

**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»**

**ВПЛИВ СТУПІНЧАСТОЇ ТЕРМІЧНОЇ  
ОБРОБКИ НА ПРОЦЕСИ ФОРМУВАННЯ  
ЕПОКСИПОЛІМЕРНОГО ПОКРИТТЯ / THE  
INFLUENCE OF STEPWISE HEAT TREATMENT  
ON THE PROCESSES OF FORMING AN EPOXY  
POLYMER COATING**

спеціальність 132 Матеріалознавство

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Індустріальний інжиніринг і менеджмент

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти

групи ПМ(ПМ)З-41

**Федорук Валентин 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

\_\_\_\_\_Федоруку Валентину Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Вплив ступінчастої термічної обробки на процеси формування епоксиполімерного покриття

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. Літературний огляд; Розділ 2. Методики досліджень та характеристика вихідних матеріалів; Розділ 3. Дослідження впливу ступінчастої термічної обробки на структуру та властивості епоксидних полімерів; Розділ 4. Технологічні режими структурування та формування епоксидних полімерних матеріалів; Висновки; Список використаних джерел; Додатки

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

Слайд 1 – Мета, постановка завдань (1 л. ф. А4);

Слайд 2-3 – Вигляд зразків, схеми досліджень (1 л. ф. А4);

Слайди 4-5 – Режимы обробки (7 л. ф. А4);

Слайд 6-10 – Дослідження властивостей (1 л. ф. А4);

Слайд 7 – 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. Літературний огляд;<br>Розділ 2. Методики досліджень та характеристика вихідних матеріалів         | 05.05.2026 р.                                  |          |
| 2     | Розділ 3. Дослідження впливу ступінчастої термічної обробки на структуру та властивості епоксидних полімерів | 12.05.2026 р.                                  |          |
| 3     | Розділ 4. Технологічні режими структурування та формування епоксидних полімерних матеріалів                  | 19.05.2026 р.                                  |          |
|       |                                                                                                              |                                                |          |
|       |                                                                                                              |                                                |          |
|       |                                                                                                              |                                                |          |
|       |                                                                                                              |                                                |          |
|       |                                                                                                              |                                                |          |
|       |                                                                                                              |                                                |          |
|       |                                                                                                              |                                                |          |
|       |                                                                                                              |                                                |          |
|       |                                                                                                              |                                                |          |
|       |                                                                                                              |                                                |          |
|       |                                                                                                              |                                                |          |
|       |                                                                                                              |                                                |          |

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_  
( підпис )

Федорук В.В.  
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_  
( підпис )

Боярська І.В.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Федорук В.В. Вплив ступінчастої термічної обробки на процеси формування епоксиполімерного покриття. 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, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

Пояснювальна записка складається з 39 сторінок і містить чотири розділи.

Також пояснювальна записка містить 11 рисунків, 4 таблиць та 15 літературних джерела та додаток.

Графічна частина складається з 11 аркушів формату А4, які розміщені в додатку А.

Ключові слова: епоксиполімер, система, покриття, термічна обробка.

|           |      |           |        |      |                                                                                       |                         |      |         |  |
|-----------|------|-----------|--------|------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------|---------|--|
|           |      |           |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ                                                                     |                         |      |         |  |
| Змн.      | Арк. | № докум.  | Підпис | Дата | Вплив ступінчастої термічної обробки на процеси формування епоксиполімерного покриття | Літ.                    | Арк. | Аркушів |  |
| Розробив  |      | Федорук   |        |      |                                                                                       |                         | 3    | 39      |  |
| Перевірів |      | Боярська  |        |      |                                                                                       | ЛІНТУ                   |      |         |  |
| Н. контр. |      | Мисковець |        |      |                                                                                       | каф. матеріалознавства, |      |         |  |
| Затверд.  |      | Імбірович |        |      |                                                                                       | гр. ПМ(ІІМ)з- 41        |      |         |  |

## ANNOTATION

Fedoruk V.V. The influence of stepwise heat treatment on the processes of forming an epoxy polymer coating. 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, four chapters, conclusions, a list of sources used, and appendices.

The explanatory note consists of 39 pages and contains four chapters.

The explanatory note also contains 11 figures, 4 tables and 15 literary sources and an appendix.

The graphic part consists of 11 A4 sheets, which are placed in Appendix A.

Keywords: epoxy polymer, system, coating, heat treatment.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 4    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

## ЗМІСТ

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                                | 6  |
| 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....                                                                                 | 7  |
| 1.1. Поняття про епоксидні полімери.....                                                                  | 7  |
| 1.2. Отримання матеріалів на основі епоксидних полімерів.....                                             | 8  |
| 1.3. Висновки та постановка задач досліджень.....                                                         | 11 |
| 2 МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ.....                                          | 12 |
| 2.1. Характеристика вибраних матеріалів.....                                                              | 12 |
| 2.2. Методика дослідження властивостей і структури розробленої епоксидної системи .....                   | 13 |
| 2.3. Методи формування епоксиолімерів .....                                                               | 16 |
| 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТУПІНЧАСТОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ ПОЛІМЕРІВ..... | 17 |
| 3.1. Дослідження фізико-механічних властивостей .....                                                     | 17 |
| 4 ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕЖИМИ СТРУКТУРУВАННЯ ТА ФОРМУВАННЯ ЕПОКСИДНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ.....                  | 30 |
| 4.1. Особливості технології формування епоксиолімерних покриттів .....                                    | 30 |
| 4.2. Технологічний процес формування захисних епоксиолімерних покриттів.....                              | 33 |
| ВИСНОВКИ .....                                                                                            | 37 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                           | 38 |
| ДОДАТКИ                                                                                                   |    |

## ВСТУП

Правильно обрана схема твердіння епоксидних полімерів забезпечує формування матеріалу з високими фізико-механічними показниками. Науково обґрунтовані термічні впливи під час або після процесу формування виробу сприяють посиленню релаксаційних процесів унаслідок зміни ступеня зшивання структури, що, своєю чергою, покращує механічні характеристики полімеру.

Полімерна матриця набуває оптимальних структурно-механічних властивостей за умов формування в режимі поступового зміцнення. Епоксидний полімер, отриманий ступінчастим методом, характеризується розвиненою тривимірною сітчастою структурою, завдяки чому відзначається підвищеною термоокиснювальною стійкістю, термостійкістю та ударною в'язкістю. Поступове охолодження затверділих полімерів дає змогу суттєво зменшити залишкові напруження завдяки релаксації та перебудові надмолекулярної структури. Водночас зі зростанням швидкості охолодження збільшується рівень залишкових напружень, оскільки пригнічуються релаксаційні процеси, пов'язані з перерозподілом внутрішніх напружень.

Отже, підвищення експлуатаційних властивостей вихідного епоксидного полімеру можливе шляхом застосування ступінчастої температурно-часової схеми системної термічної обробки.

Метою роботи є створення нових захисних покриттів на основі епоксидних матеріалів, що характеризуються високими фізико-механічними властивостями.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 6    |

# РОЗДІЛ 1

## ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1. Поняття про епоксидні полімери

Епоксидні полімери належать до класу термореактивних полімерних матеріалів, які широко застосовуються в різних галузях промисловості завдяки високим фізико-механічним, адгезійним та хімічним властивостям. Основою їхньої структури є епоксидна група, що здатна вступати в реакцію з отверджувачами, утворюючи просторово зшиту тривимірну сітку. Саме така структура забезпечує матеріалам високу міцність, твердість, термостійкість та стійкість до впливу агресивних середовищ.

Епоксидні смоли отримують шляхом поліконденсації епіхлоргідрину з фенольними або іншими органічними сполуками. Найбільш поширеними є дианові епоксидні смоли, які характеризуються добрими технологічними властивостями та універсальністю застосування. Для формування готового матеріалу епоксидні смоли поєднують з отверджувачами, пластифікаторами, наповнювачами та модифікаторами, що дозволяє регулювати властивості кінцевого продукту.

