

Міністерство освіти і науки України

**Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності
Кафедра матеріалознавства**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИПОЛІМЕРІВ
МОДИФІКОВАНИХ КРЕМНІЙОРГАНІЧНИМ
ЛАКОМ, ОБРОБЛЕНИМ В МАГНІТНОМУ ПОЛІ
/ PROPERTIES OF EPOXY POLYMERS
MODIFIED WITH ORGANOSILICON VARNISH
TREATED IN A MAGNETIC FIELD**

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Матеріалознавство»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМс – 31
КОЗАК Максим Михайлович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Садова Оксана Леонідівна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 20__ р.
к.т.н., професор
Гарант освітньої програми:
Кашицький Віталій Павлович

(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: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри

ІМБІРОВИЧ Н.Ю.

“___” _____ 20__ року

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

Козаку Максиму Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Властивості епоксиполімерів модифікованих кремнійорганічним лаком, обробленим в магнітному полі

керівник роботи Садова О.Л., к.т.н., доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

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

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

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

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

Слайд 1 – Завдання роботи і склад епоксиполімерів (1 л. ф. А4);

Слайди 2-5 – Дослідження властивостей епоксикомпозитних матеріалів (4 л. ф. А4);

Слайд 6 – Загальні висновки (1 л. ф. А4)

6. Консультанти розділів роботи

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Розділ 1. Технічне обґрунтування	05.05.2026 р.	
2	Розділ 2. Характеристика вихідних матеріалів та методики досліджень	12.05.2026 р.	
3	Розділ 3. Експериментальна частина	19.05.2026 р.	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Козак М.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Садова О.Л.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Козак М.М. Властивості епоксиполімерів модифікованих кремнійорганічним лаком, обробленим в магнітному полі. Рукопис.

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

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

У першому розділі даної роботи подано вплив модифікаторів на структуру та властивості епоксиполімерів та епоксикомпозитів. У другому розділі подано характеристики використовуваних матеріалів та методику дослідження фізико-механічних властивостей епоксикомпозитів. Приведено склад розроблених епоксиполімерів матеріалів, технологію їх формування та режим термічної обробки. У третьому розділі приведено дослідження Дослідження властивостей модифікованих епоксиполімерів на основі обробленої суміші епоксидної смоли з кремнійорганічним лаком марки КО-915Б в електромагнітному полі різної потужності.

Бакалаврська робота складається з пояснювальної записки та додатків. Пояснювальна записка містить 38 сторінок, 9 рисунків, 2 таблиці та включає список з 13 літературних джерел. Графічна частина складається з 6 листів формату А4, представлених у додатку А.

Ключові слова: епоксиполімер, поліетиленполіамін, кремнійорганічний лак, адгезійна міцність, міцність на стискання, ударна в'язкість.

					БР 3226.00.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Властивості епоксиполімерів модифікованих кремнійорганічним лаком, обробленим в магнітному полі	Літ.	Арк.	Акрушів	
Розробила	Козак						3	38	
Перевірив	Садова								
						ЛНТУ, каф. матеріалознавства гр. ПМс-31			
Н. Контр	Мисковець								
Затв.	Імбінович								

ANNOTATION

Kozak M.M. Properties of epoxy polymers modified with organosilicon varnish treated in a magnetic field. Manuscript.

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

Bachelor's qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, list of references and applications.

The first section of this work presents the influence of modifiers on the structure and properties of epoxy polymers and epoxy composites. The second section presents the characteristics of the materials used and the methodology for studying the physical and mechanical properties of epoxy composites. The composition of the developed epoxy polymer materials, the technology of their formation and the heat treatment regime are presented. The third section presents the study of the properties of modified epoxy polymers based on a processed mixture of epoxy resin with organosilicon varnish of the KO-915B brand in an electromagnetic field of various strengths. The bachelor's thesis consists of an explanatory note and appendices. The explanatory note contains 38 pages, 9 figures, 2 tables and includes a list of 13 literary sources. The graphic part consists of 6 A4 sheets, presented in Appendix A.

Keywords: epoxy polymer, polyethylene polyamine, organosilicon varnish, adhesive strength, compressive strength, impact strength.

					БП 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	4
1.1. Вплив методів модифікування на властивості і структуру полімеркомпозитів.....	4
1.2. Застосування кремнійорганічних сполук в якості модифікаторів полімеркомпозитів.....	6
1.3. Висновки та постановка завдань досліджень	10
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	15
2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів.....	15
2.2. Технологія формування епоксиполімерних матеріалів.....	16
2.3. Методи дослідження властивостей та структури.....	18
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	21
3.1 Дослідження властивостей модифікованих епоксиполімерів на основі обробленої суміші епоксидної смоли з кремнійорганічним лаком марки КО-915Б в електромагнітному полі потужності 125 Вт.....	21
3.2 Дослідження властивостей модифікованих епоксиполімерів на основі обробленої суміші епоксидної смоли з кремнійорганічним лаком марки КО-915Б в електромагнітному полі за потужності 250 Вт	28
ВИСНОВКИ.....	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	37
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Впровадження передових технологій у сучасне виробництво потребує підвищення надійності обладнання, яке працює під дією циклічних навантажень та високих температур. Для вирішення цього завдання все частіше застосовують полімерні композити, зокрема на основі епоксидних матриць, що зумовлює потребу в оптимізації їхнього складу задля покращення механічних властивостей.

Підвищити експлуатаційні характеристики таких матеріалів можна шляхом введення в олігомерні сполучні дисперсних або волокнистих наповнювачів різної природи. Іншим ефективним підходом є модифікація епоксидних композитів, яка дозволяє цілеспрямовано регулювати структуру полімеру, усувати його внутрішні дефекти та збільшувати міцність. Серед сучасних методів фізичного впливу особливу увагу привертає обробка епоксиолімерів силовими полями. Зокрема, застосування змінного магнітного поля під час затвердіння композицій є дієвим способом суттєвого підвищення міцнісних показників готового матеріалу.

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було використано інструменти штучного інтелекту для редагування та форматування тексту (пошук літературних даних) 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.

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

1.1. Вплив методів модифікування на властивості і структуру полімеркомпозитів

У даний час модифікація існуючих полімерів і отримання нових матеріалів на їх основі, є одним з актуальних напрямків промисловості. Перетворення, видозміну чого-небудь із набуттям нових властивостей, називають модифікацією. У першу чергу при модифікації потрібно зберегти кращі якості матеріалу, одночасно забираючи небажані та додаючи хороші якості. За допомогою модифікації можна направлено регулювати структуру полімерних в'язучих і усувати властиві їм недоліки, покращувати міцнісні властивості матеріалів, тощо [1].

Виділяють наступні методи модифікування полімерів: хімічні, фізико-хімічні і фізичні.

При фізико-хімічному модифікуванні змінюється молекулярна будова полімерів, а це також призводить до необхідності повторної оцінки всього комплексу властивостей. При фізичній модифікації залишаються сталими хімічний склад і молекулярна будова, а змінюється лише надмолекулярна структура матеріалів. Тобто, полімер залишається тим же, однак він має лише інші властивості, що визначаються його молекулярної впорядкованістю [2, 3].

Велику увагу сьогодні приділяють дослідженню матеріалів та виробів оброблених електрофізичними методами, які показали ефективність використання енергії надвисокочастотних (НВЧ) електромагнітних коливань.

Відомо, що обробка зовнішніми енергетичними полями, а саме високочастотним магнітним полем, покращує фізико-механічні та адгезійні властивості полімеркомпозитних матеріалів. Встановлено, що обробка

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

композицій у змінному електромагнітному полі невеликої частоти (до 20МГц) суттєво не впливає на адгезійну міцність полімерних захисних покриттів. Збільшення частоти височастотного електромагнітного поля із 20 до 60 МГц дозволяє підвищити адгезійну міцність на 5...10 %, при цьому максимального значення досягали при обробці матеріалу частотою 40 МГц. Подальше збільшення частоти призводить до зниження адгезійно-міцнісних характеристик, що пояснюють збільшенням залишкових напружень внаслідок зростання температури у процесі обробки [4].

Направлена введення безпечних наповнювачів з подальшою на частоту електромагнітної обробки дозволяє регулювати фізико-механічні властивості модифікованих матеріалів у широких межах.

у роботі [5] було досліджено епоксикомпозити з додаванням дрібнодисперсного наповнювача фериту та обробкою у магнітному полі, що сприяє підвищенню міцнісних характеристик композиту внаслідок покращення умов полімеризації.

