аналізу.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі наукові та практичні задачі:

1. Здійснити системний аналіз та класифікацію типових дефектів і видів зносу технологічного та допоміжного обладнання на промислових підприємствах та підприємствах технічного сервісу.
2. Дослідити фізичну природу та чинники виникнення абразивного, корозійного та кавітаційного зношування елементів систем водо- та теплопостачання.
3. Виконати порівняльний аналіз сучасного ринку ремонтних композиційних матеріалів та ідентифікувати номенклатуру матеріалів із

найбільш раціональними фізико-механічними і технологічними характеристиками для умов технічного сервісу.

4. Експериментально та теоретично дослідити комплекс основних фізико-механічних, хімічних та експлуатаційних властивостей високоякісних композиційних матеріалів.

5. Розробити комплексну конструкторсько-технологічну методологію відновлення деталей та вузлів допоміжного обладнання з використанням зносостійких композитів без їх демонтажу.

6. Оцінити техніко-економічну ефективність запропонованих технологічних рішень та розрахувати потенціал енерго- і ресурсозбереження.

Основні теоретичні положення, методичні підходи та практичні результати дисертаційного дослідження неодноразово оприлюднювалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку фахівців на 3 науково-технічних конференціях (зокрема, міжнародного та всеукраїнського рівнів).

Основний зміст та ключові результати магістерської кваліфікаційної роботи повною мірою відображено у 3 наукових публікаціях: матеріалах конференцій.

1. СТАН ПИТАННЯ ТА ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Дефекти та способи їх усунення допоміжного обладнання підприємств технічного сервісу

Основним виробничим завданням при експлуатації обладнання та інженерних мереж підприємств ТС є забезпечення надійного, безперебійного водо- та теплопостачання споживачів із заданими технологічними параметрами. Це завдання залишається актуальним і остаточно не вирішено. Реальний стан обладнання з водо- та теплопостачання таке, що на початку ХХІ ст. зафіксовані пошкодження, які супроводжуються не лише тимчасовим вимкненням споживачів, але й порушенням технологічних процесів машинобудівних та підприємств ТС, травмуванням людей та матеріальними збитками.

У зв'язку з кризовим станом, діяльність підприємств ТС у цій сфері характеризується високими витратами, відсутністю економічних стимулів зниження витрат за виробництво послуг, нерозвиненістю конкуренції. Усе це призводить до високого ступеня зносу основних фондів, неефективного роботи підприємств ТС, великих втрат різних видів енергії, водних та інших ресурсів.

В таблиці 1.1 представлені показники фізичного зношування основних фондів ЖКГ загалом України, що характеризують стан систем водо- і теплопостачання [1, 6, 7].

Ступінь зносу об'єктів комунального господарства за окремими муніципальним структурами досягає 70-80%, при цьому темпи наростання зносу продовжують становити 3 – 5% на рік.

Подолання високого ступеня зношування та аварійності, низького коефіцієнта корисної дії потужностей та значних втрат енергоносіїв є необхідною умовою зміни якості обладнанням водо- та теплопостачання, оновлення основних фондів та збереження конкурентних позицій над ринком. Сьогодні пріоритетами державної технічної політики під час вирішення завдання модернізації основних фондів підприємств, включаючи обладнанням водо- та теплопостачання підприємств ТС, є: впровадження нових технологій та

екологічно безпечного, надійного та високопродуктивного обладнання; енергозбереження та розвиток малої енергетики у комунальній сфері; формування стратегій відновлення працездатності ОВТП.

Таблиця 1.1

Показники фізичного зношування основних фондів ЖКГ України

№ пп	Фонди ЖКГ	Ступінь зносу, %
1.	Котельні	54,5
2.	Центральні теплові пункти	50,1
3.	Комунальні мережі водопроводу	65,3
4.	Теплові мережі	62,8
5.	Водопровідні насосні станції	65,1
6.	Каналізаційні насосні	57,1
7.	Теплові насосні станції	52,3

Попередній аналіз показує, що розробка та застосування сучасних технологій та матеріалів, конструкцій та обладнання в забезпечує прогнозоване збільшення енергоефективності у 2-3 рази, а зниження витрат на ЖКП до 30% [12]. Для ефективної роботи систем ОВТП необхідно розробити комплекс заходів щодо запобігання виникненню дефектів та їх своєчасному виявленню та усунення. Більшість конструктивних елементів теплових мереж ремонтними службами не ремонтуються, а замінюються на нові, що призводить до значного збільшення вартості ремонту ОВПТ. Класифікація об'єктів систем ОВПТ представлена в Додатку А1.

Функціонування ОВПТ здійснюється за умов, що постійно змінюються, до них відносяться перепади тиску і температур, різні види зносу, корозійні руйнування. Відповідно до представленої класифікації на схемі виділено дванадцять основних елементів, що забезпечують функціонування систем водо- та теплопостачання ЖКГ та підприємств ТС. Серед об'єктів досліджень, що розглядаються, найбільшому зносу схильні насоси і засувки, які в процесі експлуатації зазнають максимальних гідравлічних навантажень та можливого

руйнування (рис. 1.1, 1.2). Насос є пристроєм для камерного переміщення рідини внаслідок надання їй кінетичної чи потенційної енергії (рис. 1.2).

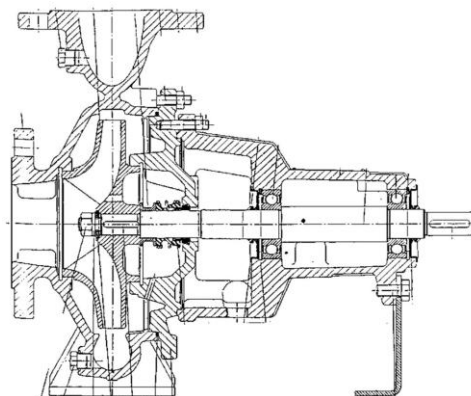


Рис. 1.1. Насос систем допоміжного обладнання систем ОВТП

Засуви забезпечують перекриття основних каналів води у магістральних трубопроводах. За конструктивним виконанням вони поділяються на клинові та паралельні, з висувним або не висувним шпинделем. Висувний шпиндель при обертанні здійснює поступальний рух, невисувний – лише обертальний. Засуви виготовляються на тиск 0,25-6,4 МПа в діапазоні діаметрів 50 – 800 мм (рис. 1.3).

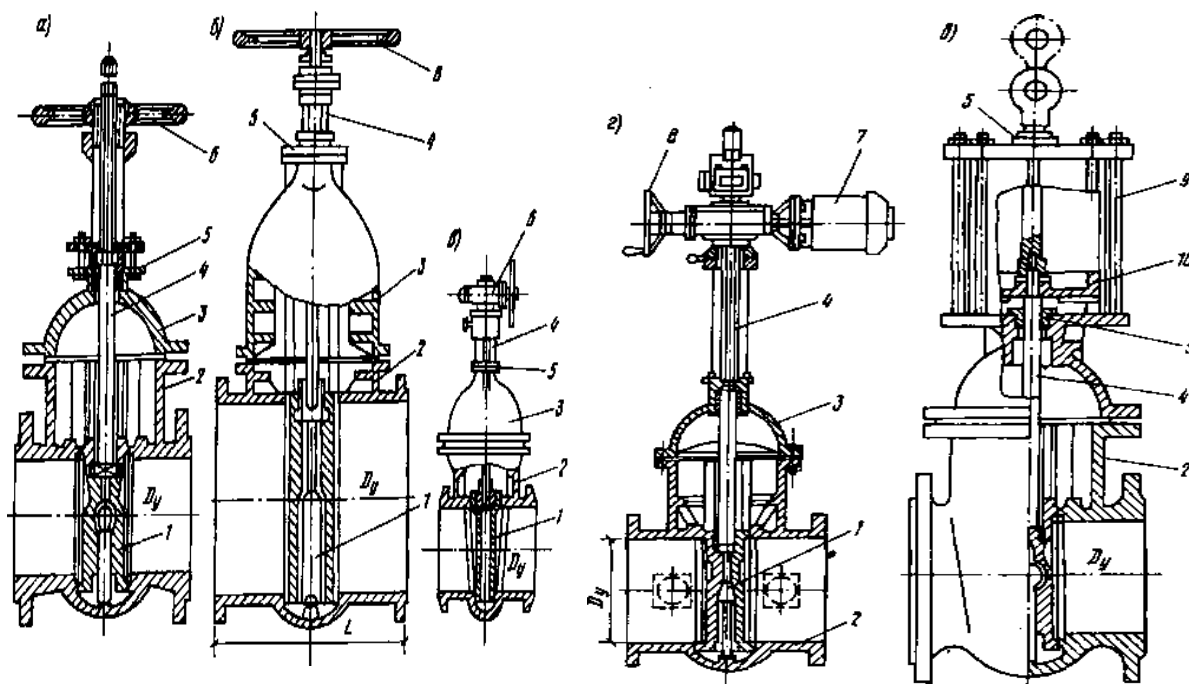


Рис. 1.2. Схеми засувів допоміжного обладнання систем ОВТП: а, б – паралельні з ручним приводом з висувним та невисувним шпинделем; в –

клинова з ручним приводом та невисувним шпинделем; г, д – паралельні з електричним та гідравлічним приводом

Інші види обладнання, які представлені в класифікації, також піддаються різним видам зносу [3, 4]. Аналіз дефектів, що виникають при експлуатації вище названих елементів, показує спільність і дозволяє стверджувати, що їх знос може бути усунений подібними методами, що є одним з основних завдань цього дослідження.

Перераховане вище обладнання та пристрої з часом піддаються різним видам зносу під дією динамічного напору водного середовища та теплоносіїв, ударної дії абразивних частинок (піску, продуктів зносу та ін.), що знаходяться в них, корозійних і кавітаційних процесів. Це призводить до появи різного виду дефектів у вигляді раковин, тріщин, потоншення стінок пристроїв і нерідко їх руйнуванням і, як наслідок, до розгерметизації та витоків рідин із систем життєзабезпечення (рис.1.3).



Рис. 1.3. Дефекти систем ОВТП

В результаті зменшення товщини стінок, що виникають в результаті зношування, змінюються прохідні перерізи, що призводить до втрат тиску в системах ОВТП (рис.1.4).



Рис. 1.4. Зношування внутрішньої поверхні равлика відцентрового насоса ОВТП

Основними заходами щодо відновлення зношеного обладнання та пристроїв, усунення дефектів, що виникають, є або його заміна, що дороге і не завжди можливо через відсутність необхідного обладнання та пристроїв, або проведення відновлювальних робіт з використанням енергоємних технологічних процесів якими є зварювання, наплавлення, напилення (рис. 1.5).

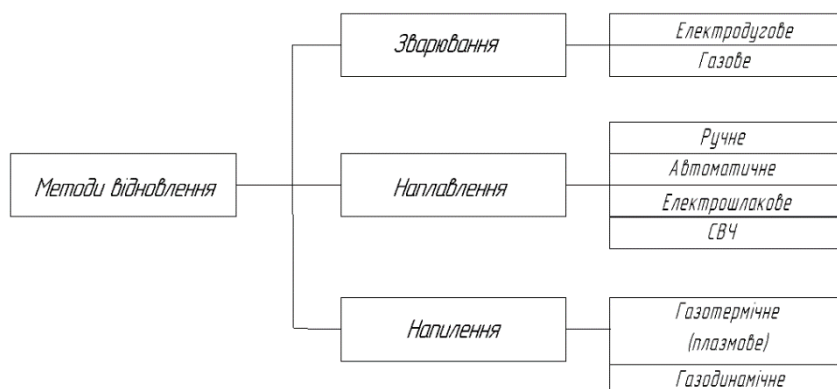


Рис. 1.5. Класифікація методів відновлення зношених поверхонь обладнання водо- та теплопостачання

Технологічний процес зварювання, хоч і призведе до усунення тріщин, раковин, проривів, проте, високотемпературне нагрівання в місці виникнення дефектів призводить до зміни структури та зміни кристалічної решітки в зоні, що прилягає до місця зварювання. При цьому пластичність у навколошовній зоні знижується, виникає крихкість матеріалу, що може призвести до руйнування деталей ОВТП.

Наплавлення застосовують при ремонті та відновленні геометрії зношених деталей ОВТП, а також для забезпечення особливих властивостей на поверхні, а саме, твердості, зносостійкості, корозійної стійкості та ін. Наплавлення являє собою процес, при якому на поверхню деталі наноситься шар металу необхідного складу. Маса наплавленого металу, як правило, не перевищує кілька відсотків від загальної маси виробу, але при цьому усуваються втрати металу на поверхні деталей. Проплавлення основного металу та перемішування основного та проплавленого металів повинні бути мінімальними для збереження механічних властивостей основного металу. Товщина наплавленого шару лежить у межах від 0,5 до 20 мм. Способи розплавлення частини основного металу і матеріалу, що наплавляється аналогічні зварювальним процесам. До таких способів слід включати: ручне дугове наплавлення металевими електродами; автоматичне наплавлення під флюсом; багатоелектродне наплавлення з одночасним плавленням декількох електродних дротів, підключених до одного джерела струму; електрошлакове наплавлення за умови плавлення великої кількості металу; наплавлення струмами високої частоти за допомогою індукційного нагріву з присадним матеріалом, попередньо нанесеним на поверхню виробу, що ремонтується, у вигляді суміші порошків; дугове наплавлення електродом, що не плавиться, для твердих зернистих і порошкових сплавів.

Також існує багато різновидів наплавлення з використанням плазмової дуги, газового полум'я, електрода, що плавиться в захисному газі, порошкового дроту і пластинчастого електрода.

В останні роки особливо популярним стає плазмове напилення, яке здійснюється з використанням малогабаритних плазмотронів типу «Мультиплаз», призначеного для різання, зварювання, паяння металом та нанесення захисних покриттів [1, 5, 6]. Процес здійснюється за допомогою технології одержання плазми з водяної пари. Це абсолютно безпечний та екологічно чистий метод обробки металів.

Процес напилення (металізації) виконується за рахунок нанесення металевого покриття на поверхню методом осадження на ній рідкого металу, що розпорошується газовим струменем [4, 7]. Залежно від виду напилюваного матеріалу (порошок або дріт) газотермічне напилення виконується плазмовим дугою або плазмовим струменем. (рис. 1.7)

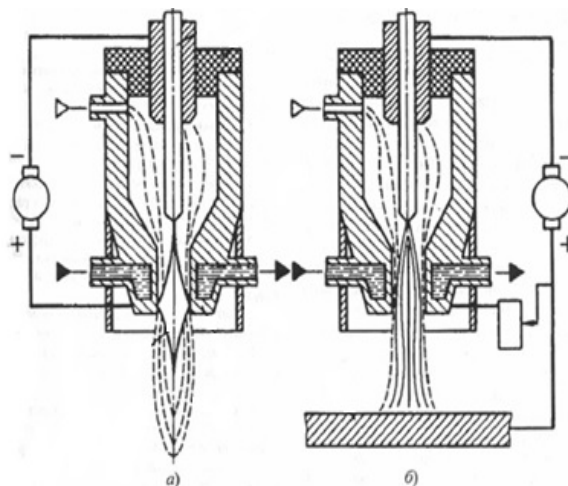


Рис. 1.6. Плазмові джерела нагрівання: а - плазмового струменя, виділеного з дуги; б - плазмової дуги, поєднаної з плазмовим струменем

У першому випадку в зону плазмового струменя під тиском газу, що транспортує, подають матеріал у вигляді порошку, у другому - використовують дрітаний матеріал. Перевагою плазмового напилення є можливість застосування широкого спектру матеріалів та проведення процесу як в атмосфері, так і в захисних камерах. Недоліком є висока вартість способу, відносно низька продуктивність, високий рівень шуму.

