

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Митної справи, матеріалів та технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра Матеріалознавства

(повна найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»
СТРУКТУРУВАННЯ ЕПОКСИПОЛІМЕРІВ ПІД ДІЄЮ
ВПЛИВУ СТУПІНЧАСТОГО НАГРІВАННЯ /
STRUCTURE OF EPOXYPOLYMERS UNDER THE
INFLUENCE OF STEP-BY-STEP HEATING

спеціальність 132 «Матеріалознавство»

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Матеріалознавство»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти

групи ММ-21

**Рихва Володимир
Федорович**

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Боярська Інна Володимирівна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«___» _____ 20__ р.

к.т.н., доцент

Гарант освітньої програми:

Мельничук Микола Дмитрович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Імбирович Н.Ю.

“___” _____ 20__ року

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

Рихва Володимир Федорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Структурування епоксиполімерів під дією впливу ступінчастого нагрівання*

керівник роботи *Боярська Інна Володимирівна, к.т.н., доцент*,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “05” 06 2025 року №02 282/01-

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «___» _____ 202_ р.

3. Вихідні дані до роботи *склад матеріалу, технологія формування, термічна обробка, технічні умови, стандарти*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *вступ; огляд технічної літератури, методика досліджень та характеристика вихідних матеріалів, дослідження впливу зовнішніх полівна процес структурування та властивості епоксиполімерів, технологічні режими формування епоксиполімерів, висновки*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) *1 слайд – формулювання мети; 2, 3 слайди – методика експериментальних досліджень; 4, 5 слайди – режими обробки; 6 слайд – залежність вмісту гель-фракції епоксиполімеру від режимів обробки; 7 слайд – залежність внутрішніх напружень епоксиполімеру від режимів обробки; 8 слайд – залежність вмісту гель-фракції епоксиполімеру від режимів обробки; 9 слайд – залежність твердості епоксиполімеру від режимів обробки; 10 слайд – технологічний процес*

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Нормоконтроль</i>	<i>доцент кафедри матеріалознавства к.т.н. Мисковець С.В.</i>		

7. Дата видачі завдання « 02 » 09 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	<i>Вступ. Літературний огляд.</i>	<i>20.10.2025</i>	
2.	<i>Планування та виконання експерименту.</i>	<i>15.11.2025</i>	
3.	<i>Опис та аналіз результатів експерименту, розробка рекомендацій та висновків</i>	<i>06.12.2025</i>	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Рихва В.Ф.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Боярська І.В.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Рихва В.Ф. Структурування епоксиполімерів під дією впливу ступінчастого нагрівання. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Робота складається з текстової та графічної частин.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

Пояснювальна записка складається з 52 сторінок і містить такі розділи: огляд технічної літератури, методика досліджень та характеристика вихідних матеріалів, дослідження впливу зовнішніх полів на процес структурування та властивості епоксиполімерів, технологічні режими формування епоксиполімерів.

Також пояснювальна записка містить 4 таблиці, 14 рисунків, 17 літературних джерела та додаток.

Графічна частина складається з 10 аркушів формату А4, які розміщені в додатку А.

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

					MP 1425.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Рихва				Структурування епоксиполімерів під дією впливу ступінчастого нагрівання	Літ.	Арк.	Аркуші
Перевірів	Боярська						3	52
Н. контр.	Мисковець					ЛНТУ		
Затверд.	Імбідович					каф. матеріалознавства, гр. Мм - 21		

ANNOTATION

Rykhva V.F. Structure of epoxy polymers under the influence of step-by-step heating. Manuscript.

Master's qualification work OP "Materials Science" specialty 132 materials science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The work consists of textual and graphic parts.

The master's qualification work consists of an introduction, four sections, conclusions, list of used sources, appendices.

The explanatory note consists of 52 pages and contains the following sections: a review of technical literature, research methodology and characterization of starting materials, research into the influence of external fields on the structuring process and properties of epoxy polymers, technological modes of forming epoxy polymers.

Also, the explanatory note contains 4 tables, 14 figures, 17 literary sources and an appendix.

The graphic part consists of 10 sheets of A4 format, which are placed in the appendix A.

Key words: epoxy polymer, epoxy composite, structuring, heat treatment, step heat treatment.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	7
1.1. Поняття про епоксидні полімери як в'язучі композиційних матеріалів.....	7
1.2. Особливості отримання композитів на основі епоксидних полімерів.....	10
1.3. Сучасні методи формування епоксиолімерів.....	13
1.4. Висновки та постановка задач досліджень.....	20
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ	21
2.1. Характеристика вибраних матеріалів.....	21
2.2. Методи дослідження властивостей та структурування розроблених епоксиолімерних систем	22
2.3. Методи формування епоксиолімерів	25
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ПОЛІВ НА ПРОЦЕС СТРУКТУРУВАННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИПОЛІМЕРІВ.....	27
3.1. Вплив ступінчастого нагрівання на структурування епоксиолімерів.....	27
РОЗДІЛ 4 ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕЖИМИ ФОРМУВАННЯ ЕПОКСИПОЛІМЕРІВ.....	41
4.1. Особливості технології формування епоксиолімерних покриттів.....	41
4.2. Технологічний процес формування захисних епоксиолімерних покриттів.....	47
ВИСНОВКИ.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51
ДОДАТКИ	

					MP 01425.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Правильно підібраний режим тверднення композицій дає змогу отримати матеріал із оптимальними фізичними та механічними характеристиками. Обґрунтований тепловий вплив у процесі формування виробів або після нього сприяє інтенсифікації релаксаційних процесів завдяки зміні ступеня зшивання полімеру, що, у свою чергу, веде до покращення його механічних властивостей.

Найкращих структурно-механічних параметрів полімерна матриця досягає при використанні ступінчастого режиму тверднення. Епоксидні полімери, отримані за таким режимом, формують розвинену тривимірну сітчасту структуру, що забезпечує їм підвищену термоокиснювальну стійкість, термостійкість та ударну в'язкість. Повільне або поступове охолодження затверділих полімерів дає можливість суттєво знизити залишкові напруження завдяки їх релаксації та перегрупуванню надмолекулярних утворень. У разі збільшення швидкості охолодження залишкові напруження, навпаки, зростають, оскільки уповільнюються релаксаційні процеси, що відповідають за перерозподіл напружень.

Отже, покращення експлуатаційних характеристик базового епоксидного полімеру можливе за рахунок застосування ступінчастого температурно-часового режиму термічної обробки епоксикомпозитних систем.

Метою цієї роботи є створення нових захисних покриттів на основі епоксидних матеріалів із підвищеними фізико-механічними властивостями.

Під час виконання кваліфікаційної роботи магістра було використано інструменти штучного інтелекту для редагування та форматування тексту виключно як допоміжний засіб для пошуку ідей, уточнення формулювань та опрацювання літератури. Усі твердження, висновки та результати дослідження належать автору та ґрунтуються на власному аналізі, а отримані результати від генеративного ШІ були перевірені на достовірність та відповідність академічній доброчесності.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Поняття про епоксидні полімери як в'язучі композиційних матеріалів

До властивостей композиційних матеріалів ставлять надзвичайно різноманітні вимоги, оскільки умови експлуатації стають дедалі більш жорсткіші й складніші. У більшості випадків матеріали повинні забезпечувати такі властивості: високу міцність, жорсткість, корозійну стійкість, зносостійкість, антифрикційні або фрикційні властивості, низьку питому вагу, довговічність, термостійкість, теплопровідність, декоративний вигляд та ін. Використовуючи традиційні матеріали дуже важко задовольнити достатньою мірою вказані вище вимоги. Отримати комплекс необхідних властивостей можна зібравши в одне ціле кращі ознаки різних складових, тобто створивши композит.

Епоксидними смолами називають синтетичні хімічні сполуки, молекули яких містять більше однієї епоксигрупи. Під епоксидною розуміють групу, яка складається з двох атомів вуглецю і атома кисню, хоча часто на місці вуглецю знаходяться органічні сполуки. Епоксидні групи можуть бути розміщені на кінцях, в середині ланцюга або в середині кільця. Тому епоксидними смолами можна називати лінійні багатоатомні спирти з епоксидними групами на кінцях молекул. Окремі ділянки молекул смоли легко вступають у взаємодію із сполуками, які мають реакційно здатні молекули водню. При цьому відбувається зшивання молекул олігомеру і утворення сітчастої просторової структури. Укрупнення молекул і переведення смоли у термореактивний стан здійснюється за допомогою твердника. Епоксидно-діанові смоли можуть тверднути як при нагріві, так і при кімнатній температурі. Для тверднення без нагріву використовують аліфатичні поліаміни лінійної або розгалуженої будови (поліетиленполіамін, диетилентриамін) в кількості 7...25 мас. ч. на 100 мас. ч. олігомеру. При кімнатній температурі тверднення закінчується через

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

24...36 годин. Ароматичні діаміни затверджують епоксидні смоли при температурі 80...150 °С. Вони забезпечують більш високу теплопровідність. Поряд із здатністю тверднути епоксидні смоли можуть суміщуватись з іншими смолами та модифікуватись деякими смолами. В результаті цього отримують нові продукти, які володіють заданими властивостями.

Для якісного формування композицій на основі епоксидних смол необхідно знати як молекулярну структуру смол, так і фізичні та хімічні властивості смол. Важливими характеристиками смол, є в'язкість та епоксидний еквівалент. Другорядне значення мають такі властивості як температура розм'якшення, гідроксильний еквівалент, йодне число, молекулярна маса і молекулярно-масове розподілення, колір, густина, показник заломлення, вміст хлору, і такі специфічні властивості, як запах і час знепінення у високому вакуумі.

Властивості затверділих епоксидно-діанових смол залежать від особливостей їх сітчастої структури, яка визначається молекулярною масою (M_c) олігомеру і властивостями твердника. Значення M_c затверділих епоксидно-діанових смол може складати 400...2000. Із збільшенням M_c росте ударна в'язкість і деформаційні характеристики. Збільшується швидкість релаксації, дещо знижується теплостійкість. В залежності від молекулярної маси епоксидні смоли можуть перебувати в рідкому або твердому станах. Із збільшенням M_c в'язкість епоксидних смол зростає, а реакційна здатність спадає, тому смоли з молекулярною масою більше 900 тверднуть, як правило, при підвищених температурах.

Порівняно з іншими смолами епоксидні мають ряд переваг, завдяки чому отримали широке застосування в різних галузях народного господарства і в побуті.

Зокрема, композиції на основі епоксидних смол володіють достатньою рідкотекучістю на стадії переробки, що є важливою умовою для рівномірного і швидкого заповнення форм, зазорів, щілин, пор та капілярів. Вільним заливанням композицій можна отримати будь-які конфігурації. Рідкі епоксидні

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

смоли у поєднанні з рідкими твердниками утворюють системи, які легко піддаються модифікуванню та введенню наповнювачів.

При твердненні епоксидні композиції дають незначну усадку, що знижує внутрішні напруження і забезпечує герметичність виробів. Вони з великою точністю відтворюють форму виробів і не потребують наступної механічної обробки поверхні. Це скорочує терміни виготовлення і знижує трудоміскість робіт.

