

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»**

**РОЗРОБКА ВИСОКОНАПОВНЕНИХ
ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ, НАПОВНЕНИХ
КРОХМАЛЕМ / DEVELOPMENT OF HIGHLY
FILLED STARCH-FILLED EPOXY COMPOSITES**

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Матеріалознавство»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ – 41

НОВОСАД Роман Степанович

(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

Новосаду Роману Степановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка високонаповнених епоксикомпозитів, наповнених крохмалем

керівник роботи Садова Оксана Леонідівна, 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 епоксикомпозитів (1 л. ф. А4);

Слайд 2-7 – Дослідження властивостей епоксикомпозитних матеріалів (1 л. ф. А4);

Слайд 8 – 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)

Новосад Р.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис)

Садова О.Л.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Новосад Р.С. Розробка високонаповнених епоксикомпозитів, наповнених крохмалем. 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 обґрунтування використання епоксидних смол для формування полімеркомпозитів та їх наповнення природними наповнювачами. Наведено висновки та подано завдання роботи. У другому розділі подано характеристику використовуваних матеріалів та методику дослідження фізико-механічних та хімічних властивостей епоксикомпозитів. Приведено технологію формування епоксикомпозитний матеріалів та режим термічної обробки. У третьому розділі приведено дослідження фізико-механічних та хімічних властивостей епоксикомпозитів з вмістом порошку крохмалю.

Бакалаврська робота складається з пояснювальної записки та додатків. Пояснювальна записка містить 36 сторінок, 10 рисунків, 2 таблиці та включає список з 16 літературних джерел. Графічна частина складається з 8 листів формату А4, представлених у додатку А.

Ключові слова: полімеркомпозит, епоксидна смола, поліетиленполіамін, порошок крохмалю, механічні властивості, хімічна стійкість.

					БР 1326.00.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробила		Новосад			Розробка високонаповнених епоксикомпозитів, наповнених крохмалем	Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевірів		Садова					3	36	
						ЛНТУ, каф. матеріалознавства гр. ПМ-41			
Н. Контр		Мисковець							
Затв.		Імбірович							

ANNOTATION

Novosad R.S. Development of highly filled starch-filled epoxy composites. 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 provides a justification for the use of epoxy resins for the formation of polymer composites and their filling with natural fillers. The conclusions are given and the task of the work is given. The second section provides a characteristic of the materials used and the methodology for studying the physical and mechanical and chemical properties of epoxy composites. The technology for forming epoxy composite materials and the heat treatment regime is given. The third section provides a study of the physical and mechanical and chemical properties of epoxy composites containing starch powder. The bachelor's thesis consists of an explanatory note and appendices.

The explanatory note contains 36 pages, 10 figures, 2 tables and includes a list of 16 literary sources. The graphic part consists of 8 sheets of A4 format, presented in Appendix A.

Keywords: polymer composite, epoxy resin, polyethylene polyamine, starch powder, mechanical properties, chemical resistance.

					БП 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	7
1.1. Обґрунтування застосування епоксидних смол для формування полімеркомпозитів.....	7
1.2. Модифікація епоксидних матриць дисперсними наповнювачами природного походження.....	9
1.3. Висновки та постановка завдань досліджень	13
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	14
2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів.....	14
2.2. Технологія формування епоксикомпозитних.....	16
2.3. Методи дослідження властивостей та структури.....	16
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	20
3.1. Дослідження властивостей епоксикомпозитних матеріалів, наповнених порошком крохмалю	20
3.2. Дослідження ступеня структурування епоксикомпозитів, наповнених порошком крохмалю	27
3.3. Дослідження хімічної стійкості та водопоглинання епоксикомпозитів.....	28
3.4. Аналіз мікроструктури епоксикомпозитів, наповнених порошком крохмалю	30
ВИСНОВКИ.....	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	35
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Застосування природних наповнювачів у складі епоксидних композитів базується на принципах сталого розвитку та покращення експлуатаційних характеристик матеріалів. Використання рослинних волокон або мінеральних часток значно знижує собівартість готового виробу, оскільки природна сировина є дешевшою за синтетичні аналоги. Такі наповнювачі мають низьку густину, що дозволяє створювати легкі конструкції без втрати міцності.