Порівняно недавно вітчизняними вченими було розроблено метод «холодного» надшвидкісного напилення покриттів на поверхню об'єктів, що ремонтуються, названий газодинамічним. Цей метод є відносно новим і в даний час починає впроваджуватися у виробничу практику, знаходячи нові області застосування. Метод полягає у нанесенні на оброблювану поверхню металевих порошоків або їх сумішей, у тому числі з керамічними матеріалами,

прискорених за допомогою надзвукового газового потоку, що створюється подачею газу з високим тиском на вхід надзвукового сопла.

Газодинамічний метод заснований на ефекті закріплення твердих частинок, що рухаються з надзвуковою швидкістю, на поверхні деталей при контактній взаємодії [4, 7].

При цьому порошкоподібний матеріал подається у надзвукове сопло, де за допомогою повітря розганяється до необхідної швидкості. Повітряно-порошковий струмінь прямує на оброблювану поверхню і на ній відбувається нарощування металу.

Освоєно виробництво обладнання типу «Дімет» трьох моделей, з використанням якого здійснюється газодинамічний нанесення покриттів на поверхні, що ремонтуються. Портативне напилювальне обладнання серії «Дімет» забезпечує нанесення високоякісних металевих покриттів із порошкових матеріалів. Обладнання призначене для нанесення металів у виробництві виробів та при виконанні широкого спектру ремонтно-відновлювальних робіт [10-12].

У перерахованих вище методах наплавлення і напилення, що забезпечують нанесення покриттів на поверхні, що відновлюються, використовуються високотемпературні двофазні потоки, що призводить до плавлення частинок напилюваних порошків і їх взаємодії з газовим середовищем з утворенням різних сполук (окислів, нітридів і т.і.), що викликають у ряді випадків і не покривають. До інших істотних недоліків слід віднести значне розігрівання деталей та їх деформацію, яка викликана високими залишковими напруженнями, недостатньою міцністю зчеплення частинок між собою та з підкладкою, високу пористість покриття, використання вибухонебезпечних газів, складність в обслуговуванні обладнання, високу вартість обладнання тощо.

Нові можливості в технології відновлення різних видів обладнання відкриває використання РКМ, що мають гарну адгезійну міцність і зносостійкість і здатні замінити дорогі енергоємні технології [11-13]. Ці

матеріали, останнім часом, завдяки своїм властивостям, знаходять все ширше застосування в ремонтному виробництві та підприємствах ТС.

1.2. Композиційні матеріали та їх застосування для відновлення допоміжного обладнання підприємств технічного сервісу

В даний час у системі підприємств ТС все більша увага приділяється перспективним ремонтно-відновним технологіям таких важливих систем життєзабезпечення людини та підприємств легкої промисловості, як водопостачання та тепlopостачання [15-17]. Одними з найважливіших складових цих систем є трубопроводи та різне обладнання, які здійснюють роботу в різних температурних режимах, але мають подібний характер пошкоджень і дефектів. Практика останнього часу показує, що саме нові ЗРКМ та засновані на їх використанні технології дають можливість оперативного усунення дефектів, що виникають під час експлуатації цього обладнання [17, 18].

В даний час існує необхідність у ремонтних технологіях допоміжного обладнання легкої промисловості та обладнання систем тепло- та водопостачання, які не потребують значних фінансових, матеріальних та трудових ресурсів [19, 20]. Цим вимогам задовольняють технології ремонту з використанням ремонтних компаундів, застосування яких не потребує складного і дорогого оснащення та обладнання, і може бути адекватною заміною наплавлення, зварювання та паяння [21, 22]. Раціональна експлуатація фізико-хімічних властивостей ІРКМ призводить до значного зниження трудомісткості та собівартості ремонтно-відновлювальних робіт та суттєвого скорочення витрат матеріалів на їх проведення [21].

До основних переваг цієї ремонтної технології з використанням зносостійких композиційних матеріалів слід віднести можливість їх полімеризації в різних температурних режимах та отримання необхідних розмірів та форми затвердженого складу. Це дозволяє проводити ремонтні

роботи, виключаючи складні технологічні операції нанесення та обробки матеріалу [24-26].

В даний час використання нових ремонтних технологій із застосуванням композиційних матеріалів значно підвищує якість робіт. Якщо спочатку номенклатура композитів обмежувалася декількома типами і в основному це були металонаповнені компаунди, що мали низькі, нестабільні фізико-механічні характеристики, то необхідність у розширенні сфери застосування поставила важливе завдання створення нових ІРКМ з більш високими фізико-механічними властивостями [27, 28]. І як наслідок виникла потреба у вивченні, узагальненні, систематизації та подальшому застосуванні на практиці різних видів ремонтних компаундів. Проведений аналіз показав необхідність розробки методів застосування ІРКМ, оскільки вони будуть використовуватися при відновленні обладнання легкої промисловості та інженерних мереж, що призведе до продовження його життєвого циклу. Саме таке завдання вирішується в магістерській роботі.

Основним напрямом, що забезпечує своєчасне продовження життєвого циклу роботи обладнання, є ремонтно-відновлювальні технології з використанням зносостійких композитів [29, 30]. Це викликано тим, що традиційні способи відновлення та ремонту пошкоджених та зношених механізмів та вузлів на промислових підприємствах потребують значних трудових та фінансових витрат, при цьому заміна деталей з дефектами на нові не завжди є економічно вигідною. На рис. 1.7 показано структурну схему ремонтних компаундів, що застосовуються в даний час, а також перспективних типів композитів, у появі на ринку яких зацікавлені підприємства машинобудівної галузі, підприємств ТС [32, 33, 34].

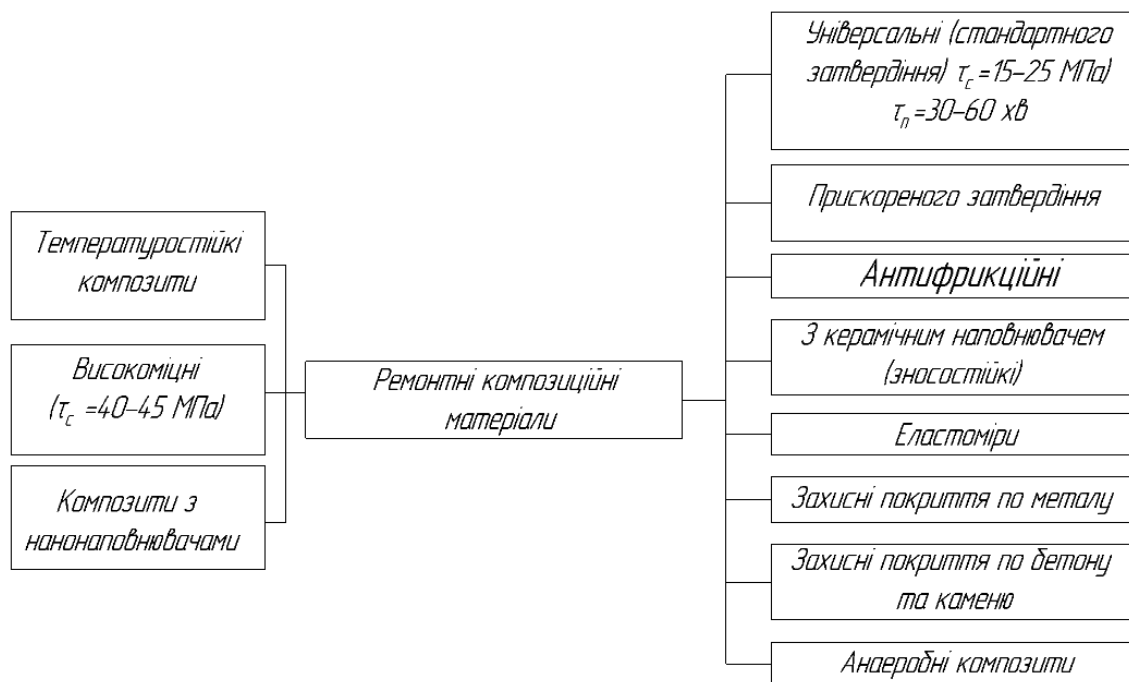


Рис. 1.7. Номенклатура використаних та перспективних РКМ

Ремонтні композиційні матеріали, які характеризуються зносостійкими властивостями можуть бути використані при проведенні ремонтних та профілактичних заходів у таких галузях, як промисловість [34, 35], енергетика, машинобудування [24, 25], автомобільний транспорт [37, 38], хімічна та нафтопереробна промисловість, авто та судноремонт та інших [39, 40].

Використання РКМ сприяє зниженню собівартості ремонтних робіт від 3 до 10 разів (у тому числі внаслідок відсутності необхідності в дорогому демонтажі), а також до можливості відновлення тих деталей і вузлів, які неможливо ремонтувати за допомогою традиційних способів (зварювання, наплавлення, напилення).

Широке застосування при проведенні ремонтно-відновлювальних робіт допоміжного обладнання підприємств ТС та інженерних мереж ЖКГ знайшли ремонтні компаунди на основі модифікованих епоксидних олігомерів, які полімеризуються без нагрівання, до складу яких входять мінеральні (у тому числі керамічні) та металеві наповнювачі [40, 41].

Присутність у складі композиту дрібнодисперсних порошків призводить до підвищення характеристик міцності у затвердженому стані і працездатності

в діапазоні температур від -60° до $+150^{\circ}\text{C}$. Застосування подібних матеріалів у ремонтних роботах складає 70% від загального обсягу всіх матеріалів, що клеять. Але за своїми характеристиками міцності ремонтні композиційні матеріали поступаються металам, що застосовуються при напиленні і наплавленні, а їх використання, як було зазначено раніше, обмежено температурним режимом від -60°C до $+150^{\circ}\text{C}$. У той же час, у цьому діапазоні вони становлять серйозну конкуренцію металам.

Застосування ремонтних компаундів дає можливість здійснювати такі види робіт, як нанесення зносостійких покриттів, відновлення геометрії деталей зруйнованих внаслідок впливу корозії та ерозії, відновлення та захист корпусних деталей від негативного впливу навколишнього середовища, герметизація та закладення різних тріщин, пробіїв, сколів та вм'ятин [42, 43].

Зазначена актуальність питань, що стосуються ремонту машин, викликана наявністю в нашій країні великого парку морально та фізично застарілого обладнання, що потребує постійного, а найчастіше аварійного ремонту при хронічній нестачі запасних частин. Головним конструкційним матеріалом масового машинобудування є метал. Як правило, ремонт виробів виготовлених з металу виконують з використанням металу. Для забезпечення контактної взаємодії між металами необхідно застосовувати термічний вплив, що забезпечується спеціальним громіздким технологічним обладнанням та висококваліфікованим персоналом. Першим виробником була швейцарська фірма «Durmetall», яка для ремонтних цілей, випустила композит універсального застосування «Durmetall-standart». Пізніше матеріали створювалися іншими зарубіжними фірмами, які освоїли технологію виробництва та застосування вже цілої гами ремонтних складів.

В Україні перші роботи з розробки та освоєння аналогічних ремонтних композиційних матеріалів (РКМ) відносяться до початку 90-х років минулого століття. Вивченню РКМ було присвячено праці багатьох вчених [9, 33, 39]. Завдяки їхнім зусиллям вдалося отримати перші вітчизняні ремонтні композити, а також було проведено комплекс досліджень їх властивостей та

виконано перші практичні відновлювальні роботи з їх використанням, сфера застосування яких останнім часом постійно розширюється, охоплюючи нові галузі.

Необхідність у ремонтних технологіях технологічного та допоміжного обладнання підприємств ТС, що не потребують суттєвих фінансових витрат, трудових та матеріальних ресурсів, існує постійно. Саме таким вимогам відповідають технології ремонту обладнання та відновлення деталей із використанням зносостійких композиційних матеріалів [47, 48]. Рациональне використання їх фізико-хімічних властивостей дозволить суттєво знизити собівартість та трудомісткість ремонту та скоротити витрати енергоресурсів та матеріалів на їх проведення не лише у легкій промисловості та системах ЖКГ, а й при відновленні обладнання у промисловому виробництві.

Аналіз вітчизняної та зарубіжної практики виявив можливість усунення порядку 15-20% дефектів трубопроводів у системах водо- та теплопостачання за рахунок застосування для їх ремонту технології на основі металополімерних композитів, що працюють за принципом «холодного зварювання», що відкриває нові можливості відновлення [42, 43].

В цьому випадку як основа адгезії виступає молекулярна взаємодія полімерної матриці РКМ з металом відновлюваної поверхні ОВТП. Зміна механізму зміцнення дає можливість повністю відмовитися від механічного та термічного впливу на поверхню, що відновлюється, в процесі ремонту зношених деталей різного обладнання. Тому технологічний процес з використанням металополімерів носить назву холодного молекулярного зварювання, або «холодне зварювання» [10-13].

Перехід від атомарного взаємодії молекулярному дозволяє виключити зазначені недоліки традиційних способів зварювання. У цьому процесі роль витратних матеріалів виконують РКМ, до складу яких входить полімерна матриця та різні наповнювачі. Для молекулярного взаємодії немає необхідності у нагріванні, тобто. виконується без підведення енергії. Сучасні ІРКМ – наукомістка продукція. Для створення композиційних матеріалів з необхідним

комплексом експлуатаційних і технологічних властивостей використовують останні досягнення в різних галузях науки. ІРКМ мають унікальне поєднання характеристик: адгезія до вологих поверхонь → можливий ремонт без повного осушення; антикорозійна стійкість → захист металу від іржі; терmostійкість → витримують гарячу воду та пару; хімічна інертність → не руйнуються під дією реагентів; герметичність → усувають мікротріщини та пори.

При формуванні адгезійного контакту між молекулами металу та полімеру беруть участь кілька видів сил, що призводить до розширення спектра технологічних можливостей контролю над адгезійною міцністю у з'єднаннях виду полімер-метал у порівнянні з металевим зв'язком [50].

Незважаючи на значні переваги, ізоляційно-ремонтні композиційні матеріали мають і певні обмеження [14, 15]. Зокрема, вони характеризуються температурними межами застосування – у більшості випадків робоча температура не перевищує 200°C. Крім того, такі матеріали є доволі чутливими до якості підготовки поверхні: недостатнє очищення або знежирення може суттєво знизити адгезію та довговічність покриття. ІРКМ також не завжди ефективні в умовах дуже високого тиску, особливо без додаткового армування. Важливим фактором є й необхідність суворого дотримання технології нанесення та полімеризації, оскільки від цього безпосередньо залежить якість і надійність ремонту.

Зміна властивостей композитів можна відповідним чином проводити за допомогою модифікування полімерної основи, вводячи функціональні групи різних призначень у її структуру. У цьому випадку їх зміст впливає на адгезійну міцність і створює екстремальну залежність від них, тому при створенні нової рецептури необхідно ретельно дотримуватись оптимального співвідношення всіх компонентів у складі композиції [22, 25].

У той же час надмолекулярна структура полімеру, що піддається технологічному регулюванню, впливає на величину адгезійної міцності. Управління над процесами змочування металевої поверхні полімерної матриці компаундів здійснюється шляхом введення в їхню рецептуру поверхнево-

активних речовин. З метою підвищення технологічних властивостей до складу ремонтного компаунду вводять тиксотропні добавки. Змінюючи зміст, дисперсність і природу наповнювача можна змінити рівень внутрішньої напруги та співвідношення пластичних та пружних властивостей композиту. Також при розробці ремонтного складу необхідно враховувати релаксаційний характер розвитку деформацій та специфіку механічної поведінки полімерів [22].