Процес твердіння епоксидних полімерів є незворотним і супроводжується утворенням просторової полімерної структури. Як отверджувачі найчастіше використовують аміни, ангідриди кислот та поліаміди. Вибір типу отверджувача та режиму термічної обробки суттєво впливає на експлуатаційні характеристики матеріалу, зокрема на міцність, теплостійкість, ударну в'язкість і хімічну стійкість.

Епоксидні полімери характеризуються рядом переваг, серед яких:

- висока механічна міцність;
- значна адгезія до металів, скла, деревини та інших матеріалів;
- стійкість до дії вологи, кислот, лугів і розчинників;
- низька усадка під час твердіння;

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 7    |

- добрі електроізоляційні властивості;
- висока теплостійкість і довговічність.

Завдяки комплексу цінних властивостей епоксидні полімери широко використовують у машинобудуванні, будівництві, електротехніці, авіаційній та автомобільній промисловості. На їх основі виготовляють клеї, захисні покриття, композиційні матеріали, герметики та електроізоляційні вироби.

Водночас епоксидні матеріали мають і певні недоліки, до яких належать крихкість, чутливість до ультрафіолетового випромінювання та можливість виникнення внутрішніх напружень під час твердіння. Для усунення цих недоліків застосовують різні методи модифікації полімерної матриці, введення наповнювачів і оптимізацію режимів термічної обробки.

Таким чином, епоксидні полімери є перспективними матеріалами сучасної техніки, а дослідження їхньої структури, властивостей та способів модифікації має важливе значення для створення нових високоефективних композиційних матеріалів і захисних покриттів. [1, 2].

## 1.2. Отримання матеріалів на основі епоксидних полімерів

Матеріали на основі епоксидних полімерів займають важливе місце серед сучасних полімерних композиційних матеріалів завдяки високим фізико-механічним, адгезійним, теплофізичним та експлуатаційним властивостям. Технологія їх отримання включає комплекс послідовних операцій, спрямованих на формування полімерної структури із заданими характеристиками.

Основними складовими епоксидних композицій є епоксидна смола, отверджувач, пластифікатори, модифікатори, наповнювачі та різні функціональні добавки.

Основою більшості епоксидних матеріалів є епоксидні смоли, які отримують у результаті реакції епіхлоргідрину з фенолами або багатоатомними спиртами. Найбільшого поширення набули дианові епоксидні смоли, що характеризуються високою реакційною здатністю та добрими технологічними

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 8    |

властивостями. Для переведення епоксидної смоли у твердий нерозчинний стан застосовують отверджувачі, які забезпечують формування тривимірної просторової сітки.

Процес отримання матеріалів на основі епоксидних полімерів включає декілька основних стадій: підготовку компонентів; дозування складових; змішування композиції; дегазацію; формування виробу; твердіння та термічну обробку.

На першому етапі здійснюють підготовку вихідних компонентів. Епоксидну смолу очищають від можливих домішок та при необхідності підігрівають для зниження в'язкості. Наповнювачі та модифікатори висушують з метою видалення вологи, яка може негативно впливати на процес твердіння та кінцеві властивості матеріалу.

Особливу увагу приділяють точності дозування компонентів, оскільки порушення співвідношення смоли й отверджувача призводить до неповного твердіння або погіршення експлуатаційних характеристик полімеру.

Після підготовки компонентів проводять змішування композиції. Цей процес має забезпечити рівномірний розподіл усіх складових у полімерній матриці. Для змішування використовують механічні мішалки, планетарні змішувачі або вакуумні установки. При введенні наповнювачів важливо досягти однорідності системи та уникнути утворення агломератів. Для покращення сумісності компонентів можуть застосовуватись поверхнево-активні речовини та спеціальні модифікатори. Під час змішування в композицію можуть потрапляти бульбашки повітря, які погіршують механічні властивості матеріалу та знижують його міцність. Тому після змішування часто проводять дегазацію у вакуумі, що дозволяє видалити газові включення та забезпечити формування щільної структури матеріалу.

Наступним етапом є формування виробу. Залежно від призначення матеріалу застосовують різні методи формування: лиття; пресування; просочення армувальних матеріалів; нанесення покриттів; вакуумне формування; контактне формування.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 9    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

Метод лиття широко використовують для отримання деталей складної форми, клеїв, герметиків та електроізоляційних виробів. При виготовленні композиційних матеріалів епоксидною композицією просочують армувальні наповнювачі – скловолокно, базальтові волокна, вуглецеві тканини або органічні волокна. У результаті формується композитний матеріал з високою питомою міцністю та жорсткістю.

Однією з найважливіших стадій є процес твердіння епоксидної композиції. Твердіння являє собою хімічну реакцію між епоксидною смолою та отверджувачем, унаслідок якої утворюється просторова сітчаста структура. Залежно від типу отверджувача процес може відбуватись за кімнатної температури або при нагріванні. Для забезпечення високих експлуатаційних властивостей важливе значення має дотримання температурно-часового режиму твердіння.

У практиці широко застосовують ступінчасті режими термічної обробки, які забезпечують поступове формування структури полімеру та зменшення внутрішніх напружень. Повільне нагрівання та охолодження сприяють релаксації напружень і формуванню більш однорідної надмолекулярної структури. Термічна обробка дозволяє підвищити теплостійкість, міцність, ударну в'язкість та хімічну стійкість матеріалів.

Для покращення властивостей епоксидних матеріалів до їх складу вводять різні наповнювачі та модифікатори. Наповнювачі можуть бути порошкоподібними, волокнистими або дисперсними. Використання мінеральних наповнювачів дозволяє зменшити усадку, підвищити твердість і теплостійкість матеріалу. Волокнисті наповнювачі забезпечують підвищення міцності та жорсткості композицій. Модифікатори застосовують для зниження крихкості, підвищення еластичності, поліпшення адгезії та стійкості до зовнішніх впливів.

Матеріали на основі епоксидних полімерів широко використовуються у машинобудуванні, будівництві, авіаційній техніці, електроніці та хімічній промисловості. На їх основі виготовляють захисні покриття, клеї, герметики,

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 10   |

теплоізоляційні та конструкційні композити, електроізоляційні вироби та інші високотехнологічні матеріали.

Таким чином, технологія отримання матеріалів на основі епоксидних полімерів є складним багатадійним процесом, від правильності виконання якого залежать структура, властивості та довговічність готового виробу. Оптимізація складу композиції та режимів термічної обробки дозволяє створювати матеріали з високими експлуатаційними характеристиками для різних галузей промисловості [4].

### 1.3. Висновки та постановка задач досліджень

На основі проведеного літературного огляду та аналізу сучасних наукових досліджень у даній галузі сформульовано такі висновки:

- визначено перспективність використання епоксидних полімерних клеїв у різних сферах техніки та промисловості;
- встановлено, що для підвищення пластичності, деформаційної стійкості та міцності композиційних матеріалів доцільно застосовувати модифікатори, які забезпечують необхідний комплекс механічних властивостей;
- для покращення експлуатаційних характеристик епоксидних полімерів ефективно застосовується термічна обробка;
- перспективним напрямом є використання ступінчастого нагрівання під час твердіння епоксидних полімерів.

Для створення нових захисних покриттів на основі епоксидних матеріалів із підвищеними фізико-механічними властивостями необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити вплив температурного режиму електропечі на механічні характеристики та ступінь структуроутворення епоксидних полімерів;
- розробити поетапну технологію формування епоксидних полімерних покриттів.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 11   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

#### 2.1. Характеристика вибраних матеріалів

У якості вихідного компонента застосовували епоксидно-діанову смолу марки ЕД-20 (ДСТУ 2093-92), яка являє собою прозору рідину з високою в'язкістю. Вміст епоксидних груп у смолі становить 20,0...22,5 %, а масова частка летких речовин – 0,2...0,8 %. Смоли цієї марки належать до технічних матеріалів широкого призначення, що дозволяє використовувати їх як основу для виготовлення покриттів, клеїв, адгезивів, компаундів, герметиків та інших полімерних матеріалів [1, 5-8].