Природні компоненти є біорозкладними або придатними до вторинної переробки, що зменшує екологічне навантаження на довкілля. Застосування деревної муки, конопель або льону підвищує питому жорсткість композиту та покращує його теплоізоляційні властивості. Наповнювачі природного походження сприяють зменшенню усадки епоксидної смоли під час тверднення, що забезпечує високу точність геометричних розмірів деталей. Крім того, вони діють як ефективні поглиначі вібрацій та шуму, розширюючи сферу використання полімеркомпозитних матеріалів. Таким чином, перехід на природні наповнювачі є стратегічно важливим кроком для створення екологічно безпечних та економічно вигідних полімерних систем.

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 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

РОЗДІЛ 1

ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

1.1. Обґрунтування застосування епоксидних смол для формування полімеркомпозитів

Завдяки своїй універсальності та різноманітності властивостей, епоксидна смола широко застосовується в промисловості: від виготовлення друкованих плат і герметизації електронних компонентів до створення захисних покриттів, компаундів для заливки, армування волокон та виробництва клеїв. Однак у високотехнологічних галузях використання чистої смоли обмежене через її схильність до розшарування, низьку ударостійкість та природну крихкість. Ці недоліки долають шляхом модифікації складу перед промисловим використанням. Сьогодні модифіковані епоксидні смоли активно застосовуються у виробництві композитів із натуральними наповнювачами, забезпечуючи виробам чудові механічні, термічні та електричні характеристики [1].

Епоксидні смоли є одним з універсальних термореактивних полімерів, які широко використовуються для різних застосувань, таких як будівництво, покриття, автомобіль, аерокосмічна та конструкційні клеї. По суті, епоксидні смоли – це низькомолекулярні рідини з двома або більше епоксидними функціональними групами. Ці епоксидні групи в епоксидних смолах можуть легко реагувати з широким спектром затвердільних засобів, таких як кислоти, ангідриди, спирти та аміни. Під час затвердіння рідина низькомолекулярної рідини епоксидна смола збільшується в довжину, робить гілки і, нарешті, стає високомолекулярним твердим матеріалом з тривимірною мережевою структурою [2,3]. Повністю затверділі епоксидні смоли відомі своєю високою міцністю, модулем, термічною стабільністю, низькою усадкою, хімічною стійкістю та стабільністю розмірів [4]. Однак вилікувані епоксидні зразки

					БР 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

дуже крихкі і чутливі до поглинання води. Висока крихкість епоксидної системи була обумовлена їх високою щільністю зшивання. Xian та інші [5] повідомили, що зшиті епоксидні смоли можуть піддаватися гідролітичній деградації або гідролізу мережі під впливом вологого середовища. Це може призвести до наступних змін в епоксидній мережі, таких як пластифікація, зниження температури переходу скла (T_g) і деградація механічних властивостей при впливі умов мокрого старіння.

Епоксидні смоли як важливі органічні матриці, завдяки своїй хімічній структурі та можливості модифікації, мають унікальні властивості, які сприяють тому, що ці матеріали використовуються в багатьох композитних галузях промисловості протягом багатьох років. Епоксидні смоли неодноразово використовуються в вимогливих застосуваннях завдяки своїм вишуканим механічним властивостям, термічній стабільності, стійкості до подряпин та хімічній стійкості. Крім того, епоксидні матеріали також мають дійсно сильну стійкість до розчинників, хімічних атак і кліматичного старіння. Представлені особливості підтверджують той факт, що існує постійний інтерес вчених до модифікації смол і розуміння її механізмів, а також в розробці цих матеріалів для отримання систем з необхідними властивостями. Більшість останніх досліджень у літературі зосереджені на зелених наповнювачах, таких як порошок після сільськогосподарських відходів (порошок горіхів кеш'ю, порошок кокосової шкаралупи, рисове лущиння, датоване насіння), клітковина трави (бамбукові волокна), волокна баста / листя (волокна коноплі, волокна бананової кори, листя ананаса) та інші натуральні волокна (волокна для відходів, пальма) як армування для епоксидних смол. Крім того, переваги натуральних наповнювачів перед традиційними наповнювачами є прийнятною специфічною міцністю і модулем, легка і хороша біорозкладаність, що дуже бажано в наш час. Тому розвиток і прогрес «зелених продуктів» на основі епоксидної смоли і натуральних наповнювачів, оскільки арматура зростає. Багато застосувань натуральних наповнювачів

					БР 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рослинного походження включають багато рослинних відходів, таких як бананова кора, кокосова оболонка та відходи арахісової оболонки, можна знайти в літературі. Частково біорозкладні полімери, отримані за допомогою натуральних наповнювачів і епоксидних полімерів, можуть успішно зменшити небажані відходи епоксидної та синтетичного волокна. Крім того, частково біополімери на основі епоксидних смол, які будуть представлені в папері, є більш корисними, ніж комерційні полімери, завдяки низькій вартості та покращеним хорошим термомеханічним властивостям [6].