В роботі [6] показано як НВЧ впливає на епоксикомпозити з наповнені карбідом бору і кремнію та діаманетиком лускатим графітом. Згідно з результатами досліджень встановлено, що опромінення НВЧ електромагнітним полем полем епоксидної матриці призводить до покращення міцності адгезійних з'єднань композиції зі сталеву основою. У зразків, які піддавалися впливу НВЧ електромагнітного поля спостерігали підвищення адгезійної міцності з'єднань, зокрема опромінення тривалістю 30 с призводить до максимального покращення характеристик адгезійної міцності з'єднань на 35 %. з 23 МПа до 32 МПа. Це можна пояснити виникненням зміщення позитивного заряду вздовж напрямку електричної складової поля, і негативного заряду у зворотному напрямку, в результаті чого на поверхні композиції, яка являється діелектриком, виникають електричні заряди, а отже, відбувається поляризація композиції. У зв'язку з цим виникають зв'язані заряди на поверхнях композиції, які взаємодіють із

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зарядами металевої основи, що позитивно впливає на «прилипання» композиції до підкладки. При обробці матеріалу більше 30 с спостерігали екзотермічні ефекти, що негативно впливають на процеси структуроутворення при формуванні епоксиполімеру. Аналізуючи результати досліджень залежності адгезійної міцності від тривалості НВЧ електромагнітної обробки встановлено, що максимальні адгезійні характеристики мають композитні матеріали, наповнені SiC, при дії електромагнітного поля надвисокої частоти протягом 60 с. Введення такого роду наповнювача дозволяє збільшити адгезійні характеристики матеріалу. Подальше збільшення тривалісності обробки не покращує показників адгезійної міцності композитів в складі яких є грубодисперсний SiC.

Виявлено, що матеріали, наповнені лускатим графітом, після 30 с НВЧ електромагнітної обробки володіють кращими показниками адгезійної міцності порівняно з необробленими зразками (на 22 %), проте дані покриття мають найнижчу адгезією до металевої основи, навіть в порівнянні з епоксидною матрицею. Це можна пояснити тим, що лускатий графіт має малу активність і питому площу поверхні, є діаманетиком, що формування навколо часток наповнювача шарів з дефектною структурою [7].

1.2. Застосування кремнійорганічних сполук в якості модифікаторів полімеркомпозитів

Кремнійорганічні сполуки знайшли широке застосування для виготовлення високоякісних теплостійких електроізолюючих матеріалів в кабельному виробництві, у виробництві електрогенераторів та інших електричних машин, трансформаторів, іншого електротехнічного обладнання. Застосування кремнійорганічних сполук в електротехніці дозволяє різко збільшити надійність роботи машин і устаткування, зменшити їх вагу, скоротити витрату матеріалів тощо. Часто і успішно кремнійорганічні

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

полімери використовуються в якості жаростійких антикорозійних покриттів для металів, що дозволяють працювати при температурах від -60 до +550 °С, для виготовлення дугостійкості і теплостійких пластичних мас і шаруватих діелектриків, а також у виробництві точного лиття, що не потребує механічної обробки. Рідкі полімери застосовуються для виготовлення різних мастильних речовин, гідравлічних і демпферних рідин, використовуваних в широкому діапазоні позитивних і негативних температур. Ущільнюючі матеріали на основі кремнійорганічних еластомерів дозволяють забезпечувати роботу агрегатів при температурі до 250 °С і вище.

Нині в Україні використання кремнійорганічного матеріалу знаходить широке застосування в галузі будівництва для надання водовідштовхувальних властивостей робочій поверхні будівельних матеріалів [8]. Однак дослідження стійкості таких матеріалів, тривалої дії води, особливо під певним постійним тиском води, не проводилися. Позитивні результати таких досліджень дають можливість вирішення проблеми отримання із них матеріалів для проведення гідроізоляційних робіт. Як модифікатори застосовують кремнійорганічні лаки, марки: КО-910, КО-915Б, КО-921, КО-923, КО-075 та продукт часткової поліконденсації лаку КО-08К (ТКОС), а також дигліциділовий ефір диетиленгліколю (ДЕГ-1) та полідиетилакрилат (ПДЕА-4) що являють собою розчини поліметилфеніл-силоксанової смоли в толуолі [9].

Модифікація епоксидних смол кремнійорганічними сполуками дозволяє значно покращити ударну в'язкість, діелектричні і антикорозійні властивості епоксидних полімерів і підвищити їх термостійкість до температури 220...250 °С.

Амінні затверджувачі, зв'язані з атомом кремнію, підвищують адгезійну міцність до таких елементів як алюміній і його сплави. При цьому значно підвищується хімічна стійкість і водостійкість матеріалів. Тому розробка нових затверджувачів зі збільшеною довжиною ланцюга між

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

атомами азоту, що містять у своїй структурі атоми кремнію, є актуальним завданням.

Складність модифікування кремнійорганічними сполуками полягає в тому, що у їх складі присутній розчинник, який знижує в'язкість композиції та забезпечує її технологічність. В процесі структурування під впливом підвищених температур відбувається інтенсивне випаровування розчинника, на місці локалізації якого утворюються пустоти. Це призводить до зниження когезійної міцності та ударної в'язкості системи на основі епоксидної матриці. Враховуючи вплив даного модифікатора доцільно використовувати добавки, які не змінюють свій склад в процесі формування композиції. Зокрема, дисперсні наповнювачі належать до комплексу добавок, які характеризуються високою технологічністю та можливістю модифікації структури реакційноздатних полімерів у широкому діапазоні наповнення [10, 11].

У роботі [6] встановлено, що найвищі значення межі міцності на стискання мають епоксиполімери, модифіковані кремнійорганічним лаком марки КО-915Б. Виявлено, що хімічний склад модифікатора значно впливає на міцність при стисканні епоксиполімерів. Найнижчі значення мають епоксиполімери модифіковані кремнійорганічними лаками КО-910 та КО-923, які містять у своєму складі поліефір. Очевидно, дана сполука перешкоджає утворенню необхідної кількості фізико-хімічних зв'язків між кінцевими групами епоксидної складової.

Подальші дослідження епоксиполімерів модифікованих кремнійорганічним лаком марки КО-915Б дозволяють отримати високі значення межі міцності на стискання через найвищий вміст в розчині нелетких речовин. Із 5 досліджуваних режимів обробки найкращі результати отримано для зразків оброблених в електромагнітному полі за потужності 120 Вт. Високі значення за даного режиму пов'язані з особливостями електромагнітних хвиль високої частоти проникати крізь розчин

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поліметилфенілсилоксану, в результаті чого відбувається одночасне нагрівання всього об'єму модифікатора та ефективне випаровування толуолу. Оптимальний вміст модифікатора становить 30 мас. ч., що пов'язано з можливістю утворювати додаткові фізико-хімічні зв'язки між кінцевими групами макромолекул епоксидної смоли та поліметилфенілсилоксану [12].

Значення твердості епоксиолімерів перебувають в кореляційному наближенні до значень міцності на стискання. Найвищі значення отримано для епоксиолімерів, що містять модифікатор з обробкою в електромагнітному полі. Це пояснюється низьким вмістом толуолу в епоксидній композиції, що забезпечує високий ступінь структурування епоксиолімерного матеріалу. В даному випадку усунуто перешкоду у вигляді молекул розчинника, що дозволяє утворювати додаткові вузли зшивання та формувати гнучку структуру. Найвищі значення вмісту гель-фракції зафіксовано в епоксиолімерах з цією ж обробкою ($G=97,3\%$). Це пов'язано з утворенням максимальної кількості фізико-хімічних зв'язків, внаслідок видалення значної частини толуолу під час обробки в електромагнітному полі. Найнижчі значення отримано в епоксиолімерах, що містять модифікатор без обробки, що пояснюється недостатнім енергетичним впливом на процес видалення толуолу [13].

Режими обробки модифікатора, які забезпечують ефективне видалення толуолу, сприяють підвищенню ударної міцності епоксиолімерів, що є важливим аспектом в процесі розробки епоксиолімерних матеріалів, які мають підвищену крихкість.

Модифікування епоксидних смол кремнійорганічним лаком є ефективним методом підвищення фізико-механічних характеристик епоксиолімерів за рахунок формування гнучкої просторової сітки з високою термічною стабільністю кремнійорганічного скелету, ароматичних й аліфатичних складових. Обробка кремнійорганічного модифікатора в електромагнітному полі забезпечила максимальне видалення толуолу, що

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

призводить до підвищення фізико-механічних характеристик на 29...74 % через термодинамічну сумісність компонентів системи, в якій утворюються додаткові зв'язки та гнучкі ланки макромолекул, що є стійкими до впливу динамічних навантажень.

Синтезовані нові кремнійорганічні амінні затверджувачі епоксидних олігомерів, що дозволяють модифікувати епоксиаміну матрицю за рахунок зниження функціональності вузла зшивання, введення гнучких міжвузлових ланцюгів і змісту в своїй структурі атомів кремнію, що призводить до істотного зниження температури склування полімерної матриці при забезпеченні високих гідрофобних і фізико-механічних властивостей композицій.