Смола ЕД-20 здатна отверджуватися як за нормальної, так і за підвищеної температури без застосування зовнішнього тиску, що дає можливість здійснювати процес формування без використання пресового та спеціального нагрівального обладнання. Під час твердіння не утворюються побічні продукти, завдяки чому забезпечуються низька пористість і висока щільність готового матеріалу. Основні фізико-хімічні характеристики незатверділої смоли наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Фізико-хімічні властивості смоли марки ЕД-20

| Показник                                                             | Значення показника |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Густина, г/см <sup>3</sup>                                           | 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 °С, с | 65                 |
| Вміст загального хлору, %                                            | 1,0                |

Для отвердження епоксидних композицій використовували поліетиленполіамін (ПЕПА) згідно з ТУ 6-02-594-70. Даний отверджувач застосовується для твердіння епоксидних смол за кімнатної температури, а також в умовах зниженої температури та підвищеної вологості. За зовнішнім виглядом ПЕПА являє собою рідину кольору від світло-жовтого до темно-коричневого без наявності механічних домішок. Масова частка загального азоту в складі отверджувача становить не менше 30 %.

## 2.2. Методика дослідження властивостей і структури розробленої епоксидної системи

Для встановлення оптимального режиму утворення епоксидного полімеру обрано метод дослідження фізико-механічних властивостей та ступеня структурованості.

Зразки для досліджень зображено на рисунку 2.1.

Дослідження твердості матеріалу за методом Брінеля визначали за ДСТУ ISO 6506-1:2007 [9]. Дослідження проводили на зразках стрижневої форми з гладкою поверхнею, товщина яких становила не менше 5 мм, а ширина — не менше 15 мм. У процесі випробувань у поверхню досліджуваного матеріалу вдавлювали сталеву кульку діаметром 10 мм під навантаженням 2,5 кН упродовж 60 с. Значення твердості матеріалу визначали за відповідною розрахунковою 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], який базується на вимірюванні величини відхилення вільного кінця пружної металевої

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 13   |

пластини, закріпленої консольно, від її початкового положення. Деформування пластини відбувається під впливом внутрішніх напружень, що виникають у нанесеному покритті (рис. 2.2).

Внутрішні напруження розраховували за формулою:

$$S_{\text{вн}} = \frac{DhEt^3}{3l^2(t + Dt)Dt} \text{ Equation.DSMT4},$$

де  $\Delta h$  – відхилення вільного кінця консолі, мм;

$E$  – модуль пружності підложки, МПа;

$t$  – товщина підложки, мм;

$l$  – довжина плівки, мм;

$\Delta t$  – товщина плівки, мм.

Покриття наносили на основу у вигляді пластинки з пружної сталі з відомими фізико-механічними характеристиками, розмірами 80×15 мм та товщиною 0,25...0,3 мм. Товщину висушеного покриття  $\Delta t$  визначали як середнє арифметичне значення трьох вимірювань, виконаних уздовж довжини консольного зразка.

Методи визначення ступеня структурованості. Ступінь структуроутворення матеріалів і покриттів оцінювали за вмістом гель-зольної фракції. Метод ґрунтується на здатності частинок матеріалу (тонких плівок), які не включені до полімерної сітки, вимиватися органічними розчинниками в екстракторі Сокслета, що працює в автоматичному режимі [10, 12].

Пластинчасті зразки розмірами 20×30 мм і товщиною до 0,5 мм екстрагували в ацетоні протягом 8 годин, а потім висушували до постійної маси при 393 К. Масу проб до і після екстракції визначали на аналітичних лабораторних вагах з точністю до 0,0001 г. Вміст золь-фракції та гель-фракції в плівці наповненої дисперсними частинками визначали за формулою:

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

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

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 14   |

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 пробного зразка передбачає отримання однорідної полімерної композиції, що складається з необхідних компонентів у заданих співвідношеннях. Виходячи з об'єму дослідної проби, розраховують масову кількість інгредієнтів у перерахунку на 100 мас. ч. епоксидної смоли ЕД-20.

На кожному етапі приготування композицію ретельно перемішують для забезпечення максимальної однорідності системи. Для перемішування застосовують низькі швидкості обертання мішалки, що дозволяє уникнути локального перегріву суміші та зменшити насичення її повітрям.

Отриманий склад наносять на попередньо підготовлену поверхню або заливають у спеціальні форми. Перед нанесенням поверхню обробляють абразивними матеріалами для створення необхідної шорсткості та забезпечення кращої адгезії, після чого проводять знежирення ацетоном.

Твердіння епоксидних композитів за нормальних умов триває близько 24 годин. Для покращення структури та підвищення експлуатаційних характеристик додатково застосовують термічну обробку в електропечі. При цьому температурний режим підтримується з точністю не гірше  $\pm 2$  К, що забезпечує стабільність процесу формування полімерної сітки та зменшення внутрішніх напружень у матеріалі.

Таким чином, контроль умов змішування, підготовки поверхні та режимів твердіння є ключовим фактором отримання якісних епоксидних композицій із стабільними фізико-механічними властивостями.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 15   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

### РОЗДІЛ 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТУПІНЧАСТОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ ПОЛІМЕРІВ

### 3.1. Дослідження фізико-механічних властивостей

Для визначення оптимального режиму структурування епоксидних полімерів шляхом термічної обробки було досліджено вплив основних технологічних параметрів, а саме часу витримки, температури нагрівання та швидкості нагріву, на фізико-механічні властивості отриманих матеріалів.

На першому етапі структурування було прийнято режим формування, за якого зразки піддавали нагріванню в електропечі при температурах 313 К, 343 К та 373 К з витримкою 20 хвилин для кожного температурного режиму.

Результати експериментів показали, що нагрівання до температури 313 К є недостатнім, оскільки в цих умовах епоксидна композиція не досягає повного ступеня твердіння. Зразки, отримані при температурі 343 К, характеризуються прозорою структурою з наявністю окремих повітряних включень на поверхні. Їх утворення пов'язане з потраплянням повітря під час механічного змішування компонентів, яке через високу в'язкість системи не встигає повністю видалитися до початку процесу твердіння.

У процесі нагрівання спостерігається зниження в'язкості композиції, що сприяє частковому підняттю та виходу повітряних бульбашок. Водночас відбувається активне структурування полімерної системи та перехід у твердий стан, у результаті чого частина газових включень фіксується в об'ємі матеріалу.

При підвищенні температури до 373 К відбувається інтенсивне виділення летких компонентів, що супроводжується активним газоутворенням, утворенням численних бульбашок і частковим витісненням композиції з форми. Таким чином,

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 16   |

надмірно високий тепловий вплив при 373 К призводить до «кипіння» та спінювання полімерної системи (рисунок 3.1), що негативно позначається на якості структури матеріалу.



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд зразка епоксиполімеру, структурованого шляхом нагрівання до температури 373 К без попередньої витримки за кімнатної температури

Епоксидні полімери, піддані термічній обробці після витримки в нормальних умовах протягом 1 години та нагріванні до температури 393 К, за зовнішнім виглядом були подібні до зразків, які не проходили попередню витримку за кімнатної температури. Водночас інтенсивність спінювання в таких зразках була значно меншою, що свідчить про більш стабільний перебіг процесу структурування.

Перед нагріванням до 393 К зразки додатково витримували на повітрі протягом 2 годин, що сприяло частковому завершенню процесів

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 17   |

структурування. У результаті отримані матеріали характеризувалися однорідною структурою, задовільним зовнішнім виглядом та відсутністю видимих пухирців і деформацій (рисунок 3.2).

Під час нагрівання при 313 К полімерна система залишалася прозорою та практично не містила повітряних включень, що пояснюється оптимальною в'язкістю композиції та рівномірним перебігом процесу твердіння.

У зразках, структурованих при температурах 343 К і 373 К, попередня витримка за нормальних умов сприяла зменшенню інтенсивності спінювання порівняно з матеріалами без такої витримки. Це пов'язано з тим, що на момент термічної обробки частина хімічних зв'язків уже сформувалася, система стала більш стабільною та щільною, що у подальшому забезпечило більш рівномірне завершення процесів зшивання полімерної сітки.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 18   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |



Рисунок 3.2 – Загальний вигляд зразка епоксиполімеру, структурованого шляхом нагрівання до температури 373 К після попередньої витримки за кімнатної температури протягом 2

Оскільки температура 313 К є оптимальною для початкових стадій структуроутворення, доцільно дослідити вплив ступінчастого режиму нагрівання (313 К + 343 К + 373 К) із витримкою 20 хв на кожному етапі, а також порівняти його з варіантами без витримки та з попередньою витримкою при 293 К протягом 1 години.