1.2. Модифікація епоксидних матриць дисперсними наповнювачами природного походження

Сучасне матеріалознавство демонструє стійку тенденцію до заміни синтетичних мінеральних наповнювачів (таких як тальк, крейда або склосфери) на дрібнодисперсні відходи агропромислового комплексу. Це обумовлено не лише прагненням до зниження собівартості композитів, а й можливістю створення функціонально-градієнтних матеріалів із прогнозованим комплексом властивостей. У дисперсно-наповнених системах епоксидна смола виступає безперервною фазою (матрицею), що сприймає навантаження, тоді як частинки природного походження виконують роль структурних модифікаторів, що перерозподіляють внутрішні напруження [7].

Принциповою проблемою термореактивних епоксидних систем є їхня висока щільність зшивання, що зумовлює крихкість матеріалу. Введення природних порошкових наповнювачів дозволяє змінити кінетику руйнування. Зокрема, у дослідженнях Wang Z., Lv H. та Yang Y. [8] доведено, що частинки біополімерів (наприклад, кукурудзяного крохмалю) при оптимальній концентрації 2,5 % мас. створюють умови для локальної пластичної деформації матриці. Навколо кожної частинки виникають мікроскопічні зони концентрації напружень, що провокують утворення множинних мікротріщин.

					БР 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Цей процес дозволяє ефективно дисипувати (розсіювати) енергію зовнішнього впливу, підвищуючи ударну в'язкість та відносне подовження композиту.

В даний час на ринку епоксидні смоли в значній мірі призначені для використання в якості композитів. Варто зазначити, що для таких пластмас доступні кілька різних наповнювачів, як природного походження, таких як сизальні волокна, джутове борошно, так і мінеральні наповнювачі вапняк, крейда, і кварцовий пи́л, так і синтетичні (наприклад, ПЕТ, арамід та графітові волокна. Кожен з вже перевірених наповнювачів в межах епоксидного композиту впливає на властивості різних матеріалів, що призводить до різних можливих застосувань. У разі використання наповнювачів для епоксидних смол, в даний час найбільш поширеними є скло або вуглецеві волокна (килимки і короткорізані волокна).

Однак зростаюча проєкологічна обізнаність суспільства також впливає на зміну та інтенсивність роботи, пов'язаної з дослідженням та застосуванням природної сировини в технологічних процесах. Хорошим прикладом такої тенденції є автомобільна промисловість, вміст якої екологічних матеріалів природного походження або вторинної сировини законодавчо регламентується. Ці правила стверджують, що транспортні засоби повинні містити до 95% матеріалів багаторазового використання. Крім того, в останні роки більш популярними є і соціальні рухи, спрямовані на свідомий споживацтво, наприклад, серед інших, щоб звернути увагу на зміст екологічних матеріалів у придбаній продукції. Ці тенденції супроводжуються роботою з адаптації рослинних волокон до більш широкого застосування та покращення їх функціональних властивостей. Світове виробництво натуральних волокон оцінювалося в 33,7 млн тонн у 2022 році, що на один мільйон більше, ніж у 2021 році. Найбільш часто використовуваними натуральними наповнювачами для полімерних матеріалів є целюлозні матеріали, лігнін і лігноцелюлоз (наприклад, деревне борошно), натуральні волокна (наприклад, сизал або джут) і модифікований крохмаль. Механічні

					БР 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

властивості натуральних волокон сильно відрізняються від промислово використовуваних синтетичних волокон, але через їх меншу щільність розміру, ціну та біологічне походження вони дуже привабливі з точки зору використання в нових технологічних рішеннях. Застосування відходів природного походження, тобто шкаралупи волоського горіха, черепашки лісового горіха, а також соняшникового або деревного борошна останнім часом привернуло багато уваги [9].