1.3. Висновки та постановка задач дослідження

У даний час в різних галузях широко використовуються композитні матеріали які привертають увагу науковців на їх подальше дослідження для покращення властивостей та експлуатаційних характеристик. Поліпшення епоксиполімерів можливе при різних методиках, одним з таких методів є модифікування епоксиполімерних матеріалів. Фізичне модифікування полімерів є недостатньо вивченим, що дає можливим для подальших досліджень.

Модифікування епоксидних смол кремнійорганічним лаком є ефективним методом підвищення фізико-механічних характеристик епоксиполімерів. Це дозволяє значно покращити ударну в'язкість, діелектричні і антикорозійні властивості епоксидних полімерів і підвищити їх термостійкість.

Одним з недоліків кремнійорганічних лаків є присутність розчинника та толуолу в складі, що знижує теоретично можливі характеристики

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

епоксиполімеру. Тому одним із способів позбутися цих недоліків є обробка електромагнітним полем.

В даній бакалаврській роботі необхідно було вирішити наступні завдання:

– дослідити вплив кремнійорганічного лаку марки КО-915Б, обробленого в електромагнітному полі на властивості епоксиполімерів залежно від тривалості обробки модифікатора;

– дослідити вплив кремнійорганічного лаку марки КО-915Б, обробленого в електромагнітному полі на властивості епоксиполімерів залежно від режимів термічної обробки епоксидних матеріалів;

– дослідити вплив потужності електромагнітного поля на обробку кремнійорганічного лаку марки КО-915Б та властивості епоксиполімерів.

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів

При виготовлені виробів на полімерній основі із використанням різнофункціональних наповнювачів головними компонентами є твердник, вихідний матеріал та наповнювач.

У якості полімерної матриці використовувалась епоксидна смола марки ЕД-20. Епоксидна смола являє собою синтетичну термореактивну смола полімеризація молекул в яких відбувається при додаванні заверджувача, в результаті чого маса необоротно твердне (зшивання полімерів). Затверділа маса є неплавною. Поліепоксидні смоли універсальні синтетичні продукти, вироби на основі яких характеризуються непоганими захисними, адгезійними, фізико-механічними та діелектричними властивостями.

Твердником у композитному матеріалі вибрано поліетилеполіамін (ПЕПА). За зовнішніми ознаками це рідина світло-жовтого до темно-бурого кольору без механічних включень допускається зеленувате забарвлення. ПЕПА призначений для застосування в якості затверджувачів епоксидних смол, у виробництві різних іонообмінних смол, присадок і в різних хімічних виробництвах.

В ролі модифікатора використано кремнійорганічний лак марки 915 (КО-915Б). Кремнійорганічний лак КО-915Б являє собою розчин поліметилфенолсилоксанової смоли, модифікований поліефіром в толуолі.

Особливості:

- малонебезпечна речовина (4 клас небезпеки);
- робоча зона в повітрі по толуолу – 150 мг./м³;
- пожежонебезпечна речовина.

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У таблиці 2.1 показано основні характеристики кремнійорганічного лаку КО-915Б (ТУ 6-02-709-76).

Таблиця 2.1 – Характеристики лаку КО-915Б

Найменування показників	Показники
В'язкість по віскозиметру ВЗ-246 (сопло 4 мм) при температурі 20 °С, с	30...70
Масова частка нелетучих речовин, %	63...67
Час висихання плівки лаку до 3 ступеня при (200 ± 3) °С, t	45...75
Електрична міцність плівки лаку, МВ/м, не менше:	
Термоелектричність плівки лаку при (200 ± 3) °С, не менше	320

З огляду на низькі адгезійні властивості кремнійорганічних полімерів і лакофарбових матеріалів на їх основі, вкрай важливим є забезпечення для кремнійорганічних покриттів оптимальної товщини. Зазвичай вона не повинна перевищувати 40...50 мкм. При більшій товщині покриття буде розтріскуватися або відшаровуватися від підкладки. Сушку кремнійорганічних покриттів зазвичай виробляють в сушильних шафах при нагріванні до температури 150...200 °С. При інтенсивному обдуванні пофарбованої поверхні виробу процес висихання пришвидшується.

Застосовується КО-915Б для органосилікатних матеріалів і виготовлення склотканин, проводів зі скловолокнуистою ізоляцією.

2.2. Технологія формування епоксиполімерних матеріалів

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.

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Формували композити різними способами:

– на першому етапі замішували епоксидну смолу з кремнійорганічним лаком, після чого дану суміш піддавали магнітній обробці; після охолодження матеріалу додається твердник ПЕПА. Обробку в магнітному полі застосовували для кремнійорганічного лаку при двох різних напругах: 125 Вт та 250 Вт.

Метод ручного викладання, яким ми користувались, використовують відкриту форму без застосування тиску. Форма точно відтворювала контур формованої деталі, це ознаки негативної форми. Щоб одержати форму, можна використовувати будь-які матеріали, що має достатню твердість і забезпечує одержання потрібної геометрії виробу в процесі виготовлення. Основна умова полягає в тому, щоб матеріал форми не піддався хімічному впливу смоли й шкідливо впливав на швидкість тверднення. Тверднення епоксиполімерів при нормальних умовах тривало 24 год. Після чого зразки піддаються термічній обробці.

З метою уникнення високих залишкових напружень проведено ступінчастий режим термічної обробки: 1 год при температурі 50 °С, 1 год при температурі 100 °С; кінцева температура становила 140 °С; 160 °С; 180 °С.

Сушильна шафа слугувала оснащенням для обробки матеріалів. Шафи сушильна лабораторні застосовуються в лабораторіях або на виробництві. Це універсальні шафи як для сушіння інструменту, реактивів, відпуску металу так і для стерилізації інструментів. Все це здійснюється під час переміщення повітряних мас усередині робочого простору. Повітряний вентилятор, який розташовується в шафі, забезпечує рівномірне розповсюдження температури по камері.

Корпус сушильної шафи виготовлений з листової сталі, пофарбований порошковою фарбою на спеціальній лінії полімерного покриття, що надає покриттю оригінальний вигляд і довговічність в експлуатації. Порошкове покриття дуже стійке до всіляких розчинників, лугів і кислот.

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ущільнення дверей виготовлено зі спеціальної термостійкої гуми і разом з конструкцією кріплення дверей, створює можливість уникнути нещільного прилягання, і забезпечує хорошу теплоізоляцію робочої камери. Робоча камера виготовляється з чорної сталі зі спеціальним покриттям, або нержавіючої сталі, що дозволяє вирішувати всі завдання. Нагрівання камери здійснюється з усіх боків, для цього застосовується оригінальний стрічковий нагрівач. Вентилятор: в задній частині робочої камери встановлений вентилятор перемішування повітря, що створює високу рівномірність теплового поля всередині камери. Сушильна шафа має отвір для введення контрольної термопари або термометра.

2.3. Методи дослідження властивостей та структури

Для забезпечення високої конструкційної міцності та визначення впливу температур використовували механічні методи досліджень та методи визначення ступеня структурування епоксиполімерних систем.

«Границю адгезійної міцності за нормального відриву визначали за ASTM D695. Досліджуваний матеріал наносили на торцеву поверхню стержнів (грибків) з конічним виступом у місці захватів для самоцентрування. Дослідження проводили на розривній машині марки УММ-5 із швидкістю переміщення нижньої траверси 2 мм/хв.»

Межу адгезійної міцності визначали за формулою:

$$\sigma_a = P/S,$$

де P – навантаження, за якого відбулось руйнування клейового з'єднання, Н;

S – площа клейового з'єднання, см².

«Границю міцності на стискання визначали за ASTM D256. Зразки у формі циліндрів діаметром 10±0,5 і висотою 15 мм піддавали стисненню за

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рівномірно зростаючого зусилля з швидкістю наближення площинок 2 мм/хв.» Межу міцності при стисненні розраховували за формулою:

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

де P – навантаження, за якого зразок зруйнувався, Н;

S – площа поперечного перерізу зразка, см².

«Метод визначення ступеня структурування. Ступінь тверднення матеріалів і покриттів визначали за вмістом гель-золь-фракції [32, 21]. Метод заснований на здатності частини матеріалу (плівки), не зв'язаної в полімерну сітку, вимиватися органічним розчинником в екстракторі Сокслета, який працював в автоматичному режимі.»

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

$$G = 100 - \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \times 100\%,$$

де M_1, M_2 – маса патрона з наважкою композитного матеріалу до і після екстракції відповідно, г.

«Ударну в'язкість визначали методом Шарпі (ISO 179 / ASTM D6110). Метод базується на випробуванні, при якому зразок, що лежить на двох опорах, зазнає удару маятника, причому лінія удару знаходиться посередині між опорами і безпосередньо навпроти надрізу у випадку зразків із надрізом.. Досліджуваний зразок складає такі розміри 60×60×10 мм».