Запропонована схема термічної обробки сприяє «фіксації» дрібних повітряних бульбашок у об'ємі зразка, які стають нерухомими внаслідок підвищення в'язкості та поступового протікання процесів зшивання полімерної сітки. Епоксидні композиції, попередньо витримані при 293 К, за зовнішнім виглядом практично не відрізняються від зразків, отриманих без стадії витримки,

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 19   |

що свідчить про незначний вплив цього етапу на макроскопічну структуру матеріалу.

Таким чином, можна зробити висновок, що епоксидні полімерні матеріали демонструють підвищені механічні характеристики за умов формування в режимі прогресивного твердіння. Отримані за такою технологією полімери характеризуються розвиненою тривимірною сітчастою структурою, що забезпечує високу термоокиснювальну стійкість, підвищену термостійкість та ударну в'язкість.

Структурування із застосуванням ступінчастого нагрівання сприяє релаксації залишкових напружень завдяки поступовій перебудові надмолекулярної структури. Водночас зі збільшенням швидкості охолодження спостерігається зростання залишкових напружень через пригнічення релаксацийних процесів і нерівномірний перерозподіл структурних елементів у полімерній матриці. Крім того, швидкість нагрівання суттєво впливає на початкові стадії формування хімічних зв'язків, однорідність розподілу компонентів у системі, а також на характер і величину внутрішніх напружень у матеріалі.

Важливим етапом оптимізації процесу структуроутворення епоксидних полімерів є також контроль стадії охолодження на початкових етапах формування сітчастої структури, що забезпечує ефективну релаксацію напружень. Як раціональний варіант реалізації процесу рекомендується ступінчаста схема термообробки, наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Режим ступінчастої термічної обробки

| 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           |

Структурування за запропонованою ступінчастою схемою термообробки (рисунок 3.3) сприяє формуванню матеріалів із підвищеним вмістом дрібнодисперсних повітряних включень у об'ємі. Це пояснюється різким переходом до температури 343 К після стадії охолодження, що активізує процеси зшивання полімерної матриці та призводить до часткового «запечатуння» повітряних бульбашок у структурі матеріалу.

Ступінчаста термічна обробка із додатковою стадією повторного нагрівання після охолодження до температури 393 К (таблиця 3.2) дала змогу отримати епоксиполімери без видимих повітряних включень (рисунок 3.4), що свідчить про більш оптимальний режим термічного формування та покращення якості структури матеріалу.

Було також проведено оцінювання руйнування, зумовленого внутрішніми напруженнями в епоксидних полімерах, структурованих при 313 К без попередньої витримки за кімнатної температури. У цьому випадку спостерігалася недостатня завершеність процесів зшивання полімерної матриці, що призводило до підвищеної чутливості матеріалу до внутрішніх напружень.

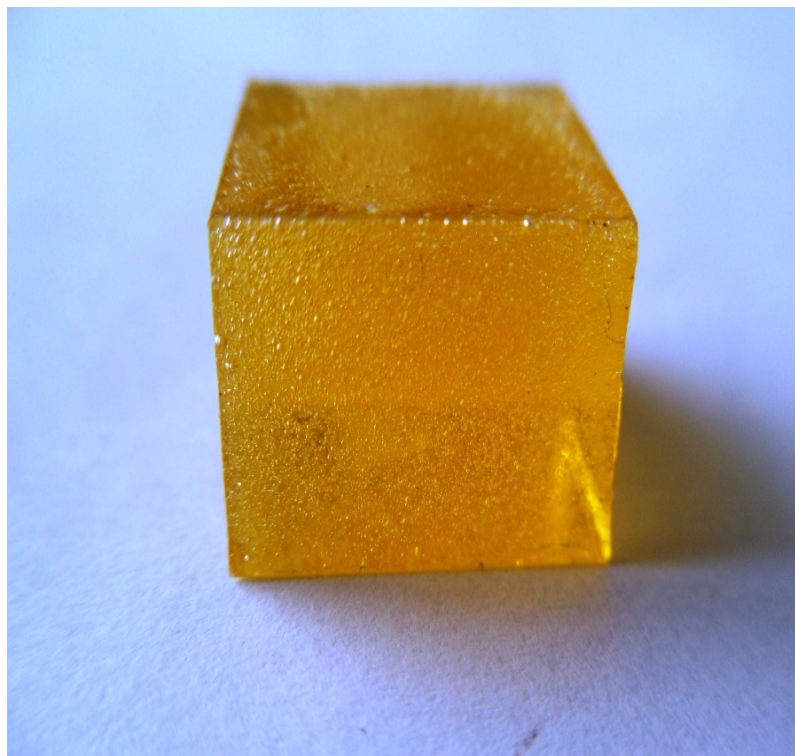


Рисунок 3.3 – Загальний вигляд зразка епоксиполімеру структурованого за режимом таблиці 3.1.

Нагрівання до 343 К забезпечувало більш повне структурування системи навіть без попереднього витримання композиції в нормальних умовах. Водночас формування матеріалу при 373 К без стадії витримки за кімнатної температури призводило до істотного зростання внутрішніх напружень – у 2,7 раза, що пов'язано з інтенсивним утворенням локальних хімічних зв'язків і нерівномірним протіканням процесу зшивання.

Встановлено, що витримка при кімнатній температурі протягом 1 години з подальшим нагріванням до 343 К також спричиняє підвищення рівня внутрішніх напружень у порівнянні зі зразками без витримки. Це пояснюється тим, що вже при температурі 313 К починається часткове структурування полімерної матриці. У результаті протягом години витримки відбувається поступове формування первинних зв'язків, що супроводжується накопиченням внутрішніх напружень у системі ще до основної стадії термічної обробки.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 22   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

Таблиця 3.2 – Процес ступінчастої термічної обробки

| 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           |

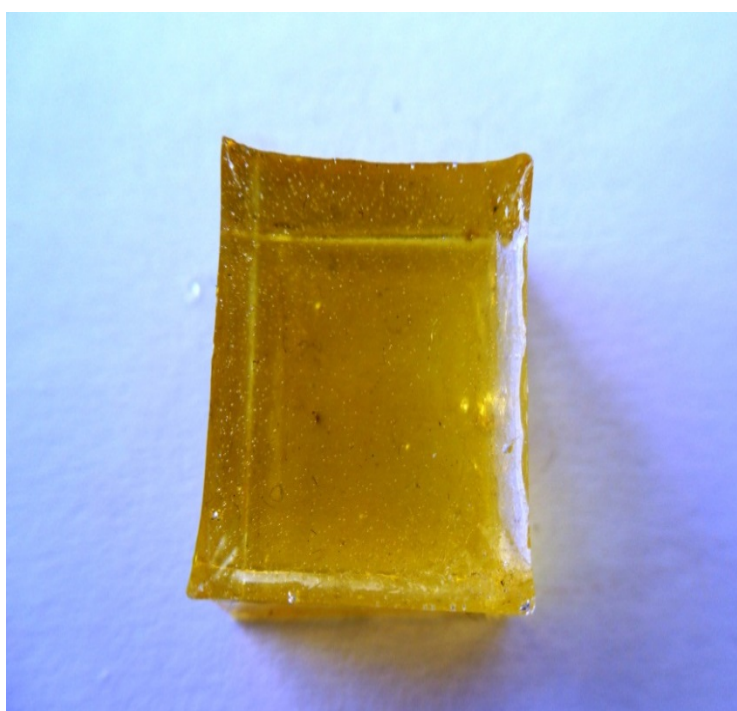


Рисунок 3.4 – Загальний вигляд зразка епоксиполімеру структурованого за режимом таблиці 3.2

Незважаючи на те, що процес структуроутворення розпочинається вже за сприятливих умов, його інтенсивність зростає приблизно у 1,7 раза порівняно зі зразками без попередньої експозиції. Це, ймовірно, зумовлено формуванням додаткових хімічних зв'язків у полімерній матриці внаслідок прискорення релаксаційних процесів після 1-годинної витримки за кімнатної температури.

