

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності

(повне найменування факультету)

Кафедра матеріалознавства

(повна найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»

ВИГОТОВЛЕННЯ ПОЛІМЕРМАТРИЧНИХ
МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ
ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ / PRODUCTION OF
POLYMER MATRIX MATERIALS USING
INDUSTRIAL WASTE

спеціальність 132 Матеріалознавство

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Індустріальний інжиніринг і менеджмент

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ(ІМ)-41

Солтис Андрій Володимирович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Боярська Інна Володимирівна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» _____ 20__ р.

к.т.н., професор

Гарант освітньої програми:

Гусачук Дмитро Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Індустріальний інжиніринг і менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри

_____ІМБІРОВИЧ Н.Ю.

“ _____ ” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

_____Солтису Андрію Володимировичу_____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Виготовлення полімерних матеріалів з використанням промислових відходів

керівник роботи _____Боярська І.В., к.т.н., доцент_____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “31” 12.2025 р. № 540/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
«23» травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи літературні джерела, властивості вихідних матеріалів, методи досліджень властивостей матеріалів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ; Розділ 1. Технічне обґрунтування; Розділ 2. Експериментальна частина; Розділ 3. Технологічна частина; Висновки; Список використаних джерел; Додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайд 1-2 – Вигляд зразків, схеми досліджень (1 л. ф. А4);

Слайд 3, 5-6 – Дослідження властивостей (1 л. ф. А4);

Слайд 4 – Мікроструктура епоксикомпозитів (1 л. ф. А4);

Слайд 7 – Поверхня трибоконтакту епоксикомпозитів (1 л. ф. А4);

Слайд 8 – Технологічний процес (1 л. ф. А4);

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «03» січня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Розділ 1. Технічне обґрунтування	05.05.2026 р.	
2	Розділ 2. Експериментальна частина	12.05.2026 р.	
3	Розділ 3. Технологічна частина	19.05.2026 р.	

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Солтис А.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис)

Боярська І.В.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Солтис А.В. Виготовлення полімерматричних матеріалів з використанням промислових відходів. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Робота складається з текстової та графічної частин.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

Пояснювальна записка складається з 47 сторінок і містить такі розділи: технічне обґрунтування, експериментальна частина, технологічна частина.

Також пояснювальна записка містить 2 таблиці, 10 рисунків, 20 літературних джерела та додаток.

Графічна частина складається з 8 аркушів формату А4, які розміщені в додатку А.

Ключові слова: епоксиполімер, епоксикомпозит, структурування, термічна обробка, відходи.

					БР 2926.00.000 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Виготовлення полімерматричних матеріалів з використанням промислових відходів	Літ.	Арк.	Акрушіє	
Розробив		Солтис							
Перевірів		Боярська					3	47	
						ЛІНТУ			
Н. контр.		Мисковець				каф. матеріалознавства, гр. ПМ(ІІМ)- 41			
Затверд.		Імбірович							

ANNOTATION

Soltys A.V. Production of polymer matrix materials using industrial waste. Manuscript.

Bachelor's qualification work in the field of "Materials Science" in specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The work consists of textual and graphic parts.

The bachelor's qualification work consists of an introduction, three sections, conclusions, a list of sources used, and appendices.

The explanatory note consists of 47 pages and contains the following sections: technical justification, experimental part, technological part.

The explanatory note also contains 2 tables, 10 figures, 20 literary sources and an appendix.

The graphic part consists of 8 sheets of A4 format, which are placed in Appendix A.

Keywords: epoxy polymer, epoxy composite, structuring, heat treatment, waste.

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ.....	7
1.1. Загальна характеристика епоксидних композиційних матеріалів, способи їх виготовлення та основні властивості	7
1.2. Епоксидні матриці.....	10
1.3. Застосування дрібнодисперсних наповнювачів	13
1.4.Застосування епоксидних композитних матеріалів в нових областях техніки.....	19
1.5. Висновки та постановка задач досліджень	19
РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	21
2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів.....	21
2.2. Методи дослідження фізико-механічних властивостей та мікроструктури розроблених епоксидних композиційних систем	22
2.3. Формування дослідних зразків	25
2.4. Дослідження вмісту наповнювача на властивості полімер матричних матеріалів	26
РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	34
3.1. Особливості формування епоксикомпозитів	34
3.2. Технологія отримання епоксикомпозитних покриттів	37
3.3. Види браку та методи його усунення	39
3.4. Охорона навколишнього середовища	45
ВИСНОВКИ.....	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	45
ДОДАТКИ	

ВСТУП

У різних галузях промисловості та в повсякденному житті полімерні композиційні матеріали (ПКМ) активно замінюють традиційні матеріали – метали, деревину, окремі види полімерів тощо. Це насамперед пояснюється їхніми унікальними експлуатаційними властивостями: високими механічними показниками, належними теплофізичними, електричними, магнітними та естетичними характеристиками. Водночас актуальним залишається питання утилізації виробів, що втратили споживчі якості, адже вони можуть слугувати вторинною сировиною для виготовлення нових ПКМ і продукції на їх основі.

Сьогодні вдосконалення експлуатаційних властивостей полімерних композитів є одним із пріоритетних завдань матеріалознавства. Жорсткі технологічні та експлуатаційні вимоги суттєво звужують можливості застосування традиційних матеріалів. Розроблення нових композиційних систем на базі вже відомих, зокрема полімеркомпозитів, дозволяє забезпечити потребу в якісних і конкурентоспроможних матеріалах. Одним із перспективних напрямів є створення та модифікація епоксидних композитів на основі епоксидних смол. Такі матеріали відзначаються високими міцнісними показниками, технологічністю, сприяють зниженню собівартості продукції та підвищенню її експлуатаційної надійності.

Епоксидні полімери характеризуються комплексом цінних властивостей – адгезійних, механічних, технологічних тощо, що часто робить їх незамінними як основу для клеїв, лакофарбових покриттів, компаундів і армованих пластиків. Завдяки цьому епоксидні смоли посідають важливе місце серед промислових полімерних матеріалів. Особливо перспективними вважаються наповнені полімерні системи. Наповнювачі застосовують переважно для регулювання в'язкості, зменшення усадки та температурного коефіцієнта лінійного розширення, здешевлення матеріалу, а також для надання йому необхідного кольору.

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

1.1. Загальна характеристика епоксидних композиційних матеріалів, способи їх виготовлення та основні властивості

Розвиток сучасної техніки, особливо в ракетно-космічній галузі, неможливий без застосування матеріалів із високими та надвисокими фізико-механічними експлуатаційними властивостями. Важливу роль серед таких матеріалів відіграють полімерні композиційні матеріали, які використовуються як конструкційні елементи в різних виробках і конструкціях.

Полімерні композиційні матеріали – це гетерофазні системи, що складаються з безперервної фази (зв'язуючого матеріалу або матриці), яка сприймає зовнішні навантаження та передає їх на дисперсну фазу – наповнювач; між фазами при цьому відбувається їх взаємодія [1].

У полімерних композиційних матеріалах зв'язувальним компонентом (матрицею) є синтетичні полімери. Ефективність їх застосування визначається не лише технологічними властивостями, але й здатністю забезпечувати певні специфічні характеристики, такі як теплостійкість, радіаційна стійкість та механічні параметри [1].

Через різноманітність властивостей і будови полімерних сполук їх класифікують за різними ознаками. За походженням полімери поділяють на природні, штучні та синтетичні; за хімічним складом – на органічні, неорганічні та елементорганічні; за характером побудови макромолекулярних ланцюгів – на лінійні, розгалужені та сітчасті; за хімічною будовою основного ланцюга – на гомо- та гетерогенні; а за формою молекул – на глобулярні та фібрилярні [2].

Залежно від зміни властивостей під час нагрівання полімери поділяються на термопластичні та термореактивні. Термопластичні полімери при нагріванні розм'якшуються і стають еластичними, а після охолодження знову тверднуть –

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цей процес можна повторювати багаторазово. Натомість термореактивні полімери під час нагрівання також розм'якшуються й тверднуть при охолодженні, але при повторному нагріванні не розм'якшуються, оскільки утворюється незворотна сітчаста структура [3].

Усього цього досягають завдяки умовам синтезу і складу вихідних мономерів, що впливають на будову макромолекул полімерів. У твердому стані макромолекули розташовані безладно, вигнуті й переплетені, утворюючи складну просторову систему, подібну до клубка ниток. Це визначає високу механічну міцність, еластичність і ударну в'язкість полімерного матеріалу [4].

Структура макромолекул та їх взаємне розміщення істотно впливають на властивості полімерів. Лінійні полімери розчиняються в деяких органічних розчинниках із формуванням колоїдних розчинів різної в'язкості та текучості залежно від кількості розчинника. У розгалужених полімерів здатність до розчинення зменшується зі збільшенням кількості бічних ланцюгів. Сітчасті полімери не утворюють розчинів, а лише набухають, утворюючи гелеподібні системи, оскільки їх просторові зв'язки не руйнуються в розчиннику. Набухання відбувається через проникнення молекул розчинника між макромолекулами полімеру [4].

До властивостей композиційних матеріалів висувають дуже широкі вимоги, оскільки умови експлуатації стають дедалі складнішими й жорсткішими. У більшості випадків матеріали повинні забезпечувати високу міцність, жорсткість, корозійну та зносостійкість, антифрикційні й фрикційні показники, низьку питому вагу, довговічність, термостійкість, теплопровідність тощо. Звичайні матеріали самі по собі рідко задовольняють усі ці вимоги. Досягти необхідного комплексу властивостей можна, поєднуючи найкращі ознаки різних компонентів у складі композиту [5].

Під час розроблення композиційних матеріалів необхідно вирішувати низку складних завдань, пов'язаних із вибором виду наповнювача, визначенням

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оптимального ступеня наповнення та дисперсності, а також встановленням раціонального режиму полімеризації наповненої системи.

Композиційні матеріали характеризуються багатофункціональністю, оскільки один і той самий композит може поєднувати комплекс властивостей, що забезпечує його використання в різних сферах застосування.

Однією з ключових умов отримання композитів із високими фізико-механічними показниками є формування міцного та стабільного зчеплення між поверхнею наповнювача і полімерною матрицею за мінімального рівня внутрішніх напружень. Це досягається завдяки обґрунтованому вибору типу наповнювача, попередній обробці його поверхні та оптимізації гранулометричного складу [6].