Ударна в'язкість визначається за формулою:

$$KC = \frac{K}{S},$$

де K – робота руйнування зразка, Дж;

S – площа поперечного перерізу зразка, см².

Робота, що витрачається на руйнування зразка, визначається за формулою:

$$K = gl(\cos \alpha - \cos \beta),$$

де g – маса маятника, кг;

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

l – довжина маятника, м;

α – кут зарядки маятника, рад;

β – кут підйому маятника після руйнування зразка, рад;

γ – кут підйому маятника при холостому ході, рад.

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1. Дослідження властивостей модифікованих епоксиполімерів на основі обробленої суміші епоксидної смоли з кремнійорганічним лаком марки КО-915Б в електромагнітному полі за потужності 125 Вт

Склад розроблених епоксиполімерних матеріалів приведено в таблиці 3.1. Технологія формування епоксиполімерних матеріалів полягала в наступному. Спочатку кремнійорганічний лак марки КО-915Б обробляли в електромагнітному полі. Потім кремнійорганічний лак змішували з епоксидною смолою. Після цього суміш повинна була охолонути на спокійному повітрі за кімнатної температури. В охолоджену суміш вводили тверник ПЕПА (поліетиленполіамін).

Таблиця 3.1 – Склад епоксиполімерних матеріалів

Склад епоксикомпозитного матеріалу	Вміст інгредієнтів, мас. ч.
ЕД-20	100
ПЕПА	12
КО-915Б	30

Експериментально встановлено, що адгезійна міцність епоксиполімерів, термічно оброблених за температур 140 °С, 160 °С та 180 °С які не містять кремнійорганічний лак, становить 0,7 МПа, 1,3 МПа та 3,8 МПа (рисунок 3.1) відповідно. У випадку додавання обробленого в електромагнітному полі протягом 5 хв кремнійорганічного лаку адгезійна міцність епоксиполімерів значно підвищується в 3,8..20 разів та становить 11,3...14,5 МПа рази залежно від температури термічної обробки. Обробка електромагнітним полем дозволяє видалити наявний в модифікаторі толуол,

який перешкоджає формуванню фізичних та хімічних зв'язків між компонентами епоксиполімеру. Це суттєво посилює хімічну та фізичну міжфазну взаємодію, призводячи до різкого зростання адгезійної міцності сформованого епоксиполімеру.

За тривалості обробки модифікатора протягом 5 хв показник адгезійної міцності епоксиполімерів, термічна обробка яких становила 140 °С, досягає 14,5 МПа. Обробка модифікатора в електромагнітному полі протягом 10 хв не дозволяє суттєво підвищити адгезійну міцність (14,9 МПа) епоксиполімерів. Це свідчить про завершення первинного етапу видалення толуолу та інтенсифікацію міжфазної взаємодії. Додавання обробленого протягом 15 хв в електромагнітному полі кремнійорганічного лаку призводить до зниження адгезійної міцності епоксиполімерів (10,9 МПа). Однак обробка модифікатора протягом 20 хв в електромагнітному полі дозволяє отримати епоксиполімерні матеріали з вищою адгезійною міцністю (16,6 МПа).

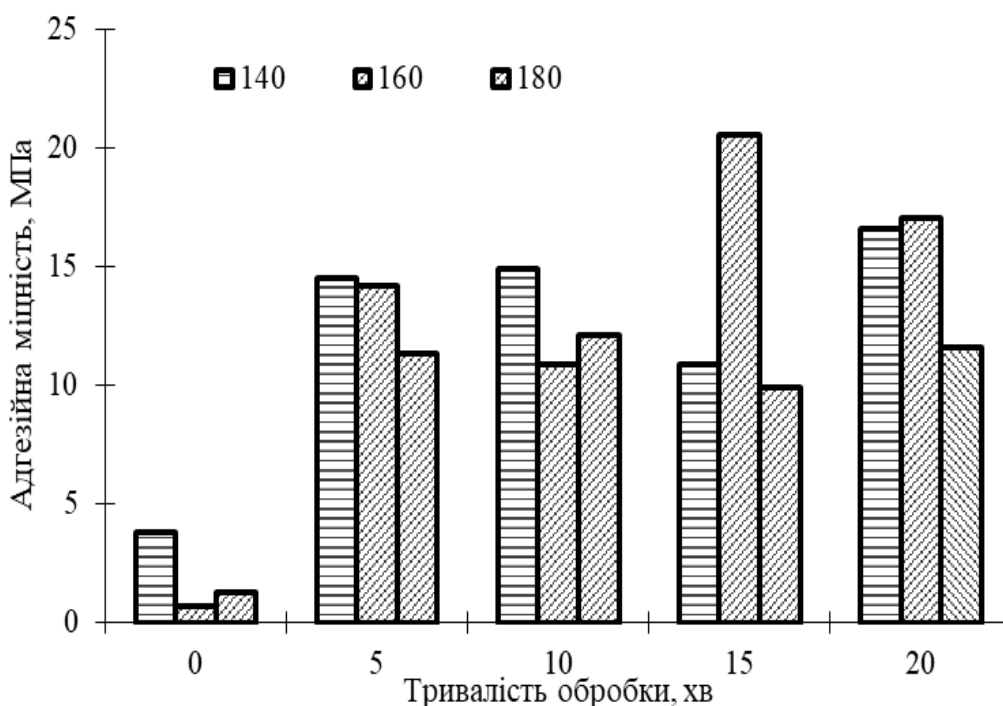


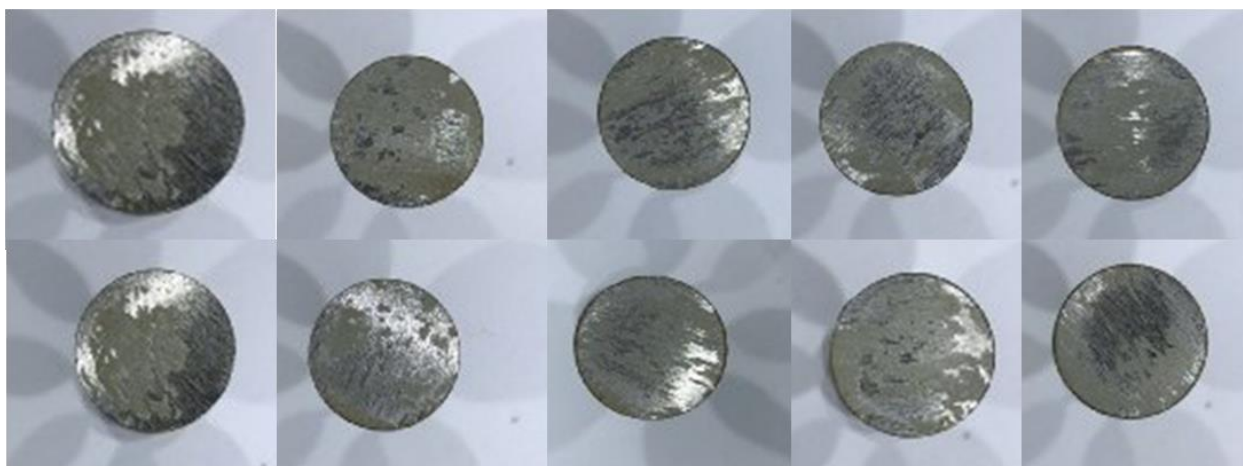
Рисунок 3.1 – Залежність адгезійної міцності епоксиполімерів, модифікованих кремнійорганічним лаком, від часу електромагнітної обробки КО (125 Вт)

За тривалості обробки модифікатора протягом 5 хв показник адгезійної міцності епоксиполімерів, термічна обробка яких становила 160 °С досягає 14,5 МПа. Обробка модифікатора в електромагнітному полі протягом 10 хв призводить до помітного зниження на 30% адгезійної міцності епоксиполімерів до 11,0 МПа. Додавання обробленого протягом 15 хв в електромагнітному полі кремнійорганічного лаку дозволяє досягти абсолютного максимуму (збільшується майже вдвічі) адгезійної міцності епоксиполімерів, яка становить 20,5 МПа. Однак обробка модифікатора протягом 20 хв в електромагнітному полі призводить до зниження на 25% показників адгезійної міцності до 16,9 МПа.

За тривалості обробки модифікатора протягом 5 хв показник адгезійної міцності епоксиполімерів, термічна обробка яких становила 180 °С, досягає 11,4 МПа. Обробка модифікатора в електромагнітному полі протягом 10 хв не дозволяє суттєво змінити адгезійну міцність (12,0 МПа) епоксиполімерів. Додавання обробленого протягом 15 хв в електромагнітному полі кремнійорганічного лаку призводить до незначного зниження на 17% адгезійної міцності епоксиполімерів (10,0 МПа). Однак обробка модифікатора протягом 20 хв в електромагнітному полі дозволяє стабілізувати систему та отримати епоксиполімерні матеріали з адгезійною міцністю 11,5 МПа.