Епоксидні смоли володіють порівняно високими механічними властивостями. Міцність відповідним чином підібраних композицій перевищує міцність всіх інших ливарних смол. Висока міцність пояснюється малою усадкою, що зумовлює незначний ріст внутрішніх напружень, які в іншому випадку різко понизили границю міцності. Для епоксидних смол характерні високі електроізоляційні властивості. Вони є чудовими діелектриками.

Хімічна стійкість смоли може змінюватись в залежності від твердника. Але в загальному випадку затверділі епоксидні смоли володіють винятковою стійкістю до дії лугів та задовільною – до дії кислот.

Вище перераховані властивості можна легко регулювати шляхом підбору твердника і введенням модифікаторів та наповнювачів, що забезпечує універсальність епоксидних композицій.

Найбільш характерні області застосування епоксидних смол:

- як клеї для виготовлення деталей комірчастої структури в літакобудуванні, у виробництві малярних щіток і для покриттів по бетону;
- для склеювання окремих деталей і як герметики при ремонті пластмасових і металевих човнів, автомобілів тощо;
- як ливарні суміші для виготовлення малих серій виливків і експериментальних виливків, штампів, шаблонів та інструментів;
- як ущільнюючі маси в будівництві будинків і шосейних доріг, а також в тих випадках коли необхідна висока хімічна стійкість;

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– як ливарні та герметичні суміші, а також для просочення в електротехнічній та електронній промисловості;

– як шаруваті пластики, які використовують для виготовлення корпусів літаків та літальних апаратів.

Епоксидні смоли використовують в якості добавок у виробництві ряду інших пластмас, наприклад вінілових і акрилових, натуральних і синтетичних каучуків.

Покриття з епоксидних смол використовують в якості захисних і оздоблюваних: для оздоблення суден і цеглової кладки, покриттів по сталі, покриттів цистерн, літаків, ґрунтових покриттів, в інструментальній та автомобільній промисловості, футировки консервної тари, оздоблювання мебелі і в якості покриттів трубчатих конструкцій. Вони використовуються також в якості фарб для бетонної підлоги і для оздоблювання гімнастичних залів, лаків для підлоги.

Епоксидні олігомери знаходять використання також в якості декоративних покриттів, у виробництві друкарських фарб, в зубопротезній та протезній промисловості, в хірургії, в нафтопереробній промисловості та для виготовлення пінопластів [1, 2].

1.2. Особливості отримання композитів на основі епоксидних полімерів

При створенні композиційних матеріалів потрібно вирішувати ряд складних завдань, пов'язаних із вибором типу наповнювача, ступеня наповнення й диспергування, режиму полімеризації наповненої композиції тощо.

Технологічний процес виготовлення виробів на полімерній основі із використанням різнофункціональних інгредієнтів побудований на виконанні наступних операцій:

а) підбір та підготовка вихідних матеріалів (в'язучих, модифікаторів, наповнювачів).

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

б) приготування формувальної суміші (дозування, змішування).

в) формування виробів (пресування, заливка у форми, лиття під тиском та ін.).

в) термічна і механічна обробка, що відбувається за певними стадіями.

Технологія термічної обробки епоксиполімерів є важливим етапом покращення їх експлуатаційних властивостей і суттєво впливає на такі характеристики, як міцність, термо- та теплостійкість, зносо- та корозійну стійкість. Основні фактори, що впливають на дані характеристики:

- швидкість нагріву композиції при формуванні;
- час витримки при температурі нагріву;
- температура нагріву;

Швидкість нагріву регулює особливості структуроутворюючих процесів на первинній стадії зшивання полімерної сітки, однорідність розташування інгредієнтів в системі, також характер і величину виникнення напружень в процесі формування. Найбільш прийнятною для епоксикомпозитних матеріалів з експериментів є швидкість нагріву 5 °С за одну хвилину. Температура полімеризації залежить від наступних чинників:

– Природи використання полімерних складових (менше температури термодеструкції на 5...15 %). Також необхідно враховувати функції твердника: чи він низькотемпературний, чи високотемпературний. Проте використання низькотемпературного твердника вказує його особливості, але не обмежує його можливості, про що доводять експериментальні дослідження. При підвищенні температури полімеризації відбувається додаткове зшивання структурної сітки в'язучого й зменшення вмісту гель-фракцій від 10...15 до 2...8% (гель-фракції – це непрореаговані фрагменти мономерів та інших складників у композиції через недостатню рухливість молекулярних складових при полімеризації неоднорідних консистенцій, седиментаційні явища, інші внутрішні переходи).

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– технологія отримання (наприклад, полімеризація у відкритому або замкненому просторі, можливість або відсутність подальшої механічної обробки, допустимий рівень залишкових внутрішніх напружень та ін.);

– тип і природа композиту (низько- та високонаповнений, пористий або з мінімальним об'ємом пор);

– особливостей поєднання та сумісностей в системі полімер-наповнювач [2].

Час витримки при температурі полімеризації залежить від таких основних чинників:

– товщина й геометрія заготовки та характер розвинутості її поверхні;

– температура нагріву (із збільшенням температури нагріву час витримки переважно зменшують);

– умови експлуатації майбутньої заготовки (із зростанням жорсткості умов час витримки також переважно зростає);

– співвідношення між енергетичними затратами та приростом функціональних показників [3].

Умови охолодження найбільш суттєво впливають на довговічність та міцність епоксиполімерів. Оптимальна швидкість охолодження дозволяє знайти найкраще співвідношення між величиною залишкових напружень та когезійною міцністю матеріалу, що насамперед залежить від виду утворення хімічних зв'язків, дефектів структури, пористості, домішок в композиті. В переважній більшості для епоксидних композитів, що сформовані методом лиття – це охолодження на спокійному повітрі, для високонаповнених та середньонаповнених прескомпозитів найбільш характерним є охолодження разом з піччю.

Умови охолодження в переважній більшості залежать від наступних чинників:

– природи вибраного в'язучого і наповнювачів;

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- особливостей сумісності (термодинамічної, кінетичної, механічної) інгредієнтів (чим менш сумісні, тим м'якший режим);
- режимів нагріву (полімеризації) і витримки при температурі (чим жорсткіші попередні режими, тим бажаніший м'якший режим охолодження для зменшення появи напруг на попередніх етапах термічної обробки);
- структури композитів (низко-, середньо-, чи високонаповнений. Із збільшенням степеня наповнення швидкість охолодження зростає).
- технологія формування композиту (при застосуванні операцій пресування швидкість охолодження вибирається меншою, ніж при литті під тиском тощо) [4].

1.3. Сучасні методи формування епоксиполімерів

До числа найважливіших типів печей і нагрівників належать печі опору, індукційні і дугові. Полімерні композиційні матеріали найчастіше виготовляють у печах опору.

Конструкція печей опору дає змогу регулювати робочу температуру в дуже вузьких межах. Найважливішим елементом печі є матеріал, з якого виготовляють нагрівні елементи, що визначають максимальну робочу температуру.

Останнім часом замість електричних печей опору застосовують так звані аеродинамічні печі.

Ці печі вперше з'явилися на одному з підприємств Дніпропетровська, коли пірометр, після закінчення робочої зміни, вимкнувши електронагрівники, не вимкнув вентилятор.

Коли вранці відчинили піч, то з'ясувалося, що теплозахисне покриття, залишене там для тверднення, не тільки заполімеризувалось, а навіть частково обвуглилось. Спочатку вирішили, що вийшли з ладу терморегулятор і ще щось.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

А розгадка цього явища була у внутрішньому терті в газі, що підлягає закону Ньютона:

$$K = t = -m \frac{dv}{dz},$$

де K – питомий потік кількості руху, що дорівнює дотичній напрузі t у газі у разі вимушеного руху;

m – коефіцієнт внутрішнього тепла;

$\frac{dv}{dz}$ – градієнт швидкості вздовж координати z .

З молекулярної фізики відомо, що

$$m = \frac{1}{3} mn \overline{u^2},$$

де m – маса молекули;

n – число молекул в одиниці об'єму;

$\overline{u^2}$ – середня квадратична швидкість молекули.

Відомо, що в разі тертя у газі кінетична енергія рухомого тіла перетворюється на теплову енергію газу. Ось і вся розгадка того, що сталося, і принцип роботи аеродинамічних печей.

Потрібно ще раз нагадати, що тут не потрібні жодні натрівні елементи, потрібен лише вентилятор.

В останні роки вся ракетно-космічна галузь перейшла на аеродинамічні печі (рис. 1.1), максимальна температура в яких становить 873–973 К, тобто це та температура, яку витримує матеріал лопаті вентилятора.

Крім того, аеродинамічні печі в два-три рази менше споживають енергії, вони дуже прості і зручні. Нині розроблено понад 20 типів таких печей, їх можна використовувати на будь-якому підприємстві, у сільському господарстві, для опалення приміщень тощо.

Дуже зручні ці печі при твердненні полімерних матеріалів виробів різних розмірів (до 10 м завдовжки і 3,5 м діаметром).

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Якщо вироби формують у механічних прес-формах під пресом, то можна застосовувати індукційний метод нагрівання або нагрівання за допомогою термоелектричних нагрівників.

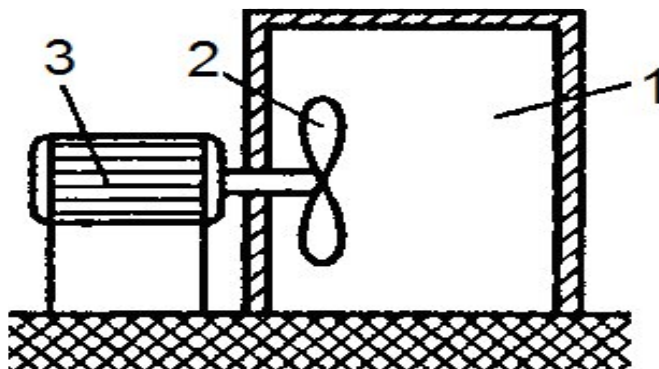


Рисунок 1.1 – Схема аеродинамічної печі:

1 – замкнений об'єм з теплоізоляцією;

2 – лопать вентилятора;

3 – електродвигун.

Індукційна піч, або нагрівник, якщо це прес-форма, – це трансформатор, первинною обмоткою якого є індуктор, а вторинною – виріб, що нагрівається, або прес-форма. Зрозуміло, виріб, що нагрівається, має бути провідним за заданої частоти. Для нагрівання металевих виробів і графіту зазвичай застосовують низькочастотні машинні генератори або перетворювачі частоти (теристори), для діелектриків – дуже високі частоти, які у виробництві полімерів майже не застосовують, оскільки в процесі полімеризації чи поліконденсації смол змінюється електричний опір.

Великі металеві прес-форми нагрівають за допомогою індукторів, які працюють на промисловій частоті (50 Гц).

Індуктори у вигляді соленоїда зазвичай виготовляють з мідних охолоджуваних водою труб діаметром 10 - 20 мм за місцем призначення, нагрівники омичного опору ТЕНи промисловість постачає у вигляді спіралей, вміщених у металеві труби і відокремлених від стінок фарфоровими ізоляторами.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У разі індукційного нагрівання пластиків або інших непровідних матеріалів застосовують товстостінні металеві чи графітові нагрівники, температуру яких забезпечують вихрові струми і передають теплоту в простір, де знаходяться деталі, що нагріваються.