Утворення нових зв'язків супроводжується виникненням внутрішньо напруженого стану, оскільки процес зшивання відбувається поступово в об'ємі матеріалу протягом періоду витримки.

Епоксидні полімери, структуровані при 373 К як без попередньої витримки, так і після витримки протягом 1 години за кімнатної температури, характеризувалися близькими значеннями внутрішніх напружень. Це пояснюється тим, що температура 373 К забезпечує інтенсивний перебіг реакцій зшивання та формування максимальної кількості хімічних вузлів просторової сітки. У результаті кількість утворених зв'язків значно перевищує їх число, що формується лише під час 1-годинної експозиції за нормальних умов.

Найменші значення внутрішніх напружень (рисунок 3.5) спостерігалися в епокси полімерах, структурованих при 313 К з попередньою витримкою за нормальних умов протягом 1 години ( $\sigma_{\text{вн}}=0,11$  МПа).

Також встановлено, що епоксидні полімери, отримані при різних температурах (313 К, 343 К та 373 К), демонструють найнижчий рівень внутрішніх напружень після 2 годин витримки за кімнатної температури. Це пов'язано з тим, що процес структуроутворення розпочинається ще на стадії витримки та протікає поступово і рівномірно, а подальша термічна обробка лише завершує формування просторової сітки. У результаті відбувається більш рівномірний розподіл хімічних зв'язків у різних мікрооб'ємах матеріалу та зниження рівня внутрішніх напружень.

Встановлено, що зі збільшенням тривалості витримки за кімнатної температури зростає вміст гель-фракції (рисунок 3.6). Низькі значення гель-фракції пояснюються повільним перебігом реакцій зшивання при 313 К, однак уже впродовж першої та другої години витримки ці процеси поступово активізуються, що призводить до підвищення ступеня структурованості.

При нагріванні до 343 К після попередньої витримки протягом 1 години вміст гель-фракції становив  $G=70,5$  %, що обумовлено інтенсифікацією утворення хімічних зв'язків при даній температурі.

Для зразків, структурованих при 343 К після витримки 1 та 2 години за

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 24   |

кімнатної температури, значення гель-фракції становили відповідно  $G=73,4\%$  та  $G=86,7\%$ . Це пояснюється тим, що триваліша попередня витримка забезпечує формування більшої кількості первинних структурних вузлів ще до основної стадії термічного твердіння, а подальше нагрівання при  $343\text{ K}$  сприяє їх інтенсивному розвитку та завершенню просторового зшивання полімерної матриці.

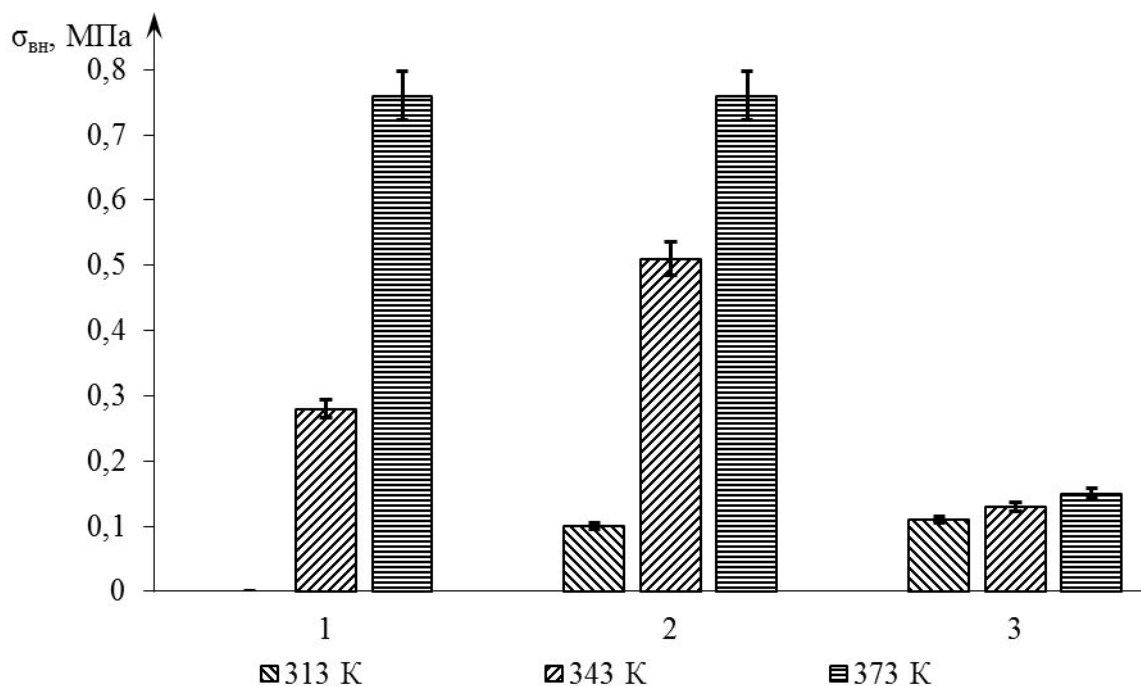


Рисунок 3.5 – Залежність внутрішніх напружень епоксиполімерів від часу структурирування з попередньою витримкою за температури  $293\text{ K}$ : 1 – без витримки; 2 – 1 год; 3 – витримка 2 год

Структурирування при температурі  $373\text{ K}$  забезпечує досягнення максимального вмісту гель-фракції в системі, який знаходиться в межах  $83,5\ldots 86,7\%$  і залежить від тривалості попередньої витримки за кімнатної температури. За таких умов інтенсивний тепловий вплив сприяє активному утворенню хімічних зв'язків, що ініціює та прискорює процес полімеризації.

Незалежно від тривалості витримки епоксидного полімеру при кімнатній температурі, при  $373\text{ K}$  спостерігається значне зростання швидкості реакцій

зшивання та формування максимально можливої кількості просторових хімічних зв'язків у полімерній матриці. Різниця між отриманими значеннями вмісту гель-фракції становить близько 3,6 %, що знаходиться в межах експериментальної похибки та не є суттєвою.

Таким чином, можна зробити висновок, що технологічно доцільними є два альтернативні режими обробки: або нагрівання епоксидного полімеру до 373 К без попередньої витримки при кімнатній температурі, або нагрівання до 343 К з подальшою витримкою за кімнатної температури протягом 2 годин. Обидва підходи забезпечують формування матеріалу з високим ступенем структурованості та стабільними експлуатаційними характеристиками.