Процеси, що відбуваються на межі поділу «матриця – наповнювач», є складними й багатофакторними. Вони зумовлені сукупністю взаємодіючих, а інколи й протилежно спрямованих чинників. Для забезпечення високої міцності композиту необхідно досягти ефективної передачі навантаження на всі структурні елементи матеріалу через міжфазну межу [7].

Властивості композиційних матеріалів значною мірою визначаються умовами взаємодії зв'язуючого з частинками наповнювача ще на стадії формування системи, тобто залежать від природи полімеру, умов структуроутворення та формування поверхневого шару. Серед фізико-хімічних явищ, що відбуваються на межі фаз, особливе значення має змочування. Якісне змочування поверхні наповнювача полімерним зв'язуючим є обов'язковою передумовою створення композиту з високими експлуатаційними характеристиками. Для покращення змочування до полімерної системи вводять поверхнево-активні речовини або здійснюють апретування наповнювача.

Отже, фізико-механічні процеси, що супроводжують формування полімерних композитів із наповнювачами, є складними та багатогранними. Для їх повного розуміння необхідно враховувати сукупність чинників, зокрема хімічну природу компонентів, адгезійну взаємодію полімеру з поверхнею

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

наповнювача, фазовий і фізичний стан матриці, а також умови тверднення зв'язуючого.

1.2. Епоксидні матриці

На сьогодні полімерні композиційні матеріали на основі епоксидних смол відзначаються високою ефективністю експлуатаційних властивостей. Епоксидні смоли належать до синтетичних сполук, поява яких сприяла розвитку принципово нових напрямів використання полімерних матеріалів і відіграла ключову роль у створенні багатьох унікальних конструкцій у різних галузях техніки.

Епоксидні смоли визначають як хімічні сполуки, молекули яких містять більше однієї епоксигрупи. Епоксигрупа складається з двох атомів вуглецю і одного атома кисню, при цьому атоми вуглецю приєднані до органічних радикалів [8].

Епіхлоргідринові та етоксілінові епоксидні смоли зазвичай є полімерами продуктів конденсації епіхлоргідрину або гліцерину з багатоатомними спиртами або бісфенолами. У ролі бісфенолів найчастіше застосовують дифенілпропан. Ці смоли іноді називають епоксидно-діановими [10].

Епоксидні смоли можна розглядати як лінійні багатоатомні спирти з епоксидними групами на кінцях молекул. Висока реакційна здатність цих груп забезпечує можливість взаємодії епоксидних смол з різними хімічними сполуками, що виконують функції твердників або модифікаторів [10, 11].

Вихідна епоксидна смола, отримана в промислових умовах, зазвичай являє собою суміш лінійних полімерів із різною молекулярною масою. Зі збільшенням молекулярної маси зростає в'язкість смол, а їх реакційна здатність знижується; тому епоксидні смоли з молекулярною масою понад 900 зазвичай тверднуть при підвищених температурах.

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вітчизняні низькомолекулярні смоли (ЕД-16, ЕД-20) мають яскраво-жовтий або коричнеуватий колір. Вони розчиняються в ацетоні, толуолі, бензолі, діоксані та інших органічних розчинниках, включаючи кетони, складні ефіри, спирти та хлоровані вуглеводні, але не розчиняються у воді й мінеральних маслах. При нагріванні до 60 °С і вище виділяється незначна кількість летких компонентів, таких як епіхлоргідрин і толуол. Температура розм'якшення епоксидних смол підвищується від 65 до 155 °С із ростом молекулярної маси від 900 до 3800. Густина цих смол коливається від 1,15 до 1,45 г/см³ [10].

Окрім смол універсального призначення, розроблена велика група високомолекулярних епоксидних смол, що застосовуються переважно як плівкоутворююча основа для лакофарбових матеріалів. Серед вітчизняних продуктів цього типу найбільш відомі немодифіковані смоли марок Е-40, Е-41, Е-33, Е-44, Е-15, Е-49, Е-55, а також модифіковані смоли марок Е-30 та Е-30Т.

Речовини, які вступають у взаємодію з епоксидними смолами та спричиняють процес укрупнення молекул із перетворенням лінійних низькомолекулярних смол у тверді, неплавкі, просторово зшиті полімери конденсаційного типу, називають твердниками. Відповідно, технічні характеристики епоксидних матеріалів залежать не лише від властивостей вихідної смоли, а й від типу застосованого твердника. Як тверджувачі можуть використовуватися аліфатичні та ароматичні ді- і поліаміни, ангідриди ди- та полікарбонових кислот, а також окремі смоли [12].

Вихідні епоксидні смоли, окрім здатності до тверднення, можуть поєднуватися з іншими смолами та модифікуватися різними сполуками, що дозволяє отримувати нові продукти з необхідними експлуатаційними властивостями.

Наприклад, при використанні резорцину замість дифенілолпропану утворюються епоксидно-резорцинові смоли. Проте епоксидно-діанові смоли залишаються більш поширеними через меншу токсичність, кращу доступність і відносно низьку вартість дифенілолпропану.

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Епоксидні смоли, модифіковані поліамідами та ізоціанатами, здатні тверднути при низьких температурах, при цьому вони відзначаються підвищеною еластичністю та ударною міцністю. Модифікація фосфорорганічними сполуками дозволяє отримувати негорючі матеріали.

Найбільше поширення отримали рідкі низькомолекулярні епоксидно-діанові смоли ЕД-16 та ЕД-20, які забезпечують високу технологічну зручність при переробці та дають змогу виготовляти різноманітні вироби: покриття, клеї, компаунди, герметики, склопластики тощо. Ці смоли можуть тверднути при нормальній або підвищеній температурі залежно від використовуваного твердника, без застосування зовнішнього тиску, що дозволяє обійтися без пресового й термічного обладнання та дорогих прес-форм.

Ця властивість особливо важлива при виготовленні та ремонті великогабаритних конструкцій безпосередньо на місці монтажу, значно розширюючи сфери застосування епоксидних смол. Крім того, здатність цих смол тверднути з виділенням мінімальної кількості побічних продуктів забезпечує безпористість і високу густину матеріалу, що критично важливо для роботи конструкцій у складних умовах, наприклад, при радіоактивному забрудненні або у вакуумі.

Композиційні системи на основі епоксидних смол, що містять твердники, пластифікатори, розчинники та інші добавки, характеризуються достатньою рідкотекучістю на стадії переробки. Це забезпечує рівномірне і швидке заповнення форм, зазорів, щілин, пор та капілярів. За допомогою вільного заливання можна виготовляти деталі складної конфігурації. Рідкі епоксидні смоли в поєднанні з рідкими твердниками утворюють системи, що легко модифікуються та допускають введення різноманітних наповнювачів.

Під час тверднення епоксидні смоли демонструють незначну усадку, що знижує внутрішні напруження, забезпечує герметичність виробів і високу точність заповнення форми. Це дозволяє відтворювати деталі з великою

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

точністю і зменшує потребу в подальшій механічній обробці, скорочуючи терміни виготовлення і трудомісткість процесу.

Композиції на основі епоксидних смол мають високу адгезію до різних матеріалів, значну хімічну та термічну стійкість і відмінні діелектричні властивості. За показниками зносостійкості вони близькі до алюмінієвих сплавів. Хімічна стійкість систем може змінюватися в залежності від типу твердника, проте, в цілому, затверджені епоксидні смоли стійкі до впливу кислот та лугів [1,10].

Таким чином, епоксидні смоли поєднують у собі унікальний комплекс властивостей: низьку в'язкість; легкість тверднення; малу усадку; високу адгезійну здатність; високі механічні характеристики; відмінні електроізоляційні властивості; високу хімічну стійкість; універсальність застосування.

1.3. Застосування дрібнодисперсних наповнювачів

Наповнення полімерів – це поєднання полімерної матриці з твердими, рідкими або газоподібними речовинами, які відносно рівномірно розподілені в об'ємі композиції та мають чітко виражену межу розділу з неперервною полімерною фазою (матрицею). Наповнення є одним із основних методів створення пластмас, гуми, лакофарбових матеріалів, клеїв та інших полімерних систем із заданими технологічними та експлуатаційними властивостями.

У більшості випадків для виготовлення наповнених полімерних матеріалів використовують тверді наповнювачі: дрібнодисперсні частинки зернистої форми (сажу, двоокис кремнію, крейду, каолін), пластинчастої форми (тальк, слюду, графіт тощо), а також різноманітні волокнисті матеріали.

Методика введення наповнювача визначається фізичним станом полімеру та типом наповнювача. Основні способи наповнення твердими дрібнодисперсними частинками або волокнами включають:

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

- змішування наповнювача з високомолекулярним полімером у високоеластичному або в'язкотекучому стані;
- змішування з розплавом або розчином термореактивного зв'язуючого з подальшим твердненням наповненої системи;
- змішування з мономером або форполімером (або їх розчинами) з наступною полімеризацією чи поліконденсацією, що особливо широко застосовується при виготовленні клеєних та лакофарбових композицій.

Для змішування наповнювача зі зв'язуючим використовують змішувачі різних конструкцій, а також вальці.

Властивості наповненого полімерного матеріалу визначаються як характеристиками полімерної матриці і наповнювача, так і природою взаємодії на межі розділу полімер–наповнювач та характером розподілу частинок. Додатково вони залежать від дисперсності та форми частинок, ступеня і умов наповнення, фазового або фізичного стану полімеру та частоти формування його просторової сітки.

При наповненні полімерів твердими частинками молекулярна рухливість макромолекул у граничному шарі значно знижується через обмеження, пов'язані з наявністю твердої поверхні, а також взаємодію полімеру з цією поверхнею. Це призводить до змін структури й властивостей граничного шару, що проявляється підвищенням температури склування, зміною текучості полімеру та модифікацією релаксаційних характеристик системи.

Суттєві зміни властивостей наповнених полімерів, особливо реологічних і фізико-механічних, обумовлені не лише впливом наповнювача на структуру граничного шару, а й взаємодією самих частинок наповнювача. Зі збільшенням ступеня наповнення та асиметрії частинок утворюється неперервна сітка завдяки контакту між частинками та злиттю адсорбційних шарів полімеру, що оточують контактуючі частинки. Це призводить до різкого зростання в'язкості матеріалу і може викликати втрату текучості.