У ході полімеризації суміші компонентів компаундів, що входять до їх складу, відбувається об'єднання молекул у макромолекулярні ланцюги, які у свою чергу утворюють складну тривимірну структуру шляхом переплетення з дисперсними частинками дискретного наповнювача. Можливість відмови від механічного та термічного впливів на відновлювану поверхню в процесі ремонту пошкоджених деталей дає зміну механізму зміцнення від атомарної взаємодії (для металів) до молекулярної (для композитів). Холодне зварювання дозволяє забезпечити простоту технології робіт із відновлення різного обладнання та надійність ремонтного з'єднання.

Увага представників виробництва прикута до переваг ХЗ. Використання холодного молекулярного зварювання для ремонтних робіт, такої найбільш масової продукції, як автомобільний транспорт та обладнання підприємств ТС, почалося практично одночасно в Україні та за кордоном. Через не розвиненість на той час ринкових відносин вітчизняні вчені не мали можливості реалізувати потенційні можливості виконаних робіт, хоча в той же час розробки зарубіжних фірм отримали подальший розвиток.

РКМ на основі металополімерів використовують уже понад тридцять років [34, 35]. Для вітчизняних підприємств пропонується широка гама цих матеріалів. Причини такого різноманіття ґрунтуються лише на рекламних проспектах фірм-виробників – звичайному споживачеві складно зробити вибір.

Найчастіше різні виробники випускають однотипну продукцію під своїми фірмовими назвами, ціна яку може різнитися у межах кілька разів. РКМ російських розробок досі практично не використовувалися через відсутність їх

промислового випуску та необхідної інформації про них для потенційних замовників. Проте за останні 10-12 років у нашій країні були створені підприємства, які не тільки здійснюють виробництво на замовлення споживачів необхідну кількість ремонтних композитів, але й розробляють прогресивні технології відновлення та беруть участь при проведенні ремонтних робіт різного промислового обладнання на підприємствах [29, 30].

На сьогоднішній день на ринку представлені ремонтні композити таких відомих іноземних фірм-виробників, як «Durmetall», «Belzona», «Diamant», «Loctite», «Unirep Devcon», «Chester Molecular» та інших. Слід відрізнити полімерні ремонтні композити від металонаповнених композицій, які виконані у вигляді найпростішої суміші епоксидної смоли і різних наповнювачів. Зазначені композиції за своїми фізико-механічними та хімічними показниками у значній мірою поступаються ремонтним полімерним композитам і призначені для ремонту на промислових підприємствах.

Високі фізико-механічні параметри в сукупності з невисокою вартістю та простотою використання роблять РКМ незамінними при проведенні ремонтних робіт та складальних з'єднань у різних галузях промисловості, у тому числі легкої, ЖКГ та підприємств ТС.

Для відновлення розмірів деталей та здійснення ремонтних робіт найбільш підходящими є такі способи, при яких на деталь не виявляється температурна дія або виявляється, але незначною мірою, не змінюючи її механічні властивості та структуру. До подібних способів слід віднести електроіскрове та гальванічне нарощування металу, розпилення; імпульсне приварювання стрічок, металізації різних видів, але в першу чергу використання полімерних композитів [24, 25]. Це зумовлено:

- невисокою вартістю синтетичних матеріалів порівняно з металами;
- універсальністю при виконанні ремонту деталей із чорних та кольорових металів, дерева, кераміки, бетону, пластмас, каменю, скла та ін.;
- простотою їх підготовки до роботи та використання;

- високою хімічною стійкістю композитів до різноманітних агресивних середовищ, у тому числі лугів, кислот, морської води, нафтопродуктів та ін.;
- малою питомою масою компаундів;
- можливістю отримання різних, часом унікальних фізико-механічних та хімічних властивостей РКМ, що часто перевершують за своїми експлуатаційними показниками метали;
- електроізоляційними та антифрикційними властивостями;
- вібро- та шумопоглинанням при застосуванні їх у конструкціях механізмів та машин.

РКМ – це двокомпонентні полімери, з наповнювачами у вигляді мінеральних та дрібнодисперсних металевих порошків. Для наділення їх специфічними показниками, такими як твердість, міцність, температуростійкість, в'язкість у ремонтні склади вводять різноманітні модифікуючі добавки. Структурну схему складу ремонтних композитів представлено на рис. 1.8. Кожен із компонентів, що входять до складу, здійснює строго визначену для нього функцію. При цьому важливе значення при отриманні якісного складу РКМ з високими вихідними параметрами відводиться кількості компонентів, що вводяться в композицію. Варіюючи складом, кількістю компонентів та їх співвідношенням можна змінювати підсумкові параметри ремонтних композитів.

Це можна пояснити такими причинами: широкий асортимент доступних на ринку епоксидних смол та затверджувачів дозволяє в результаті після полімеризації отримати композити з широким поєднанням властивостей; в результаті хімічної реакції між епоксидними смолами та затверджувачами не виділяються шкідливі леткі речовини та вода, а усадкові явища при полімеризації значно нижчі, ніж для поліефірних або фенольних смол; для епоксидних смол характерна хороша адгезія до різних наповнювачів, підкладок та армуючих компонентів [33, 34].

Активаторами композиційних матеріалів є затверджувачі органічних смол, які суттєво впливають на такі характеристики композитів, як

температуростійкість, час полімеризації, життєздатність приготовленої суміші, водостійкість композиції.

Крім основи та затверджувачів до складу ремонтних компаундів додатково вводять компоненти, представлені на рис. 1.8. Їх кількість підбирається індивідуально кожного зі складів гами РКМ.

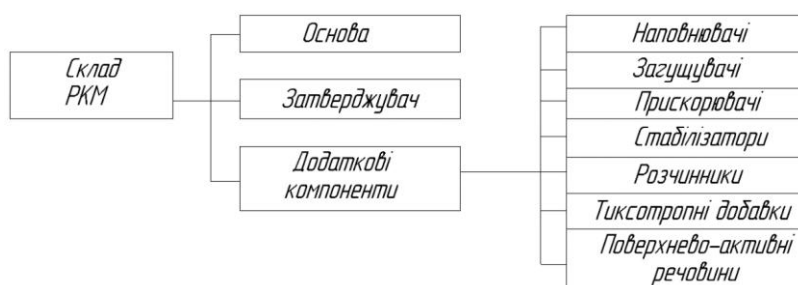


Рис. 1.8. Структурна схема складу РКМ

Використання полімерних композитів у ремонтно-відновлювальних роботах постійно зростає у всьому світі, незважаючи навіть на невисокі характеристики міцності композицій і адгезійних сполук полімер-метал у порівнянні з металами, а також відносно невисоку робочу температуру відновлених деталей і з'єднань (найчастіше в межах 150°C). На сьогодні вже явно визначилися ті сфери застосування, в яких доцільно використовувати саме полімерні композити, завдяки їх цінним властивостям. На рис. 1.9 наведено аналіз характерних властивостей РКМ, а в таблиці 1.2 Додатку А2 представлені їх усереднені значення, які змінюються залежно від конкретної поставленої задачі під час проведення ремонту пошкодженого ОВТП.

Аналіз наявних на ринку ІРКМ та анаеробних клеїв показує, що найкращою фірмою, що поставляє гамму ремонтних композитів та анаеробних клеїв, є польська компанія «Chester Molecular» (див. Додаток 2). У номенклатурі матеріалів цієї фірми можна зустріти різні за своїми можливостями використання і характеристиками, в тому числі РКМ швидкого затвердіння, універсального застосування, для кавітаційного та корозійного захисту, антифрикційні, різні види герметиків і анаеробних клеїв, спеціальні види захисних полімерних покриттів, а також цілий ряд застосуванням РКМ.

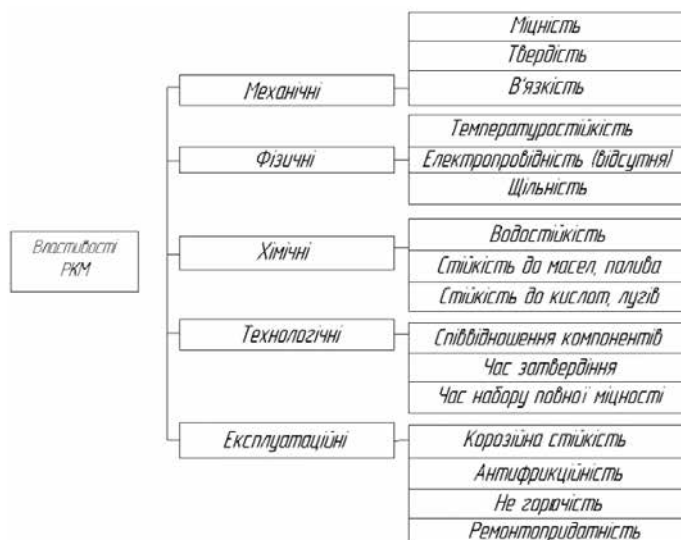


Рис. 1.9. Характерні властивості РКМ

Матеріали цього виробника відрізняються стабільною високою якістю, і за своїми фізико-технічними та експлуатаційними показниками не поступаються матеріалам, що поставляються в нашу країну такими відомими фірмами як «Durmetall» (Швейцарія), Belzona (США), Diamant (ФРН), «Loctite» (США) та інших., але значно дешевше цих аналогів, тобто. за найважливішим співвідношенням «ціна/якість» - виявляються найбільш прийнятними. Серед РКМ виділяються найкращими фізико-механічними параметрами композити «Полімет» та «Лео». Їх ефективне використання дає можливість виконувати швидкий ремонт різних дефектів, таких як раковини, пробоїни, тріщини, в деталях виготовлених з чорних і кольорових металів [39, 40].

1.3. Аналіз композиційних ремонтних матеріалів

Попередній аналіз характеристик РКМ вітчизняних та зарубіжних виробників показав, що для усунення зносу металевих поверхонь в обладнанні та агрегатах систем допоміжного обладнання підприємств ТС, якими є ОВТП, найбільш переважними є композити з керамічними наповнювачами. Такими матеріалами є композиційні матеріали фірми «Честер Молекуляр» (Польща), а саме: «Метал Керамік Т» – пастоподібної консистенції; «Метал Керамік F, FHT, FSL» – ці три види матеріалів мають рідку консистенцію. Розглянуті матеріали

представлені в Додатку А3. Провівши аналіз Додатку А3 слід зазначити, що матеріали «Метал Керамік» має високі механічні характеристики: стійкі до води, олій, моторних палив, неконцентрованих кислот і лугів; набуття повної хімічної стійкості протягом 7 діб.

Таким чином, на основі аналізу ОВТП, класифікації їх дефектів, вивчення різних видів зношування, пошуку нових матеріалів та технологій були визначені наступні завдання дослідження: теоретичне опрацюванні питань адгезійної міцності та зносостійкості; вибір РКМ та проведення експериментальних досліджень щодо визначення їх фізичних, хімічних та механічних характеристик; удосконалення на основі використання РКМ методу відновлення ОВТП, яке втрачає працездатність в процесі експлуатації в результаті абразивного, корозійного та кавітаційного зносу [11, 12, 14].

1.4. Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз вітчизняних та зарубіжних джерел інформації з розглянутої проблеми. Виділено об'єкти дослідження в системах водо- та теплопостачання та проведено аналіз їх дефектів.

2. Встановлені основні методи усунення зносостійкості, розглянуто основні характеристики, відзначено їх переваги та недоліки.

3. Розглянуто склад, властивості та сфери застосування сучасних РКМ на полімерній основі, підкреслено доцільність їх застосування для відновлення обладнання у системах життєзабезпечення підприємств ТС.

4. Визначено основні завдання досліджень та алгоритми їх вирішення, які полягають у розробці методології сервісного обслуговування систем ОВТП та у розробці ТП та методів відновлення обладнання та агрегатів на базі використання прогресивних полімерних композиційних матеріалів.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Методи дослідження адгезійної міцності з'єднань «полімер метал»

Дослідження адгезійної міцності з'єднань «полімер-метал» може проводитися двома методами – руйнівним та неруйнівним. До неруйнівних методів відносяться: калориметричний, спектрометричний та термодинамічний методи.

Калориметричний метод характеризує адгезію рідини до твердого тіла за тепловим ефектом, який запропонував Гаргенс [31, 33]. Тепловий ефект визначають за допомогою мікрокалориметрів із рідинним термометром або термопарою. Адгезію полімеру до твердої поверхні отримують фіксуєючи тепловий ефект при нанесенні на поверхню низькомолекулярної речовини, що є аналогом полімеру.

Спектроскопічний метод оцінює взаємодію атомів та молекул полімеру з твердою поверхнею. Зв'язки між молекулами (атомами) характеризуються енергією та частотою коливання частинок та визначаються методом спектрального аналізу. Найбільшого поширення набула ІЧ-спектроскопія. Методом ІЧ-спектроскопії визначають взаємодію полімерів з поверхнями металів, що характеризується утворенням водневих зв'язків.

Термодинамічний метод характеризує поверхні твердого та рідкого тіл певною енергією, яка називається поверхневим натягом. Енергію зв'язку рідкого тіла з твердим характеризує рівняння Дюпре [31, 33]:

$$W_{ad} = \gamma_s + \gamma_L - \gamma_{SL}, \quad (2.1)$$

де $\gamma_s + \gamma_L$ - надлишкова енергія на межі контакту γ_{SL} рідкого L і твердого S тел;

На рис. 2.1 представлена крапля рідини у рівноважному стані на поверхні твердого тіла.

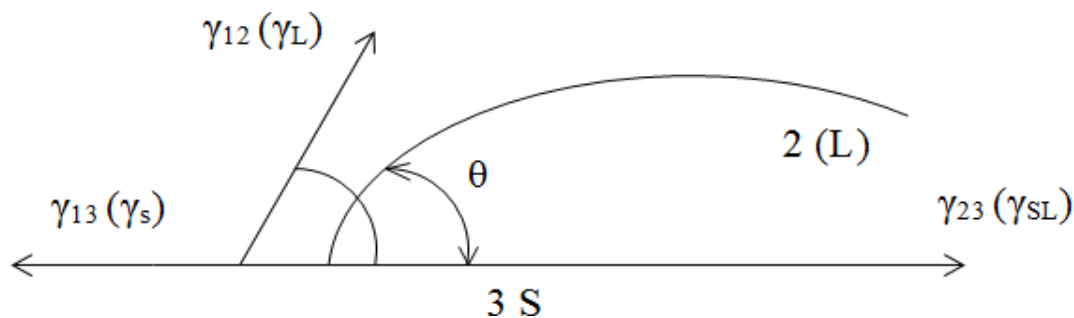


Рис. 2.1. Крапля рідини на твердій поверхні у рівноважному стані

Крапля рідини у рівноважному стані утворює з твердою поверхнею кут θ , який досягне рівноважного значення, якщо поверхневий натяг рідини, твердого тіла та міжфазного розділу рідини та твердого тіла стануть урівноваженими. За рис. 2.2 очевидно, що:

$$\gamma_s - \gamma_{SL} = \gamma_L \cdot \cos \theta \quad (2.2)$$

Аналізуючи вирази (2.1) і (2.2) отримаємо вираз, який називають рівнянням Юнга [1]:

$$W_{ад} = (1 + \cos \theta) \quad (2.3)$$

На основі викладеного можна констатувати, що знання поверхневого натягу рідини та величини для змочування θ дозволяє визначити адгезію рідини до твердого тіла. У цьому значення γ_L і θ визначаються експериментально. Адгезія, отримана вказаним методом називається термодинамічною.