Загальний вигляд поверхні зразків епоксиполімерів, модифікованих кремнійорганічним лаком, після досліджень адгезійної міцності подано на рисунку 3.2. Необроблені зразки мають великі глянцеві ділянки чистого металу, що візуально підтверджує їхню низьку початкову міцність через слабку міжфазну взаємодію. Натомість на зразках, модифікованих в електромагнітному полі, поверхня стає шорсткою та матовою з вираженими залишками когезійно зруйнованого полімеру. Найбільш розвинений та однорідний рельєф фіксується в зоні оптимального часу обробки, де адгезійний контакт є найміцнішим.

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а б в г д

Рисунок 3.2 – Загальний вигляд поверхні зразків епоксиполімерів після досліджень адгезійної міцності модифікованих кремнійорганічним лаком від часу обробки за потужності 125 Вт:

а – 0 хв; б – 5 хв; в – 10 хв; г – 15 хв; д – 20 хв;

Експериментально встановлено, що міцність на стискання епоксиполімерів, термічно оброблених за температури 140 °С, які не містять модифікатора, становить 38,0 МПа (рисунок 3.3). За тривалості обробки модифікатора протягом 5 хв показник міцності на стискання епоксиполімерів досягає 45,0 МПа. Обробка модифікатора в електромагнітному полі потужністю 125 Вт протягом 10 хв не дозволяє суттєво змінити міцність на стискання (46,5 МПа) епоксиполімерів, що свідчить про стабілізацію структури матеріалу. Додавання обробленого протягом 15 хв в електромагнітному полі кремнійорганічного лаку призводить до подальшого незначного підвищення міцності на стискання епоксиполімерів (50,5 МПа). Обробка модифікатора протягом 20 хв в електромагнітному полі дозволяє отримати епоксиполімерні матеріали з вищою міцністю на стискання, яка становить 51,5 МПа.

Експериментально встановлено, що міцність на стискання епоксиполімерів, термічно оброблених за температури 160 °С, які не містять обробленого модифікатора, становить 49,0 МПа. За тривалості

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обробки модифікатора протягом 5 хв показник міцності на стискання епоксиполімерів дещо знижується і досягає 45,0 МПа. Обробка модифікатора в електромагнітному полі протягом 10 хв не дозволяє суттєво змінити міцність на стискання (45,2 МПа) епоксиполімерів. Додавання обробленого протягом 15 хв в електромагнітному полі кремнійорганічного лаку призводить до зростання міцності на стискання епоксиполімерів (52,5 МПа). Однак обробка модифікатора протягом 20 хв в електромагнітному полі стабілізує систему, дозволяючи отримати епоксиполімерні матеріали з міцністю на стискання 52,0 МПа.

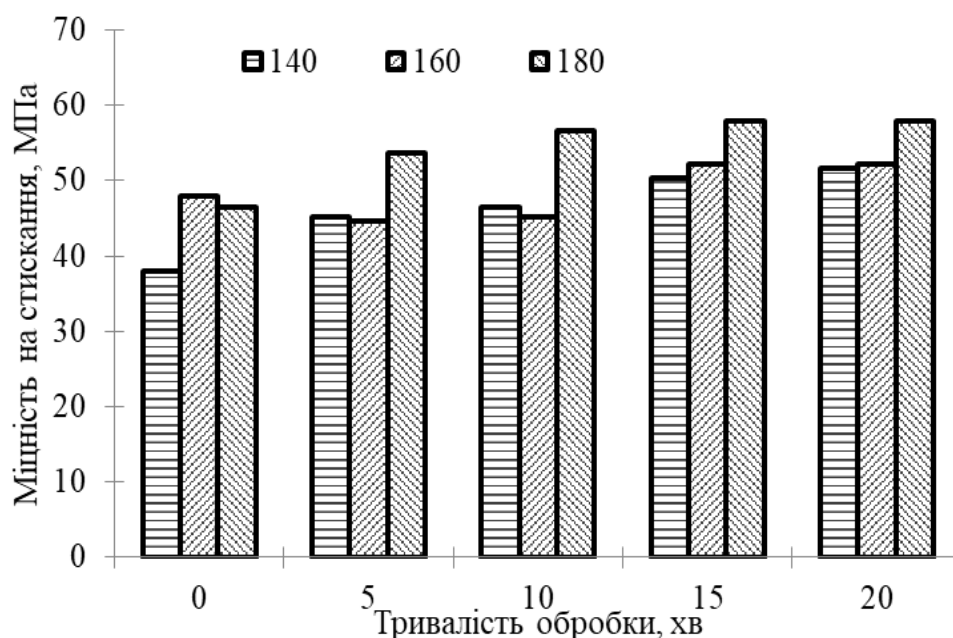


Рисунок 3.3 – Залежність міцності на стискання епоксиполімерів, модифікованих кремнійорганічним лаком, від часу електромагнітної обробки КО (125 Вт)

Експериментально встановлено, що міцність на стискання епоксиполімерів, термічно оброблених за температури 180 °С, які не містять обробленого модифікатора, становить 46,5 МПа. За тривалості обробки модифікатора протягом 5 хв показник міцності на стискання епоксиполімерів зростає на 15% і досягає 53,5 МПа. Обробка модифікатора в електромагнітному полі протягом 10 хв дозволяє

додатково підвищити міцність на стискання (56,5 МПа) епоксиполімерів за рахунок видалення толуолу та інтенсифікації взаємодії між компонентами. Додавання обробленого протягом 15 хв в електромагнітному полі кремнійорганічного лаку забезпечує міцність на стискання епоксиполімерів 58,0 МПа. Обробка модифікатора протягом 20 хв в електромагнітному полі не дозволяє підвищити ще міцність на стискання епоксиполімерів (58,0 МПа). Тривала обробка модифікатора є не доцільною, оскільки видалення толуолу відбувається раніше.

За тривалості обробки модифікатора в електромагнітному полі потужністю 125 Вт протягом 5 хв показник ударної в'язкості епоксиполімерів (рисунок 3.4), термічна обробка яких становила 140 °С, становить 3,7 кДж/м² (рисунок 3.5). Обробка модифікатора в електромагнітному полі протягом 10 хв дозволяє підвищити ударну в'язкість (4,9 кДж/м²) епоксиполімерів. Додавання обробленого протягом 15 хв в електромагнітному полі кремнійорганічного лаку призводить до подальшого зростання ударної в'язкості епоксиполімерів (7,1 кДж/м²). Однак обробка модифікатора протягом 20 хв в електромагнітному полі викликає незначне зниження показників, що дозволяє отримати епоксиполімерні матеріали з ударною в'язкістю 6,4 кДж/м².



а б в г д
Рисунок 3.5 – Загальний вигляд модифікованих кремнійорганічним лаком епоксиполімерів, оброблених в електромагнітному полі протягом 5 хв (а), 10 хв (б), 15 хв (в), 20 хв (г) та без обробки (д)

За тривалості обробки модифікатора протягом 5 хв показник ударної в'язкості епоксиполімерів, термічна обробка яких становила 160 °С, досягає 8,7 кДж/м². Обробка модифікатора в електромагнітному полі протягом 10 хв призводить до помітного зниження ударної в'язкості (6,3 кДж/м²) епоксиполімерів. Додавання обробленого протягом 15 хв в електромагнітному полі кремнійорганічного лаку забезпечує інтенсивну поляризацію компонентів і стрімке зростання ударної в'язкості епоксиполімерів до 11,7 кДж/м². Однак обробка модифікатора протягом 20 хв в електромагнітному полі викликає зниження характеристики, що дозволяє отримати епоксиполімерні матеріали з ударною в'язкістю 4,3 кДж/м².