Нині у багатьох галузях промисловості успішно застосовують ІЧ-нагрівання, для чого використовують генератори теплового (температурного) випромінювання.

У разі ІЧ-нагрівання до різних випромінювачів можна висунути загальні вимоги і намітити їхні технічні показники. Генератори ІЧ-випромінювання мають задовольняти таким основним вимогам:

- забезпечувати стабільний розподіл інтенсивності випромінювання і максимально можливу рівномірність опромінення оброблюваного матеріалу;
- мати мінімальну теплову інерцію, від якої залежить тривалість приведення випромінювача в робочий стан;
- мати високий енергетичний ККД і щонайбільшу тривалість терміну експлуатації.

Внаслідок простоти, доступності, відносно невисокої вартості генераторів енергії ІЧ-нагрівання знайшло широке застосування в технологічних процесах як перспективний спосіб прискореного тверднення полімерних матеріалів. ІЧ-нагрівання використовують на різних стадіях виготовлення виробів. Під час намотування попередньо просоченим матеріалом нагрівання потрібне для розм'якшення зв'язника, а потім, після закінчення намотування, для його тверднення. У разі намотування “мокрим” методом потрібне нагрівання зв'язника в просочувальній ванні для зменшення його в'язкості, і тим самим – покращення якості просочення і швидкості змочування. ІЧ-нагрівання застосовують і під час пошарово-послідовного формування конструкцій. Оскільки швидкість намотування зазвичай намагаються зробити достатньо високою, нагрівник, з одного боку, має забезпечувати максимально швидке

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нагрівання поверхневого шару, з іншого – максимум його випромінювання має припадати на ту частину спектра, яка краще поглинається матеріалом.

Механізм впливу ІЧ-опромінення на полімерні композиційні матеріали можна подати так. У разі ІЧ-випромінювання процеси прогрівання й тверднення суміщуються, внаслідок чого різко скорочується час формоутворення виробів. За конвективного підведення теплоти процеси нагрівання й тверднення розвиваються послідовно один за одним. Оскільки теплопровідність композита низька, він нагрівається від поверхні до центра заготовки. Градієнт температур, що виникає по перерізу заготовки, поступово зменшується, подовжуючи як час наскрізного прогрівання, так і тривалість процесу тверднення. ІЧ-нагрівання інтенсифікує процес тверднення внаслідок впливу квантів енергії $h\nu$ на розвиток хімічних реакцій між макромолекулами, тобто виникають фотохімічні процеси взаємодії.

Якщо цей механізм має місце, можна чекати, що зміна величини $h\nu$ в разі ІЧ-нагрівання впливатиме на процес тверднення.

Виявлені явища дають змогу запропонувати нову енергозберігаючу технологію створення композицій з ПКМ.

У разі заміни термореактивних зв'язників на термопластичні типу поліетиленової плівки така технологія дасть змогу усунути операцію просочення наповнювача, запобігти виділенню летких речовин під час нагрівання, одержати високі міцність і герметичність, а також вирішити проблему використання вторинної полімерної сировини.

Слабкомагнітні речовини, до яких належать полімери, вивчені недостатньо глибоко, однак є низка загальних положень магнетохімії полімерів, що полегшують розуміння процесів взаємодії елементів структури з магнітним полем:

– для полімерів характерна анізотропія магнітної сприйнятливості вздовж і впоперек макромолекул з максимумом у напрямку поздовжньої осі;

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк. 17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– підвищення ступеня упорядкованості полімерів у магнітному полі забезпечує зближення реакційноздатних груп в олігомерах;

– у разі зближення макромолекул між ними утворюються додаткові зшивки.

Отже, раціонально підібрані режими термомагнітної обробки полімерних композиційних матеріалів дають змогу підвищити міцнісні показники до 20...25 %.

Застосування тверднення в магнітному полі можна використовувати в разі виготовлення елементів конструкцій у машинобудуванні, суднобудуванні, хімічній промисловості (корпуси, посудини високого тиску, труби тощо).

Радіаційний метод вважають одним з найшвидших методів тверднення полімерних матеріалів: час тверднення найменш реакційноздатних зв'язників вимірюється секундами.

Для перебігу радіаційної полімеризації (поліконденсації) термоактивних епоксидних і феноло-формальдегідних смол потрібні дози відповідно 0,6...0,9 і 1,4...1,8 мГр, але за цих доз процес тверднення не відбувається цілком. Підвищення доз опромінення до 2...8 мГр забезпечує високий ступінь тверднення, однак погіршує чимало фізико-механічних показників полімерів. На характер радіаційного тверднення композитів значно впливає наповнювач. Сполуки, що містяться у волокнах, а також у замаслювачах і апретах (зокрема, оксиди бору), здатні поглинати більші дози опромінення (1,5...3 мГр), через що зростають дози, потрібні для тверднення композита порівняно з твердненням зв'язників. Застосування вищих доз опромінення може викликати деструкцію, що спричинює погіршення властивостей матеріалу. З метою зниження рівня доз застосовують стабілізуючі добавки, однак при цьому погіршують фізико-механічні показники отвердненого полімеру.

Оптимальне поєднання способів і параметрів радіаційної обробки забезпечує одержання вищих і стабільніших характеристик матеріалу і виробу.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Істотним є також та обставина, що міцнісні показники твердого матеріалу зберігають стабільність за значних коливань технологічних параметрів (доза поглиненої енергії, натягу нитки наповнювача). Це сприяє автоматизації процесу формування у разі поєднання його з твердненням під локальним впливом пучка електронів.

Тверднення із застосуванням надвисоких частот широко досліджували в лісопереробній галузі для пристосування його до просушування деревини. Під час високочастотного нагрівання відбувається одночасне і рівномірне підвищення температури по всьому перерізу однорідного матеріалу. Крім того, нагрівання припиняється одночасно з вимиканням напруги на конденсаторі. На відміну від звичайного нагрівання, незалежно від стану навколишнього середовища легко регулюється температура матеріалу. Це має місце для частот від середньохвильового до метрового діапазону за рівномірного розподілу в матеріалі, що нагрівається, електричного поля. Особливістю високочастотного методу нагрівання, що принципово відрізняє його від інших методів, є виділення теплової енергії в самій масі матеріалу, що нагрівається. Залежно від електричних властивостей матеріалу використовують два способи високочастотного нагрівання: індукційне нагрівання провідних матеріалів у магнітному полі і нагрівання непровідних матеріалів в електричному полі.

У разі виготовлення виробів з термореактивних композиційних матеріалів використовують їхню властивість розм'якшуватися з підвищенням температури, а після досягнення певної температури синтезуватися, тобто переходити в незворотний стійкий стан.

Спираючись на швидкісний характер процесу високочастотного нагрівання, легко можна організувати потоковий метод нагрівання, тобто застосувати прогресивну технологію. Вдосконалення процесу нагрівання сприяє створенню вищої культури виробництва [5].

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4. Висновки та постановка задач досліджень

На основі проведеного літературного огляду, аналізу існуючих наукових даних в цій галузі знань слідують наступні висновки:

– перспективність використання епоксиполімерних в'язучих в різних галузях техніки;

– з метою збільшення пластичності, деформаційної стійкості, міцності використовують модифікатори, що зміцнюють композиційний матеріал, надають йому необхідні механічні властивості;

– з метою покращення експлуатаційних характеристик епоксиполімерів застосовується термічна обробка;

– перспективність використання аеродинамічних печей для тверднення епоксиполімерів;

З метою отримання нових захисних покриттів на основі епоксидних матеріалів з високими фізико-механічними характеристиками необхідно вирішити такі задачі:

– дослідити вплив інтенсивності та напрямку повітряного потоку в аеродинамічній печі на механічні характеристики та ступінь структурування епоксиполімеру;

– дослідити вплив температури в аеродинамічній печі на властивості епоксиполімеру;

– розробити ступінчатий режим формування епоксиполімеру.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2
МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ
МАТЕРІАЛІВ

2.1. Характеристика вибраних матеріалів

Як вихідну сировину застосовано епоксидно-діанову смолу марки ЕД-20 (ДСТУ 209392), яка являє собою прозору рідину підвищеної в'язкості. Вміст епоксидних груп у ній становить 20,0...22,5%, а кількість летких компонентів – 0,2...0,8 %. Смола цього типу вирізняється хорошими технологічними властивостями, що дає змогу використовувати її для отримання широкого спектра матеріалів, призначених для виготовлення покриттів, клеїв, мастик, компаундів, герметиків та інших продуктів [1, 6–8].

ЕД-20 здатна тверднути як за нормальних умов, так і при підвищеній температурі без прикладання зовнішнього тиску, що робить можливим її переробку без застосування пресового та спеціального термічного обладнання. Відсутність виділення побічних продуктів під час тверднення забезпечує низьку пористість та високу щільність сформованих матеріалів. Основні фізико-хімічні характеристики незатвердженої смоли наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Фізико-хімічні 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 використовували поліетиленполіамін (ПЕПА) за ТУ 6-02-594-70. Цей твердник призначений для структурування епоксидних смол за кімнатної або зниженої температури та характеризується стабільною роботою в умовах підвищеної вологості. Зовні ПЕПА являє собою рідину від світло-жовтого до темно-бурого відтінку, без видимих механічних домішок. Масова частка загального азоту в ньому становить не менше ніж 30 %.

2.2. Методи дослідження властивостей та структурування розроблених епоксиполімерних систем

Для встановлення оптимального режиму формування епоксиполімеру вибрано методики досліджень фізико-механічних характеристик та ступеня структурування.

Зразки для досліджень зображено на рисунку 2.1.

Дослідження твердості матеріалу за методом ДСТУ EN ISO 65061:2019 [9]. Дослідження проводили на зразках у формі бруска з гладкою поверхнею товщиною не менше 5 мм і шириною не менше 15 мм. При дослідженні стальну кульку діаметром 10 мм вдавлювали в поверхню досліджуваного матеріалу з навантаженням 2,5 кН протягом 60 с. Розрахунок твердості матеріалу проводили за формулою:

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

де P – зусилля, прикладене до кульки, Н;

d – діаметр кульки, мм;

h – глибина відбитку кульки, мм.

Внутрішні напруження визначали консольним методом [10, 11] відповідно до вимог ДСТУ 13036-67. Метод базується на вимірюванні зміщення від

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк. 22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

початкового положення вільного кінця консольно закріпленої пружної металевої пластини. Вигин пластини відбувається під дією внутрішніх напружень, що формуються в покриттях (рис. 2.2).

Внутрішні напруження розраховували за формулою:

$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{DhEt^3}{3l^2(t + Dt)D}$$

де Δh – відхилення вільного кінця консолі, мм;

E – модуль пружності підложки, МПа;

t – товщина підложки, мм;

l – довжина плівки, мм;

Δt – товщина плівки, мм.

Покриття наносили на пластинку-основу з пружної сталі з відомими фізико-механічними характеристиками. Розміри пластинки складала 80×15 мм, товщина – $0,25 \dots 0,3$ мм. Товщину висушеного покриття Δt визначали як середнє арифметичне трьох вимірювань, виконаних уздовж довжини консолі.