Перераховані вище неруйнівні методи визначення адгезії є переважно теоретичними та експериментальними, тоді як у практичних цілях для визначення адгезії застосовуються руйнівні методи. До складу цих методів відносяться: відшаровування; ультразвуковий; ударного навантаження пневмогідравлічний; інерційний; та ін. Однак найбільш широко для визначення адгезії сполук метал-полімер застосовують метод зсуву, нормального і нерівномірного відриву, метод штифтів. Саме ці методи докладно розглянуті в представлений роботі.

На рис. 2.2 наведені схеми випробувань адгезійних з'єднань, які виконані за вказаним методом, а на рис. 2.3 – пристосування для випробування зразків на відрив.

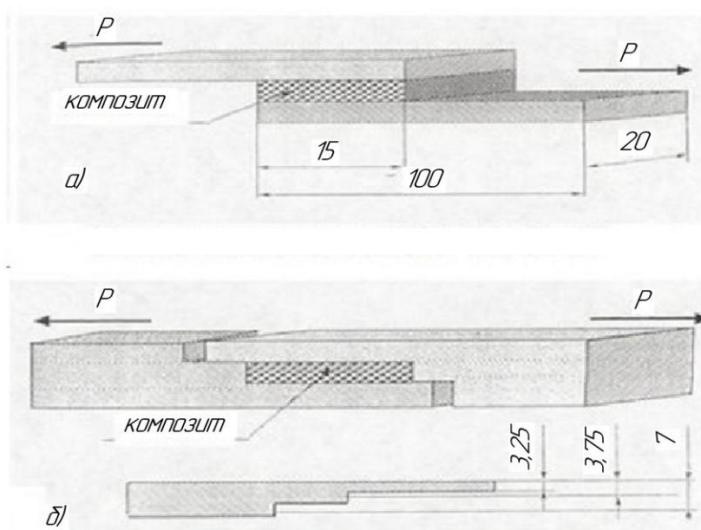
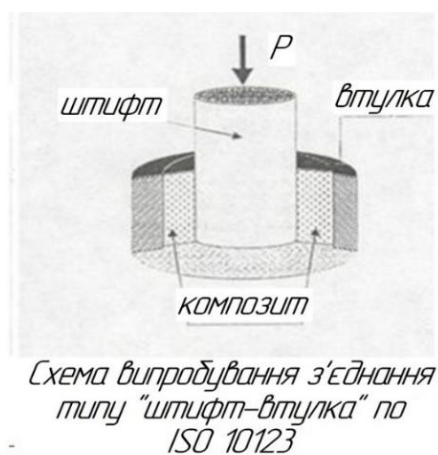


Рис. 2.2 Схеми випробувань адгезійних з'єднань за методом зсуву

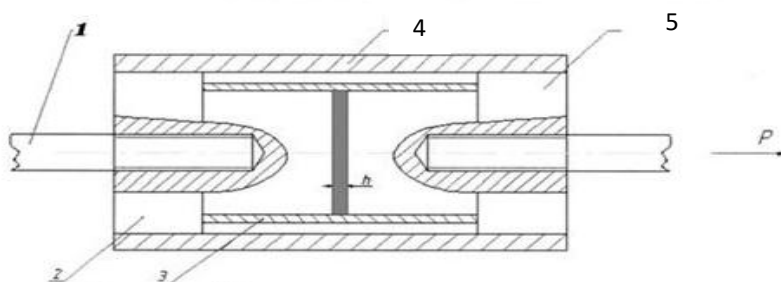


Рис. 2.3. Пристосування для випробування зразків адгезійних з'єднань на відрив: 1, 2 – зразки, що підлягають склеюванню; 3 – розрізна втулка (розпірна); 4 – втулка центрувальна; 5 – перехідники; h – висота клеєвого складу, мм

Під час проведення досліджень було встановлено, що реальна міцність клейових сполук значно нижча, ніж теоретична. Зазначена особливість пояснюється наявністю в ньому мікродефектів, що виникають внаслідок

різноманітних взаємодій ОБТП підприємств ТС: вологих; теплових; усадкових; механічних; відсутністю універсальних методів розрахунку та єдиної теорії адгезії.

Згідно літературних джерел, клейове з'єднання є нероз'ємним з'єднанням двох або більше деталей, де навантаження від одного елемента, що склеюється, передається іншому через клейовий прошарок. Така сполука є лише окремим випадком адгезійної сполуки гетерогенної системи, що утворюється в результаті адгезійної взаємодії і має комплекс власних характеристик, обумовлених властивостями адгезиву та склеюваних елементів.

На відміну від адгезії, що характеризує міцність зв'язку адгезійних з'єднань та субстрату, когезія визначає міцність самого адгезиву. Когезія обумовлена хімічним зв'язком між складовими адгезив молекулами та атомами та міжмолекулярною взаємодією. При формуванні клейового шва біля меж розділу виникає перехідна зона, обумовлена впливом поверхні склеюваного елемента.

Розглянемо найбільш поширений тип клейового з'єднання металів «внахлест», для якого клейовий прошарок є полімером (рис. 2.4).

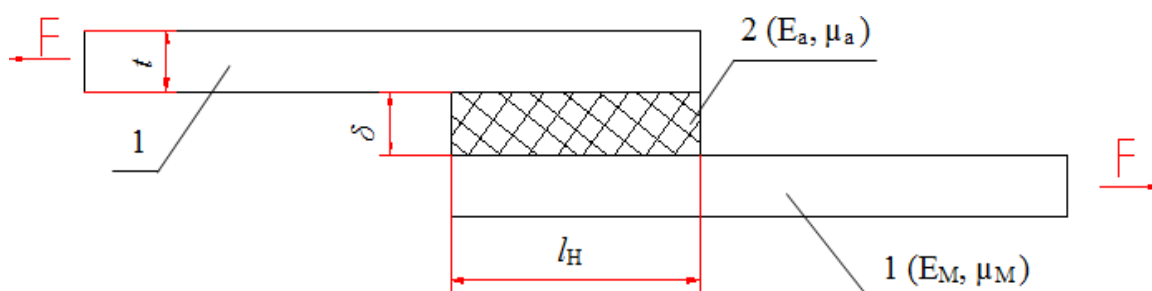


Рис. 2.4. Схема з'єднання елементів типу «одинарний нахлест»: 1 - склеювані елементи; 2 - клейовий шов; E_a , E_m - модулі пружності адгезиву та металу; μ_a , μ_m - коефіцієнти Пуассона адгезиву і поверхонь, що з'єднуються

Навантаження в площині пластин, що склеюються, призводить до появи змінних напружень зсуву і відриву, як у клейовому шві, так і на поверхні матеріалів. По довжині елементів, які з'єднані внахлест напруги розподілені нерівномірно. Максимальні напруження в клейовому шві можуть у декілька

разів перевищувати значення середнього напруження зсуву τ_{cp} , яке визначається як відношення зовнішнього навантаження до площі склеювання:

$$\tau_{cp} = \frac{F}{l \cdot b} \quad (2.4)$$

де l – довжина нахлесту,

b – ширина елементів, які склеюються.

Максимальні напруження кінця нахлесту та його відношення до середнього напруження, тобто коефіцієнт концентрації напруження, значною мірою залежить від геометричних параметрів та властивостей матеріалів клейового з'єднання. Спрощено вважають, що значення напруження залежить від ширини нахлесту з'єднання і зменшується зі збільшенням його довжини.

Попередніми експериментами встановлено, що руйнівне навантаження пропорційне довжині деталей, що з'єднуються в нахлест тільки при невеликих значеннях останньої, а після досягнення деякого значення руйнівне навантаження прагне постійного значення і середня руйнівна напруга зсуву значно зменшується (рис. 2.5).

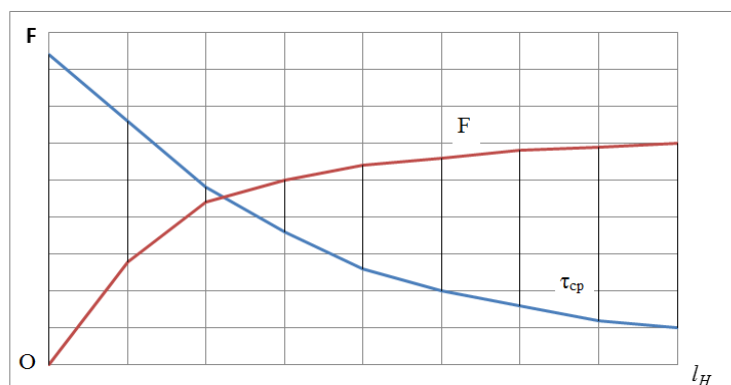


Рис. 2.5. Графік залежності руйнівного навантаження F і середньої руйнівного напруження τ_{cp} при зсуві від довжини внахлест

Такий стан клейової сполуки обумовлений концентрацією напруження у кінця нахлесту, викликаною різницею деформацій склеєних елементів та їх вигином, і багато в чому визначається межею плинності матеріалів субстрату. Якщо припустити, що напруження розподілені рівномірно, то розтягування в склеюваних з'єднання буде становити:

$$\sigma = \frac{F}{lt} \quad (2.5)$$

де t - товщина елементів, що склеюються.

При постійних значеннях σ і t середня руйнівне напруження зсуву обернено пропорційні довжині внахлест. При аналізі розподілу напруги у клейовому шві необхідно також враховувати і різницю деформацій склеєних елементів (рис. 2.6).

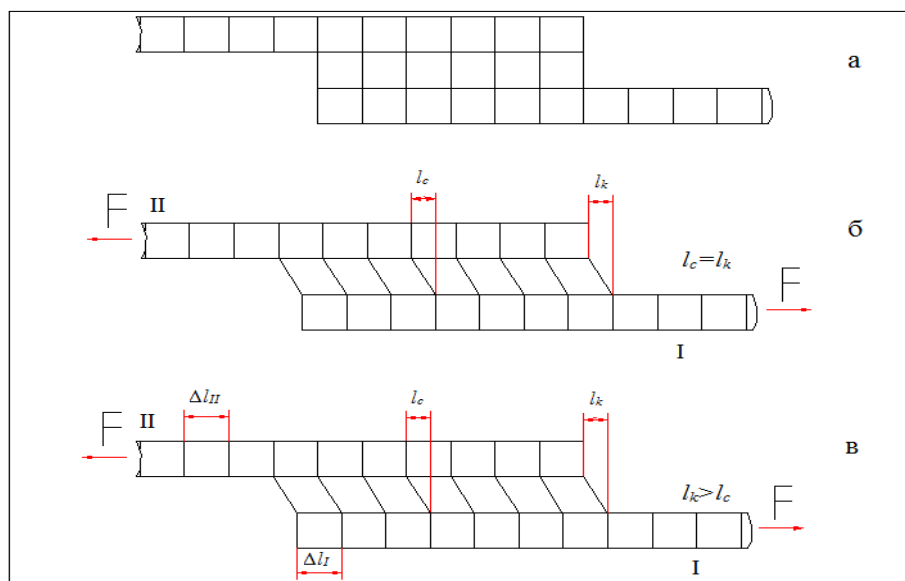


Рис. 2.6. Напруження зсуву в клейовому шві: а - не навантажене з'єднання внахлест; б - навантажене при жорстких склеюваних елементах; в - навантажене з'єднання при пружних склеюваних елементах; l_c - деформація елементарної ділянки клейового шва в центрі внахлест; l_k - те саме в кінці нахлестки; Δl_I - деформація елементарної ділянки склеюваного елемента I наприкінці; Δl_{II} - те ж для склеюваного елемента II наприкінці з'єднання внахлест.

Якщо склеєні елементи не деформуються і переміщуються як жорсткі блоки (рис. 2.6, б), то клейовий шов деформується так, що взаємне усунення обох елементів залишається постійним по всій довжині клейового шва.

Якщо з'єднання виконане для пружних елементів, що склеюються, то деформація і переміщення відповідатимуть відображенню на рис. 2.6.

Нерівномірність напруг, що зсувають, оцінюється коефіцієнтом концентрації напруг:

$$K_t = \frac{\tau_{max}}{\tau_{cp}} \quad (2.6)$$

Також слід зазначити, що деформація в клейовому шві за його товщиною також різна ($\Delta l_{II} > \Delta l_I$).

При сильній адгезійній взаємодії та наявності напливу на кінці нахльостування тріщина виникає у торця склеюваного елемента і рухається через шар адгезиву у напрямку до міжфазної поверхні до зони з найбільшою деформацією в склеюваному елементі. Якщо адгезійне з'єднання симетрично як по геометрії, так і за властивостями матеріалу, то поширення тріщини починається з 2-х кінців нахлесту (рис. 2.6) і після досягнення певної довжини нахлесту l_ϕ клейового з'єднання руйнується.

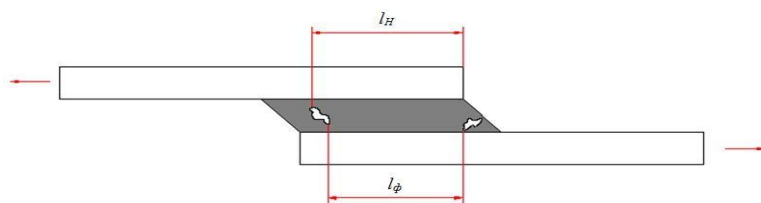


Рис. 2.6. Когезійне руйнування клейового з'єднання: l_H - номінальна довжина внахлест; l_ϕ - фактична довжина внахлест при руйнуванні

Однак для визначення міцності клейового з'єднання недостатній лише аналіз розподілу напруження. У дослідженні міцності адгезійних з'єднань необхідно також враховувати низку інших факторів, особливо технологічного та експлуатаційного характерів, що дуже важливо при використанні РКМ для відновлення різних видів обладнання підприємств ТС.

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Методика дослідження адгезійної міцності зносостійких композиційних матеріалів

Оцінювання адгезійної міцності ремонтних композиційних матеріалів, що використовуються для відновлення та зміцнення поверхонь деталей допоміжного обладнання підприємств ТС, є одним із ключових етапів визначення їх експлуатаційної придатності [9, 16, 22].

Для аналізу міцності композиційних систем при короткочасному навантаженні доцільно використовувати показники середньої та максимальної міцності. Показник середньої міцності визначається як відношення руйнівного навантаження до площі контакту між з'єднуваними поверхнями. Однак у реальних умовах навантаження розподіл напружень у зоні склеювання є нерівномірним, що обумовлено геометрією зразка, властивостями основного матеріалу, товщиною адгезійного шару та пружно-деформаційними характеристиками композиту [16, 17].

При дослідженні з'єднань на відрив вплив товщини полімерного шару на величину нормальних напружень є незначним. Натомість під час випробувань на зсув товщина клейового прошарку суттєво впливає на формування дотичних напружень у зоні контакту. У більшості випадків руйнування адгезійного з'єднання відбувається локально – у місцях концентрації напружень, де виникають максимальні навантаження. З цієї причини саме максимальні напруження найбільш повно характеризують фактичну адгезійну міцність системи «композиційний матеріал – металева поверхня».

У процесі виконання досліджень максимальне допустиме напруження приймалось відповідно до умов роботи з'єднання при зсуві або зрізі.

Основною метою експериментальних досліджень було визначення адгезійної міцності зносостійких композиційних матеріалів, а також

встановлення впливу технологічних параметрів на якість сформованих з'єднань.