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміцнення наповненого матеріалу спостерігається, коли наповнювач міцніший за полімер, а умови наповнення забезпечують спільну роботу обох компонентів під дією механічних навантажень. Досягнення міцного контакту між полімерною матрицею та частинками наповнювача по всій поверхні розділу є критичною умовою ефективного зміцнення.

Підвищення міцності пов'язане зі зміною локальних умов перенапруження на краях тріщин, релаксацією напружень і їх перерозподілом на більшу кількість центрів росту мікротріщин. Мікротріщина, що розвивається в наповненому полімері, може зупинитися на частинці наповнювача, і для її подальшого розвитку буде потрібне збільшення напруження. Чим вища концентрація наповнювача, тим більше перешкод створюється для росту тріщин, що гальмує процес руйнування. Крім того, у тонких шарах полімеру, відповідно до статичної теорії міцності, кількість дефектів, що призводять до руйнування, менша; у межах певних значень товщина шару обернено пропорційна збільшенню міцності [12].

Наповнювачі – це тверді, нелеткі, нерозчинні у основному матеріалі речовини, призначені для покращення експлуатаційних властивостей полімерів та зниження витрат основного матеріалу. Зазвичай ними є дешеві дрібнодисперсні речовини, які, на відміну від волокон, не надають підсилювальної дії.

Наповнювачі застосовують у композиціях для покриттів, у зв'язуючих для шаруватих пластиків, у литих смолах та конструкційних матеріалах. Наприклад, графіт і дисульфід молібдену підвищують антифрикційні властивості поліаміду та політетрафторетилену. Додавання металевих порошків на основі бронзи, міді або нержавіючої сталі покращує теплопровідність полімерів.

Крім того, введення наповнювачів суттєво знижує коефіцієнт термічного розширення, що у полімерів значно перевищує показники металевих конструкційних матеріалів. Це полегшує комбінування металевих і полімерних

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матеріалів у конструкційних деталях, які працюють при високих температурах. Також додавання наповнювача (зазвичай близько 30 %) дозволяє зменшити усадку полімерів під час переробки, що особливо важливо для литих смол в електротехніці, де потрібні деталі з мінімальними внутрішніми напруженнями.

Властивості матеріалу можна змінювати залежно від виду та кількості наповнювача. Неелектропровідні наповнювачі, наприклад слюда, застосовуються для деталей із литих смол, що експлуатуються під високою електричною напругою. Для підвищення електропровідності використовують графіт або металеві порошки. Таким чином, введення наповнювачів дає широкі можливості регулювання властивостей матеріалів. Водночас слід враховувати, що покращення одних характеристик може супроводжуватися погіршенням інших: зі збільшенням вмісту наповнювача знижується пластичність та механічна міцність матеріалу [2].

Зазвичай наповнювачі є інертними дрібнодисперсними неорганічними матеріалами у вигляді порошку, розмір частинок якого може досягати 0,015 мкм. Зі збільшенням кількості наповнювача зростає в'язкість смоли: рідина перетворюється на пастоподібну масу, а далі – у формуючий компаунд.

Для досягнення кращих результатів перед введенням у смолу наповнювачі зазвичай нагрівають для видалення вологи та адсорбованих газів. Після цього їх змішують із рідкими смолами, переважно при високій швидкості перемішування. У випадку більш крупних частинок наповнювача бажано використовувати сухий матеріал і просочити його під вакуумом та тиском смоли. Для введення наповнювачів застосовують стандартне фарбозмішувальне обладнання, але для повного змішування часто використовують роликові млини.

Додавання наповнювачів має кілька основних функцій: зменшення температури екзотермічної реакції, зниження усадки та подовження “життя” матеріалу. Наповнювачі у вигляді пилоподібних частинок мало впливають на температуру теплової деформації; межа міцності при розтягуванні і статичному згині дещо зменшується, тоді як межа міцності на стиск помітно зростає.

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Волокнисті наповнювачі у великих кількостях покращують усі ці характеристики.

Введення наповнювачів підвищує поверхневу твердість; міцність при зношуванні та оброблюваність можуть змінюватися залежно від виду наповнювача. Теплопровідність найбільше зростає при використанні волокнистих металевих наповнювачів, а температурний коефіцієнт розширення зазвичай зменшується пропорційно об'єму введеного матеріалу. Стійкість до термоударів і ударна в'язкість можуть покращуватися при оптимальному обсязі пилоподібного наповнювача і значно зростають при введенні великих об'ємів волокнистих наповнювачів. Пилоподібні наповнювачі часто використовують для підвищення міцності зчеплення епоксидних композицій.

Водночас введення наповнювачів збільшує густину матеріалу, що може впливати на економічну ефективність. У спеціальних випадках, де маса конструкції є критичною, застосовують низькогустинні наповнювачі [1].

Композиції з дисперсними наповнювачами поділяють на два основні класи: дисперсно-зміцнені та зміцнені часточками. У обох випадках композицію утворюють матриця та розподілена в ній друга фаза, яку додають для модифікації певних властивостей. Основна відмінність цих класів полягає у структурі.

Дисперсно-зміцнені композиції містять матрицю з елементарної речовини, у якій рівномірно розподілені наддрібні часточки розміром 0,01...0,1 мкм при об'ємній частці 1...1,5 %. Композиції, зміцнені часточками, відрізняються більшим розміром часток (понад 1,0 мкм) і значним об'ємним вмістом до 25 %. Як часточки застосовують карбіди, борида, нітриди, оксиди, нерозчинні та некогерентні з матрицею матеріали. У дисперсно-зміцнених композиціях матриця несе основне навантаження, а ефективність зміцнення визначається опором, який часточки чинять руху дислокацій. Основними параметрами є середній вільний шлях між часточками та проміжок між ними, що залежать від діаметра часток і їх об'ємної концентрації. Головна перевага

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дисперсно-зміцнених матеріалів – здатність зберігати властивості в широкому температурному інтервалі, до 80 % температури плавлення матриці [13].

У композиціях, зміцнених часточками, матриця відіграє проміжну роль між двома іншими класами матеріалів. У дисперсно-зміцнених матеріалах вона несе основне навантаження, тоді як у часточково-зміцнених композиціях навантаження розподіляється між матрицею та часточками. Зміцнювальний ефект часточок проявляється, коли вони обмежують деформацію матриці механічним стисненням, тобто коли відстань між часточками перешкоджає їх зближенню. Величина зміцнення залежить від відношення відстані між часточками до їх діаметра та від співвідношення пружних характеристик матриці й часточок.

Механізм зміцнення дисперсними часточками пояснює теорія Орована. У цій моделі рух дислокацій у м'якій і в'язкій матриці, що містить тверді рівноважні часточки, призводить до вигинання дислокацій між часточками. При проходженні дислокацій формуються петлі навколо кожної часточки, що створює поле пружних напруг і утруднює просування нових дислокацій, підвищуючи міцність матеріалу [13].

Металеві порошки виготовляють із заліза, міді, алюмінію, срібла, нікелю, олова, вісмуту, кадмію, паладію та інших металів. Порошки алюмінію, заліза та міді, які швидко окислюються, не застосовують для електропровідних полімерних матеріалів. Міцнісні характеристики металонаповнених полімерів значною мірою визначаються адгезією металу до зв'язуючого, яка зменшується у ряду: нікель, сталь, залізо, олово, свинець. Адгезія може бути результатом фізичних та хімічних взаємодій металів і полімеру.

Металонаповнені полімерні композиції мають електропровідність, що залежить від типу металу, ступеня наповнення, змочуваності наповнювача та умов переробки. Максимальна провідність досягається, коли металевий наповнювач не окислюється і хімічні реакції зі зв'язуючим проходять лише на

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

контактній поверхні. При однаковому ступені наповнення електропровідність зростає зі збільшенням дисперсності наповнювача [6].

Водночас введення понад 40 % порошкоподібного металевго наповнювача зазвичай знижує міцність через збільшення внутрішніх напружень у високонаповненому полімері. Наповнення волокнистим матеріалом забезпечує більший приріст міцності та теплопровідності, ніж порошком. Деякі металеві наповнювачі надають специфічні властивості: порошки заліза і сплавів – феромагнітні властивості; лусочки алюмінію, нікелю, срібла – низьку газо- і паропроникність; порошки алюмінію та мідних сплавів – декоративність. Наповнення дрібнодисперсними порошками платини, паладію, родію, іридію та заліза дозволяє каталізувати реакції гідрування і часто перевершує каталітичну активність металевих порошків. Матеріали, наповнені свинцем, кадмієм, вольфрамом, використовують для захисту від високої енергії випромінювання [12].

1.4. Висновки та постановка задач досліджень

Висновки:

1. Полімерні композиційні матеріали мають високу перспективність для застосування у різних галузях техніки.
2. Для розробки полімеркомпозитів активно використовують епоксидні в'язкі речовини.
3. Найбільш ефективною основою є епоксидно-діанова смола, яка володіє універсальними властивостями.
4. Введення дрібнодисперсних наповнювачів сприяє покращенню властивостей епоксикомпозитів.
5. Під час формування виробів з епоксидних композиційних матеріалів необхідно дотримуватися наступних вимог: суворе дотримання технологічного процесу та послідовності всіх операцій; правильний підбір компонентів та

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

урахування всіх технологічних параметрів; забезпечення однорідності структури матеріалу.

З метою покращення властивостей епоксидних композитів на основі дрібнодисперсних наповнювачів необхідно вирішити такі завдання:

1. Визначити оптимальний склад епоксидного композиційного матеріалу (ЕКМ).
2. Підібрати раціональне співвідношення компонентів для забезпечення технологічності формування системи.
3. Оптимізувати температурно-часові режими одержання ЕКМ.
4. Дослідити вплив дрібнодисперсних наповнювачів на механічні властивості епоксикомпозитів.
5. Вивчити вплив обробки наповнювача на механічні характеристики епоксикомпозитів.
6. Провести аналіз мікроструктури наповнених епоксисистем.
7. Дослідити вплив температури на механічні характеристики епоксикомпозитів.