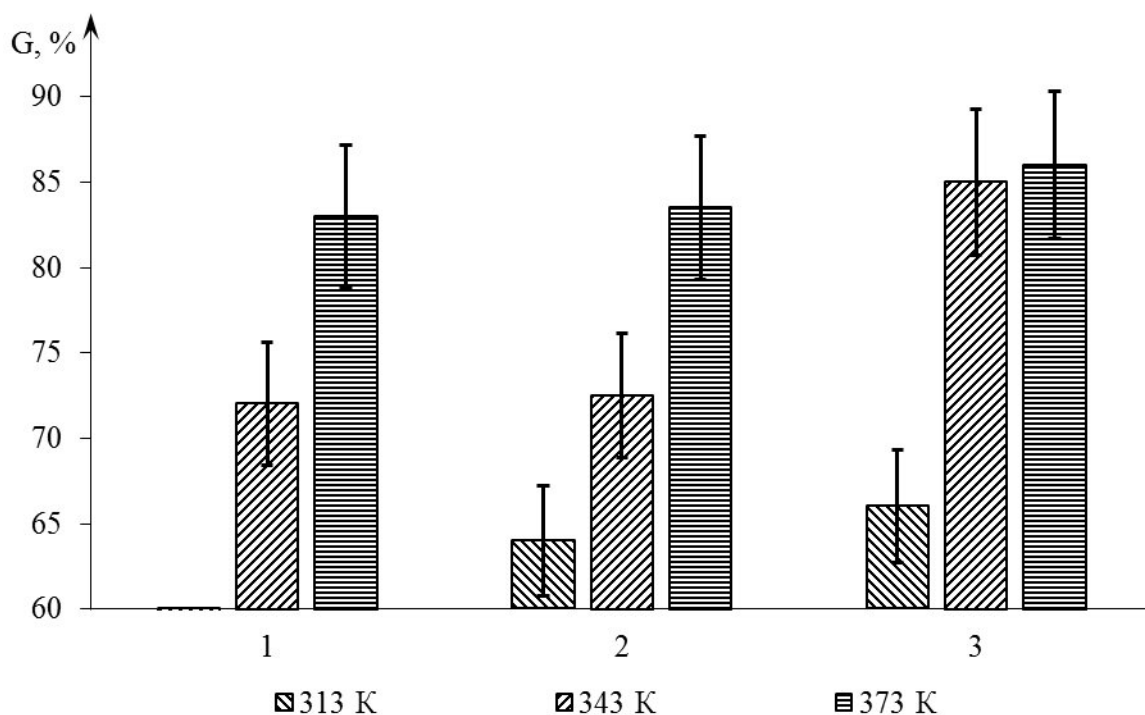


Рисунок 3.6 – Залежність вмісту гель-фракції епоксиполімерів від режиму структурування з попередньою витримкою за температури 293 К: 1 – без витримки; 2 – 1 год; 3 – 2 год

Наступний етап досліджень був спрямований на зниження рівня внутрішніх напружень у системі (рисунок 3.7) та одночасне підвищення вмісту гель-фракції в епоксидному полімері, структурованому при 373 К із подальшою

витримкою за кімнатної температури протягом 1 години. З цією метою процес термічної обробки було поділено на кілька послідовних стадій, включаючи проміжне охолодження зразків на повітрі після нагрівання до 313 К. Скорочення часу витримки за кімнатної температури до 1 години розглядається як більш технологічно доцільний режим формування виробів з епоксидних полімерів.

Встановлено, що після попередньої витримки при 313 К подальше нагрівання до кінцевої температури 373 К призводить до різкого зростання внутрішніх напружень у матеріалі ( $\sigma_{\text{вн}}=0,86$  МПа) при охолодженні до кімнатної температури. У випадку застосування аналогічної схеми з 1-годинною витримкою за кімнатної температури спостерігається незначне зниження внутрішніх напружень (приблизно на 9,3 %). Це пояснюється тим, що температура 373 К забезпечує високу швидкість полімеризації та інтенсивне формування просторової сітки, а розподіл утворених хімічних зв'язків у об'ємі стає практично незалежним від попереднього стану системи.

Експериментальні результати показали, що величина внутрішніх напружень у зразках, отриманих за другим режимом (рисунок 3.7), практично не відрізняється від першого режиму. Подальше розміщення епоксидного полімеру в камерній печі також не призводить до суттєвих змін після стадії охолодження, оскільки при 313 К процес полімеризації сповільнюється, але водночас продовжується утворення хімічних зв'язків.

Натомість встановлено, що при використанні третього та четвертого режимів (рисунок 3.7), які передбачають повторне поступове нагрівання після охолодження, рівень внутрішніх напружень може бути знижений на 39...55 %. Це пов'язано з тим, що при повторному нагріванні до 313 К після стадії охолодження відбувається інтенсифікація релаксацийних процесів за рахунок підвищення рухливості сегментів макромолекулярних ланцюгів. У цих умовах матеріал отримує достатню теплову енергію для перебудови надмолекулярної структури та формування більш рівномірної просторової сітки без локального перенапруження в окремих мікрооб'ємах.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 27   |

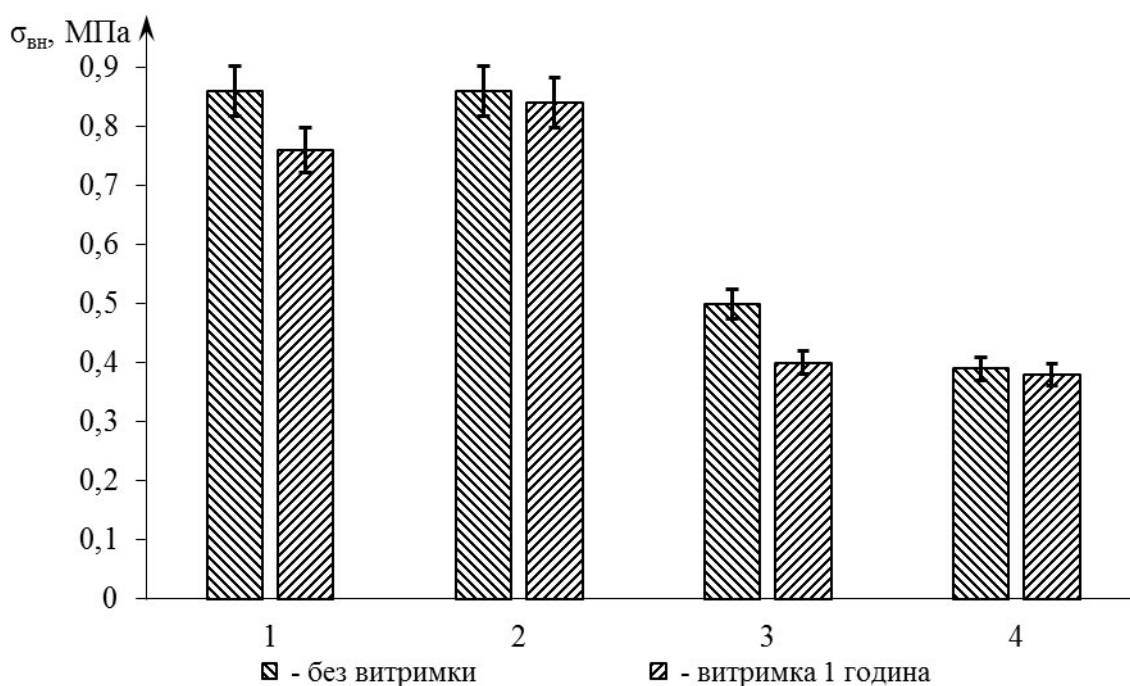


Рисунок 3.7 – Залежність внутрішніх напружень епоксиполімерів від режиму структурування з нагрівом до кінцевої температури 373 К: 1 – нагрівання до 313 К; 2 – нагрівання до 313 К + охолодження; 3 – нагрівання до 313 К + охолодження + нагрів до 313 К; 4 – нагрівання до 303 К + охолодження + нагрів до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

Епоксиполімери, структуровані за режимом 1 без попередньої витримки (рисунок 3.8), характеризуються мінімальним вмістом гель-фракції – 69,37 %, що пояснюється недостатнім ступенем утворення просторової сітки за відведений час та неповним розвитком реакцій зшивання.

Для режиму 2 спостерігається підвищення даного показника, що зумовлено більш сприятливими умовами структуроутворення та рівномірнішим перебігом процесу полімеризації.

Зростання вмісту гель-фракції в зразках, отриманих за режимами 3 і 4, пов'язане зі здатністю системи більш повно та рівномірно формувати просторові хімічні зв'язки за умов тривалішого термічного впливу під час нагрівання.

У випадку попередньої витримки епоксидних полімерів протягом 1 години за кімнатної температури перед термічною обробкою відбувається додаткове

збільшення вмісту гель-фракції. Це зумовлено частковим формуванням первинних структурних зв'язків уже на стадії витримки, що створює передумови для подальшого більш інтенсивного та впорядкованого процесу зшивання під час нагрівання.

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

Епоксидні полімери, сформовані за режимом 1 (рис. 3.9), характеризуються найнижчими значеннями твердості, що зумовлено підвищеним рівнем внутрішніх напружень та недостатнім ступенем структурної організації полімерної матриці.

Застосування режимів 2 і 3 призвело до істотного підвищення твердості матеріалу – приблизно у 2,3 раза. Це пояснюється збільшенням вмісту гель-фракції та більш повним формуванням просторової сітчастої структури в епоксидно-полімерній системі.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 29   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

У випадку зразків, отриманих за режимом 2, додаткове поступове нагрівання після стадії охолодження не забезпечило суттєвого зростання твердості. Це пов'язано з незначною зміною вмісту гелеподібної фракції, а також із тим, що при аналізі динамічних властивостей матеріалу спостерігалось більш виражене зниження внутрішніх напружень, ніж приріст ступеня зшивання, що й обмежувало подальше зростання твердості.