Для проведення експериментів використовували композиційні матеріали виробництва «Chester Molecular», а саме: Chester Metal Ceramic F, Chester Metal Ceramic FSL, Chester Metal Ceramic FHT та Chester Metal Ceramic T. Вибір зазначених матеріалів обумовлений їх високими експлуатаційними характеристиками, зокрема стійкістю до абразивного зношування, механічною міцністю та придатністю до ремонтно-відновлювальних робіт. Знежирення поверхонь здійснювали із застосуванням очищувача Chester Molecular F7. На рис. 3.1 представлено зразки композиційних матеріалів та очищувач.



Рис. 3.1 Композиційні матеріали Chester Metal Ceramic F та очищувач Chester Molecular F7

Для забезпечення достовірності результатів випробувань кожен режим дослідження передбачав одночасне тестування п'яти однотипних зразків. Такий підхід дозволив мінімізувати випадкові похибки та підвищити статистичну надійність отриманих результатів. Підготовка зразків до нанесення композиційного матеріалу виконувалась за уніфікованою методикою, яка включала механічне оброблення поверхонь із досягненням шорсткості $R_z=175$ мкм та подальше знежирення очищувачем Chester Molecular F7. Формування необхідної шорсткості забезпечувало підвищення площі фактичного контакту та покращення умов механічного зачеплення адгезійного шару з металевою основою. Після нанесення композиційного матеріалу зразки витримували

протягом 24 годин за кімнатної температури, що забезпечувало стабільне проходження процесу полімеризації.

Випробування на зсув проводили за схемою розтягу з'єднання внапуск, яка є однією з найбільш поширених методик визначення адгезійної міцності клейових систем. Як матеріал основи використовували пластини зі сталі 40Х, що широко застосовується для виготовлення деталей машин та елементів промислового обладнання.

3.2 Програма і методика досліджень застосування композиційних матеріалів під час відновлювальних робіт ОВТП

У ході виконання досліджень було розроблено програму експериментальних робіт, спрямованих на оцінювання ефективності застосування РКМ при відновленні ОВТП. Основною метою досліджень було встановлення можливості використання композиційних матеріалів для оперативного відновлення пошкоджених поверхонь без застосування складних термічних технологій та демонтажу обладнання.

Для реалізації поставленої мети було передбачено виконання комплексу дослідних робіт, які включали [29, 30]: аналіз технологічних умов ремонту; визначення впливу підготовки поверхні на якість зчеплення полімерного шару з металом; дослідження режимів приготування композиційних сумішей; оцінювання процесів полімеризації та формування відновленого покриття.

Дослідження проводилися на деталях та елементах обладнання систем водо- і теплопостачання, що мали типові експлуатаційні пошкодження: корозійні ураження, тріщини, раковини, зношування посадкових поверхонь та локальні механічні дефекти.

Методика досліджень передбачала послідовне виконання технологічних етапів відновлення. На початковому етапі здійснювалася підготовка поверхні пошкоджених деталей. Поверхню очищали від продуктів корозії, залишків мастил, бруду та старих покриттів. Для цього використовували абразивну

обробку, механічне шліфування, зачистку наждаковими матеріалами та, за необхідності, піскоструминне очищення. Після механічної обробки поверхні проводилося її знежирення ацетоном або спеціальними технологічними засобами. Особливу увагу приділяли забезпеченню сухості та необхідної шорсткості поверхні, оскільки ці фактори безпосередньо впливали на адгезійні властивості композиційного покриття.

Наступним етапом було приготування композиційної суміші. Компоненти матеріалу змішували у пропорціях, рекомендованих виробником, до утворення однорідної маси без видимих включень та неоднорідностей. Змішування виконували ручним або механізованим способом залежно від кількості підготовлюваного матеріалу.

Умовою забезпечення ефективного технологічного процесу було дотримання співвідношення між тривалістю перемішування та початком полімеризації композиційного матеріалу.

Підготовлений композиційний матеріал наносили на дефектні ділянки вручну за допомогою шпателя або інших формувальних інструментів. Формування ремонтного шару виконувалося відповідно до конфігурації поверхні та характеру пошкодження. При відновленні значних дефектів матеріал наносили пошарово з проміжним ущільненням. Товщину сформованого шару вибирали залежно від глибини пошкодження та вимог до подальшої механічної обробки. Полімеризація композиційних матеріалів відбувалася за кімнатної температури або з використанням додаткового нагрівання.

Після завершення процесу полімеризації здійснювали механічну обробку відновленої поверхні, яка включала видалення надлишків матеріалу, шліфування та доведення геометричних параметрів деталі до необхідних розмірів. Оцінювання результатів ремонту проводилося за показниками суцільності покриття, міцності зчеплення композиту з металом, відсутності тріщин і пор, а також відповідності відновленої поверхні експлуатаційним вимогам.

4. ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ВІДНОВЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ З ДОПОМОГОЮ РЕМОНТНИХ КОМПОЗИТІВ

4.1 Технологічні основи застосування композиційних матеріалів під час відновлювальних робіт

Перед сучасними технологіями відновлення обладнання та машин стоїть завдання щодо забезпечення працездатності діючої техніки, без звернення до спеціалізованих ремонтних підприємств. Можливість застосування ХЗ, як основна ремонтно-відновна технологія, обумовлюється наступними її перевагами.

ХЗ здійснюється на повітрі без використання тиску та нагріву, поза захисним середовищем без застосування спеціалізованого обладнання, а також не потребує високого рівня підготовки виконавця. В якості основного робочого інструменту ХЗ виступає шпатель, необхідний створення певної конфігурації шва.

Економічно та технічно ефективним, а найчастіше й єдиним способом ремонту важкої техніки є здійснення ремонтних робіт на місці її експлуатації. У той же час транспортування громіздкого обладнання для традиційних способів ремонту, якими є методи наплавлення, термічного зварювання, паяння дуже проблематичне. Технології ХЗ дають можливість здійснити з мінімальними витратами відновлення МЕЗ у польових умовах [9-11].

Зварний шов ХЗ утворюється з суміші пастоподібної компонентів РКМ. При цьому полімерна матриця виступає в ролі клейової основи матеріалу та забезпечує адгезію композитів до поверхні, що ремонтується. Значна кількість РКМ мають високу адгезію практично до всього різноманіття як металевих, так і неметалевих машинобудівних матеріалів різного призначення, у тому числі функціонального та конструкційного. Присутність у складі композиції наповнювача надає їй нових властивостей, що виявляють технологічні переваги холодного зварювання як перед термічними (традиційними наплавленням, пайкою, зварюванням та ін.), так і клейовими способами утворення з'єднання

деталей при відновленні.

Основними перевагами є значення товщини зварного шва ХЗ є оптимальним (0,5...1.0 мм) на відміну від потрібного мінімального зазору між деталями, що сполучаються в клейових з'єднаннях. Це дає можливість, використовуючи технологію ХЗ створювати з'єднання деталей без необхідної геометричної припасування, включаючи криволінійні поверхні сполучень. Відмова від операції нагрівання дає можливість виключити деформацію відремонтованої методом ХЗ деталі та ймовірність утворення термічної напруги. За термічних технологій ремонту важко уникнути подібних негативних явищ, усунення яких створює додаткові труднощі. У порівнянні з клеями композити дають можливість заповнити вироблення обладнання та деталей різних машин глибиною від 10 мм та більше.

Зазначена ремонтна технологія не призводить до порушення заданого термобробкою рівня фізико-механічних властивостей матеріалу деталі, що ремонтується. Це дозволяє відмовитися від додаткової термообробки відновлених вузлів та деталей, яка є обов'язковою після закінчення термічних методів ремонту. Використання ремонтних композитів дозволяє виготовити цілікову деталь методами пластичного деформування на певній стадії полімеризації компаунду, лиття, або механічною обробкою затвердженого композиту. Ремонтні композити, на відміну від клеїв, мають цілу низку об'ємних властивостей на рівні таких сплавів як силумін [13, 14].

Ремонтно-відновлювальні роботи з використанням полімерних композицій у різних галузях промисловості можна здійснювати за такими напрямками: усунення дефектів лиття та зварних швів; ремонт різних видів технологічного та допоміжного обладнання та ємностей; відновлення систем життєзабезпечення підприємств ТС. Практика застосування ремонтних композитів у різних галузях промисловості дозволяє говорити про широкі можливості цього технологічного методу, що наочно демонструє наведена нижче таблиця 4.1 [9, 22, 23].

Таблиця 4. 1

Застосування композиційних матеріалів різних галузях промисловості

Місце використання	Характер робіт
1. Допоміжне господарство підприємств ТС	Усунення дефектів у системах життєзабезпечення, у тому числі при ремонті трубопроводів водо-, тепло-, газопостачання, каналізації та вентиляції. Можливість проведення екстрених аварійних робіт у мережах водопостачання та опалення в будинках, де тривале відключення та використання, зварювання суттєво порушує робочий ритм та знижує рівень сервісного обслуговування.
2. Машинобудівне виробництво	При усуненні дефектів усіх видів металевого лиття, збиранні теплообмінників, електро- та радіотехнічних виробів, вузлів в автомобілебудуванні, у тому числі як герметик. Використання виробничих умов для ремонту робочих ємностей, трубопроводів, систем повітроводів, виробничого обладнання тощо.
3. Системи та ОВТП житлово комунальних підприємств	Усунення нориці та тріщин у системах водопостачання та опалення, герметизації стиків трубопроводів, відновлення тріснутих та сколотих керамічних виробів, відновлення елементів сантехнічної арматури.
4. Ремонт мобільних енергетичних засобів, транспортних засобів, транспортно-технологічних машин	Аварійний ремонт у польових умовах паливних баків, посадкових поверхонь, трубопроводів, повітроводів, глушників. Вклейка дзеркал, гумових прокладок, що герметизують, відновлення металевих деталей, закладання тріщин корпусів двигунів, усунення невеликих отворів і пробоїн у кузові автомобіля.
5. Будівництво та цивільна інженерія	Всі види столярних з'єднань, включаючи зовнішні елементи, відновлення тонкостінних оболонок з оцинкованого заліза (повітропроводи, водостоки, баки, герметизація та відновлення жорсткої покрівлі, склеювання сколів черепиці, ремонт відкритих водоводів).

В даний час вони починають застосовуватися в машинобудуванні, авто- та судноремонті, ремонті сільськогосподарських машин, енергетиці, хімічній, нафтопереробній, легкій промисловості, комунальному господарстві, поліграфії, деревообробній та целюлозно-паперовій промисловості.

Технологічний процес застосування ремонтних композитів при відновленні деталей, вузлів та обладнання в цілому відрізняється від енергоємних техпроцесів (зварювання, паяння, наплавлення, напилення), які він з успіхом може замінити в низці конкретних випадків.

У таблиці 4.2 представлений технологічний маршрут із переліком обов'язкових операцій, кожна з яких відрізняється своєю специфікою та вимогою обов'язкового виконання певних умов, необхідних для якісного виконання технологічного процесу.

Таблиця 4.2

Технологічний маршрут відновлення деталей ОВТП підприємств ТС
металополімерними матеріалами

№ пп	Найменування операції	Технологічні переходи
1	Підготовка деталі (агрегату)	Виправлення форми; Очищення поверхні; Обезжирювання;
2	Приготування матеріалу	Вручну; Механізованим способом; За допомогою туб;
3	Нанесення матеріалу	Вручну (щіткою, шпателем); Механізованим способом;
4	Формування шару матеріалу	Під тиском; Без тиску; Нерухомими оправками;
5	Затвердіння матеріалу	Холодне; Гаряче; Змішане;
6	Обробка матеріалу	Зняття задирок і напливів; Механізована обробка.

Якісна підготовка поверхні є запорукою успішного ремонту. Поверхня, на яку буде нанесений полімерний матеріал, має бути сухою, чистою та ретельно зачищеною. Попереднє очищення поверхні від бруду і масла виконується ганчіркою або спеціальними порошкоподібними складами, що вбирають масло і щіткою, що потім видаляються. Для видалення залишків мастил із пористої поверхні деталі застосовують нагрівання дефектного місця за допомогою

газового пальника або промислового фену.

Зачищення поверхні перед нанесенням матеріалу виконується за допомогою абразивного кола, напилка, наждакового паперу, фрезерування або використання голкорези. Найкращий ефект, як показали спеціально проведені випробування, дає обробка абразивним колом. Це найбільш доступний спосіб, що дає змогу виконати зачистку швидко та без застосування спеціальних інструментів чи верстатів. Достатньо оправлення з наждачним каменем закріпити в патроні дрилі. У випадках, коли поверхня має сліди іржі, або корозійні процеси утворили на поверхні сильні виразки, слід застосувати піскоструминну обробку з використанням крупнозернистого піску.

Знежирення поверхні після її зачистки здійснюється або штатним знежирювачем фірми «Честер», або ацетоном. Порівняльні випробування цих двох засобів не показали будь-яких значних відмінностей в адгезійній міцності, утворених після знежирення полімерних сполук матеріалів з металом. У той же час штатний знежирювач може дозволити утвореному адгезійному з'єднанню триваліший час зберігати вихідну міцність за рахунок запобігання утворенню вогнищ корозії на поверхні металу під шаром полімеру. Тому сприяють спеціальні добавки, що містяться у фірмовому знежирювачі.

Змішування металополімерних матеріалів виконується або на гладкій поверхні металу, скла або пластику (пастоподібні композиції), або в спеціальному посуді (для рідких композицій) у пропорціях, зазначених на етикетках упаковок обох компонентів. Перед змішуванням доцільним представляється попереднє перемішування кожного компонента своєї ємності з метою отримання однорідного складу кожного компонента. Особливо важливо виконувати ці умови, коли використовується лише частина матеріалу із упаковки. Сказане не відноситься до компонентів, що мають велику в'язкість. У разі використання всієї упаковки одноразово, змішування можна виконувати безпосередньо в одній із ємностей з одним із компонентів. Перемішуючи обидва компоненти шпателем протягом 3-5 хв, необхідно домагатися отримання однорідної консистенції і за кольором композиції.

У разі перемішування об'ємів понад 0,5 кг доцільно використовувати спеціальну мішалку (стрижень з лопатями), яка вставляється в патрон ручного дреля або свердлильного верстата.

Після перемішування бульбашки повітря, що утворилися, видаляються шляхом розтирання отриманої суміші тонким шаром на пластині (пастоподібний матеріал) або переливанням тонким струменем в іншу ємність (рідотекучий матеріал). Після перемішування починається відлік часу виробітку матеріалу. Кожен матеріал має свою тривалість процесу полімеризації, і у разі укорочених термінів (30-40 хв.) необхідно прискорювати всі процеси, пов'язані безпосередньо зі змішуванням, видаленням повітря із суміші та нанесенням.

Для прискорення застигання матеріалів відновлювані деталі можуть бути поміщені в термостат і нагріті до температури 50...60° С. Можливий підігрів ділянки, що ремонтується, електролампю великої потужності, паяльною лампою або промисловим феном. Термін застигання матеріалу при цьому скорочується у 2-3 рази.

Деякі полімерні матеріали на епоксидній основі мають негативну властивість розігріватися при затвердінні. Причому, чим більша кількість матеріалу заміщується, тим коротша година вироблення і тим вища температура саморозігріву. Ця властивість епоксидних смол повністю нейтралізована у матеріалах таких фірм як Diamant metallplastic GMBH, Devcon, Belzona, Честер Молекуляр. Тому їх застосування дозволяє вирішувати багато технологічних проблем, пов'язаних із нанесенням матеріалу без урахування згаданого саморозігріву. Затвердіння таких матеріалів при температурі 20-24°C настає через 2-5 годин (залежно від різновиду матеріалу).