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів

В якості вихідного матеріалу була використана епоксидно-діанова смола марки ЕД-20 (ДСТУ 10587-84), яка являє собою високов'язку прозору рідину. Масова частка епоксидних груп становить 20,0...22,5 %, а вміст летких речовин – 0,2...0,8 %. Основні фізико-хімічні властивості незатвердженої смоли наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Фізичні властивості смоли марки ЕД-20

Показник	Значення показника
Густина, г/см ³	1,16-1,2
Молекулярна маса	390-430
Вміст епоксидних груп, %	19,9-22,0
Вміст летких речовин, %	1,0
Умовна в'язкість за кульковим віскозиметром при температурі 25°C, с	65
Вміст загального хлору, %	1,0

Для тверднення епоксидних композицій як отверджувач використовували поліетилен-поліамін – ПЕПА (за ТУ 60259470). Ця речовина призначена для структурування епоксидних смол при нормальних та знижених температурах, зокрема в умовах підвищеної вологості. Зовні ПЕПА представляє собою рідину від світложовтого до темnobуrowого кольору без видимих механічних домішок. Масова частка загального азоту в ньому становить не менше 30 %.

В якості наповнювача використовували порошок із підшипникової сталі ШХ15. До складу цієї сталі входять такі хімічні елементи [14], як хром, мідь

(Cu), нікель, кремній, марганець, які вводяться спеціально для регулювання фізико-механічних властивостей матеріалу, а також сірка і фосфор, що залишаються у сталі після процесу лиття.

2.2. Методи дослідження фізико-механічних властивостей та мікроструктури розроблених епоксидних композиційних систем

Границю міцності на стиск визначали за ДСТУ 4651–82. Зразки у формі циліндрів діаметром $10 \pm 0,5$ і висотою 15 мм піддавали стиску при рівномірному зростаючому зусиллі з швидкістю наближення площадок 2 мм/хв [15].

Межу міцності при стиску розраховували за формулою:

$$\sigma_{cm} = P/S,$$

де P – навантаження, при якому зразок зруйнувався, Н;

S – площа поперечного перерізу зразка, см^2 .

Твердість матеріалу за методом Брінеля визначали за ГОСТ 1786–80 [16]. Товщиною не менше 5 мм і шириною не менше 15 мм. При дослідженні сталю кульку діаметром 10 мм вдавлювали в поверхню досліджуваного матеріалу з навантаженням 5 кН протягом 60 с. Розрахунок твердості матеріалу проводили за формулою:

Значення твердості визначали шляхом розрахунку за відповідною формулою:

$$HB = \frac{P}{pdh},$$

де P – зусилля, прикладене до кульки, Н;

d – діаметр кульки, мм;

h – глибина відбитку кульки, мм.

Випробування зносостійкості виконували на машині тертя СМЦ-2 за

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

схемою «вал–сегмент втулки» в умовах сухого тертя [16]. Зразок закріплювали на циліндричній поверхні металевого контртіла, що оберталося з заданою швидкістю. Контртіло виготовляли у вигляді диска (рис. 2.1) із сталі 45 за ГОСТ 1050-74, діаметром 50 мм та шорсткістю поверхні $Ra = 3,2$. Зразки виконували як із монолітного матеріалу, так і у вигляді покриття, нанесеного на рельєфну поверхню металевого стержня прямокутного перерізу 10×10 мм і висотою 15 мм (рисунок 2.2). Довжина тертя складала 1020 м. Маса зразків визначалася на аналітичних лабораторних вагах ВЛА–200 з точністю до 0,0001 г.

Інтенсивність лінійного зношування визначали в лінійних безрозмірних одиницях:

$$I = \frac{\Delta h}{\Delta L},$$

де Δh – товщина зношеного шару, мм;

ΔL – шлях тертя, км.

Іншою характеристикою зносостійкості матеріалу вибрано інтенсивність вагового зношування:

$$I_g = \frac{m_1 - m_2}{\Delta L},$$

де m_1, m_2 – маса зразків до і після випробувань, г.

Дослідження макро- та мікроструктури матеріалу проводили за допомогою оптичного мікроскопа МБС-9 при збільшенні $\times 30$ та металографічного мікроскопа МІМ-10 з діапазоном збільшень $\times 100 \dots 600$. Аналіз структури епоксидного композитного матеріалу виконували методами пластмасографії [17], що дозволило об'єктивно оцінити розташування структурних компонентів, особливості їх взаємодії, зокрема на межі розділу фаз, а також виявити мікро- і макродефекти структури.

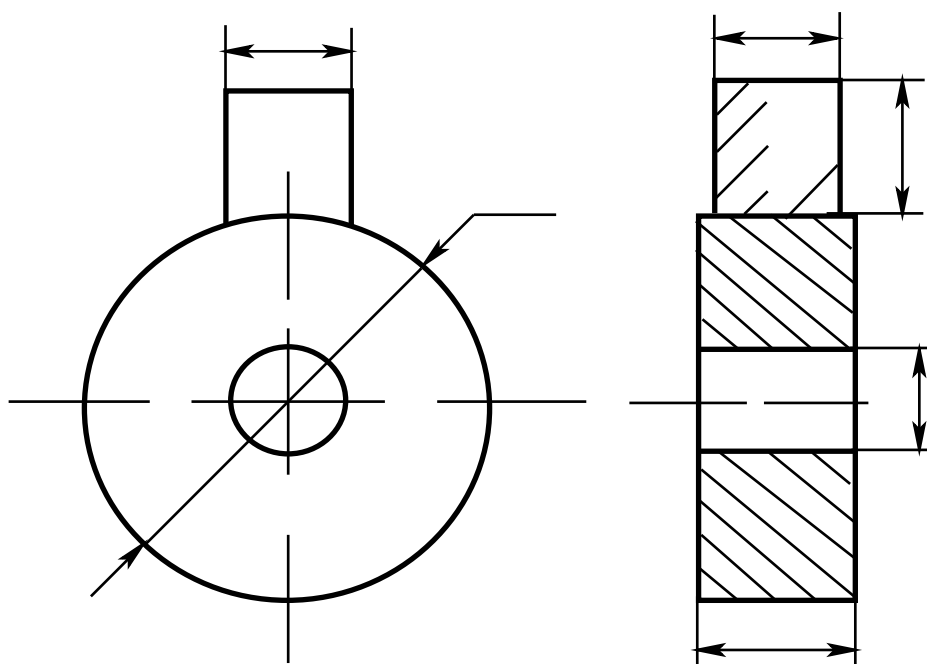


Рисунок 2.1 – Схема тертя і розміри елементів трибопари:

1 – зразок; 2 – гніздо для термопари; 3 – контртіло

Механізм підготовки поверхні шліфа включав кілька етапів. Спочатку зразок протирали гасом, щоб зменшити зчеплення частинок алмазної пасту з його поверхнею. Потім здійснювали полірування на полірувальному верстаті, наносячи на робочу поверхню круга (папір або тканину) алмазну пасту АСМ-3/5 з дисперсністю частинок 3...5 мкм. Після завершення полірування зразок промивали розчином етилового спирту для видалення залишків пасту. Мікроструктуру обробленого шліфа контролювали за допомогою мікроскопа МІМ-10. Цю процедуру повторювали кілька разів до отримання максимально чистої поверхні без помітних одиночних полос і рисок. Наступні операції виконували з використанням алмазної пасту АСМ-0,25/0 (дисперсність 0,25...0,5 мкм) до повного усунення дефектів полірування.

Зазначена обробка не забезпечує повного видалення залишків продуктів шліфування, що ускладнює аналіз структури полімеркомпозиту. Методи, що передбачають видалення цього шару шляхом розчинення, непридатні, оскільки полімери перед розчиненням зазнають набухання і структурних змін. Тому для очищення зразків застосовували метод ультразвукового оброблення в етиловому спирті.

2.3. Формування дослідних зразків

Формування дослідних зразків полягало у приготуванні однорідної композиції, що включала всі необхідні компоненти. Вміст інгредієнтів визначали у масових частинах на 100 мас. ч. епоксидної смоли ЕД-20 залежно від об'єму зразків.

Композицію готували наступним чином: до епоксидної смоли додавали твердник ПЕПА у кількості 12 мас. ч. на 100 мас. ч. ЕД-20, після чого поступово вводили наповнювач із ретельним механічним перемішуванням на кожному етапі. Вміст порошку сталі ШХ15 варіювався від 0 до 100 мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидної смоли з кроком 20 мас. ч. Отриману суміш заливали у спеціальні форми. Сформовані зразки спочатку тверднули при кімнатній температурі (18 °С) протягом 24 годин, а потім піддавалися термічній обробці: у першому випадку – 4 години при 80 °С, у другому – 4 години при 180 °С.

Для підвищення адгезійних властивостей епоксикомпозитів використовували також попередньо оброблений порошок сталі ШХ15. Обробку проводили за допомогою поверхнево-активних речовин, а для видалення машинного масла порошок промивали спеціальними засобами із ретельним перемішуванням і кількаразовим прополіскуванням водою. Для остаточного видалення вологи порошок поміщали у піч, нагріту до 120 °С, на 30 хвилин.

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

2.4. Дослідження вмісту наповнювача на властивості полімер матричних матеріалів

Випробування на стиск показали, що максимальна границя міцності ($\sigma_{\text{ст}}$) досягається для епоксикомпозиту з вмістом порошку 80 мас. ч. серед зразків, які піддавалися термічній обробці при 180 °С, і становить 107,00 МПа. Для зразків, оброблених при 80 °С, найвищий показник $\sigma_{\text{ст}}$ зафіксовано для зразка з 100 мас. ч. наповнювача (104,46 МПа).

Обробка наповнювача поверхнево-активними речовинами (ПАР) значно підвищує межу міцності. Так, при використанні обробленого порошку максимальна $\sigma_{\text{ст}}$ досягла 131,21 МПа для зразка з 100 мас. ч. наповнювача (рисунок 2.3).