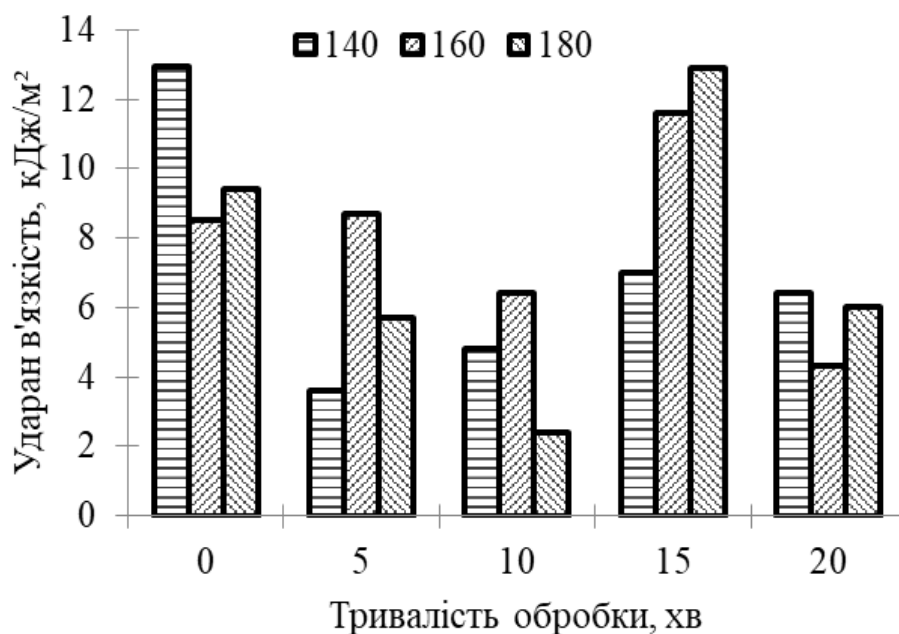


Рисунок 3.5 – Залежність ударної в'язкості епоксиполімерів, модифікованих кремнійорганічним лаком, від часу електромагнітної обробки КО (125 Вт)

За тривалості обробки модифікатора протягом 5 хв показник ударної в'язкості епоксиполімерів, термічна обробка яких становила 180 °С, досягає

5,8 кДж/м². Обробка модифікатора в електромагнітному полі протягом 10 хв призводить до стрімкого спаду ударної в'язкості (2,4 кДж/м²) епоксиполімерів, що свідчить про завершення первинного етапу видалення толуолу та інтенсифікацію міжфазної взаємодії.

Експериментально встановлено, що найвищі значення ударної в'язкості (12,9 кДж/м²) мають епоксиполімери, модифіковані кремнійорганічним лаком, обробленим в електромагнітному полі потужністю 125 Вт протягом 15 хв з кінцевою температурою термічної обробки 180 °С. «Це вказує на те що модифікування епоксиполімерів кремнійорганічним лаком вимагає підвищених температур термічної обробки порівняно з немодифікованими епоксиполімерами. «Хімічний склад модифікатора значно впливає на ударну в'язкість епоксиполімерів, які містять у своєму складі толуол, яка перешкоджає утворенню необхідної кількості фізико-хімічних зв'язків між кінцевими групами епоксидної смоли та твердника поліетиленполіаміну.» Однак обробка модифікатора протягом 20 хв в електромагнітному полі викликає вторинне зниження показників, що дозволяє отримати епоксиполімерні матеріали з ударною в'язкістю 6,1 кДж/м².

3.2. Дослідження властивостей модифікованих епоксиполімерів на основі обробленої суміші епоксидної смоли з кремнійорганічним лаком марки КО-915Б в електромагнітному полі за потужності 250 Вт

Підвищення потужності електромагнітного поля до 250 Вт дозволила отримати вищі значення фізико-механічних характеристик епоксиполімерного матеріалу за меншої тривалості обробки суміші епоксидної смоли з кремнійорганічним лаком. Додавання модифікатора в епоксиполімери за витримки 5 хв (рисунок 3.6) спостерігається значне підвищення адгезійної міцності в 3...12 раз порівняно з епоксиполімерами, необробленими в магнітному полі.

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

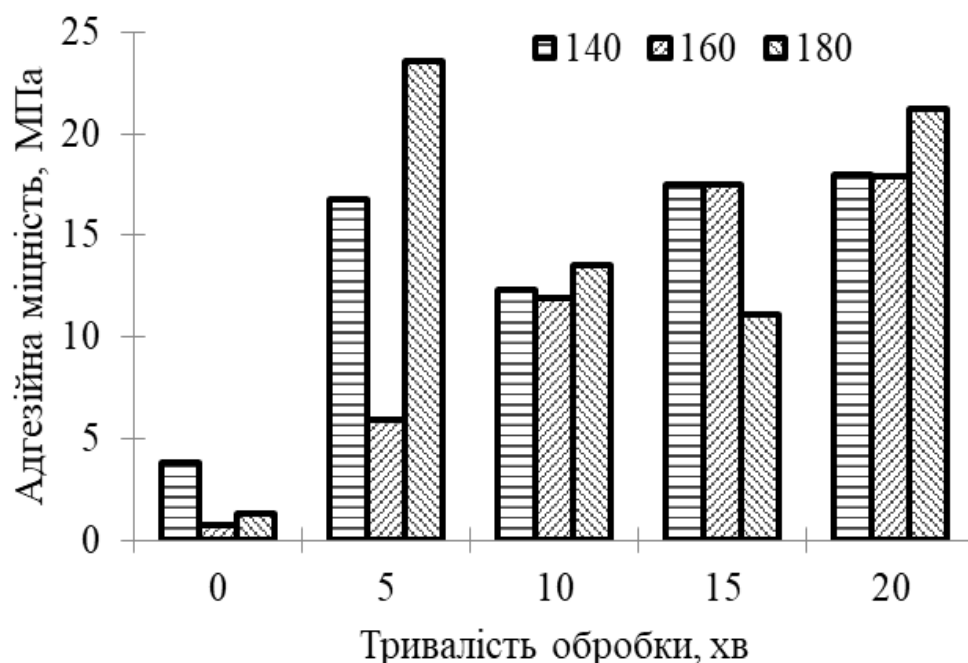


Рисунок 3.6 – Залежність адгезійної міцності епоксиполімерів модифікованих кремнійорганічним лаком від часу електромагнітної обробки КО (250 Вт)

За тривалості обробки модифікатора протягом 5 хв показник адгезійної міцності епоксиполімерів, термічна обробка яких становила 140 °С, досягає 17,0 МПа. Обробка модифікатора в електромагнітному полі протягом 10 хв призводить до зниження на 28% адгезійної міцності (12,3 МПа) епоксиполімерів. Додавання обробленого протягом 15 хв в електромагнітному полі кремнійорганічного лаку дозволяє знову підвищити на 45% адгезійну міцність епоксиполімерів (17,5 МПа). Однак обробка модифікатора протягом 20 хв в електромагнітному полі не призводить до суттєвих змін, дозволяючи отримати епоксиполімерні матеріали з адгезійною міцністю 18,0 МПа.

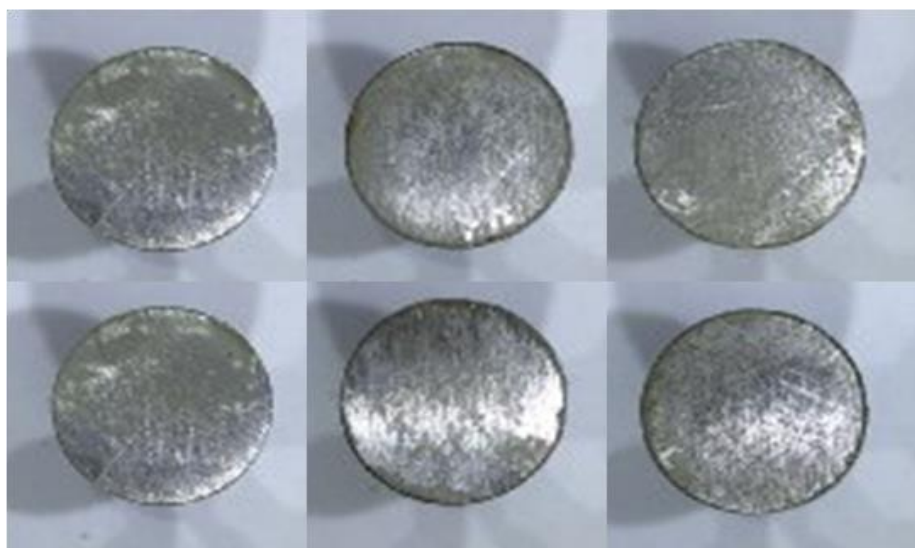
За тривалості обробки модифікатора протягом 5 хв показник адгезійної міцності епоксиполімерів, термічна обробка яких становила 160 °С, досягає 6,0 МПа. Обробка модифікатора в електромагнітному полі протягом 10 хв забезпечує стабільне зростання адгезійної міцності (11,9 МПа)

епоксиполімерів. Додавання обробленого протягом 15 хв в електромагнітному полі кремнійорганічного лаку призводить до подальшого інтенсивного підвищення адгезійної міцності епоксиполімерів (17,5 МПа). Однак обробка модифікатора протягом 20 хв в електромагнітному полі стабілізує систему, що дозволяє отримати епоксиполімерні матеріали з адгезійною міцністю 17,9 МПа.