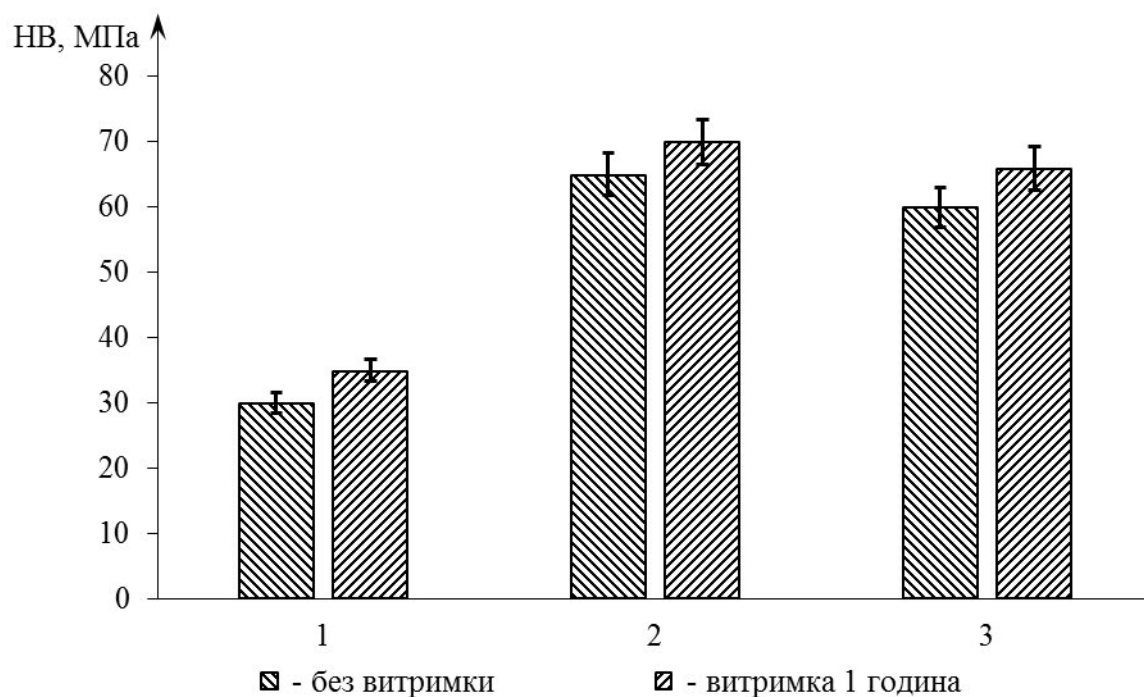


Рисунок 3.9 – Залежність твердості епоксиполімерів від режиму формування за кінцевої температури нагрівання 373 К:  
 1 – нагрівання до 313 К; 2 – нагрівання до 313 К + охолодження;  
 3 – нагрівання до 313 К + охолодження + нагрів до 313 К

## РОЗДІЛ 4

### ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕЖИМИ СТРУКТУРУВАННЯ ТА ФОРМУВАННЯ ЕПОКСИДНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

#### 4.1. Технологічні особливості отримання епоксидних полімерних покриттів

Процес формування епоксидного полімерного покриття включає основні та допоміжні технологічні операції. До основних етапів належать процеси, що безпосередньо визначають якість кінцевого покриття, зокрема підготовка поверхні виробу перед нанесенням матеріалу та стадія твердіння (структурування) покриття. Допоміжні операції спрямовані на забезпечення стабільності технологічного процесу та покращення властивостей системи і включають приготування композиції та технологію змішування компонентів.

Якість та довговічність епоксидних покриттів значною мірою визначається станом поверхні основи, оскільки саме підготовка поверхні часто є вирішальним фактором експлуатаційного ресурсу матеріалу. Належне очищення та активація поверхні забезпечують високу адгезію та рівномірність нанесеного шару, тоді як недостатня підготовка призводить до виникнення дефектів, зниження міцності та передчасного руйнування покриття.

Важливою стадією технологічного процесу є нанесення епоксидної композиції. Застосування сучасних автоматизованих методів нанесення дозволяє максимально реалізувати потенційні властивості матеріалу, підвищити однорідність шару та мінімізувати втрати сировини. Саме на цьому етапі значною мірою формується майбутня структура покриття та його експлуатаційні характеристики.

Підготовчі операції включають сушіння, просіювання та дозування компонентів, послідовність яких залежить від властивостей вихідних матеріалів і технології змішування. Сушіння є однією з ключових операцій у виробництві епоксидних матеріалів, оскільки видалення вологи з наповнювачів і компонентів

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 31   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

забезпечує стабільність реакцій твердіння та покращує фізико-хімічні властивості системи. Найчастіше застосовують конвекційне сушіння в сушильних шафах із використанням нагрітого повітря.

Просіювання наповнювачів необхідне для видалення сторонніх домішок і забезпечення однорідності дисперсної фази. Це дозволяє підвищити якість змішування та зменшити ризик утворення дефектів у готовому покритті.

Дозування компонентів здійснюється відповідно до розрахованої рецептури з використанням точних вагових або об'ємних методів. Порушення пропорцій, зокрема надлишок наповнювача або зв'язуючого, призводить до погіршення механічних характеристик, зниження зносостійкості або підвищення крихкості матеріалу.

Змішування є ключовою технологічною операцією, що визначає однорідність системи та, відповідно, властивості кінцевого продукту. У процесі механічного перемішування забезпечується рівномірний розподіл компонентів у композиції. Для цього застосовують роторні або планетарні змішувачі, у які компоненти вводяться послідовно з контрольованою швидкістю. Однорідність системи є необхідною умовою формування покриттів із стабільними фізико-механічними характеристиками.

Окрему роль відіграє підготовка поверхні основи. Вона включає видалення оксидів, продуктів корозії, мастильних і забруднюючих речовин. Метод підготовки вибирають залежно від матеріалу виробу, його геометрії, стану поверхні та вимог до експлуатації покриття. Найпоширенішими є механічні та хімічні методи очищення.

До механічних методів належить піскоструминна обробка, яка забезпечує ефективне видалення корозії, старих покриттів і забруднень за допомогою абразивно-повітряної суміші. Такий спосіб дозволяє отримати розвинену шорстку поверхню, що значно підвищує адгезію покриття та його довговічність [14].

Хімічні методи включають знежирення, травлення та фосфатування. Знежирення здійснюється із застосуванням лужних розчинів, органічних розчинників або емульсій і спрямоване на видалення жирових забруднень, солей

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 32   |

та залишків технологічних речовин. Для підвищення ефективності процесу використовують поверхнево-активні речовини.

Нанесення епоксидних матеріалів здійснюється сучасними методами – пневматичним, безповітряним або електростатичним розпиленням, а також електроосадженням. Основною тенденцією є автоматизація процесу, що дозволяє підвищити якість покриття, знизити втрати матеріалу та покращити умови праці. Формування аерозольного потоку та його осадження на поверхню є складним фізико-хімічним процесом, який визначається в'язкістю системи, поверхневим натягом та характеристиками розпилення.

Завершальним етапом є твердіння епоксидного покриття, яке визначає його остаточні експлуатаційні властивості. Застосовують природне та штучне твердіння. Природне твердіння відбувається при кімнатній температурі, однак характеризується тривалістю процесу та обмеженими можливостями регулювання структури. Штучне твердіння здійснюється шляхом термічної або комбінованої обробки, що дозволяє прискорити процес структуроутворення та покращити властивості матеріалу.

Найбільш ефективним є термічне твердіння в електропечах або з використанням інфрачервоного випромінювання. При цьому забезпечується контрольований тепловий вплив, рівномірне прогрівання матеріалу та зниження рівня внутрішніх напружень, що сприяє отриманню покриттів з високими фізико-механічними та експлуатаційними характеристиками [15].