Компоненти композиційних матеріалів ретельно змішують один з одним у співвідношенні, що рекомендується інструкцією. Практика показала, що зміна співвідношення в межах 5-10% від необхідного не суттєво впливає на вихідні характеристики композиту. При змішуванні необхідно враховувати в'язкість компонентів, що представляють основу та затверджувач, оскільки вона надає

певний вплив на годину змішування ($t_{\text{см}}$) та годину початку полімеризації ($t_{\text{нп}}$). Ці два показники визначають потрібну годину нанесення композиту. Тому має бути забезпечена така умова:

$$t_{\text{см}} < t_{\text{нп}} \text{ або } \frac{t_{\text{нп}}}{t_{\text{см}}} = n, \text{ де } n > 2 \quad (4.1)$$

Для забезпечення якісного перемішування потрібен час 3-5 хв, тому життєздатність суміші повинна становити не менше 15 хв. Перемішування компонентів може здійснюватися як байдужою, так і механізованими способами залежно від кількості одноразово використовуваного матеріалу.

При перемішуванні компонентів вручну найбільш підходящою формою ємностей є еліптична або кругла, бо у прямокутній формі у кутах компоненти не перемішуються. Форма шпателя має цілком певний вплив на якість та швидкість перемішування. Для циліндричного посудини прийнятною формою шпателя для змішування є циліндрична. З метою досягнення певної швидкості зсуву необхідно мати певне співвідношення між діаметром судини D_c і діаметром шпателя $d_{\text{ш}}$. При невеликій величині відношення $d_{\text{ш}}/D_c$ швидкість зсуву незначна, оскільки різниця $D_c - d_{\text{ш}}$ велика. У міру збільшення $d_{\text{ш}}$ різниця $D_c - d_{\text{ш}}$ зменшується і швидкість зсуву збільшується та прискорюється процес зміщення (таблиця 4.3).

Таблиця 4.3

Вплив розмірів шпателя на якість змішування компонентів

Відношення $D_{\text{ш}}/D_c$	Найменування показників	Показники міцності при обертах шпателя		
		10	50	100
0,1	Середня руйнівна напруга при зсуві $\tau_{\text{ср}}$, МПа	0,3	8,7	5,0
	Середнє, σ , МПа	0,4	2,0	1,6
	$\sigma/\tau_{\text{ср}}$, %	134	23,4	23,2
0,15	$\tau_{\text{ср}}$, МПа	8,6	10	12,4
	σ , МПа	1,8	1,5	1,7
	$\sigma/\tau_{\text{ср}}$, %	21	15	17,3
0,36	$\tau_{\text{ср}}$, МПа	10,7	12,4	135
	σ , МПа	2,4	1,3	9,4
	$\sigma/\tau_{\text{ср}}$, %	22,4	10,5	7

Дані таблиці 4.3. дають підтвердження поліпшення якості перемішування компонентів (основа-затверджувач), що входять до складу суміші, через збільшення як частоти обертання шпателя, так і відношення $d_{ш}/D_c$.

Формування властивостей композиційного прошарку шляхом її затвердіння відбувається за певним принципом. На рис. 4.1 показано характер зміни міцності при з'єднанні сталевих деталей з використанням композиційного матеріалу «Chester Ceramic – Т».

Формування властивостей композиційного прошарку шляхом її затвердіння відбувається за певним принципом. На рис. 4.1 показано характер зміни міцності при з'єднанні деталей зі сталі використанням композиційного матеріалу «Chester Ceramic – Т».

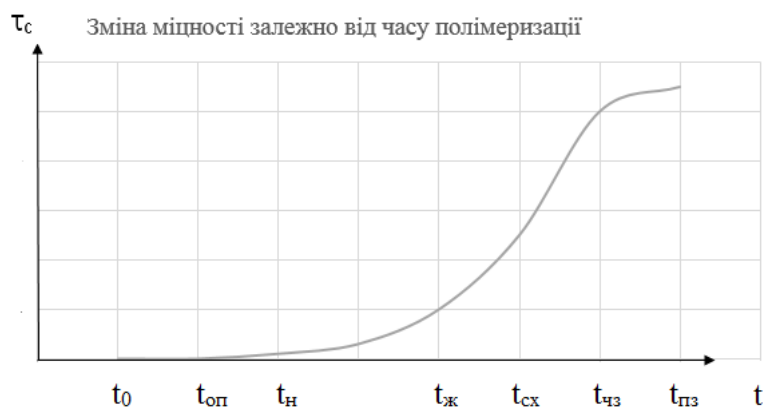


Рис. 4.1. Зміна міцності, залежно від часу полімеризації композиту: t_0 - початковий момент змішування компонентів; $t_{оп}$ - час остаточного перемішування; t_n - момент нанесення композиту поверхню деталі; $t_{жс}$ - час життєздатності суміші; $t_{сх}$ - момент схоплювання; $t_{чз}$ - час часткового затвердіння; $t_{пз}$ - час повного затвердіння.

Ділянка $(t_0 - t_{оп})$ характеризує період, протягом якого проводять змішування компонентів. Ділянка $(t_n - t_{жс})$ визначає тривалість часу, протягом якого необхідно нанести композит та провести монтаж з'єднання. Час $t_{жс}$ визначає момент часу, після якого композит може бути використаний.

У час t_0 здійснено поєднання двох компонентів композиційного

матеріалу, тобто. основи та затверджувача та розпочато перемішування компонентів. Період часу ($t_{см} - t_{жс}$) визначає життєздатність композиції, тобто. період часу, протягом якого композит може бути нанесений поверхню з'єднання. Далі в'язкість композиції наростає в результаті зростання лінійних (розгалужених) молекул, а в момент $t_{сх}$ починається утворення поперечних зв'язків між молекулами, що в результаті призводить до підсумкової полімеризації композиту і набору остаточної міцності.

Нанесення матеріалу є однією з основних операцій, що визначають як якість утворених адгезійних зв'язків, так і довговічність відновленої деталі. Перший шар метало-полімеру ретельно втирається лопаткою або шпателем у поверхню деталі, що відновлюється. Необхідність утирання першого адгезійного шару підтверджується ілюстрацією цього процесу на рис. 4.2. Попадання при такому втиранні полімерного матеріалу у западини та мікронерівності на поверхні відновлюваної деталі з одного боку забезпечує покращення адгезії, а з іншого - виключає ймовірність утворення вогнищ корозії в цих западинах, не заповнених полімерним матеріалом. Всі наступні шари наносяться без застосування будь-яких зусиль, виключаючи при цьому утворення порожнин заповнених повітрям. Використовуються для цього пластикові, металеві шпателі або лопатки. У спеціалістів-ремонтників великою популярністю користується такий інструмент як столовий ніж - жорсткий і в той же час зручний шпатель для перемішування, втирання та нанесення матеріалів.



Рис. 4.2. Втирання першого шару полімерного матеріалу (а) та формування наступних шарів (б)

Дуже часто виникає питання – чи можна наносити ще один шар металополімерного матеріалу за раніше нанесеним шаром? Якщо раніше

нанесений матеріал ще не затвердів, наступний шар можна наносити, будучи впевненим, що отримаємо однорідний гомогенний шар полімеру. Якщо ж полімеризація раніше нанесеного шару вже відбулася, то для з'єднань шару, що наноситься знову зі старим, поверхню останнього необхідно зачистити і знежирити, як описано вище, і потім втерти знову наноситься шар за допомогою шпателя.

Формування поверхні нанесеного матеріалу виконується у різний спосіб, залежно від цілей, які переслідуються при відновленні дефектної поверхні деталі.

Якщо поставлена мета отримати порівняно гладку поверхню, можна застосовувати поліетиленову плівку і з її допомогою зформувати відповідну якість поверхні. Для одержання шліфованої поверхні необхідно додати до неї шліфовану пластинку або шаблон, заздалегідь оброблені антиадгезійним складом. З цією метою можна використати матеріал у вигляді рідини або пастоподібного складу на основі тефлону. Наприклад, фірма «Diamant metallplastic GmbH» рекомендує застосовувати «Trennmitell» (рідкий), «Trennmitell» (аерозоль) та «Trennmitell» (пастоподібний).

Поверхня шаблону знежирюється, просушується і потім відділювач наноситься одним або двома шарами. У разі нанесення двох шарів після нанесення першого витримується пауза до 15 хв. Після затвердіння відокремлювача, покрита ним поверхня, при необхідності, полірується м'якою тканиною. Затверділий метало-полімерний матеріал можна обробляти будь-яким із відомих способів, включаючи шліфування або обробку ріжучим інструментом.

Після нанесення шару композиції на поверхню деталей шар матеріалу необхідно піддати формуванню, включаючи силовий вплив та надання необхідної форми. За допомогою методів динамічного або статичного формування з використанням композитів можна отримувати як зовнішні, так і внутрішні поверхні за відновлення деталей ОВТП. Отримання таких поверхонь показано на рис. 4.3

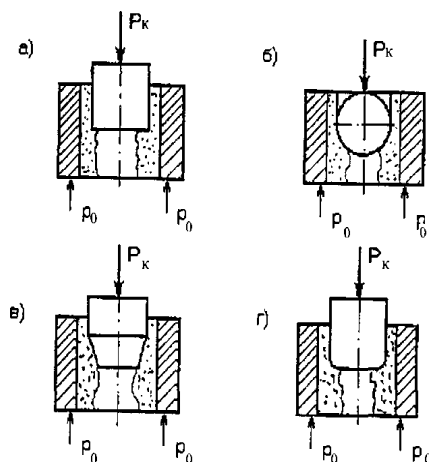


Рис. 4.3. Схема динамічного формування шару композиції шляхом використання калібрів (P_k - сила калібрування, P_o - опорна реакція): а – циліндричним калібром; б – сферичним калібром; в – циліндричним калібром з конусною фаскою; г – циліндричним калібром з сферичною фаскою.

Зусилля, що витрачаються на переміщення калібрів, залежить від геометричних розмірів циліндричних поверхонь, відповідно до чого визначається швидкість переміщення калібрів. Експерименти показали, що найкраща якість поверхні була отримана при мінімальному шарі композиту 1 мм при дисперсності частинок наповнювача не більше 50 мкм. На рис 4.4 представлена залежність між зусиллям формування композиції та швидкістю переміщення калібру. При цьому найбільша чистота поверхні досягається затвердінням протягом 2:00 20 хвилин.

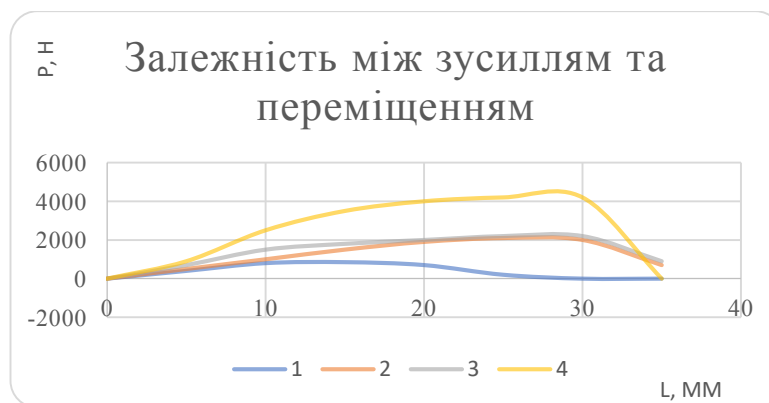


Рис. 4.4. Залежність між зусиллям та переміщенням калібру при динамічному формуванні шару композиції: P – зусилля продавлювання

калібру діаметром 30 мм; L – переміщення калібру, час затвердіння: 1 – 1 год. 40 хв.; 2 – 2 год. 20 хв.; 3 – 2 год. 30 хв.; 4 – 2 год. 15 хв.

На рис. 4.5 представлений характер режимів формування циліндричної поверхні необхідних геометричних розмірів.

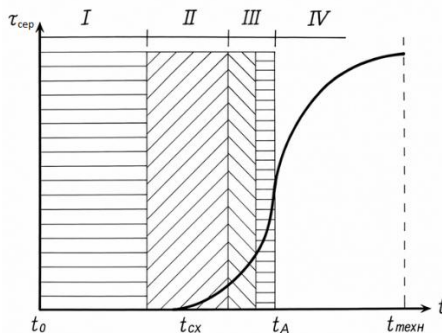


Рис. 4.5. Режими формування шару композицій: T_{cp} – середня руйнівна напруга при зрушенні; t – час полімеризації композиту, А – момент переходу від когезійного до адгезійного характеру руйнування

Необхідне зусилля для формування циліндричної поверхні:

$$\rho_0 = \frac{P}{\pi \cdot d} \quad (4.2)$$

де P – зусилля при формуванні, Н;

d – діаметр калібру, мм.

В результаті змішування компонентів та нанесення композиту на циліндричну поверхню обраної деталі формування проходить по 4-х ділянках: I - нанесення композиції та з'єднання деталей; II - статичне формування та склеювання деталей; III - оптимальна для динамічного (розмірного калібрування) формування - після $t_{сх}$; IV - недоцільна для формування (у момент близький до t_A).

Різниця між діаметром отвору, що ремонтується (після полімеризації) і діаметром калібру залежить від зони формування і при формуванні в першій зоні становить від 0,1 до 0,2 мм; у другій – 0,05 мм; у третій – від 0,01 до 0,03 мм. При формуванні композиту у 4-й зоні покриття руйнується.

Теплове оброблення деталей. Використання нагрівання в процесі

затвердіння композиційного матеріалу призводить до значного скорочення часу полімеризації. Додаткове нагрівання може бути здійснене безпосередньо на місці з'єднання (фенами) або в сушильних шафах. При цьому температура нагрівання має лежати в межах 60-90 °С. При цьому час затвердіння скорочується в 5-6 разів.

Нагрівання композиції, яка використовується при відновленні деталей, може здійснюватися наступними способами:

а) підведення джерела тепла здійснюється в момент з'єднання деталей $t_0 < t_n < t_{схв}$ (гаряче затвердіння);

б) підведення тепла проводиться після моменту схоплювання, але до моменту технологічного затвердіння $t_{схв} < t_n < t_{техн}$;

в) нагрівання виконується безпосередньо після технологічного затвердіння $t_n < t_{техн}$ (змішане затвердіння).

При відновленні деталей найбільш прийнятними є дві останні схеми нагріву, так як при використанні першої схеми композиція стає малов'язкою, що на поверхні похилі призводить до стікання композиції.

Практика показує, що найбільш доцільно забезпечити затвердіння компаунда при температурі навколишнього середовища до затвердіння, а потім проводити додаткове нагрівання та витримку при вищій температурі.

Механічна обробка після затвердіння композиту проводиться з метою видалення задирок, напливів, зняття гострих кромek. Основне призначення механічної обробки - це видалення надлишків матеріалу, забезпечення візуальної якості та функціональних характеристик з'єднання. Механічна обробка може проводитися ручним інструментом, механізованим, або на металорізальному устаткуванні залежно від вимог до поверхні, що отримується. Основною вимогою при обробці поверхонь, виконаних з композиційних матеріалів, є забезпечення певних фізико-механічних властивостей. Від них залежать режими різання та геометричні характеристики інструменту. Так теплостійкість і теплопровідність композитів обмежують швидкості різання, які низька твердість вимагає

використання інструменту з гострою ріжучою кромкою. Використання спеціальних насадок при застосуванні ручного механізованого інструменту, що працює при високих швидкостях, може призвести до негативних явищ, які можуть проявитися в процесі експлуатації.

Слід також враховувати, що обробка тонкошарових антикорозійних покриттів, виконаних з композиційних матеріалів трудомістка і неефективна, оскільки в тонкому шарі (0,3 - 1,0 мм) з'являються небажані напруження, що призводить до деформації композицій.