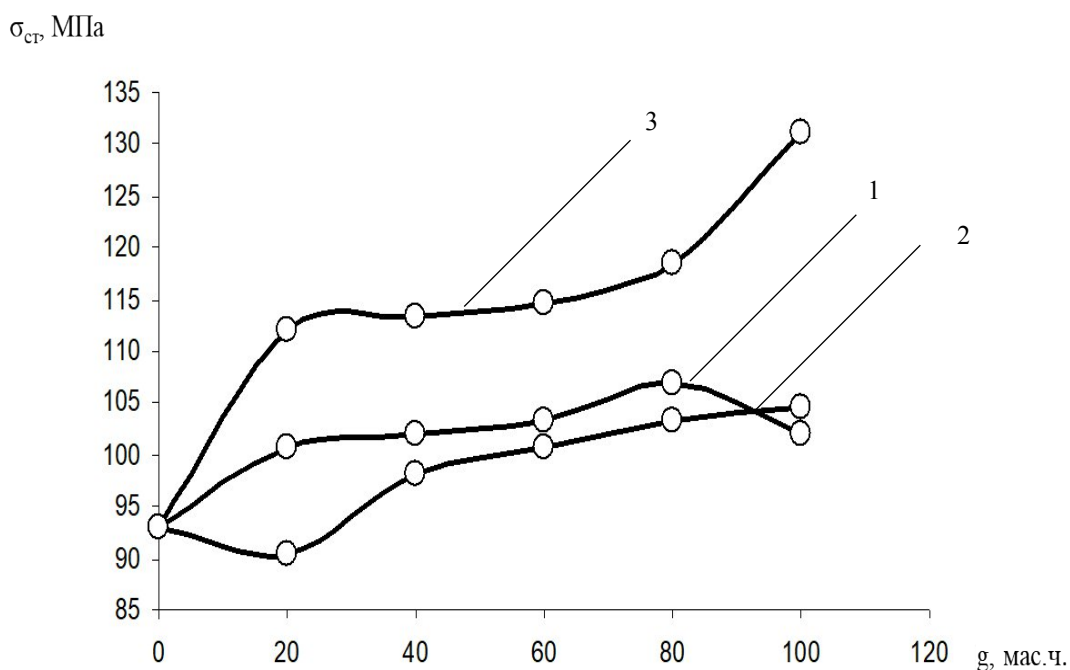


Рисунок 2.3 – Залежність границі міцності при стиску від вмісту наповнювача для зразків з кінцевою температурою термічної обробки:

1 – 180 °С; 2 – 80 °С; 3 – 80 °С та обробкою наповнювача ПАР

Загалом, введення дрібнодисперсних наповнювачів сприяє підвищенню межі міцності на стиск, оскільки частинки порошку перешкоджають поширенню тріщин. Зокрема, введення 80 мас. ч. порошку при термічній обробці 180 °C дозволило підвищити $\sigma_{\text{ст}}$ у 1,2 раза порівняно з ненаповненим епоксиполімером. Такий ефект пояснюється більш рівномірним розподілом наповнювача та поліпшеною взаємодією з матрицею у порівнянні із зразками, що містять 20 мас. ч. порошку (рисунок 2.4). Обробка наповнювача ПАР забезпечила збільшення $\sigma_{\text{ст}}$ у 1,5 раза для зразка з 100 мас. ч. порівняно з ненаповненим епоксиполімером.

Отже, експериментальні дані свідчать про прямий зв'язок між вмістом наповнювача і міцнісними характеристиками епоксикомпозиту: чим більше частинок порошку, тим вищі показники міцності. Крім того, обробка наповнювача поверхнево-активними речовинами покращує адгезію до епоксидної матриці і підвищує загальну міцність матеріалу.

Для зразків, наповнених необробленим порошком, спостерігаються частинки неправильної форми з рваними краями, що частково відшаровуються від епоксидної матриці через низьку адгезію. Наповнювач, оброблений поверхнево-активними речовинами (ПАР), набуває більш округлої форми та забезпечує кращий контакт із матрицею, що позитивно впливає на механічні властивості матеріалу (рисунок 2.5).

Дослідження підтвердили, що оптимізація температурно-часових режимів тверднення є критично важливою при розробці епоксикомпозитних матеріалів. Недостатній час полімеризації за низької температури не забезпечує утворення достатньої кількості хімічних зв'язків між макромолекулами матриці та частинками наповнювача, тоді як надто високі температури призводять до зниження фізико-механічних характеристик унаслідок термодеструктивних процесів та зростання внутрішніх напружень.

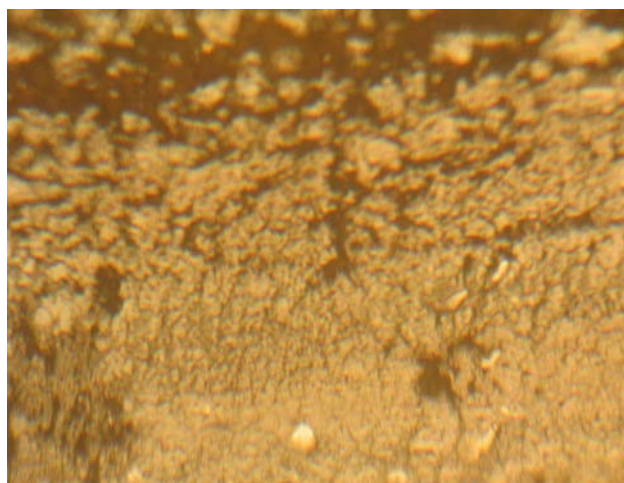
Зокрема, зразки, які піддавалися термічній обробці при 180 °C, продемонстрували дещо вищу межу міцності при стиску порівняно із зразками, обробленими при 80 °C (при вмісті наповнювача 80 мас. ч.: $\sigma_{\text{ст}} = 107,00$ МПа при

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

180 °С та $\sigma_{ст} = 103,18$ МПа при 80 °С). Це пояснюється видаленням забруднень з поверхні частинок порошку, що сприяє утворенню більшої кількості вузлів хімічного зшивання з епоксидною матрицею.

Аналіз поверхні руйнування зразків після випробувань на стиск показав: для зразків без обробки ПАР утворюються діагональні тріщини, розвиток яких веде до руйнування матеріалу через неспроможність протидіяти дотичним напруженням у поперечному напрямку; для зразків із обробленим ПАР тріщини переважно формуються вздовж зразка, що свідчить про підвищений опір матеріалу до дотичних напружень.

Отже, обробка наповнювача ПАР та правильний температурно-часовий режим тверднення значно покращують механічні властивості епоксикомпозитів та підвищують стійкість матеріалу до руйнування.



а

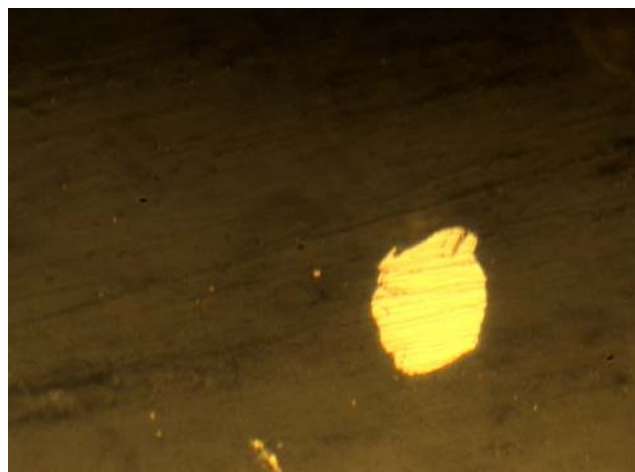


б

Рисунок 2.4 – Мікроструктура епоксикомпозитів, наповнених дрібнодисперсним порошком: а) 20 мас. ч.; б) 80 мас. ч.



а



б

Рисунок 2.5 – Мікроструктура епоксикомпозитів, наповнених дрібнодисперсним порошком: а) без обробки; б) з обробкою

Експериментальні дослідження показали, що максимальні значення твердості епоксикомпозитів спостерігаються при вмісті наповнювача 80 мас. ч. і кінцевій термічній обробці при 80 °С (НВ = 276,93 МПа), що на 12 % перевищує твердість ненаповненого епоксикомпозиту (НВ = 244,97 МПа). Було встановлено, що залежність твердості від вмісту наповнювача має симетричний характер: із збільшенням кількості порошку твердість матеріалу підвищується (рис. 2.6).

Введення наповнювача, обробленого поверхнево-активними речовинами, дозволило досягти ще більшого підвищення твердості. Для зразків із вмістом 100 мас. ч. обробленого порошку твердість склала НВ = 324,97 МПа, що на 25 % більше, ніж у ненаповненого епоксикомпозиту (НВ = 244,97 МПа).

Таким чином, обробка наповнювача ПАР значно покращує взаємодію частинок із матрицею і суттєво підвищує механічні характеристики епоксикомпозитів.

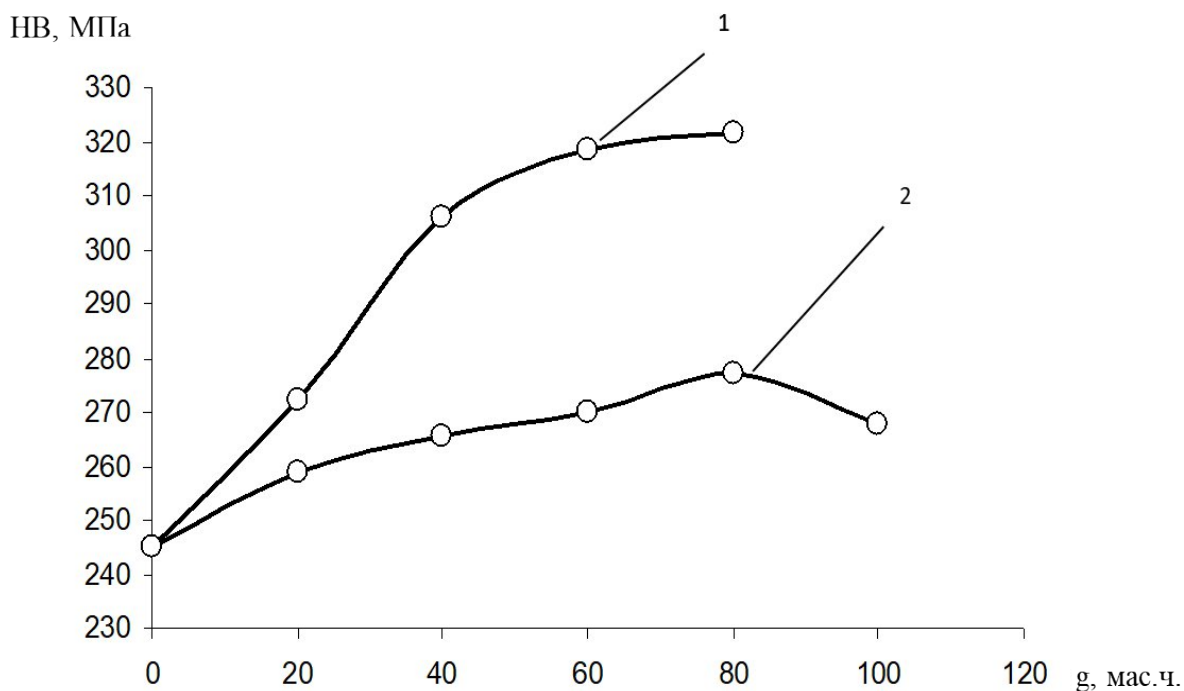


Рисунок 2.6 – Залежність твердості епоксикомпозитів від вмісту наповнювача для зразків з кінцевою температурою термічної обробки:

1 – 80 °C; 2 – 80 °C та обробкою наповнювача ПАР

Дослідження зносостійкості епоксикомпозитів проводили при швидкості ковзання 1,7 м/с і питомому навантаженні 0,75 МПа, що дозволило оцінити інтенсивність зношування матеріалу з різним вмістом наповнювача. Вибір режимів навантаження базувався на властивостях композиту: при низьких швидкостях та навантаженнях зміни зносостійкості були незначні, а при високих режимах спостерігалось катастрофічне руйнування зразків.