Методи визначення ступеня структурування. Ступінь тверднення матеріалів і покриттів визначали за вмістом гель- та золь-фракцій. Метод ґрунтується на здатності частини матеріалу (плівки), що не включена до полімерної сітки, вимиватися органічним розчинником у апараті Сокслета, який працював в автоматичному режимі [10, 12].

Екстракцію зразків у формі пластин розміром 20×30 мм і товщиною до 0,5 мм проводили в ацетоні протягом 8 год із подальшим сушінням при температурі 393 К до постійної маси. Маса зразків до та після екстракції визначали на аналітичних лабораторних вагах із точністю до 0,0001 г.

Вміст золь-фракції та гель-фракції в плівці наповненої дисперсними частинками визначали за формулою:

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк. 23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Z = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\%,$$

$$G = 100 - (M_1 - M_2) \times 100\% / M_0,$$

де M_1, M_2 – маса патрона з наважкою плівки до і після екстракції;
 M_0 – вміст плівкоутворюючої речовини в наважці плівки.

2.3. Методи формування епоксиполімерів

Формування дослідних зразків полягало в отриманні однорідної композиції, до складу якої входили необхідні компоненти. Залежно від об'єму зразків розраховували кількісний вміст інгредієнтів у масових частинах на 100 мас. ч. епоксидної смоли ЕД-20. На кожному етапі проводили механічне перемішування композиції для забезпечення високої однорідності системи. При цьому використовували низьку частоту обертання лопастей, щоб запобігти нагріванню суміші та її насиченню повітрям.

Сформовану композицію наносили на підготовлену поверхню або заливали у спеціальні форми. Поверхню попередньо обробляли абразивом для досягнення необхідної шорсткості та знежирювали ацетоном. Твердження епоксикомпозитів при нормальних умовах тривало 24 год. Додаткову термічну обробку проводили у печі, відхилення температури в якій не перевищувало ± 2 К.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

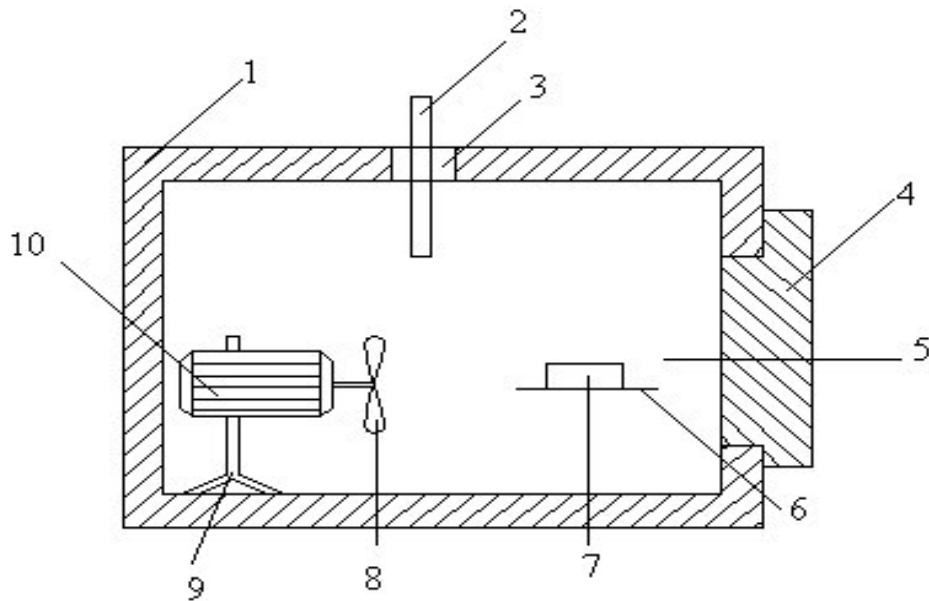


Рисунок 2.3 – Схема аеродинамічної печі:

1 – корпус печі; 2 – термопара; 3 – отвір для термопари; 4 – двері; 5 – робочий простір печі; 6 – поличка; 7 – зразок; 8 – гвинт вентилятора; 9 – штатив; 10 – електродвигун

Обробку проводили в аеродинамічній печі (рис. 2.3), яка являє собою сушильну шафу з установленим усередині вентилятором. Привід вентилятора – електричний; він має 8 лопастей діаметром 18 см, частота їх обертання становить 1600 об/хв. Вентилятор закріплений на штативі на висоті 19 см від поду, при цьому його вісь розташована вертикально. Зразки розміщували на поличці на висоті 17 см від поду.

Температура в аеродинамічній печі без увімкнених електронагрівників становить 20 °С. Швидкість нагрівання печі становить 20 хв при використанні електронагрівників та 8 хв – без них. Двигун вентилятора живиться від понижувального трансформатора з напругою 12 В.

РОЗДІЛ 3

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк. 25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ПОЛІВ НА ПРОЦЕС СТРУКТУРУВАННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИПОЛІТЕРІВ

3.1. Вплив ступінчастого нагрівання на структурування епоксиполімерів

З метою визначення оптимального режиму структурування епоксиполімерів методом термічного нагрівання було проведено дослідження впливу тривалості витримки, температури та швидкості нагрівання на їх фізико-механічні властивості.

На початковому етапі для структурування було обрано режими, за яких зразки нагрівали в електричній печі до температур 313 К, 343 К та 373 К протягом 20 хв. Експериментально встановлено, що нагрівання до 313 К є недостатнім, оскільки епоксиполімер не досягає повного ступеня тверднення.

Епоксиполімери, структуровані за температури 343 К, мають прозорий вигляд з незначною кількістю бульбашок на поверхні. Їх поява зумовлена потраплянням повітря під час механічного перемішування компонентів композиції. Через високу в'язкість системи частина бульбашок залишається всередині матеріалу. Під час нагрівання в'язкість зменшується, що сприяє підніманню бульбашок догори. Водночас триває процес структурування і композиція переходить у твердий стан, внаслідок чого частина бульбашок фіксується у полімерній матриці.

В процесі нагрівання за температури 373 К відбулося інтенсивне виділення летких речовин, що спричинило утворення бульбашок та відповідне видалення композиції за межі форми. Отже, інтенсивний тепловий вплив за температури 373 К призводить до спінення композиції (рис. 3.1).

Епоксиполімери, що піддавалися термічній обробці через одну годину після витримки за нормальних умов і нагріванні до температури 393 К, мають зовнішній вигляд, подібний до зразків, структурованих без попередньої витримки

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

за кімнатної температури. Однак інтенсивність спінення в цьому випадку була меншою.

Зразки епоксиполімеру, які перед нагріванням до 393 К перебували на повітрі протягом двох годин, повністю затверділи та характеризуються задовільним зовнішнім виглядом без ознак спінення чи деформації форми (рис. 3.2).

Під час нагрівання до 313 К епоксиполімер залишався прозорим і не містив повітряних включень, що пов'язано з оптимальним рівнем в'язкості композиції. У зразках, структурованих за температур 343 К та 373 К, також не спостерігалось значного спінення, на відміну від матеріалів, які перед цим витримували в нормальних умовах. Це пояснюється тим, що на початкових стадіях полімеризації вже відбувається формування первинних хімічних зв'язків, що зменшує рухливість системи та забезпечує інтенсивний подальший розвиток просторової сітки полімеру.



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд зразка епоксиполімеру структурованого нагріванням до температури 373 К без витримки за кімнатної температури

					МП 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки температура 313 К є оптимальною на початкових стадіях структурування, доцільно дослідити вплив ступінчастого нагріванням (313 К + 343 К + 373 К) з витримкою протягом 20 хв на кожному етапі, а також без витримки та з витримкою протягом однієї години за температури 293 К.

Даний режим нагрівання сприяв фіксації у товщі зразка дрібних повітряних бульбашок. Епоксиполімерна композиція, що перед нагріванням витримувалась за температури 293 К, мала аналогічний вигляд порівняно з композицією, структурованою без попередньої витримки.



Рисунок 3.2 – Загальний вигляд зразка епоксиполімеру структурованого нагріванням до температури 373 К після попередньої витримки за кімнатної температури протягом 2 годин

Отже, слід зазначити, що епоксиполімерні матеріали демонструють високі механічні характеристики під час формування за ступінчастим режимом тверднення. Епоксидні полімери, структуровані за таким режимом, формують розвинену тривимірну сітчасту структуру, яка забезпечує підвищену

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

термоокиснювальну стійкість, термостійкість та ударну в'язкість. Ступінчасте нагрівання під час структурування сприяє релаксації залишкових напружень у системі внаслідок перегрупування надмолекулярних структур.

Зі збільшенням швидкості охолодження спостерігається інтенсивний ріст залишкових напружень, що пов'язано з гальмуванням релаксаційних процесів і недостатнім перерозподілом структурних елементів. Швидкість нагрівання, у свою чергу, впливає на особливості структурування на первинній стадії формування хімічних зв'язків, однорідність розташування компонентів у системі, а також на характер і величину напружень у матеріалі.

Важливим аспектом інтенсивного структурування епоксиполімерів за ступінчастим режимом є застосування стадії охолодження на початковому етапі формування сітчастої структури, що сприяє проходженню релаксаційних процесів. Як один із варіантів ступінчастого термічного нагрівання було запропоновано режим, представлений у таблиці 3.1.

Структурування за цим режимом ступінчастої термічної обробки (рис. 3.3) призвело до утворення структури з високим вмістом дрібних бульбашок повітря в об'ємі. Це зумовлено різким підвищенням температури композиції до 343 К після стадії охолодження, що викликало інтенсивне структурування полімерної матриці та фіксацію повітряних включень у матеріалі.

Натомість ступінчаста термічна обробка з додатковим нагріванням після охолодження до температури 393 К (табл. 3.1) дала можливість отримати епоксиполімери без помітних повітряних включень (рис. 3.4), що свідчить про більш оптимальний режим термічного нагрівання.

Таблиця 3.1 – Режим ступінчастої термічної обробки

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Стадія	Температура, К	Витримка, хв
1	нагрівання до 313	20
2	охолодження до 393	10
3	нагрівання до 343	20
4	нагрівання до 373	20

Оцінюючи внутрішні напруження для епоксиполімерів структурованих за температури 313 К без попередньої витримки за кімнатної температури не вдалося, через незавершеність процесів структурування. Нагрівання до температури 343 К забезпечило структурування системи без витримки композиції за нормальних умов. У випадку структурування системи за температури 373 К без витримки за нормальних умов відбувається зростання внутрішніх напружень у 2,7 рази, що пов'язано із формуванням локальних хімічних зв'язків.