Це забезпечить високу якість технології ремонтно-відновних робіт із застосуванням РКМ.

4.2. Методи усунення основних видів дефектів композиційними матеріалами

Аналіз дефектів деталей ОВТП показує, що більшість з них виникає від дії абразивного, корозійного та кавітаційного зношування. Тому доцільно розглянути як забезпечується усунення відмов ОВТП в умовах підприємств ТС.

Незважаючи на різний характер дефектів деталей, що усуваються металополімерними композиціями, схеми технологічного процесу відновлення деталей у загальному плані однотипні і можуть бути представлені на рис. 4.6. Особливостями цього процесу є необхідність приготування полімерної композиції на робочому місці, з одного боку, а з іншого - обмежена кількість композиції, що готується, для одноразового застосування через їх недостатній ресурс.

Технології відновлення посадкових поверхонь підшипників кочення та ковзання, зношування валів, шпонкових пазів, різьбових з'єднань представлені в Додатку.

Розглянемо окремі приклади відновлення поверхонь деталей ОВТП [42, 43]. Герметизація тріщин у корпусних деталях. Початковим етапом

вирішення зазначеного завдання є попереднє зачищення тріщини, визначення її довжини та засвердлювання кінців тріщини свердлом Ø 3-4 мм, як показано на (рис. 4.6 а). Потім виконується обробка тріщини абразивним або різцевим інструментом аналогічно обробці шва V-подібного перерізу під зварювання. При цьому зони шириною 20-30 мм, що примикають до шва, зачищаються з обох боків шва. Поверхня цих зон бажано загрубити, роблячи засічки зубилом або невеликі заглиблення свердлом. Якщо довжина тріщини перевищує 100 мм, слід виконати фіксацію тріщини у двох варіантах. Перший – встановлення гужонів (рис. 4.6, б) безпосередньо в тріщину через 30-40 мм (засвердлювання, нарізання різі, загвинчування гвинта з надпиляною головкою до упору та його зрізання).

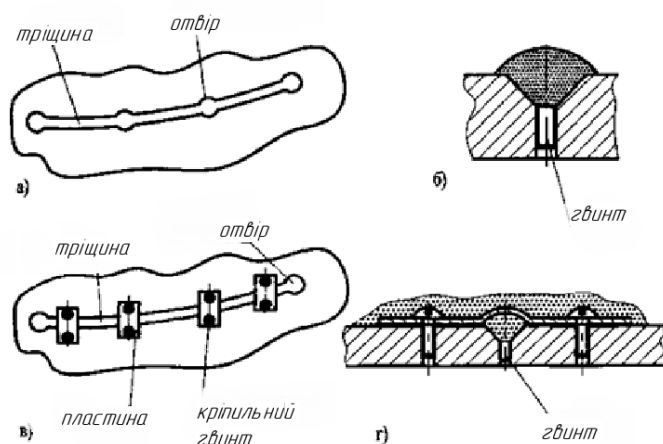


Рис. 4.6. Герметизація тріщини в корпусній деталі: а – засвердлюванням кінців тріщини та отворів під гвинт; б – встановлення гвинта; в – встановлення закріплювальних пластин; г – герметизація тріщини

Другий варіант полягає в механічному усуненні тріщини шляхом встановлення металевих пластин та з'єднанні їх з корпусом болтами по обидва боки тріщини. Ці пластини встановлюються через 70-80 мм і можуть поєднуватись із встановленими раніше гужонами.

Така фіксація тріщини дозволить полімерному матеріалу зберегти

адгезійні зв'язки з металом навіть в умовах значного нагрівання корпусу та подальших температурних розширень матеріалу корпусної деталі. Після механічної фіксації тріщини проводиться ще раз зачистка шва разом з елементами кріплення, їх знежирення і нанесення першого шару полімерного матеріалу шляхом його втирання в метал. Потім накладаються наступні шари матеріалу, що закривають всі кріпильні елементи, і формується шов шляхом прикочування його через поліетилен, або шляхом точкового притискання тканиною, яка змочується в ацетоні.

Ремонт ливарної раковини. У разі відновлення раковин на зовнішній поверхні литих виробів або раковин, що розкрилися на поверхні, що обробляється, доцільніше застосувати матеріал «Честер Метал Супер». Технологія відновлення такого виду дефекту наводиться нижче. Спочатку виконується обробка дефекту під нанесення полімерного матеріалу, як показано на рис. 4.7.

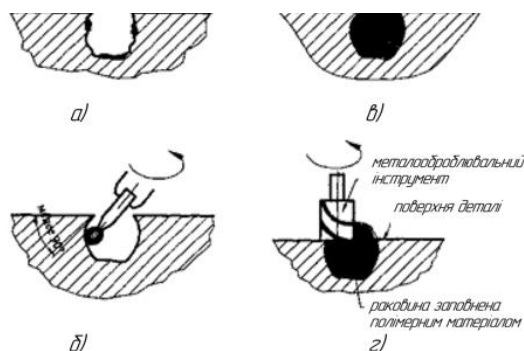


Рис. 4.7. Послідовність ремонту деталі з раковиною: а – раковина із слідами забруднень; б – обробка дефектної ділянки; в – заповнення раковини; г – обробка метало-полімеру після його затвердіння

Пошкоджене місце очищається від стружки ацетоном. Після знежирення необхідно дати знежирювачу випаруватися або просушити раковину теплим повітрям. Потім в ємність із затверджувачем додається порошок, і обидва компоненти «Честер-супер» перемішуються. Співвідношення компонентів вказується в інструкції на використання. Допускається відхилення пропонованих пропорцій на 8-10%, що не позначається на механічних характеристиках композиту.

Перший адгезійний шар матеріалу ретельно втирається шпателем у поверхню дефектної ділянки. Інші шари можуть наноситися шпателем без зусиль або просто наливатися в порожнину раковини. Поверхню нанесеного матеріалу можна сформувати за допомогою шаблону, що має гладку поверхню. Для цього шаблон обробляється відокремлювачем і після висихання притискається до дефектного місця. Після застигання матеріалу (2-3 год.) шаблон видаляється шляхом докладання зусилля в напрямку паралельному площині, що відновлюється. Якщо шаблон для формування поверхні не використовувався і матеріал нанесений з надлишком, то через 2-3 год. композит може бути підданий токарній або будь-якій іншій обробці на режимах, за допомогою яких обробляються пластмаси (наприклад, швидкість різання 40-55 м/хв; глибина різання 0,5-1,0 мм, подача 0,1-0,2 мм/об. Навантаження деталі здійснюється не раніше, ніж через 24 год.

Для практичної реалізації технології ХЗ та ліквідації абразивного, корозійного та кавітаційного зносу деталей доцільно застосовувати диференційовану номенклатуру матеріалів «Chester Molecular» та їхніх світових аналогів. Для відновлення посадочних місць під підшипники, шпонкових пазів та усунення тріщин у корпусних деталях обґрунтовано використання базових металополімерів із залізним наповнювачем типу Chester Molecular Metall Slider (аналоги: Loctite EA 3478, Devcon Plastic Steel ST, Diamant Multimetall).

Для проведення термінового аварійного ремонту, ліквідації проривів магістралей під тиском та усунення нориць протягом 3–4 хвилин ефективно використовувати швидкозатверджуючі металополімери Chester Molecular Rapid або Rapid E (аналоги: Loctite EA 3463, Devcon Zip Patch).

Захист проточних частин перекачувальних насосів, засувок, заслінок та фітінгів від корозії, абразивного впливу та кавітації забезпечується нанесенням рідкотекучих або пастоподібних композитів із керамічним чи корундовим наповнювачем Chester Molecular Coating типів СН або Ceramic (аналоги: Loctite PC 7227, Devcon Ceramic Repair Putty).

Перед застосуванням того чи іншого матеріалу поверхня, яка буде

захищена полімерним матеріалом, піддають піскоструминній обробці або обробці шліфувальними машинками, а також перетворювачем іржі.

4.3. Обґрунтування комплексу заходів з охорони праці та техніки безпеки при впровадженні ремонтних металополімерних технологій

Реалізація запропонованих технологічних рішень із ліквідації абразивного, корозійного та кавітаційного зносу деталей машин за допомогою диференційованої номенклатури композиційних матеріалів (зокрема «Chester Molecular Metall Slider», «Rapid», «Coating CH» та їхніх світових аналогів від «Loctite», «Devcon», «Diamant») вимагає суворого дотримання нормативно-правових актів з охорони праці. Оскільки базові матриці зазначених композитів базуються на епоксидних, акрилових або поліуретанових олігомерах, до моменту повної полімеризації робоче середовище класифікується як потенційно небезпечне через дію комплексу хімічних та фізичних факторів.

Організація робочого простору при проведенні відновлювальних робіт повинна базуватися на принципі локалізації шкідливих виділень. Зважаючи на те, що етап підготовки поверхонь супроводжується генерацією високодисперсного пилу та залишків шкідливих продуктів корозії, обов'язковим є зонування ділянки. Технологічні зони знежирення та безпосереднього нанесення композитів мають бути відділені від механічних зон та обладнані автономною системою місцевої витяжної вентиляції з механічним спонуканням, яка забезпечує швидкість руху повітряного потоку безпосередньо у зоні змішування не менше 0,5 м/с.

Особливу увагу з погляду техніки безпеки слід приділити кінетиці хімічних реакцій затвердіння. При застосуванні швидкозатверджуючих металополімерів типу «Chester Molecular Rapid» (або аналогів «Loctite EA 3463», «Devcon Zip Patch») час життєздатності суміші становить 3–4 хвилини, що зумовлено високою швидкістю екзотермічної реакції. Неконтрольоване збільшення маси одноразового замісу призводить до критичного локального

підвищення температури 100–120 °C і вище, що провокує деструкцію полімеру, інтенсивне газовиділення з токсичними компонентами та ризик отримання персоналом термічних опіків. Тому технологічний регламент повинен суворо лімітувати масу порційного замісу [44, 45].

Захист органів зору: обов'язкове впровадження герметичних захисних окулярів (ДСТУ EN 166) для нівелювання ризику дисперсного розбризкування рідкотекучих композитів із керамічним наповнювачем під час їх нанесення на проточні частини насосного обладнання. Опис засобів індивідуального захисту при нанесенні ремонтних композиційних матеріалів наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Засоби індивідуального захисту при нанесенні РКМ

Орган / Ділянка тіла	Тип засобу індивідуального захисту (ЗІЗ)	Обґрунтування
Органи дихання	Напівмаски або респіратори з протигазовими фільтрами класу A1 або A2 (захист від органічних парів).	Захист від Лос під час змішування та екзотермічного затвердіння.
Шкіра рук	Хімічно стійкі рукавички з нітрилу або бутилкаучуку. Звичайні латексні або тканинні рукавички неприпустимі.	Запобігання виникненню контактних дерматитів та хімічних опіків аміновими сполуками.
Органи зору	Захисні герметичні окуляри з непрямою вентиляцією (згідно з EN 166).	Захист від випадкових бризок рідкотекучих композитів (<i>Chester Molecular Coating CH</i>).
Тіло	Спецодяг щільної текстури (бавовна з просоченням) або захисні комбінезони типу <i>Tyvek</i> .	Захист шкірних покривів від забруднення полімерною матрицею.

Екологічний аспект безпеки при роботі з полімерними композитами полягає в диференціації відходів. Рідкі залишки невикористаних компонентів «А» і «Б» відносяться до небезпечних хімічних відходів і підлягають акумуляції в спеціалізованій герметичній тарі для подальшої передачі на утилізацію шляхом високотемпературного спалювання. Водночас повністю полімеризований матеріал є хімічно інертним матричним конгломератом, який не становить загрози для навколишнього середовища і може утилізуватися як тверді промислові відходи загального призначення.

ВИСНОВКИ

1. В магістерській кваліфікаційній роботі проведено комплексну оцінку технічного стану допоміжного обладнання підприємств ТС та визначено основні чинники, що впливають на зниження його експлуатаційної надійності. Встановлено характерні види пошкоджень та дефектів, які виникають у процесі тривалої експлуатації допоміжного обладнання.

2. Проаналізовано сучасні методи діагностування технічного стану допоміжного обладнання та обґрунтовано доцільність використання конструкторсько-технологічних підходів для підвищення ефективності ремонтно-відновлювальних робіт. Визначено найбільш ефективні способи контролю та оцінювання ступеня зношування елементів обладнання.

3. Розроблено технологічні рішення щодо відновлення працездатності допоміжного обладнання із застосуванням сучасних конструкційних і композиційних матеріалів. Запропоновано методи усунення типових дефектів деталей і вузлів, що забезпечують підвищення їхньої зносостійкості, міцності та експлуатаційного ресурсу.

4. Удосконалено технологічний процес проведення ремонтно-відновлювальних робіт, який включає підготовку поверхонь, вибір ремонтних матеріалів, застосування спеціалізованого інструменту та завершальну механічну обробку відновлених елементів.

5. Проведені дослідження підтвердили практичну доцільність використання сучасних ремонтно-відновлювальних технологій для продовження терміну служби допоміжного обладнання без необхідності його повної заміни. Отримані результати можуть бути використані при модернізації систем ТОР на підприємствах ТС.

6. Результати роботи мають практичне значення для підприємств ТС, оскільки впровадження запропонованих рішень забезпечує підвищення надійності роботи обладнання, покращення виробничої безпеки та зростання загальної ефективності експлуатації технічних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aulin, V., Kovalov, S., Hryniv, A., Kovalov, Y., Holovaty, A., Kuzik, O., & Slon, V. (2025). Enhancing tribological system performance through intelligent data analysis and predictive modeling: A review. *Problems of Tribology*, 30(3/117), 49–61. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2025-117-3-49-61>
2. Надич, Т. М., В. В. Аулін, Гриньків, А. В., & Слонь, В. В. (2025). Методи і заходи удосконалення системи технічного сервісу вантажних автомобілів на основі кіберфізичного підходу і розробки науково-технічної документації його операцій. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, (11(42).2), 313–327.
3. Новицький А. В., Ружи́ло З. В., Банний О. О., Бистрий О. М., Сиволапов В. А. (2023). Надійність машин та обладнання. Частина 1. Оцінка та забезпечення надійності машин та обладнання. К.: НУБіПУ. 209 с.
4. Ружи́ло З. В., Мельник В. І., Новицький А. В., Ревенко Ю. І., Бистрий О. М., Мельник В. І., Попик П. С. (2023). Надійність машин та обладнання. Ремонткування машин та відновлення деталей. Том 2. Навчальний посібник: НУБіП України. Київ. 313 с.
5. Аулін, В., Ковальов, С., Гриньків, А., & Варваров, В. (2024). Алгоритм оптимізації надійності функціонування та ефективності використання виробничого обладнання методами штучного інтелекту. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, (10(41).1), 60–67. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.60-67](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.60-67)
6. Хітров І. О., Гавриш В. С. Ремонт машин : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2012. 184 с.
7. Технологія ремонту машин та обладнання. Курс лекцій. / Сідашенко О.І., Тіхонов О.В., Лузан С.О. та інші. Навч. Посібник. Харків: ХНТУСГ, 2017. 361с.