Результати показали, що мінімальне вагове зношування спостерігається для зразків із вмістом наповнювача 80 мас. ч. серед матеріалів, термічно оброблених як при 180 °C ($I_g = 7,8 \cdot 10^{-3}$ г/км), так і при 80 °C ($I_g = 9,8 \cdot 10^{-3}$ г/км) (рисунок 2.7).

Введення обробленого поверхнево-активними речовинами порошку дозволило ще більше знизити інтенсивність зношування. Для зразків із 80 мас. ч. обробленого наповнювача мінімальне значення вагового зношування становило $I_g = 4,9 \cdot 10^{-3}$ г/км.

Таким чином, оптимізація вмісту наповнювача та його попередня обробка значно підвищують зносостійкість епоксикомпозитних матеріалів.

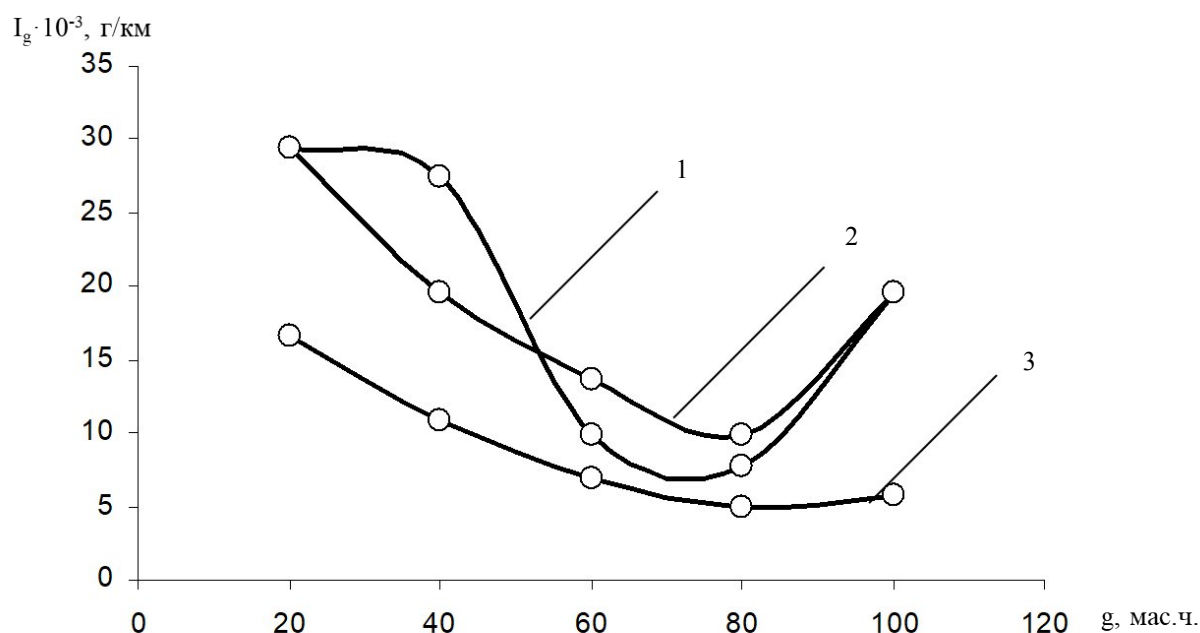


Рисунок 2.7 – Залежність інтенсивності вагового зношування від вмісту наповнювача для зразків з кінцевою температурою термічної обробки: 1 – 180 °C; 2 – 80 °C; 3 – 80 °C та обробкою наповнювача ПАР

Результати експериментальних досліджень показали, що інтенсивність зношування епоксидного композиту залежить від температури кінцевого тверднення та вмісту порошку. При температурі 180 °C зносостійкість нижча, ніж при 80 °C, що пояснюється початком термоокислювальної деструкції та виникненням додаткових внутрішніх напружень у системі.

Встановлено, що введення обробленого поверхнево-активними речовинами дрібнодисперсного порошку у кількості 80 мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидної смоли та додаткове термічне впливання дозволяє отримати епоксикомпозит із максимальною зносостійкістю ($I_g = 4,9 \cdot 10^{-3}$ г/км при $P = 0,75$ МПа і $v = 1,7$ м/с), що зумовлено формуванням оптимальної щільності структурної сітки.

У необроблених зразках з вмістом наповнювача 20 мас. ч. спостерігається слабка взаємодія частинок із епоксидною матрицею, що призводить до утворення великої кількості магістральних тріщин і погіршення зносостійкості матеріалу. Для епоксикомпозитів, наповнених порошком, обробленим ПАР, формується сітка дрібних втомних тріщин (рисунок 2.8), що свідчить про більш рівномірний розподіл наповнювача і покращену адгезію.

У зразках з 20 мас. ч. наповнювача контакт епоксидної матриці з контртілом переважає, що обумовлює підвищену інтенсивність вагового зношування. Зі збільшенням вмісту наповнювача до 80 мас. ч. контакт із контртілом відбувається через частинки порошку, при цьому поверхня наповнювача стає більш загостреною, що підвищує опір матеріалу стиранню (рисунок 2.9).



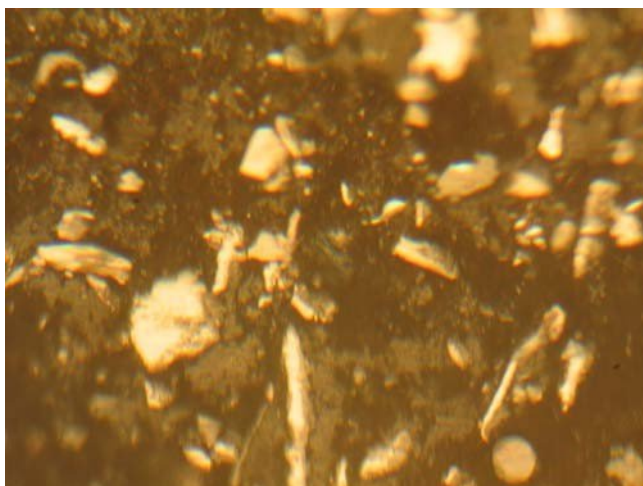
а



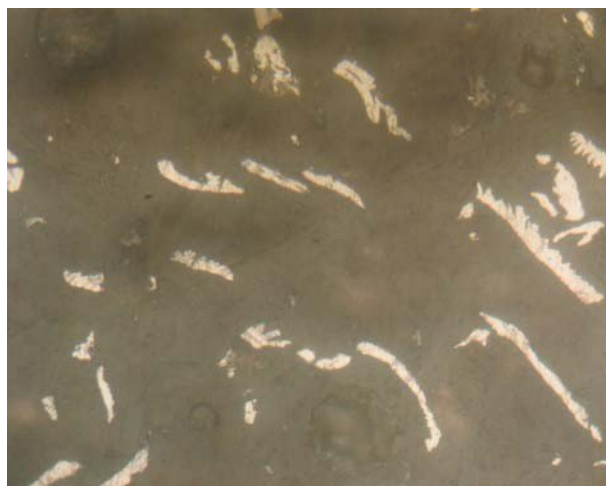
б

Рисунок 2.8 – Поверхня трибоконтакту епоксикомпозитів, наповнених дрібнодисперсним порошком 20 мас. ч.: а) без обробки; б) з обробкою

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32



а



б

Рисунок 2.9 – Поверхня трибоконтакту епоксикомпозитів, наповнених дрібнодисперсним порошком 80 мас. ч.: а) без обробки; б) з обробкою

У необроблених зразках з вмістом наповнювача 20 мас. ч. спостерігається слабка взаємодія частинок з епоксидною матрицею, що призводить до утворення великої кількості магістральних тріщин і, як наслідок, до погіршення зносостійкості матеріалу. Для епоксикомпозитів, наповнених обробленим поверхнево-активними речовинами порошком, формується сітка дрібних втомних тріщин, яка сприяє більш рівномірному розподілу навантажень на поверхні контакту з контртілом. При збільшенні кількості наповнювача до 80 мас. ч. забезпечується ефективніший контакт частинок із контртілом та підвищена стійкість до стирання. Таким чином, обробка наповнювача поверхнево-активними речовинами підвищує його адгезію до епоксидної матриці та зміцнює міжфазні зв'язки, що і пояснює значне покращення експериментально визначених фізико-механічних характеристик епоксикомпозитів.

РОЗДІЛ 3

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Особливості формування епоксикомпозитів

Ефективність розроблених матеріалів визначається, перш за все, можливістю їх практичного використання у вузлах серійних машин і механізмів, а також аналізом результатів експлуатації. Для цього проведено поетапні дослідження, що включали розробку складу та технології формування покриттів для захисту роликів транспортних платформ від іскроутворення, а також випробування полімеркомпозитів.

Технологічний процес виготовлення виробів із полімеркомпозитів включає такі операції: підбір і підготовку матеріалів, приготування формувальної маси, формування покриттів та термічну обробку. Підготовка формувальної маси починається з вибору необхідних матеріалів, що включає просіювання та просушування наповнювачів і видалення домішок. Потім проводять дозування компонентів за масою або об'ємом відповідно до розробленої рецептури. Неправильне дозування – надлишок наповнювачів або пластифікаторів – погіршує фізико-механічні властивості та зносостійкість, а надлишок в'язучого підвищує коефіцієнт і температуру тертя, що негативно впливає на працездатність прецизійної пари.