#### 4.2. Технологічний процес формування захисних епоксиполімерних покриттів

Антикорозійні покриття для захисту металів є багатошаровими системами, що можуть включати різні матеріали з відмінним хімічним складом, структурою та експлуатаційними характеристиками. Послідовність технологічних операцій отримання таких покриттів визначається вимогами до зовнішнього вигляду

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 33   |

виробу, умовами його подальшої експлуатації, а також економічною ефективністю процесу.

Формування епоксидного полімерного покриття здійснюється шляхом нанесення підготовленої композиції на попередньо знежирену та механічно оброблену металеву поверхню. Товщина нанесеного шару становить 250...350 мкм. Після нанесення проводять процес твердіння в аеродинамічній печі при температурі близько 100 °С за умов примусової циркуляції повітря (ввімкнений вентилятор), що забезпечує рівномірний тепловий вплив і стабільне структурування полімеру. Завершальним етапом є охолодження покриття в нерухомому повітряному середовищі.

Отримані епоксидні полімерні покриття характеризуються достатньо високою термостійкістю та можуть ефективно експлуатуватися в температурному діапазоні 80...100 °С, забезпечуючи надійний захист металевих поверхонь від корозійного руйнування.

Процесу формування епоксиполімерного захисного покриття наведено в таблиці 4.1.

Підготовка формувальних матеріалів передбачає попереднє приготування всіх компонентів епоксидної системи. На цьому етапі здійснюють введення твердника ПЕПА в епоксидну смолу ЕД-20 у строго визначених пропорціях відповідно до рецептури. Отриману композицію ретельно перемішують при мінімальній швидкості обертання протягом 6...10 хвилин, що дозволяє забезпечити рівномірний розподіл компонентів та запобігти інтенсивному тепловиділенню і передчасному початку реакції зшивання.

Після приготування епоксидну композицію наносять на форму або поверхню виробу та завантажують в електропіч для проведення термічної обробки. Процес твердіння здійснюється за ступінчастим режимом: попереднє витримання при 313 К протягом 20 хвилин з подальшим нагріванням до 313 К і повторною витримкою протягом 20 хвилин. Така схема дозволяє забезпечити поступове формування структури матеріалу та зменшити внутрішні напруження.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 34   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

Таблиця 4.1 – Технологічний процес формування захисних епоксиполімерних покриттів

| Номер операції | Назва операції | Структура операції                                                                                                                                                                                                                               | Обладнання, матеріали                                                               |
|----------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 005            | Заготівельна   | 1 Провести дозування компонентів<br>2 Змішати епоксидно-діанову смолу з твердником                                                                                                                                                               | Ваги, ГОСТ 19491-74<br>Шнековий змішувач                                            |
| 010            | Формувальна    | 1 Підготувати поверхню заготовки для нанесення покриття<br>2 Знежирити поверхню в місцях нанесення покриття<br>3 Провести формування шару покриття                                                                                               | Шліфувальний папір<br>Ацетон<br>Фарбувальний апарат високого тиску<br>“Фініш – 211” |
| 015            | Термічна       | 1 Ввімкнути піч та вентилятор всередині печі<br>2 Завантажити деталі в піч і провести термообробку за наступним режимом: 20 хв при 313 К + охолодження на повітрі + 20 хв при 313 К<br>3 Вийняти деталі та охолоджувати їх на спокійному повітрі | Електрична піч                                                                      |
| 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<br>2 Проконтролювати розміри                                                                                                                                                                              | Шліфувальний верстат<br>Штангенциркуль                                              |
| 030            | Маркування     | 1 Нанести відповідне клеймо                                                                                                                                                                                                                      | Фарба, трафарет                                                                     |

На наступному етапі готові вироби проходять контроль якості, який включає перевірку на відсутність дефектів, відповідність геометричних розмірів та загальний стан поверхні. За результатами контролю продукція маркується і направляється на складські приміщення для зберігання.

Контроль якості включає також візуальний огляд отриманих деталей і контрольних зразків. Допускається незначна поверхнева шорсткість покриття, яка може бути усунута в процесі подальшої механічної обробки.

Водночас слід зазначити, що повторне фарбування, склеювання або інші ремонтні втручання для усунення дефектних ділянок готових виробів не допускаються, оскільки це може негативно вплинути на експлуатаційні властивості епоксидного покриття.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 36   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |

## ВИСНОВКИ

На основі аналізу літературних джерел узагальнено сучасні підходи до формування епоксидних полімерних матеріалів. Встановлено, що правильно підібрана схема твердіння заданого складу забезпечує отримання полімеру з оптимальним комплексом фізико-механічних характеристик. Обґрунтовані термічні режими впливу як під час процесу формування, так і на стадії післявідпрацювальної обробки, сприяють інтенсифікації релаксаційних процесів за рахунок регулювання ступеня зшивання полімерної матриці, що в кінцевому результаті позитивно впливає на механічні властивості матеріалу.

Отримані експериментальні результати свідчать, що найвищий рівень структурно-механічних властивостей досягається при формуванні епоксидного полімеру за режимом 3 (нагрівання до 313 К + охолодження + повторне нагрівання до 313 К). Даний режим забезпечує максимальний ступінь структурованості ( $G=97,8\%$ ) та підвищену твердість ( $HB=69,52$  МПа), а також сприяє зниженню внутрішніх напружень до  $\sigma_{\text{вн}}=0,42$  МПа. Це пов'язано з тим, що формування тривимірної сітчастої структури відбувається поступово та рівномірно, що забезпечує достатній час для перебудови макромолекулярних ланцюгів і реалізації конформаційних переходів.

У роботі також показано, що використання ступінчастого режиму нагрівання в електропечі створює технологічно сприятливі умови для керованого процесу структуроутворення епоксидних полімерних покриттів, що в підсумку забезпечує покращення їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 37   |

## 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. Демченко В.Л., Віленський В.О. Вплив постійних електричного і магнітного полів на структуру і термомеханічні властивості композитів на основі епоксидного полімеру і оксиду Fe(III) або Al(III).
4. Copson D. A. Microwave heating.— Avi, Westport, CT, 1975.
5. Jassie L. B., Kingston H. M. Microwave dissolution in closed vessels under elevated temperature and pressure.— Pittsburgh, 1985, Paper № 108A.
6. В.Попович, А.Кондир, Е. Плешаков та ін. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: Практикум: Навч. посібник. – Львів: Світ, 2009. – 552 с.
7. Chandrabhan Verma, Lukman O. Olasunkanmi, Ekemini D. Akpan, M.A. Quraishi, O. Dagdag, M. El Gouri, El-Sayed M. Sherif & Eno E. Ebenso 2020, Epoxy resins as anticorrosive polymeric materials: A review, Reactive and Functional Polymers, vol. 156, 104741.
8. Balázs Jakab, Ileana Panaitescu & Norbert Gamsjäger 2021, The action of fillers in the enhancement of the tribological performance of epoxy composite coatings, Polymer Testing, vol. 100, 107243.
9. Стухляк П.Д. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями / П.Д.Стухляк, А.В.Букетов, І.Г.Добротвор. – Тернопіль, Збруч, 2008. – 210с.
10. Савчук П.П., Кашицький В.П. Технологічні основи формування термостійких епоксикомпозитних покриттів триботехнічного призначення //

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   | 38   |

Матеріали 24-ї міжнародної конференції і виставки. – Київ: УІЦ “Наука. Техніка. Технологія”. – 2004. – С. 202.

11. Сергєєв В.П. Базальтові волокнисті матеріали та композити на їх основі матеріали XXI століття // Наука та інновації. – 2005. – № 6. – С. 91-101.

12. Wang, Y., & Li, X. (2017). "Recent Advances in Polymer-Based Thermal Insulation Materials." Polymer Composites, 28(2), 155-167.

13. Колупаев Б.С. Физико-химия полимеров. – Львів: Вища школа, 1980. – 154 с.

14. Анохін В.В. Хімія і фізико-хімія полімерів. – К.: Вища школа, 1971. – 372 с.

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

|      |      |          |        |      |                   |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------|------|
|      |      |          |        |      | БР 5926.00.000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                   | 39   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                   |      |