Рисунок 3.3 – Загальний вигляд зразка епоксиполімеру структурованого за режимом таблиця 3.1

Таблиця 3.2 – Процес ступінчастої термічної обробки

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Стадія	Температура, К	Витримка, хв
1	нагрів до 313	20
2	охолодження до 393	10
3	нагрів до 313	20
4	нагрів до 343	20
5	нагрів до 373	20

Витримка епоксиполімеру протягом 1 години за кімнатної температури з подальшим нагріванням до 343 К спричинила зростання внутрішніх напружень порівняно зі структуруванням без попередньої витримки. Це зумовлено тим, що температура 313 К є недостатньо високою для активного ініціювання процесу структурування полімерної матриці. Відтак часткове формування хімічних зв'язків під час годинної витримки призводить до підвищення залишкових напружень у матеріалі.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

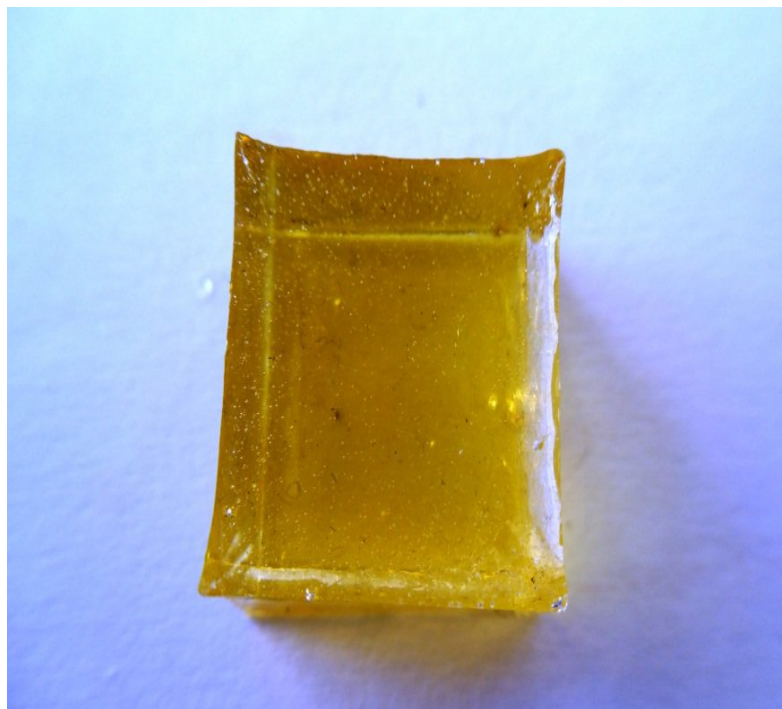


Рисунок 3.4 – Загальний вигляд зразка епоксиполімеру структурованого за режимом таблиця 3.2

Структурування епоксиполімерів за температури 343 К із попередньою витримкою протягом 1 години за нормальних умов спричиняє зростання внутрішніх напружень у 1,7 раза порівняно зі структуруванням без витримки, хоча процес тверднення відбувався за сприятливих умов. Це, ймовірно, зумовлено формуванням додаткових хімічних зв'язків у полімерній структурі протягом годинної витримки за кімнатної температури, що сприяло збільшенню швидкості релаксаційних процесів. Утворення нових зв'язків призводить до появи напружених об'ємів, оскільки частина з них формується ще до початку термічної обробки.

Структурування епоксиполімерів за температури 373 К – як без попередньої витримки, так і після витримки протягом 1 години за кімнатної температури – забезпечує матеріали з однаковою величиною внутрішніх напружень. Температура 373 К забезпечує високу швидкість реакції та інтенсивне утворення

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

хімічних вузлів, що значно перевищує кількість зв'язків, сформованих протягом годинної витримки у нормальних умовах.

Низький рівень внутрішніх напружень (рис. 3.5) характерний для епоксиполімерів, структурованих за температури 313 К після витримки протягом 1 години за нормальних умов ($\sigma_{вн} = 0,11$ МПа).

Епоксиполімери, структуровані за різних температур (313 К, 343 К та 373 К), мають найнижчі значення внутрішніх напружень після витримки протягом 2 годин за кімнатної температури. Це пояснюється тим, що процес формування структурної сітки розпочинається рівномірно вже на етапі попередньої витримки в усьому об'ємі матеріалу, а подальша термічна обробка забезпечує його інтенсивне протікання. У результаті апріорі формується значна кількість хімічних зв'язків, що підтверджено аналізом вмісту гель фракції.

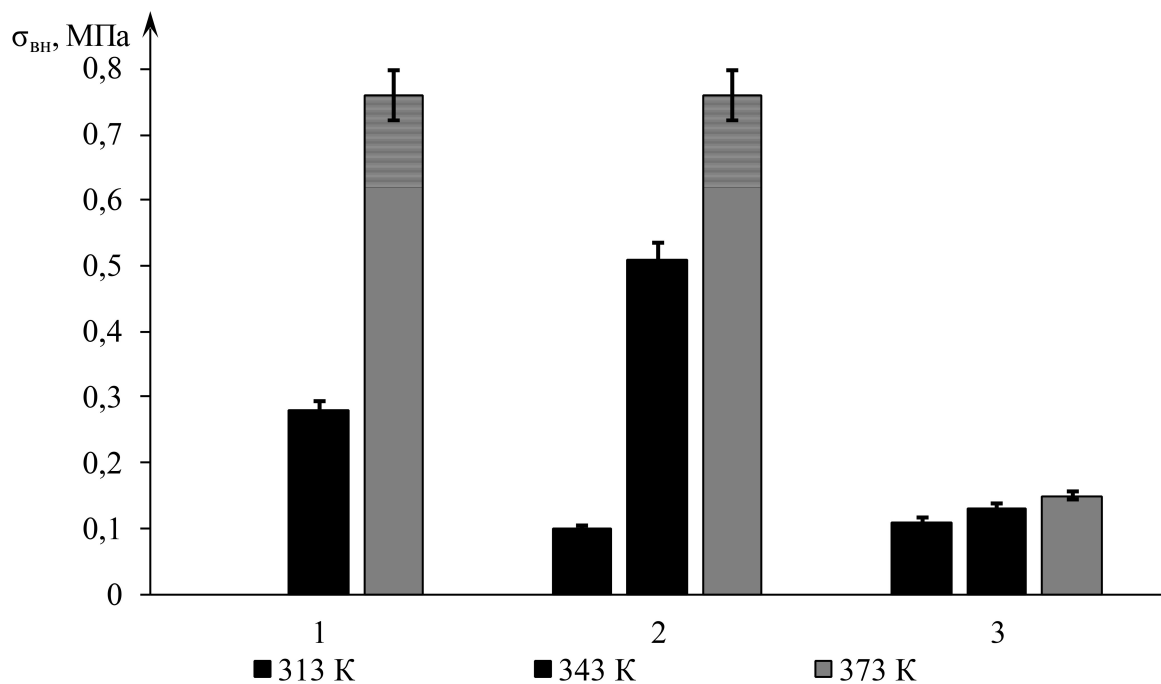


Рисунок 3.5 – Залежність внутрішніх напружень епоксиполімерів від режиму структурування з попередньою витримкою за температури 293 К: 1 – без витримки; 2 – 1 год; 3 – витримка 2 год

Встановлено, що збільшення вмісту гель-фракції (рис. 3.6) корелює зі зростанням тривалості витримки епоксиполімера за кімнатної температури.

Низькі значення гель-фракції після витримки обумовлені повільним перебігом процесів структурування за температури 313 К, однак зі збільшенням часу витримки (1...2 год) полімеризація частково відбувається вже за кімнатної температури.

Під час нагрівання до 343 К після попередньої годинної витримки вміст гель-фракції становить $G = 70,5 \%$, оскільки за даної температури інтенсивно формуються хімічні зв'язки. Для зразків, витриманих 1 та 2 години за кімнатної температури перед структуруванням за 343 К, значення гель-фракції становлять відповідно $G = 73,4 \%$ та $G = 86,7 \%$. Це пояснюється тим, що достатній час витримки забезпечує утворення первинних вузлів ще до початку термообробки, а під час нагрівання за 343 К процес полімеризації значно прискорюється, що сприяє розвитку структури.

Структурування за температури 373 К забезпечує максимальний вміст гель-фракції – у межах 83,5...86,7 %, залежно від тривалості попередньої витримки. За цієї температури тепловий вплив інтенсивно ініціює полімеризацію, швидкість реакції зростає, і формується практично максимальна кількість хімічних зв'язків, незалежно від тривалості витримки за кімнатної температури. Різниця між отриманими значеннями становить лише 3,6 %, що відповідає межах експериментальної похибки. Тому доцільно застосовувати або структурування без витримки за кімнатної температури за 373 К, або структурування за 343 К із попередньою витримкою протягом 2 год.

Наступний етап досліджень був спрямований на зниження внутрішніх напружень у системі (рис. 3.7) та підвищення вмісту гель-фракції в епоксиполімерах, структурованих за температури 373 К після витримки 1 год за кімнатної температури. З цією метою процес термічного нагрівання було поділено на кілька стадій, включно з етапом охолодження зразків на повітрі після нагрівання до 313 К. Скорочення витримки за кімнатної температури до 1 год передбачає технологічно ефективніший режим формування виробів з епоксиполімерів.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

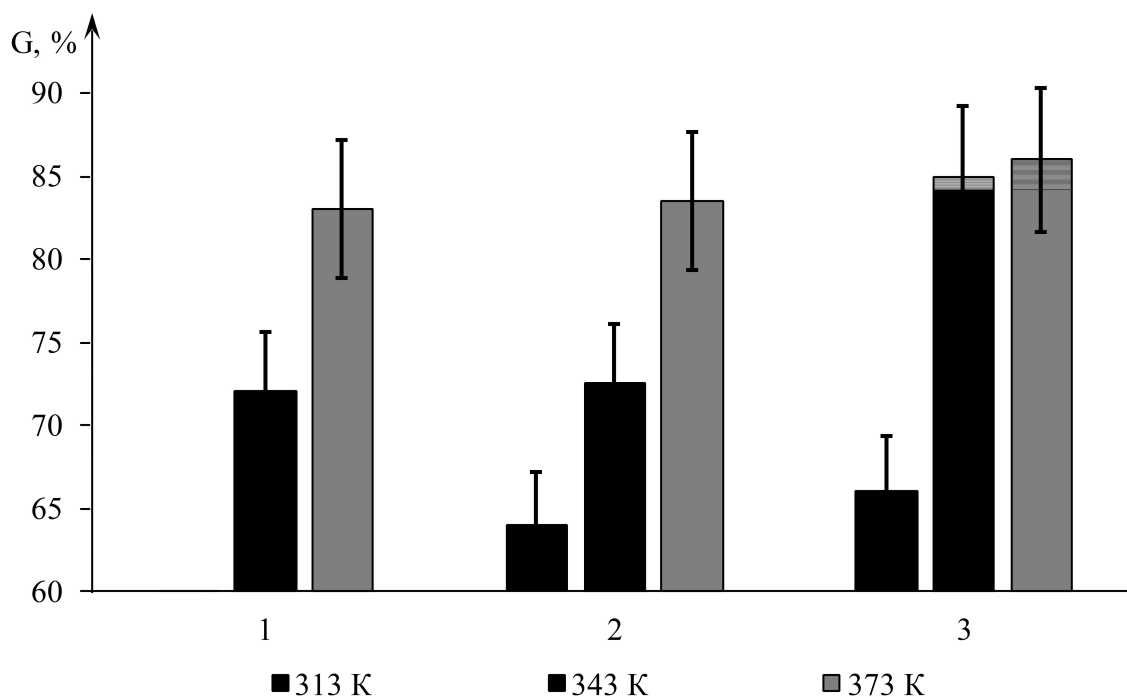


Рисунок 3.6 – Залежність вмісту гель-фракції епоксиполімерів від режиму структурування з попередньою витримкою за температури 293 К: 1 – без витримки; 2 – 1 год; 3 – 2 год

Встановлено, що нагрівання епоксиполімерів до кінцевої температури 373 К після етапу витримки при 313 К призводить до різкого зростання внутрішніх напружень ($\sigma_{\text{вн}} = 0,86$ МПа) у випадку, якщо полімери були структуровані без попередньої витримки за кімнатної температури. Якщо ж структурування відбувається за аналогічним режимом із годинною витримкою при кімнатній температурі, внутрішні напруження зменшуються на 9,3 %. Це пояснюється тим, що при 373 К процес полімеризації та формування хімічних зв'язків протікає інтенсивно, а кількість і розподіл зв'язків у об'ємі полімеру практично не залежать від попередньої витримки при кімнатній температурі.