До складу в'язучого входять епоксидно-діанова смола, пластифікатори та твердники у визначеному масовому співвідношенні, а наповнювач формується на основі базових компонентів та антифрикційних твердозмащуючих добавок. Змішування формувальної маси є критично важливим етапом, оскільки однорідність системи забезпечує отримання прес-композиту з необхідними триботехнічними і міцнісними характеристиками. Для цього використовували роторний змішувач, в який наповнювачі та в'язуче завантажували послідовно й поетапно [18].

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, технологічний процес виготовлення епоксикомпозитів включає підбір і підготовку матеріалів та обладнання, приготування формувальної маси, формування виробів, а також контроль, сертифікацію та маркування готової продукції (рисунок 3.1).

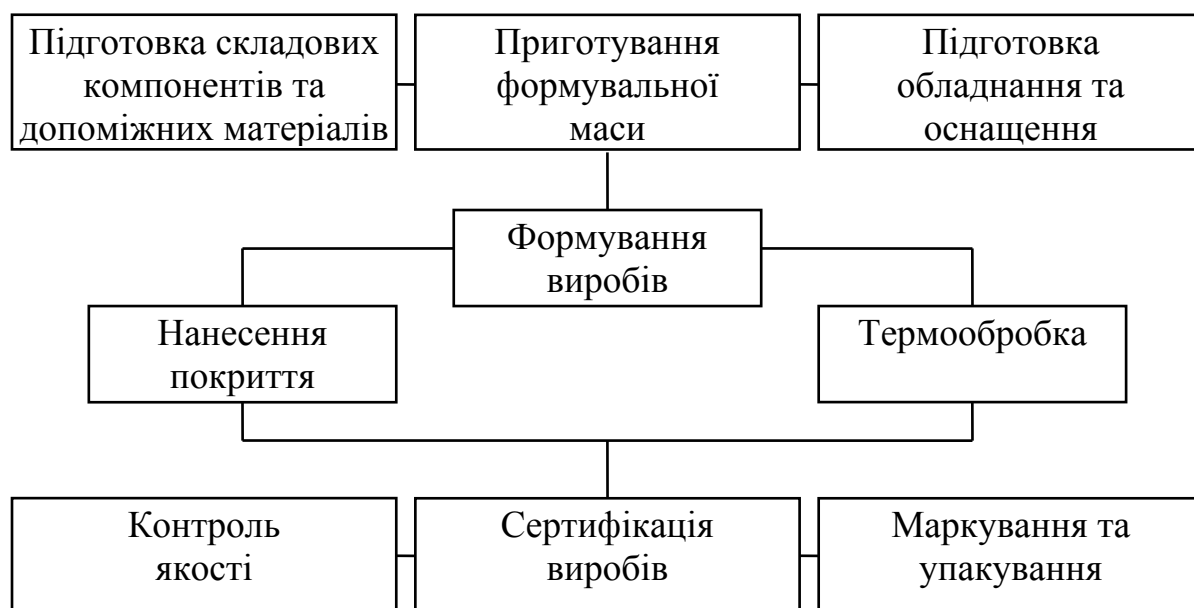


Рисунок 3.1 – Технологічна схема виготовлення епоксикомпозитних покриттів

Приготування формувальної маси:

1. Епоксидно-діанову смолу у необхідному співвідношенні нагрівають при постійному перемішуванні до температури 353 ± 5 К для забезпечення кращого суміщення компонентів.
2. Після охолодження прогрітої суміші вводять наповнювачі та перемішують протягом 20...30 хв.
3. У отриману однорідну масу додають твердник.
4. Готові композиції необхідно використати протягом 24 год після введення твердника.

Підготовка обладнання та оснащення:

1. Перед кожним увімкненням печі проводять профілактичний огляд робочого простору, а стан нагрівачів перевіряють кожну зміну.

2. Контроль точності показів регулювального потенціометра печі здійснюють не рідше одного разу за зміну.

3. Перед початком роботи перевіряють справність усіх комплектуючих вакуумної печі.

4. Технічний огляд печей виконують не менше одного разу на 3 місяці.

5. Профілактичний огляд шнекового змішувача проводять перед кожним увімкненням.

Формування виробів:

1. Встановлюють вагові співвідношення компонентів та необхідну масу композиції на одиницю виробу на основі об'ємного співвідношення в'язучого та наповнювачів.

2. Завантажують масу в форму, рівномірно розподіляючи її за допомогою шпилькової рівняли.

3. Виконують формування покриттів.

4. Деталі завантажують у піч і проводять термічну обробку за встановленим режимом.

5. Після завершення термообробки піч вимикають та охолоджують разом із виробами.

6. На наступному етапі деталі і контрольні зразки проходять перевірку на якість: відсутність дефектів, відповідність типорозмірам.

7. Вироби маркують і транспортують у місця зберігання.

Контроль якості:

1. Всі деталі та контрольні зразки підлягають зоровому огляду.

2. Не допускається наявність: відламування частин втулки; тріщин, видимих при зоровому контролі; зміни циліндричної форми; різниці в осьових діаметрах $> 0,05$ мм (за вимірюванням у двох паралельних площинах); різниці у вазі виробів $> 1,5$ г; помітної зміни кольору.

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Допускаються невеликі впадини діаметром до 2,0 мм, але не більше 3-х на виріб.

4. Замазування, підклеювання або інша реставрація бракованих виробів не дозволяється.

5. Маркування проводять нанесенням клейма відповідною фарбою через трафарет на неробочу поверхню виробу.

Термообробка:

1. Застосовувався ступінчастий режим полімеризації згідно розробленої методики.

2. Для зменшення внутрішніх напружень вироби після термообробки піддавали повільному охолодженню разом із піччю [19].

3.2. Технологія отримання епоксикомпозитних покриттів

Технологічний процес отримання полімерматричних покриттів (матеріалів) наведено в таблиці 3.1 і включає заготівельну, формувальну, термічну та контрольну операції, а також, за потреби, шліфування та маркування виробів.

Формування композиції здійснювалося таким чином: до епоксидної смоли вводили твердник ПЕПА у кількості 12 мас. ч. на 100 мас. ч. смоли ЕД-20, після чого поступово додавали наповнювач із ретельним механічним перемішуванням на кожному етапі. Вміст порошку сталі ШХ15 варіювався від 0 до 100 мас. ч. на 100 мас. ч. смоли з кроком 20 мас. ч. Після підготовки композицію наносили на металеву підложку. Сформовані покриття після тверднення протягом 24 годин при кімнатній температурі (18 °С) піддавали термічній обробці протягом 4 годин за температури 180 °С.

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1

Номер операції	Назва операції	Структура операції	Обладнання, матеріали
005	Заготівельна	1. Просушити наповнювачі в сушильному шкафу при $453 \pm 5\text{K}$ на протязі 1,5-2 год 2. Просіяти порошки через сита: розмір отвору – 40мкм 3. Провести дозування компонентів 4. Провести змішування наповнювачів, помістити їх в окрему тару. 5. Почергово ввести в олігомер твердник, наповнювачі і перемішувати композицію 15-20 хв	Сушильний шкаф. Набір сит, ГОСТ 6613-73. Ваги лабораторні, ГОСТ 19491-74. Шнековий змішувач. Змішувач роторного типу.
010	Формувальна	1. Підготувати поверхню для нанесення покриттів 2. Знежирити поверхню в місцях нанесення покриття 3. Провести формування адгезійного шару покриття	Шліфувальний папір. Ацетон. Компресор.
015	Термічна	1. Нагріти піч до $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2. Завантажити покриття в піч і провести термообробку за наступним режимом: 4год при $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 3. Вимкнути піч і охолоджувати на повітрі	Камерна піч з горизонтальним розміщенням робочої камери.
020	Контрольна	1. Перевірити покриття на відповідність розмірам згідно креслення та на відсутність дефектів	Мікрометричний нутромір, штангенциркуль, лупа
025	Шліфувальна	1. Прошліфувати до відповідного розміру 2. Проконтролювати розміри	Шліфувальний верстат Штангенциркуль
030	Маркування	1. Нанести відповідне клеймо	Фарба, трафарет.

3.3. Види браку та методи його усунення

При використанні рідких епоксидних смол дуже часто з'являються дефекти. Детальніше про деякі з них.

Пустоти та газові бульбашки. Виникають у результаті потрапляння повітря під час змішування компонентів, недостатнього вакуумування або екзотермічних реакцій, що виділяють газ. Зменшують механічну міцність, підвищують крихкість та сприяють зародженню тріщин.

Методи усунення:

- вакуумування композиції перед формуванням;
- повільне та рівномірне введення компонентів при змішуванні;
- поступове нагрівання для вивільнення розчинених газів перед полімеризацією.

Тріщини і розшарування. Мікротріщини з'являються через нерівномірне наповнення, недостатню адгезію матриці до наповнювача, або через термічні напруження при охолодженні. Велику роль відіграє ступінь обробки порошкових наповнювачів та їх сумісність з епоксидною смолою.

Методи усунення:

- використання поверхнево-активних речовин (ПАР) для покращення адгезії наповнювача;
- оптимізація температурно-часових режимів термообробки, включаючи поступове охолодження;
- збалансований вміст наповнювача для уникнення локальних концентрацій напружень.

Усадка та деформації. Виникає через нерівномірне полімеризаційне ущільнення або недостатню кількість наповнювача. Виявляється у вигляді провалів, змін об'єму та кривизни поверхні.

Методи усунення:

- введення наповнювачів для зменшення усадки полімеру;

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- дотримання оптимальної рецептури та пропорцій компонентів;
- контроль температури і часу полімеризації.

Нерівномірною поверхня та шорсткість. Поверхня може мати хвилястість, полоски, сліди від інструменту або нерівномірну текстуру. Часто виникає при неповному видаленні залишків алмазної пасти або при недостатньому шліфуванні.

Методи усунення:

- використання ультразвукового очищення для видалення залишків шліфувальної пасти;
- послідовне полірування від грубої до дрібної дисперсності пасти.
- контроль чистоти та рівності підложки перед нанесенням композиції.