За тривалості обробки модифікатора протягом 5 хв показник адгезійної міцності епоксиполімерів, термічна обробка яких становила 180 °С, досягає свого максимуму 23,6 МПа. Обробка модифікатора в електромагнітному полі протягом 10 хв призводить до стрімкого зниження адгезійної міцності на 41% (13,5 МПа) епоксиполімерів. Додавання обробленого протягом 15 хв в електромагнітному полі кремнійорганічного лаку викликає подальше зниження адгезійної міцності на 21% епоксиполімерів (11,1 МПа). Однак обробка модифікатора протягом 20 хв в електромагнітному полі дозволяє повторно активувати процес і отримати епоксиполімерні матеріали з вищою адгезійною міцністю (21,3 МПа).

Встановлено, що для даних матеріалів переважає адгезійно-когезійний характер рисунок 3.7. зразки під літерами рисунок 3.7, а,б мають виражені світлі глянцеві ділянки та зони відшарування від сталльної підкладки, що візуально підтверджує наявність залишкових внутрішніх напружень та слабку міжфазну взаємодію на початкових етапах. Натомість на зразках рисунок 3.7, в, г, д , е поверхня набуває однорідної шорсткої та матової текстури з дрібнодисперсними залишками когезійно зруйнованого полімеру. Найбільш розвинений рельєф без глянцевиx зон чистого металу фіксується в зоні оптимальних режимів обробки, де сформований адгезійний контакт характеризується максимальною міцністю зчеплення.

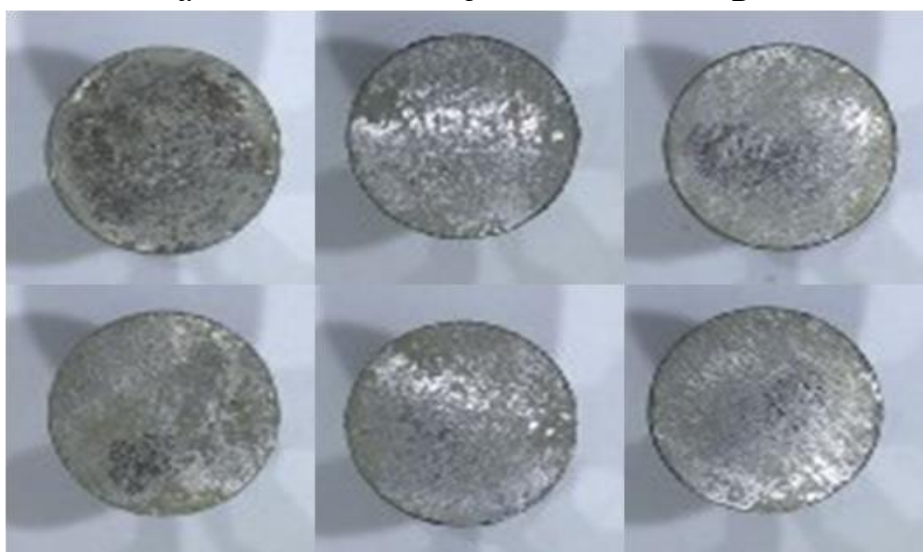
					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а

б

в



г

д

е

Рисунок 3.7 – Загальний вигляд поверхні зразків епоксиполімерів після досліджень адгезійної міцності, модифікованих кремнійорганічним лаком, обробленим в електромагнітному полі за потужності 250 Вт, та термічно оброблених за температури 140 °С (а, б, в) та 160 °С (г, д, е) протягом:

140 °С : а – 5 хв; б – 10 хв; в – 15 хв;

160 °С: г – 5 хв; д – 10 хв; е – 20 хв

Міцність на стискання епоксиполімерів без обробки становить 38,0...46,5 МПа (рисунок 3.8). За тривалості обробки модифікатора в

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

електромагнітному полі потужністю 250 Вт протягом 5 хв показник міцності на стискання епоксиполімерів, термічна обробка яких становила 140 °С, досягає свого абсолютного максимуму 74,0 МПа. Обробка модифікатора в електромагнітному полі протягом 10 хв призводить до стрімкого спаду міцності на стискання (39,0 МПа) епоксиполімерів, що свідчить про завершення первинного етапу видалення толуолу та інтенсифікацію міжфазної взаємодії. Додавання обробленого протягом 15 хв в електромагнітному полі кремнійорганічного лаку призводить до повторного зростання міцності на стискання епоксиполімерів (68,0 МПа). Однак обробка модифікатора протягом 20 хв в електромагнітному полі викликає незначне релаксаційне зниження показників, дозволяючи отримати епоксиполімерні матеріали з міцністю на стискання 65,0 МПа.

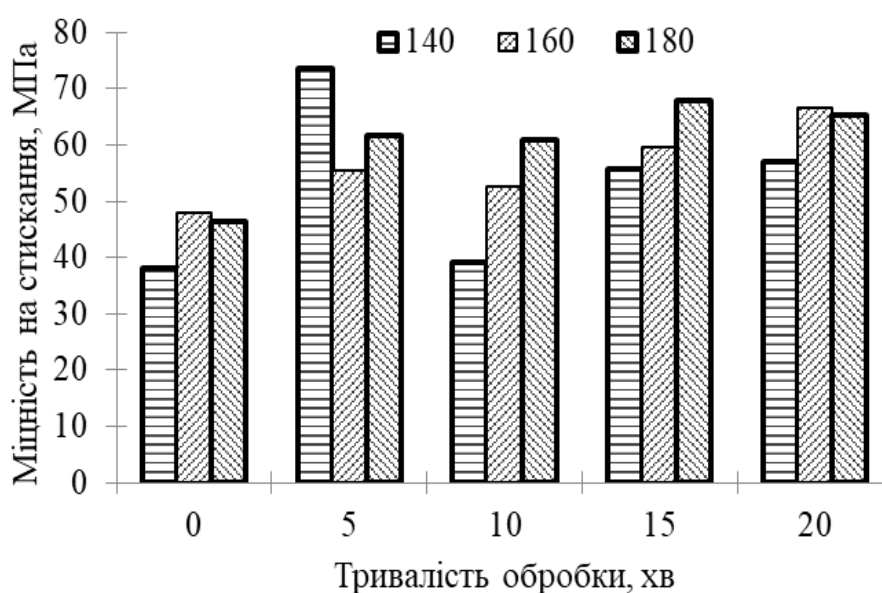


Рисунок 3.8 – Залежність міцності на стискання епоксиполімерів, модифікованих кремнійорганічним лаком, від тривалості електромагнітної обробки модифікатора (250 Вт)

За тривалості обробки модифікатора протягом 5 хв показники міцності на стискання епоксиполімерів, термічна обробка яких становила 160 °С, досягає 55,5 МПа. Обробка модифікатора в електромагнітному полі протягом

10 хв призводить до суттєвого зниження міцності на стискання (39,0 МПа) епоксиполімерів. Додавання обробленого протягом 15 хв в електромагнітному полі кремнійорганічного лаку призводить до підвищення міцності на стискання епоксиполімерів (56,0 МПа). Однак обробка модифікатора протягом 20 хв в електромагнітному полі дозволяє отримати епоксиполімерні матеріали з дещо вищою міцністю на стискання (57,0 МПа).

За тривалості обробки модифікатора протягом 5 хв показник міцності на стискання епоксиполімерів, термічна обробка яких становила 180 °С, досягає 62,0 МПа. Обробка модифікатора в електромагнітному полі протягом 10 хв не дозволяє суттєво змінити міцність на стискання (61,0 МПа) епоксиполімерів. Додавання обробленого протягом 15 хв в електромагнітному полі кремнійорганічного лаку забезпечує подальше зростання міцності на стискання епоксиполімерів (68,0 МПа). Однак обробка модифікатора протягом 20 хв в електромагнітному полі стабілізує систему, що дозволяє отримати епоксиполімерні матеріали з міцністю на стискання 66,0 МПа.

Експериментально досліджено, що епоксиполімери без модифікатора мають ударну в'язкість в діапазоні 8,8...9,6 кДж/м² залежно від температури термічної обробки.

За тривалості обробки модифікатора протягом 5 хв показник ударної в'язкості епоксиполімерів, термічна обробка яких становила 140 °С, досягає 9,3 кДж/м². Обробка модифікатора в електромагнітному полі протягом 10 хв дозволяє підвищити на 11% ударну в'язкість (10,3 кДж/м²) епоксиполімерів. Додавання обробленого протягом 15 хв в електромагнітному полі кремнійорганічного лаку призводить до зниження на 41% ударної в'язкості епоксиполімерів (6,8 кДж/м²). Однак обробка модифікатора протягом 20 хв в електромагнітному полі дозволяє отримати епоксиполімерні матеріали з вищою ударною в'язкістю, яка становить 10,5 кДж/м².