Експериментально показано, що величина внутрішніх напружень у епоксиполімерів, структурованих за режимом 2 (рис. 3.7), не відрізняється від режиму 1. Стадія охолодження не впливає на внутрішні напруження, якщо після цього матеріал нагрівати у камерній печі до 373 К. При цьому активно

формується хімічні зв'язки, оскільки при 313 К полімеризація протікає повільно.

Якщо після охолодження нагрівати епоксиполімери поступово за режимами №3 та №4 (рис. 3.2), внутрішні напруження знижуються на 39...55 %. Це пояснюється тим, що при наступному нагріванні до 313 К після охолодження відбувається релаксація напружень завдяки підвищенню рухливості окремих сегментів макромолекул. За цієї температури матеріал отримує достатньо теплової енергії для рівномірного формування просторової структури без інтенсивного локального утворення зв'язків.

Епоксиполімери, структуровані за режимом 1 без попередньої витримки (рис. 3.8), перед термічним нагріванням мають мінімальний вміст гель-фракції (69,37 %), оскільки за цей час утворюється недостатня кількість зв'язків. Для режиму 2 вміст гель-фракції зростає завдяки більш сприятливим умовам та рівномірності процесу. Збільшення гель-фракції в епоксиполімерів, структурованих за режимами 3 та 4, пояснюється здатністю системи формувати зв'язки більш рівномірно протягом тривалої витримки при нагріванні.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

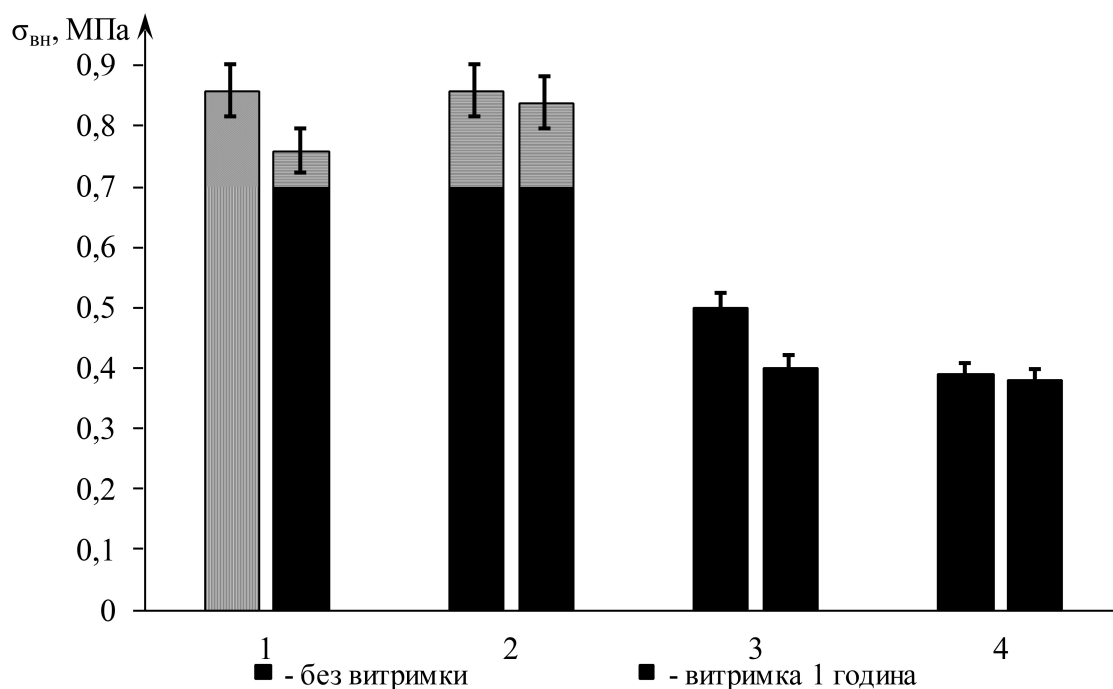


Рисунок 3.7 – Залежність внутрішніх напружень епоксиполімерів від режиму структурування з нагрівом до кінцевої температури 373 К: 1 – нагрівання до 313 К; 2 – нагрівання до 313 К + охолодження; 3 – нагрівання до 313 К + охолодження + нагрів до 313 К; 4 – нагрівання до 303 К + охолодження + нагрів до 313 К

У епоксиполімерах, які витримувалися протягом 1 години на повітрі перед нагріванням, спостерігається збільшення вмісту гель-фракції, що зумовлено утворенням первинних хімічних зв'язків на цьому етапі.

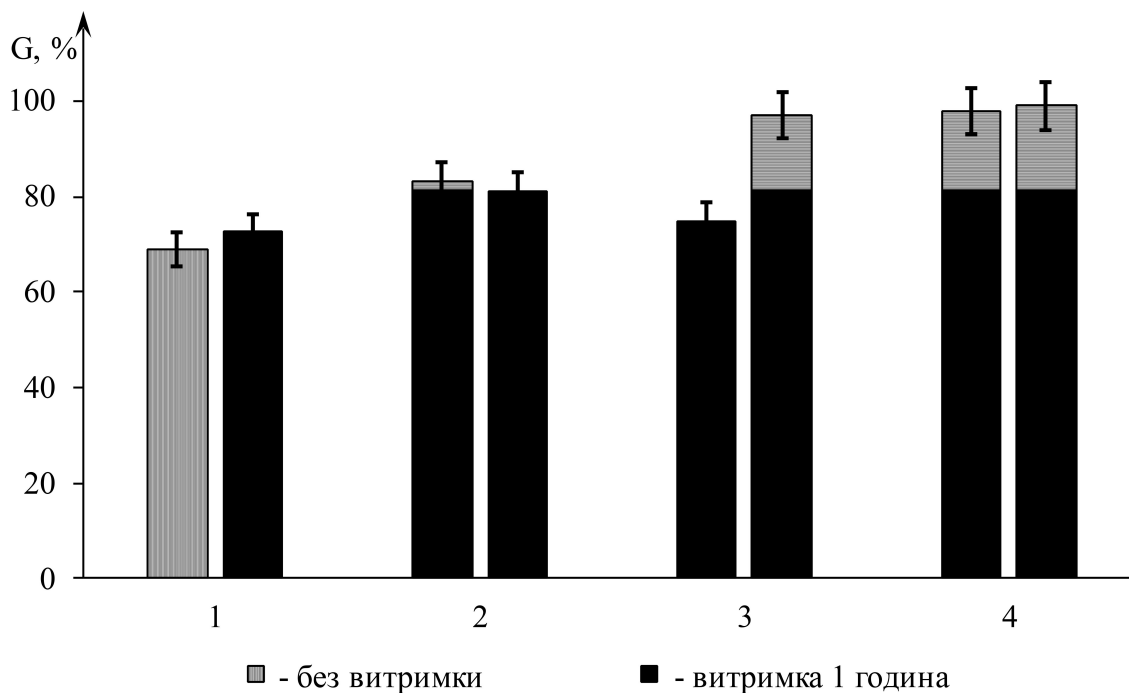


Рисунок 3.8 – Залежність вмісту гель-фракції епоксиполімерів від режиму структурування, під час нагрівання до кінцевої температури 373 К: 1 – нагрівання до 313 К; 2 – нагрівання до 313 К + охолодження; 3 – нагрівання до 313 К + охолодження + нагрів до 313 К; 4 – нагрівання до 303 К + охолодження + нагрів до 313 К

Найнижчі значення твердості мають епоксиполімери, що структуровані за режимом 1 (рис. 3.9), що пов'язано із високими значеннями внутрішніх напружень та недостатнім ступенем структурування системи.

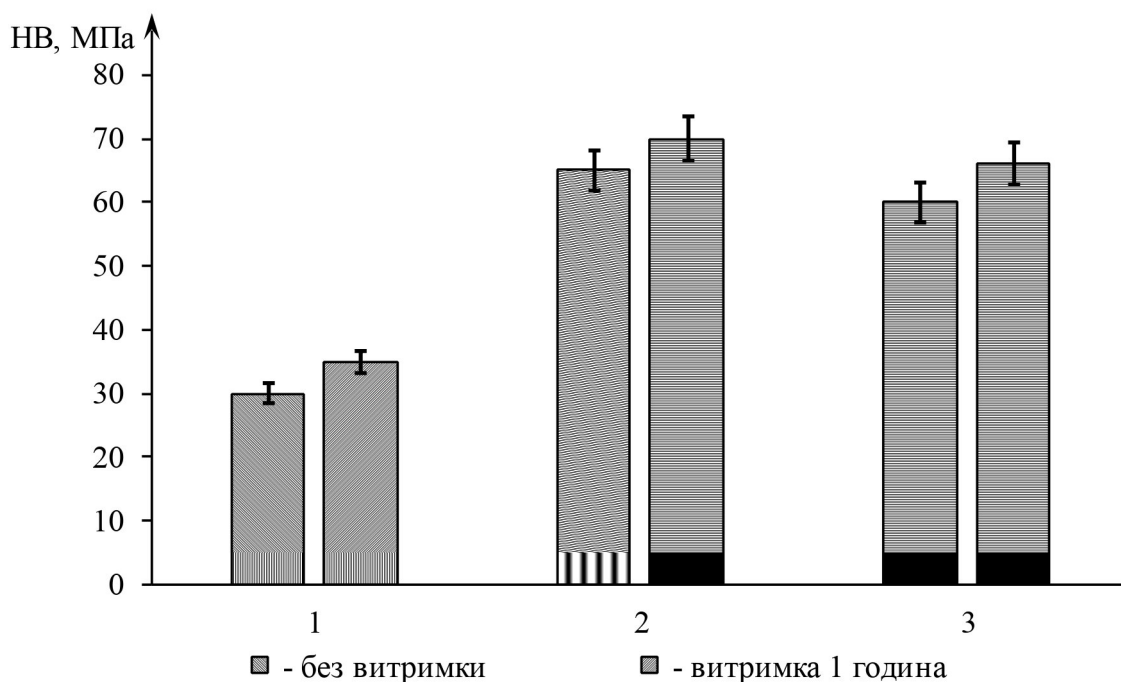


Рисунок 3.9 – Залежність твердості епоксиполімерів від режиму формування за кінцевої температури нагрівання 373 К: 1 – нагрівання до 313 К; 2 – нагрівання до 313 К + охолодження; 3 – нагрівання до 313 К + охолодження + нагрів до 313 К

Структурування за режимами 2 та 3 призводить до значного збільшення твердості епоксиполімерів (у 2,3 рази), що пов'язано зі зростанням вмісту гель-фракції в системі. У той же час суттєвого підвищення твердості для епоксиполімерів, структурованих за режимом 2 із поступовим нагріванням після охолодження, не спостерігається, оскільки при цьому приріст гель-фракції невеликий, а зниження внутрішніх напружень більше впливає на динамічні характеристики матеріалу.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕЖИМИ ФОРМУВАННЯ ЕПОКСИПОЛІМЕРІВ

4.1. Особливості технології формування епоксиполімерних покриттів

Технологічний процес отримання епоксиполімерних покриттів включає основні й допоміжні операції. До основних належать етапи, що визначають якість кінцевого покриття: підготовка поверхні виробу, нанесення матеріалу та його тверднення (сушіння). Допоміжні операції забезпечують покращення властивостей покриття і охоплюють підготовку компонентів та технологію їх змішування. Загальна схема процесу формування епоксиполімерних покриттів наведена на рисунку 4.1.