Включення сторонніх часток. Потрапляння пилу, волокон, металевих або органічних часток у масу. Призводить до локального зниження міцності, появи концентрацій напружень.

Методи усунення:

- просіювання та просушування наповнювачів перед введенням у смолу;
- робота у чистих приміщеннях, застосування фільтрів і закритих змішувачів.

Пожовтіння або зміна кольору. Змінює естетичні та деякі фізико-хімічні властивості. Може бути викликано окисненням смоли, перегрівом або забрудненням наповнювача.

Методи усунення:

- використання стабілізаторів кольору;
- контроль температури під час термообробки;
- очистка наповнювачів від машинного масла і домішок [20].

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

3.4. Охорона навколишнього середовища

Бурхливе зростання виробництва пластмас за останнє десятиріччя поставило перед науковцями та інженерами завдання ефективного очищення відходів відпрацьованого повітря та технологічних вод, що використовуються для охолодження окремих деталей обладнання. Сьогодні в промисловості переробки пластмас застосовуються різні типи очисного устаткування, серед яких найбільш поширені фільтруючі системи та установки для термічного спалювання забруднень.

Особливо велика кількість парів у повітрі утворюється при випаровуванні пластифікаторів під час виробництва лінолеуму та плівки. Частина пластифікаторів, яка не використовується при пластифікації полівінілхлориду під час теплової обробки, випаровується і потрапляє в атмосферу. Для видалення цих шкідливих речовин застосовують фільтруюче устаткування, яке є економічним, не потребує додаткового палива, просте в обслуговуванні та дозволяє повернути пластифікатори у виробництво.

У фільтруючих установках застосовують два способи охолодження повітря:

- пряме розпилення охолодженої води у потоці гарячого повітря;
- пропуск гарячого повітря через систему радіаторів, охолоджуваних водою [21].

У першому способі гаряче повітря проходить через камеру, де охолоджується розпиленими краплями холодної води. Пластифікатор, присутній у повітрі, конденсується у вигляді крапель. Охолоджене повітря надходить у фільтруючу камеру, де краплі пластифікатора осідають на волокнистих фільтрах. Зібраний пластифікатор стікає по трубопроводу у спеціальну ємність, а очищене повітря повертається у атмосферу.

Недоліки цього способу включають:

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

контакт охолоджуючої води зі шкідливими речовинами, що потребує подальшого очищення води;

– захоплення фільтрами частини води з повітря, яка у холодну пору року може замерзати та виводити установку з робочого стану;

– наявність води у зібраному пластифікаторі, що ускладнює його повторну переробку.

Другий спосіб очищення повітря від пластифікаторів передбачає, що гаряче забруднене повітря від виробничого обладнання спочатку проходить через фільтр попереднього очищення, де видаляються механічні домішки. Далі повітря пропускають через систему радіаторів, де його охолоджують до 40 °С. Після охолодження повітря подається до основних фільтрів для видалення пластифікаторів. Зібраний пластифікатор може бути повторно використаний, а тепло, відібране водою від гарячого повітря, може застосовуватися у побутових чи технологічних цілях.

Продуктивність таких фільтруючих установок становить 32 або 56 тис. м³/год. відпрацьованого повітря. Наприклад, при обробці 32 тис. м³/год. гарячого повітря з температурою 150 °С, у процесі охолодження до 40 °С конденсується близько 46 кг пластифікатора на годину, який можна змішувати зі свіжим і повторно використовувати у виробництві.

Контроль ступеня забруднення фільтрів здійснюється за допомогою водяних манометрів, встановлених перед фільтрами та після них. Для очищення фільтрів періодично подається пара. Фільтруючий елемент виконаний у формі циліндра діаметром 610 мм і довжиною 2440 мм, складається з каркаса та фільтрувальної тканини, де каркас виготовлений із тефлону або поліпропілену.

Для видалення парів розчинників та інших сумішей, які не конденсуються під час охолодження, застосовують установки термічного догорання. Принцип їхньої роботи базується на розкладі органічних сполук при високих температурах із використанням палива (природний газ, мазут або солярка). Забруднене повітря спочатку підігрівається теплообмінником до 300...500 °С,

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

потім надходить у камеру згоряння. При досягненні максимальної температури (500 °С) газова горілка вимикається. Очищене повітря перед викидом проходить через систему теплообмінників, підігрівуючи повітря або воду, що може бути використано для обігріву приміщень чи технологічних потреб [22].

Очищення технологічної охолоджуючої води у виробництві полівінілхлоридних лінолеумів необхідне для охолодження обладнання та готової продукції. Сучасне обладнання забезпечує розділення охолоджуючої води та охолоджуваного матеріалу, що виключає їх контакт. Залежно від технології застосовуються відкриті або закриті системи охолодження. Відкриті системи використовуються, якщо після охолодження температура не перевищує 30 °С. Закриті системи потребують м'якої води, щоб запобігти відкладенню солей на стінках обладнання.

Усі системи охолодження інтегруються в єдину кільцеву систему зворотної води, що дозволяє повністю виключити скидання технологічної води в навколишнє середовище та зменшити її витрати. Система включає магістральні трубопроводи, насосну станцію, фільтри та відстійники, а в якості охолоджувачів використовуються морозильні установки.

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

ВИСНОВКИ

На основі проведених експериментальних досліджень встановлено, що збільшення вмісту дрібнодисперсного порошку у складі епоксикомпозиту сприяє підвищенню його механічних характеристик. Додатково, обробка наповнювача поверхнево-активними речовинами (ПАР) покращує його адгезію до компонентів системи, посилює взаємодію між ними та зміцнює внутрішні зв'язки, що пояснює значне покращення властивостей матеріалу.

Експериментально визначено, що оптимальний вміст обробленого порошку, при якому забезпечується мінімальна інтенсивність зношування ($I_g = 4,9 \cdot 10^{-3}$ г/км), становить 80 мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидної смоли після термічної обробки при кінцевій температурі 80 °С.

Також показано, що при введенні 80 мас. ч. порошку на 100 мас. ч. епоксидної смоли ЕД-20 та термообробці при $t_k = 180$ °С спостерігається підвищення границі міцності при стиску на 13,5 %, а при термообробці $t_k = 80$ °С – збільшення твердості на 12 % порівняно з ненаповненим епоксиполімером.

Крім того, оптимізований епоксикомпозит, наповнений обробленим порошком, демонструє зростання твердості на 25 % ($HV = 324,97$ МПа) порівняно з ненаповненою системою ($HV = 244,97$ МПа) і на 15 % порівняно із зразками, наповненими необробленим порошком ($HV = 276,93$ МПа).

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Букетов А.В., Стухляк П.Д., Кальба Є.М. Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів. – Тернопіль: Збруч, 2005. – 182 с.
2. Стухляк П.Д. Эпоксидные композиты для защитных покрытий. – Тернополь: Збруч, 1994. – 177 с.
3. Демура А.Л. Використання електромагнітного поля надвисокої частоти в технологічному процесі виготовлення виробів з полімерних композиційних матеріалів // Весник двигателестроения. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2006. – № 4. – С. 76–79.
4. Середницький Я.Г., Гулай О.І. Вплив природи органічних модифікаторів та твердників на термотривкість кремнійорганічних композитів // Вісник Тернопільського державного педагогічного університету. – 2001. – Т. 6. – №2. – С. 49-54.
5. Горобець В.П. Технологія лакофарбових покриттів : навч. посібник. – Харків : ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2018. – 364 с.
6. Левченко М.І. Вплив температурних режимів на структуру та властивості епоксидних покриттів. – Дис. канд. техн. наук : ХНУ, 2017. – 214 с.
7. Романчук О.Т., Шевченко І.С. Особливості структурування полімерних покриттів при ступінчастому нагріванні. – Журнал «Полімери», 2020. – №3(45). – С. 56–68.
8. Савченко Л.П., Дмитренко В.М. Релаксація внутрішніх напружень у епоксиполімерних системах після термічної обробки. – Журнал «Композити», 2019. – Т. 12, №4. – С. 78–91.
9. Ткаченко В.О., Павленко С.Б. Методи оцінювання гел'фракції та механічних властивостей епоксидних покриттів. – Журнал «Матеріали та технології», 2021. – №2. – С. 99–114.

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

10. Бондаренко Ю.М., Петренко І.В. Тепломасообмін при сушінні полімерних покриттів. – Журнал «Теплотехніка та теплопостачання», 2018. – №5. – С. 42–56.

11. Хімія та технологія лакофарбових матеріалів : збірник наукових праць / ред. кол. : І.В. Пилипенко та ін. – Київ : КНУБА, 2019. – 512 с.

12. Теорія полімеризації та полімерної термічної обробки: колективна монографія / за ред. А.П. Литвиненка. – Одеса : ОНУ, 2016. – 398 с.

13. Mazumdar S.K. Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering. – 2nd ed. – Boca Raton, FL : CRC Press, 2018. – 456 p.

14. Vasiliev V., Morozov E. Mechanics and Analysis of Composite Materials. – Amsterdam : Elsevier, 2018. – 512 p.

15. Розробка технології та дослідження параметрів формування виробів з епоксинаповнених композитів : дис. ... канд. техн. наук. – Харків : ХНУРЕ, 2020. – 180 с.

16. Розробка захисних покриттів з підвищеною зносостійкістю на основі епоксидних композитів : дис. ... канд. техн. наук. – Львів : ЛНТУ, 2019. – 210 с.

17. Власюк С.М., Кузьменко В.В. Процеси та обладнання для отримання полімерних композицій : навч. посібник. – Львів : ЛНУ, 2021. – 280 с.

18. Левченко В.П., Гавриленко І.М. Охорона праці на підприємствах хімічної та полімерної промисловості : навч. посібник. – Київ : КНУ, 2020. – 245 с.

19. Дяченко О.П. Безпека праці при виробництві полімерних матеріалів : монографія. – Харків : ХНУ, 2019. – 198 с.

20. ГОСТ 12.0.004-2015. Система стандартів безпеки праці. Общие требования к охране труда. – Москва : Стандарт, 2015.

21. Патон В.Г. Безпека виробництва у хімічній промисловості : навч. посібник. – Київ : НТУУ “КПІ”, 2018. – 300 с.

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

22. Бондаренко А.С. Охорона праці в хімічних виробництвах: посібник для студентів – Львів : ЛНТУ, 2021. – 210 с.

					БР 2926.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		