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

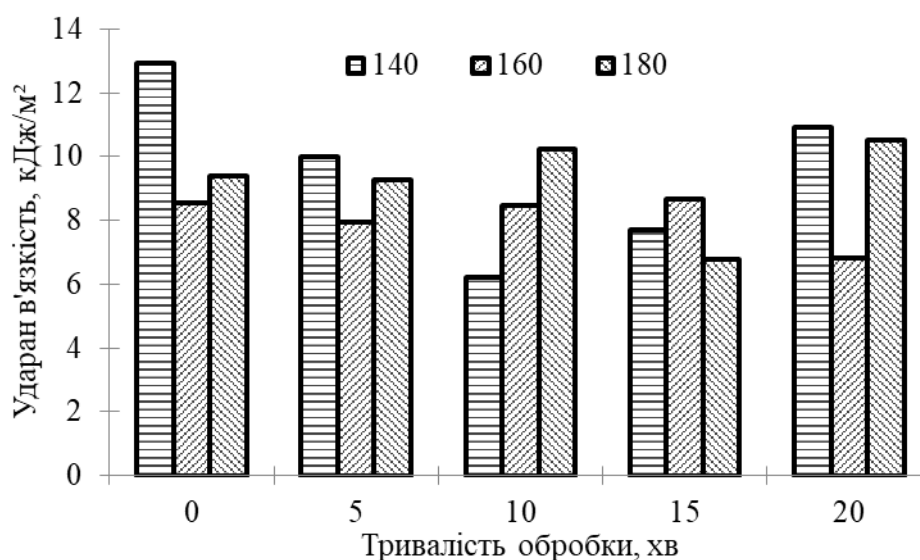


Рисунок 3.9 – Залежність ударної в'язкості епоксиполімерів, модифікованих в електромагнітному полі кремнійорганічним лаком від тривалості обробки модифікатора (250 Вт)

За тривалості обробки модифікатора протягом 5 хв показник ударної в'язкості епоксиполімерів, термічна обробка яких становила 160 °С, досягає 8,0 кДж/м². Обробка модифікатора в електромагнітному полі протягом 10 хв не дозволяє суттєво змінити ударну в'язкість (8,4 кДж/м²) епоксиполімерів. Додавання обробленого протягом 15 хв в електромагнітному полі кремнійорганічного лаку забезпечує незначне підвищення ударної в'язкості епоксиполімерів (8,7 кДж/м²). Однак обробка модифікатора протягом 20 хв в електромагнітному полі призводить до зниження показників, що дозволяє отримати епоксиполімерні матеріали з ударною в'язкістю 6,9 кДж/м².

За тривалості обробки модифікатора протягом 5 хв показник ударної в'язкості епоксиполімерів, термічна обробка яких становила 180 °С, досягає 10,0 кДж/м². Обробка модифікатора в електромагнітному полі протягом 10 хв призводить до стрімкого спаду ударної в'язкості на 62% (6,2 кДж/м²) епоксиполімерів, що свідчить про завершення первинного етапу видалення толуолу та інтенсифікацію міжфазної взаємодії. Додавання обробленого протягом 15 хв в електромагнітному полі кремнійорганічного лаку викликає

незначне підвищення ударної в'язкості епоксиполімерів (7,9 кДж/м²). Однак обробка модифікатора протягом 20 хв в електромагнітному полі дозволяє повторно активувати процес і отримати епоксиполімерні матеріали з вищою ударною в'язкістю (11,0 кДж/м²).

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Доведено доцільність електромагнітної обробки кремнійорганічного лаку, яка підвищує властивості епоксиполімерів, що зумовлено видаленням толуолу, який як розчинник перешкоджає формуванню хімічних і фізичних вузлів зшивання між компонентами полімеру.

Епоксиполімер, термічно оброблений за температури 160 °С з додаванням кремнійорганічного лаку, обробленого електромагнітним полем потужністю 125 Вт протягом 15 хвилин має адгезійну міцність 20,5 МПа. Найвищу адгезійну міцність 23,6 МПа отримано для епоксиполімеру, термічно обробленого за температури 180 °С, до складу якого вводили кремнійорганічний лак, оброблений в електромагнітному полі потужністю 250 Вт протягом 5 хвилин. Даний режим обробки модифікатора дозволяє підвищити адгезійну міцність та скоротити технологічний процес їх отримання.

Встановлено, епоксиполімер, термічно оброблений за температури 180 °С, до складу якого вводили кремнійорганічний лак, оброблений в електромагнітному полі потужністю 125 Вт протягом 5-20 хвилин, має міцність на стикання 58,0 МПа. Найвищу міцність на стискання 74,0 МПа отримано для епоксиполімеру, термічно обробленого за температури 140 °С, до складу якого вводили кремнійорганічний лак, оброблений в електромагнітному полі потужністю 250 Вт протягом 5 хвилин.

Експериментально досліджено, що максимальне значення ударної в'язкості (10,4 кДж/м²) епоксикомпозитів модифіковані кремнійорганічним лаком в електромагнітному полі потужністю 125 Вт протягом 10 хв, кінцева температура обробки яких становила 140 °С. Експериментально встановлено, що найвищі значення ударної в'язкості (12,9 кДж/м²) мають епоксиполімери, модифіковані кремнійорганічним лаком, обробленим в електромагнітному

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

полі потужністю 125 Вт протягом 15 хв з кінцевою температурою термічної обробки 180 °С.

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Influence of polymer modification on asphalt binder dynamic and steady flow viscosities / F. Cardone, G. Ferrotti, F. Frigio. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 71. P. 435–443.
2. Saboo N., Singh B., Kumar P., Vikram D. Study on viscosity of conventional and polymer modified asphalt binders in steady and dynamic shear domain. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2018. Vol. 22. P. 67–78.
3. Lim E., Jacobs A. R. Polymer side chain modification alters separation in ferroelectricsemiconductor polymer blends for organic memory. *ACS Macro Letters*. 2014. Vol. 3, № 12. P. 1244–1248.
4. Кальба Є. М., Букетов А. В. Регулювання структури і властивостей полімеркомпозиційних зносостійких і корозійностійких покриттів магнітною обробкою. *Фізико-хімія конденсованих неоднорідних систем: матеріали III Всеукраїнської конференції «Фундаментальна та професійна підготовка фахівців з фізики»*. Київ : КНПУ, 1998. Ч. II. С. 104–107.
4. Кальба Є.М. Регулювання структури і властивостей полімеркомпозиційних зносостійких і корозійностійких покриттів магнітною обробкою / Є.М. Кальба, А.В. Букетов // *Фізико-хімія конденсованих неоднорідних систем: Матеріали III Всеукраїнської конференції «Фундаментальна та професійна підготовка фахівців з фізики»*. – Ч.ІІ. – К.: КНПУ. – 1998. – С.104-107
5. Стухляк П. Д., Карташов В. В. Фізико-механічні властивості епоксиолімерів, оброблених змінним магнітним полем низької частоти. Тернопіль, 2001. 210 с.
6. Стухляк П. Д., Голотенко О. С., Скороход О. З. Вплив надвисокочастотної електромагнітної обробки на властивості епоксиолімерів. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2015. № 1 (5). С. 32–37.

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. Бур'ян Ю. Г., Черниш І. Г. Вплив надвисокочастотного випромінювання на структуру та властивості шаруватих сполук графіту. *Порошкова металургія*. 2021. № 5/6. С. 112–120.

8. Стухляк П. Д., Мороз К. М. Фізико-хімічні процеси на межі поділу фаз у наповнених епоксидних композитах. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2018. Т. 54, № 3. С. 45–52.

9. Оптимізація процесу модифікації епоксиполімерів кремнійорганічним лаком / О. М. Люшук, П. П. Савчук, В. П. Кашицький, Д. М. Матрунчик. *International Scientific and Practical Conference «WORLD SCIENCE»*. Dubai, UAE, 2017. № 4 (20), Vol. 2. P. 27–32.

10. Близнюк М. М., Холодиль О. В., Кузьменкова Є. І. Вплив органічних модифікаторів і структурування наповнювачів на морфологію продуктів зношування епоксидного полімеру. *Трение и износ*. 1991. Т. 12, № 4. С. 752–754.

11. Гулай О. І. Вплив органічних та неорганічних модифікаторів на властивості термостійких кремнійорганічних протикорозійних покриттів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01. Львів : ФМІ, 2000. 18 с.

12. He C., Li Z. *Silicon Containing Hybrid Copolymers*. Weinheim : Wiley-VCH GmbH, 2020. 308 p.

13. Садова О. Л., Кашицький В. П., Савчук П. П. Технологічні аспекти формування композиційних матеріалів триботехнічного призначення з високими механічними характеристиками. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті : збірка матеріалів V міжнародної науково-практичної конференції, 28–30 травня 2013 р.* Херсон: ХДМА, 2013.

					БР 3226.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		