Підготовка поверхні виробу є критично важливою, оскільки саме вона значною мірою визначає довговічність та експлуатаційні характеристики покриття.

Не менш суттєвим етапом є нанесення матеріалу. Використання сучасних, автоматизованих методів нанесення дає змогу максимально реалізувати потенціал матеріалу та зменшити його витрати. Формування основних властивостей покриття відбувається на стадії його тверднення. Тому саме цей етап визначає кінцеву якість та тривалість експлуатації покриття [13, 14].

4.1.1 Підготовка компонентів до формування.

Підготовчі операції включають просушування, просіювання та дозування компонентів. Їхня послідовність залежить від властивостей складових суміші та специфіки процесу змішування [6].

У виробництві епоксиполімерних матеріалів просушування сировини та готових компонентів є однією з ключових технологічних операцій. Видалення вологи з твердих складників дозволяє надати матеріалам необхідних властивостей. Повного висушування досягають шляхом випаровування вологи за допомогою теплового сушіння.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

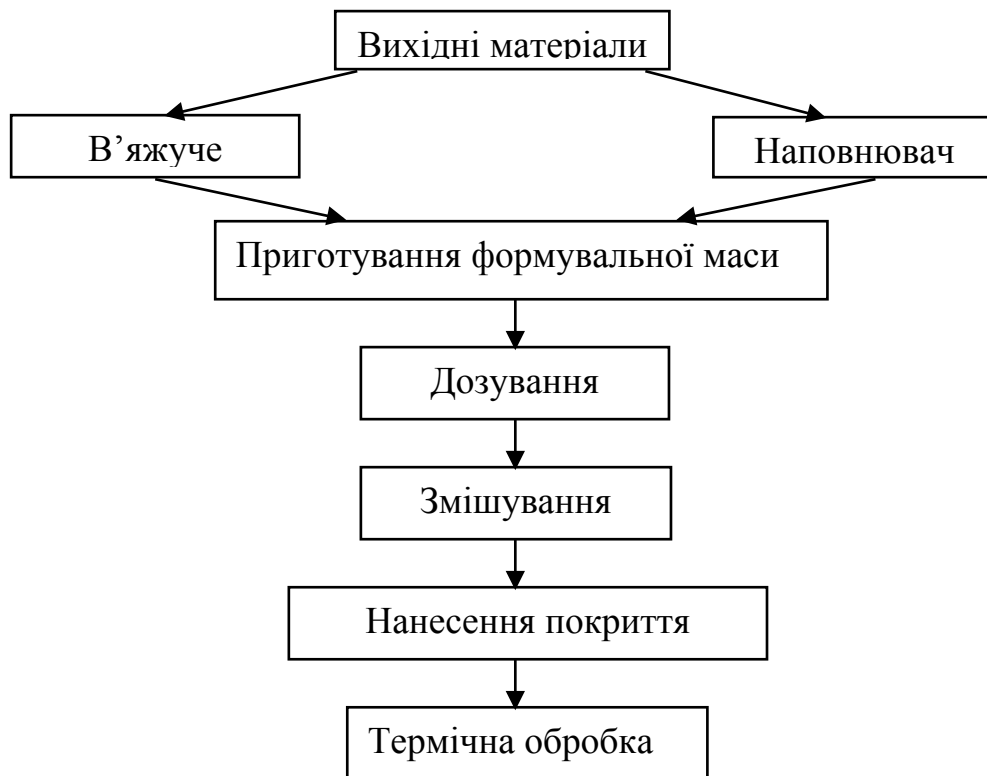


Рисунок 4.1 – Схема технологічного процесу виготовлення епоксикомпозитного покриття

Для просушування порошкоподібних наповнювачів використовували конвективний метод, за якого матеріал контактує з нагрітим повітрям у сушильній шафі [15]. Просіювання наповнювачів є ще однією важливою операцією підготовки сировини. Його основне призначення – видалення сторонніх домішок. Перед змішуванням композиції висушені компоненти пропускають через сито з отворами відповідного розміру, що забезпечує очищення від механічних включень.

Підготовка матеріальної маси починається з дозування компонентів за масою або за об'ємом відповідно до заданої рецептури. Зважування здійснюється на аналітичних вагах [16]. Порушення точності дозування може негативно впливати на властивості матеріалу: надлишок наповнювачів знижує фізико-механічні характеристики та зносостійкість, а надлишок в'язучого спричиняє підвищення коефіцієнта та температури тертя, що в підсумку погіршує якість епоксиполімерного покриття.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.1.2 Технологія змішування компонентів системи.

Змішування є однією з ключових стадій технологічного процесу отримання полімерних матеріалів. Саме від його ефективності залежить режим переробки, якість кінцевого продукту, продуктивність виробництва, а також дотримання вимог охорони праці та техніки безпеки.

Компоненти завантажували в змішувач окремо, зі встановленою сталою швидкістю подачі. Механічна дія, що виникає під час роботи змішувача, забезпечує рівномірне розподілення складових у суміші.

Однорідність системи є необхідною умовою формування покриття з оптимальними фізико-механічними властивостями. Для забезпечення якісного перемішування застосовували роторний змішувач, у який послідовно та поетапно вводили наповнювач і в'язуче.

4.1.3 Підготовка поверхні до нанесення покриття.

Експлуатаційні властивості покриттів значною мірою визначаються якістю підготовки поверхні. Чим агресивнішими є умови експлуатації виробу, тим ретельніше повинна бути проведена підготовка під фарбування. Навіть високоякісний лакофарбовий матеріал, нанесений на непідготовлену основу, утворює покриття з дефектами та незадовільними фізико-механічними і захисними характеристиками.

Довговічність лакофарбового покриття залежить від технології його формування, а також від корозійної стійкості металу, складу продуктів корозії, що утворюються на його поверхні, конструктивних особливостей виробу (форми, розмірів, конфігурації) та якості підготовки поверхні перед нанесенням покриття [14]. Підготовка поверхні передбачає видалення шарів корозії, окалини, а також забруднень, зокрема жирів та консерваційних мастил. Вибір конкретного способу обробки залежить від матеріалу виробу, його габаритів і конструкції, початкового стану поверхні, вимог щодо класу покриття та умов подальшої експлуатації.

Для очищення поверхні днища транспортних засобів було застосовано піскоструменеву обробку. Цей метод є однією з ключових стадій підготовки

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поверхонь перед нанесенням антикорозійних або декоративних покриттів. Піскоструменеве обладнання забезпечує очищення внутрішніх та зовнішніх поверхонь абразивно-повітряною сумішшю від фарби, окалини, іржі, забруднень і залишків мастил. Метод дозволяє ефективно обробляти як рівні, так і рельєфні поверхні зі складною геометрією.

Суть піскоструменевої обробки полягає у подачі піску (інколи з додаванням води) під тиском. Використання різних фракцій абразиву дає змогу ефективно очищувати навіть сильно забруднені ділянки. Продуктивність такого очищення може досягати 40 м²/год, залежно від стану поверхні. Висока швидкість обробки дозволяє оперативно наносити покриття до повторної появи ознак корозії. Покриття, нанесене на піскоструменево очищену поверхню, має триваліший строк служби – у кілька разів більший, ніж за недостатньої підготовки.

До хімічних способів очищення поверхні належать знежирювання, травлення, видалення старих покриттів, перетворювачі іржі та фосфатування.

Знежирювання передбачає очищення поверхні від залишків мастил, жирів, солей та інших забруднень, що можуть залишатися після полірувальних паст, емульсійних рідин, технологічних мастил або міжопераційного зберігання виробів. Для цього застосовують лужні розчини, органічні розчинники або емульсійні склади (розчинники, дисперговані у воді).

Вибір способу знежирювання визначається матеріалом виробу, ступенем забруднення його поверхні, вимогами до чистоти покриття та економічними міркуваннями. Для підвищення ефективності процесу у водні лужні розчини вводять поверхнево-активні речовини (ПАР). Вони адсорбуються на поверхні виробу та змінюють швидкість масообміну між матеріалом і знежирювальним середовищем, що сприяє більш повному видаленню забруднень.

Як основні компоненти лужних розчинів застосовують гідроксид натрію, карбонат натрію, рідке скло (силікат натрію Na₂SiO₃), тринатрійфосфат Na₃PO₄, пірофосфат натрію Na₄P₂O₇ та гексаметафосфат натрію Na(PO₃)₆.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.1.4 Способи нанесення епоксиполімерних покриттів.

З удосконаленням властивостей лакофарбових матеріалів та розширенням їх асортименту постійно поліпшувалися існуючі й розроблялися нові методи їх нанесення. Промисловість поступово перейшла від ручних способів – пензлевого чи валкового – до сучасних технологій: пневматичного, електростатичного та безповітряного розпилення, а також електроосадження. При цьому особливу увагу приділяють механізації та автоматизації процесів, що дає змогу підвищити якість покриттів, зменшити витрати матеріалів і підвищити продуктивність праці [17].

Способи нанесення рідких матеріалів ґрунтуються на попередньому диспергуванні – переведенні їх у стан аерозолу з подальшим осадженням тонким шаром або шляхом адсорбції лакофарбової композиції на поверхні частинок порошку. Здатність рідкого матеріалу утворювати аерозоль визначається молекулярною масою плівкоутворювача (оліго- чи полімеру), в'язкістю системи, леткістю розчинника та поверхневим натягом рідини. Якість отриманого покриття залежить від характеристик аерозолу, а також від повноти його осадження та коагуляції частинок.

Аерозолі отримують за допомогою диспергування – подрібнення рідких або твердих систем з утворенням у повітрі дрібних частинок. На цьому принципі базується розпилення лакофарбових матеріалів, виготовлених із розчинів або порошків.