8. Гайдамак О.Л., Савуляк В.І. Вузли та деталі ремонтного виробництва автотракторної техніки. Лабораторний практикум. Вінниця: ВНТУ, 2006. 92с.
9. Дем'янчук А. В., Костенко М. І. (2022). Дослідження полімерних композиційних матеріалів для відновлення деталей машин. Вісник машинобудування та транспорту. (3). 45–52.
10. Іщенко А., Молнар Л. Монтаж великогабаритних конструкцій з використанням металополімерів. Обладнання та інструмент для професіоналів. 2004. № 4. С. 24–26.
11. Іщенко А. О. Нові технології відновлення напрямних металообробних верстатів. Обладнання та інструмент для професіоналів. 2003. № 2. С.26-27.
12. Іщенко А.О., Підплетний В.І. Ремонт прокатного обладнання металополімерних матеріалів. Прокатне виробництво. 2000. № 6. С. 25–27.
13. Іщенко А.А., Артюх Г.В. Випробування нових клеїв для з'єднання еластомерів з металами. Захист металургійних машин від поломок. 1997. Вип. 2. С. 159-166.
14. Іщенко А., Рассохін Д., & Носовська О. (2023). Відновлення прокатного обладнання за допомогою композитних матеріалів. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, (46), 55–61. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288125>
15. A. Ishchenko, L. Devin, D. Rassokhin, O. Nosovska, S. Kapustin, and R. Böhm, “Comparative analysis of strength characteristics of domestic composite materials based on polyurethane”, Reporter of the PSTU. Section: Technical sciences, no. 50, p. 96, Jan. 2025.
16. Singh R. & Sharma P. (2021). Advances in polymer nanocomposites for repair technologies. Polymer Composites. 42(5). 1687–1701.
17. Zhang L. & Wu H. (2019). Mechanical properties of polymer composites with carbon nanotubes. Materials Science and Engineering A. 753. 175–184.

18. Калініч М. О. (2020). Дослідження параметрів відновлення деталей типу вал методом наплавлення. *Zbiór artykułów naukowych. Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej «Inżynieria i technologia. Współczesne tendencje w nauce i edukacji»* Paris: Sp. z o.o. "Diamond trading tour". №34. С. 36–40.

19. Новицький А. В., Плаксі́й Д. В. (2025). Оцінка працездатності допоміжного обладнання підприємств технічного сервісу. Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» з нагоди 118-ї річниці від дня народження проф. Крамарова В. С. 20-21 лютого 2025 р., К.: Видавничий центр НУБіП України, 2025. С. 623–625.

20. Новицький А. В., Плаксі́й Д. В. (2026). Особливості відновлення допоміжного обладнання підприємств технічного сервісу конструкторсько-технологічними методами. Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» з нагоди 119-ї річниці від дня народження д.т.н., проф., Крамарова В.С. 19-20 лют. 2026 р., м. Київ / МОН України, НУБіП К.: Видавничий центр НУБіП України, 2026. С. 423–427.

21. Ремонт машин та обладнання: підручник для вищих навчальних закладів / [Дирда В.І., Мелья́нцов П.Т., Калганков, Є.В. та ін.]. – Дніпропетровськ: Журфонд, 2015. 292 с.

22. Іваненко С. П., Мельник Р. О. (2020). Технології ремонту посадкових місць корпусних деталей сільськогосподарської техніки. *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК.* (8). 85–91.

23. Li X. & Zhang Y. (2021). Graphene reinforced epoxy composites for wear resistance. *Composites Science and Technology.* 213. 108957.

24. Кравченко Ю. В., Григоренко О. М. (2023). Відновлення отворів у чавунних корпусних деталях із використанням полімерних матеріалів. *Вісник Харківського НТУСГ.* (4). 102–108.

25. Сайчук О. В., Потоскаєв О.М. (2025). Технологічні аспекти ремонту зношених отворів у корпусних деталях аграрних машин із використанням

нанокомпозитних матеріалів. Збірник наукових праць УкрДУЗТ, вип. 214 С. 24–30 <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.351813>

26. Борак К. В., Куликівський В. Л., Руднік Д. І. (2023). Вплив попередньої корозії на інтенсивність абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Наукові праці ВНТУ. 2023. № 2. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/686>.

27. Марчук В. Є. (2010). Вплив зернистості абразиву на зносостійкість дискретних поверхонь. Проблеми тертя та зношування. Наук.-техн. зб. К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк». № 53. С. 139–146.

28. Попов С. М. (2013). Дослідження процесу абразивного зношування контактних поверхонь в умовах ударних навантажень роботи диспергаторів. Східно-Європейський журнал передових технологій. С. 1–4.

29. Quantifying the interrelationship between friction, wear, and noise: A comparative study on aluminum, brass, and steel / Yang Tian et al. Tribology International. 2025. Volume 203, № 110403. P. 2–5.

30. Waviness affects friction and abrasive / Yulong Liet al. Research gate. 2023. №64. P. 1–12. URL: https://www.researchgate.net/publication/370330832_Waviness_Affects_Friction_and_Abrasive_Wear

31. Основи трибології: Підручник / Антипенко А.М. Белас О.М., Войтов В.А. [та ін.]. За ред. Войтова В.А. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – 342с.

32. Черновол М.І., Шепеленко І.В. Системний підхід до формування показників якості відновлених деталей. Збірник наукових праць. Науковий вісник. Технічні науки. Вип.7 (38). Кропивницький, 2023. С.30–36.

33. Стецько А. Є. Технологічне забезпечення ресурсу роботи виготовлених і відновлених деталей: монографія. Львів: Видавнича компанія «АРС», 2013. 240 с.

34. Amirhossein Mahdavi. Corrosion Resistance of Boronized, Aluminized, and Chromized Thermal Diffusion-Coated Steels in Simulated High-Temperature

Recovery Boiler Conditions / Amirhossein Mahdavi , Eugene Medvedovski, Gerardo Lear Mendoza. Coatings. MDPI / 2018 pp.36

35. Alexander Permyakov, Yakiv Nemyrovskiy, Eduard Posviatenko and Ihor Shepelenko (2023). Methodology of technological design in the restoration of parts. Modeling and Computer Engineering in Mechanical Engineering: Theory, Practice, and Innovation" (MCEME-2022): International Scientific and Theoretical Conference. Vol. 1277 (28/09/2022 - 21/10/2022, Lviv)..

36. Шепеленко І.В., Красота М.В. Сучасні технології реновації деталей автомобільного транспорту. Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту: матеріали X міжнар. наук.-техн. інтернет-конф. (14-15 квітня 2022 р.). Вінниця: ВНТУ, 2022. С.325–328.

37. Головащенко О. В. (2024). Систематизація схем структури забезпечення технічної готовності транспортних засобів шляхом удосконалення матеріально-технічного забезпечення процесів відновлення їх працездатності. Вісник Приазовського ДТУ. Серія: Технічні науки. DOI: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321399.

38. Бардик, Е., Болотний, Н. (2018). Розробка математичної моделі розподілу витрат на технічне обслуговування та ремонт електрообладнання. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 6 (8 (96)), 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.147622>

39. Nemyrovskiy Yakiv, Shepelenko Ihor, Osin Ruslan, Posviatenko Eduard. Improving the processing quality of cylinder liners using combined technology. Cutting and Tools in Technological Systems. 2022; 96: 121–130. <http://rits.khpi.edu.ua/article/view/252506>

40. Posvyatenko E.K., Nemyrovskiy Ya.B., Sheykin S.E., Chernyavskiy O.V., Shepelenko I.V. Engineering of the parts processed by broaching. Kropyvnytskyi: Publisher Lysenko V.F., 2021. 466 p.

41. Tikhonenko V.V., Shkilko A.M. Reinforcing technologies for the formation of wearresistant surface layers. Physical engineering of the surface, 2012, no. 4, pp. 237-243.

42. Практикум з ремонту машин. Загальний технологічний процес ремонту та технології відновлення і зміцнення деталей машин. Том 1 За ред.О.І. Сідашенко, О.В. Тіхонова. Навчальний посібник. Харків: ТОВ «Пром-Арт», 2018. 416с.
43. Практикум з ремонту машин. Технологія ремонту машин, обладнання та їх складових частин. Том 2. За ред.О.І. Сідашенко, О.В. Тіхонова. Навчальний посібник. Харків: ТОВ «Пром-Арт», 2018. 491с.
44. ДСТУ EN 14387:2017 Засоби індивідуального захисту органів дихання. Фільтри протигазові та фільтри скомбіновані. Вимоги, випробування, маркування (EN 14387:2004 + A1:2008, IDT)
45. ДСТУ EN 166:2017 (EN 166:2001, IDT). Засоби індивідуального захисту очей. Технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 35 с.
46. Аулін, В., Кузик, О., Лисенко, С., Гупка, А., Гриньків, А., & Жилова, І. (2024). Методика розрахунку основних характеристик підшипників ковзання систем і агрегатів автомобілів та аналізу їх трибологічної ефективності. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, (9(40).1), 151–164. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.151-164](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.151-164)
47. Лобков Я.Ю. Устаткування для широкошарового наплавлення деталей будівельних та гірничих машин. *Техніка будівництва*. – 2001. – № 10.
48. Лобков Я. Ю. Розробка технологічного процесу багатоелектродного автоматичного дугового широкошарового наплавлення деталей будівельних і гірничих машин. *Техніка будівництва : наук.-техн. журн. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. ; гол. ред. І. І. Назаренко*. Київ, 2002. №13. С. 85-88.
49. Zhang L. & Wu H. (2019). Mechanical properties of polymer composites with carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering A*. 753. 175–184.
50. Коваленко М. С., Лисенко В. П. (2022). Вплив наночастинок на адгезію полімерних композицій. *Сучасні матеріали в машинобудуванні*. (2). 33–39.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК В

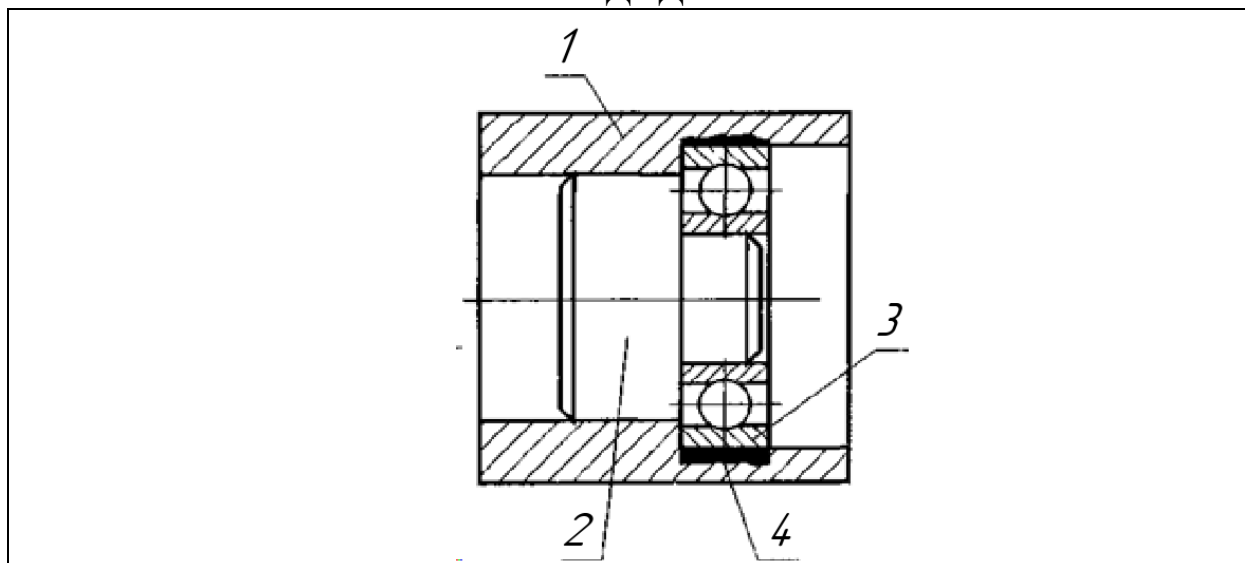


Рис. В1. Відновлення поверхні нероз'ємного корпусу підшипника за використання центруючого пристрою: 1 – корпус, 2 – центруючий пристрій; 3 – підшипник; 4 – металополімерний матеріал

ДОДАТОК В1

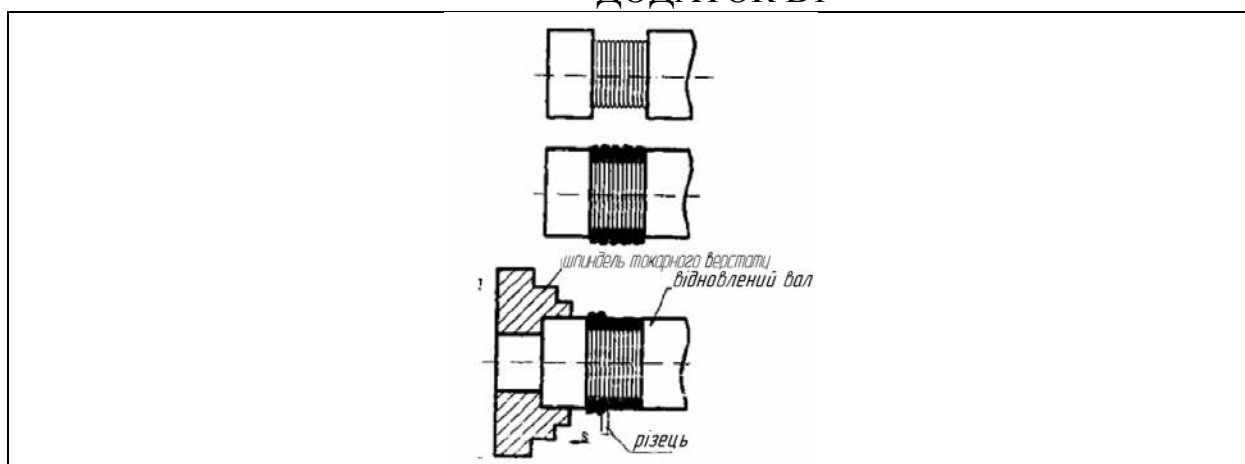


Рис. В2. Схема відновлення зношеного валу

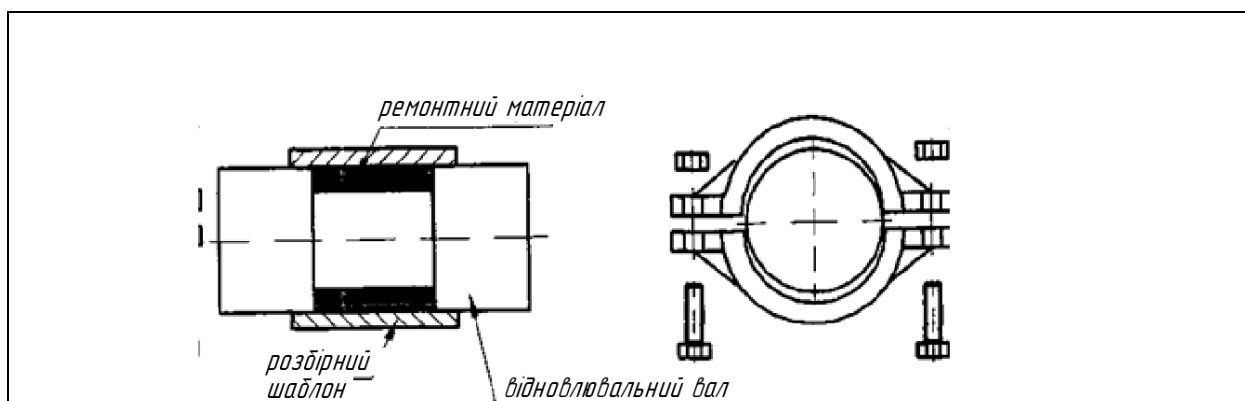


Рис. В3. Схема відновлення валу за допомогою роз'ємного шаблону