Основними властивостями аерозолів є концентрація, розмір частинок, полідисперсність та стабільність. Оптимальний розмір частинок становить 30–60 мкм. Він залежить від молекулярної маси плівкоутворювача, поверхневого натягу системи та умов розпилення.

Під час руху аерозолу від сопла до поверхні змінюються його характеристики: зменшується полідисперсність і вирівнюється концентрація частинок у факелі. Для аерозолів рідких матеріалів характерні два паралельні процеси: випаровування розчинників, що зменшує розмір частинок, та коагуляція, яка, навпаки, приводить до їх укрупнення.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метод розпилення під високим тиском базується на інтенсивному подрібненні рідини під час її проходження через сопло з великою швидкістю з подальшим осадженням частинок на поверхні. Порівняно з пневматичним способом він забезпечує значну економію матеріалів завдяки меншим втратам у навколишнє середовище, дає змогу використовувати композиції з нижчим вмістом розчинників, підвищує швидкість нанесення покриттів і дозволяє зменшити кількість шарів завдяки можливості отримання більшої товщини. Цей метод також сприяє зниженню забруднення та загазованості робочої зони, покращуючи умови праці.

Разом із тим розпилення під високим тиском менш ефективно для вузьких або гратчастих поверхонь. Установки цього типу сумісні з більшістю будівельних матеріалів, за винятком систем із цементними, мінеральними наповнювачами чи високим вмістом твердих частинок.

Метод вимагає ретельної організації процесу: контролю якості матеріалів, їх фільтрації та належної підготовки персоналу. Установки для безповітряного розпилення живляться від електромережі, відзначаються простою та безпечною експлуатацією, надійністю, низьким рівнем шуму та високою мобільністю.

4.1.5 Розробка способу тверднення епоксиполімерних матеріалів.

Однією з ключових стадій технологічного процесу формування матеріалів, що значною мірою визначає їх експлуатаційні властивості, є тверднення епоксиполімерного покриття, нанесеного на поверхню виробу.

Під час вибору типу, методу та режиму тверднення враховують насамперед характер епоксиполімерної системи, геометричні параметри та конфігурацію виробу, умови виробництва, економічність процесу та його енергоємність.

Тверднення покриттів здійснюється двома основними способами: природним і штучним.

Природне тверднення відбувається на відкритому повітрі або в приміщенні при температурі навколишнього середовища (12...25 °С) та відносній вологості не вище ніж 65 %. До переваг цього методу належать можливість обробки великогабаритних виробів, простота обладнання та низькі енергетичні витрати.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однак такий спосіб є тривалим, його складно застосовувати у промислових умовах для епоксидних систем, а також він не дозволяє автоматизувати технологічний процес.

Штучне сушіння ґрунтується на енергетичному впливі (тепловому, світловому, радіаційному) на матеріал, що забезпечує перехід рідкої композиції у твердий стан і формування плівки.

У даній роботі для тверднення покриттів застосовували аеродинамічну піч та інфрачервоне (ІЧ) нагрівання.

У процесі тверднення в аеродинамічній печі композиція нагрівається за рахунок роботи нагрівальних елементів і циркуляції гарячого повітря, переміщуваного вентилятором. Такий метод забезпечує рівномірний прогрів та сприяє мінімізації залишкових напружень у покритті, що позитивно впливає на його кінцеві властивості.

Принцип дії інфрачервоного нагрівання полягає в передачі тепла поверхневому шару нанесеного матеріалу. Спочатку формується плівка на поверхні, а потім теплота шляхом теплопровідності поширюється вглиб шару, забезпечуючи подальше тверднення покриття. ІЧ-нагрівання є ефективним для прискорення процесу холодного тверднення та дозволяє отримати високоякісні покриття з підвищеними фізико-механічними та експлуатаційними характеристиками.

4.2 Технологічний процес формування захисних епоксиполімерних покриттів

Покриття, призначені для захисту металу від корозії, мають комплексну будову й зазвичай складаються з кількох шарів, що відрізняються за складом, структурою та властивостями. Технологічні етапи формування таких багат шарових систем визначаються вимогами до зовнішнього вигляду покриття, умовами його подальшої експлуатації та економічною доцільністю процесу.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Формування епоксиполімерного покриття здійснювали таким чином: на попередньо знежирену та механічно підготовлену металеву поверхню наносили композицію товщиною 250...350 мкм. Твердження шару проводили в аеродинамічній печі при температурі 100 °С за ввімкненого вентилятора, після чого виріб охолоджували на спокійному повітрі.

Було визначено температурно-часові режими початкової стадії структурування покриттів, які забезпечують мінімальні внутрішні напруження в системі. Також встановлено граничну товщину покриття, за якої досягаються оптимальні технологічні та експлуатаційні характеристики.

Розроблені епоксиполімерні покриття придатні до експлуатації в температурному діапазоні 80...100 °С.

Технологічний процес формування захисних епоксиполімерних покриттів подано в таблиці 4.1. Він включає заготівельні, формувальні, термічні, контрольні операції, а також етапи механічної обробки та маркування виробів.

Таблиця 4.1

Номер операції	Назва операції	Структура операції	Обладнання, матеріали
1	2	3	4
005	Заготівельна	1 Провести дозування компонентів 2 Змішати епоксидно-діанову смолу з твердником	Ваги, ГОСТ 19491-74 Шнековий змішувач
010	Формувальна	1 Підготувати поверхню заготовки для нанесення покриття 2 Знежирити поверхню в місцях нанесення покриття 3 Провести формування шару покриття	Шліфувальний папір Ацетон Фарбувальний апарат високого тиску “Фініш – 211”

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк. 47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4
015	Термічна	1 Ввімкнути піч та вентилятор всередині печі 2 Завантажити деталі в піч і провести термообробку за наступним режимом: 1 год при 20 °С + 2 год при 100 °С 3 Вийняти деталі та охолоджувати їх на спокійному повітрі	Аеродинамічна піч
020	Контрольна	1 Перевірити покриття на відповідність розмірам згідно креслення та на відсутність дефектів	Мікрометричний нутромір, штангенциркуль, лупа
025	Шліфувальна	1 Прощліфувати до відповідного розміру 2 Проконтролювати розміри	Шліфувальний верстат Штангенциркуль
030	Маркування	1 Нанести відповідне клеймо	Фарба, трафарет

Приготування формувальної маси передбачало попередню підготовку компонентів системи. До епоксидно-діанової смоли ЕД-20 у визначеному співвідношенні додавали твердник ПЕПА, після чого композицію перемішували протягом 6...10 хвилин на мінімальній швидкості, щоб запобігти її надмірному нагріванню. Далі кузов транспортного засобу завантажували в сушильну камеру та проводили термічну обробку за таким режимом: 1 година при 20 °С з подальшим нагріванням протягом 2 годин при 100 °С.

На наступному етапі виробу проходили контроль якості, що включав перевірку на відсутність дефектів та відповідність заданим типорозмірам. У процесі контролю виробу маркували та транспортували до місць зберігання. Деталі та контрольні зразки підлягали візуальному огляду; незначна шорсткість покриття вважалася допустимою, оскільки усувається під час подальшої механічної обробки. Будь-яке замазування, підклеювання чи інші способи реставрації бракованих виробів не дозволяються.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

На основі аналізу літературних джерел були розглянуті сучасні методи формування епоксиполімерів. Встановлено, що правильний вибір режиму тверднення композицій забезпечує отримання матеріалу з оптимальними фізико-механічними властивостями. Технологічно обґрунтований термічний вплив під час або після формування виробів сприяє посиленню релаксаційних процесів у матеріалі через зміну ступеня зшивання, що супроводжується покращенням механічних характеристик полімеру.

Оптимальні структурно-механічні властивості були досягнуті при формуванні покриття в аеродинамічній печі з вмістом ПЕПА 12 мас.ч. У цьому режимі забезпечується максимально повне структурування ($G = 79,8 \%$) і висока твердість ($HV = 284,52$ МПа), а також створюються умови для зниження внутрішніх напружень ($\sigma_{вн} = 0,093$ МПа). Це пояснюється рівномірним формуванням тривимірної сітки з достатнім часом для конформаційних перетворень макромолекул.

Встановлено, що зростання вмісту гель-фракції при температурі 313 К можливе за умови збільшення часу витримки, оскільки процеси структурування відбуваються повільно. Структурування при температурі 373 К забезпечує високий вміст гель-фракції до 86,7 %, незалежно від тривалості попередньої витримки за кімнатної температури.

Застосування стадії охолодження сприяє зниженню внутрішніх напружень на 39...55 %, оскільки відбувається релаксація внутрішніх напружень через підвищення рухливості окремих сегментів макромолекул епоксиполімеру під час наступного нагрівання.

Робота демонструє доцільність використання аеродинамічної печі та ступінчастого нагрівання при формуванні епоксиполімерних покриттів. Такий підхід дозволяє створити сприятливі умови для структурування матеріалу та покращити його фізико-механічні характеристики

					МП 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Букетов А.В. Адгезійна міцність та внутрішні напруження полімер-епоксидних композицій // Вісник ТДТУ. Тернопіль. – 1997. – Т. 2, 4 – 2. – С. 107 – 110.
2. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці: Підручник / Є.О. Джур, Л.Д. Кучма, Т.А. Манько та ін. – К.: Вища освіта, 2003. – 399.: іл.
3. ДСТУ ISO 4618:2013 – Фарби та лаки. Терміни та визначення понять.
4. ДСТУ ISO 2808:2019 – Фарби та лаки. Визначення товщини плівок покриттів.
5. ДСТУ 4219-2003 – Визначення еластичності епоксидних та поліуретанових покриттів.
6. Рипка А.М., Никулишин І.Є., Піх З.Г. Закономірності структурування епоксиафтополімерних композицій. – Львів : Нац. унт «Львівська політехніка», 2015. – 256 с.
7. Богданов В.В., Слинько П.М. Фізикохімічні основи полімеризації та структурування епоксидних композицій. – Київ : Наук. думка, 2011. – 432 с.
8. Горобець В.П. Технологія лакофарбових покриттів : навч. посібник. – Харків : ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2018. – 364 с.
9. Левченко М.І. Вплив температурних режимів на структуру та властивості епоксидних покриттів. – Дис. канд. техн. наук : ХНУ, 2017. – 214 с.
10. Романчук О.Т., Шевченко І.С. Особливості структурування полімерних покриттів при ступінчастому нагріванні. – Журнал «Полімери», 2020. – №3(45). – С. 56–68.
11. Савченко Л.П., Дмитренко В.М. Релаксація внутрішніх напружень у епоксиолімерних системах після термічної обробки. – Журнал «Композити», 2019. – Т. 12, №4. – С. 78–91.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

12. Ткаченко В.О., Павленко С.Б. Методи оцінювання гельфракції та механічних властивостей епоксидних покриттів. – Журнал «Матеріали та технології», 2021. – №2. – С. 99–114.

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

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

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

16. Горобець В.П. Технологія лакофарбових покриттів : навч. посібник. – Харків : ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2018. – 364 с.

17. ISO 12944 – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems. Parts 1–9. – 2019. – Нормативні вимоги до покриттів і технології їх нанесення з урахуванням експлуатаційних умов.

					MP 1425.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		