Soumyalata та ін. [10] вивчили та порівняли ефект порошку кокосової шкаралупи та порошку рисового лушпиння як армуючого наповнювача в епоксидних композитах. Досліджено механічні властивості, питому тяжкість та властивості водопоглинання композитів. У порівнянні з порошком рисового лушпиння, епоксидний композит, посилений кокосовою шкаралупою, надає більш високі показники границі міцності на розтяг та границі міцності на згин, ударну міцність та твердість. Також повідомлялося, що водопоглинаюча стійкість була вищою для епоксидного композиту, посиленого кокосовою шкаралупою. Повідомляється, що питома вага для обох композитів аналогічна: 1,21 і 1.2 відповідно. Порівняльне дослідження показало, що епоксидний композит, армований кокосовою шкаралупою, перевершує епоксидний композит, посилений рисовим лушпинням.

Основною метою роботи було порівняння властивостей епоксидних композитів, наповнених відходами натуральних наповнювачів у вигляді дубового або арахісового борошна. Додатковою метою виконаних досліджень було розробити ще один спосіб функціонального управління для повторного використання природних відходів, який у всьому світі виробляється у відносно великих кількостях. Для зменшення гідрофільних властивостей лігноцелюлозних наповнювачів виконано двоступеневу силунізацію. Встановлено, що на першому кроці – мерсеризації – відбулося зменшення вмісту гідроксильних груп, пов'язаних із сполуками, такими як лігнін і геміцелюлоза. Крім того, частинки наповнювача були очищені від додаткових

					БР 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

речовин, таких як віск, пектини або інші домішки, відкладені в процесі виробництва. З іншого боку, процес сіланізації, як у випадку з деревним, так і арахісовим наповнювачем, призвів до покращення сумісності між епоксидною матрицею та лігноцелюлозними частинками шляхом введення мостоподібного силанового індивідууму, що позитивно впливає на взаємодію нанесеного наповнювача з полімерною матрицею, і потенційно завдяки хімічній структурі, що додатково сприяло процесу затвердіння [9, 11].

Коммула та ін. [12] досліджували вплив додавання необроблених та оброблених лугом волокон трави нейпір в епоксидну матрицю. Для створення композитів використовували як хаотично орієнтовані короткі волокна, так і довгі односпрямовані волокна. Вміст наповнювача складав 10%, 20% та 30% від маси, а концентрація розчину гідроксиду натрію (NaOH) для обробки – 5%, 10% та 15%. Додавання волокна та його лужна обробка дозволили покращити основні показники композитів: міцність і модуль пружності при розтягуванні (TS, TM), міцність і модуль при згині (FS, FM), а також ударну в'язкість (IS). Найкращі результати – незалежно від орієнтації волокон – було отримано при 20% вмісту наповнювача та його обробці 10% розчином луку. Таке зростання показників пояснюється посиленням міжфазної адгезії (зчеплення) між волокном і полімером після хімічної обробки. Крім того, довгі волокна продемонстрували вищі характеристики порівняно з короткими, а лужна обробка додатково знизила водопоглинання матеріалу та підвищила його хімічну стійкість.

Дослідження показало, що додавання звичайного кукурудзяного крохмалю може значно покращити властивості епоксидної смоли, робивши її міцнішою та менш крихкою. Ключовим моментом є дозування: найкращий результат досягається при додаванні 2,5% крохмалю. При такій концентрації міцність на розтяг зростає на 9%, а здатність матеріалу до розтягування перед розривом збільшується майже в півтора рази. Механізм зміцнення полягає в тому, що дрібні частинки крохмалю змінюють спосіб руйнування смоли.

					БР 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Замість того, щоб миттєво тріснути (як скло), матеріал починає поглинати енергію удару через утворення мережі мікроскопічних зсувів. Це перетворює смолу з крихкого матеріалу на більш в'язкий та пластичний. Однак важливо не перевищувати межу у 10% крохмалю. Якщо додати забагато порошку, його частинки починають злипатися і погано змішуватися зі смолою. Це створює внутрішні дефекти та пустоти, через які композит стає слабшим навіть за звичайну чисту епоксидну смолу. Таким чином, крохмаль є ефективною та дешевою еко-добавкою, але лише за умови точного дотримання пропорцій [13-16].

1.3. Висновки і постановка завдань досліджень

Використання природних наповнювачів суттєво знижує вартість та вагу епоксикомпозитів, роблячи їх екологічно безпечнішими. Вони забезпечують чудову теплоізоляцію та високу питому жорсткість готових виробів. Проте головним недоліком є висока гігроскопічність (поглинання вологи), що може призвести до розбухання та гниття матеріалу. Також природна сировина має низьку термічну стійкість, що обмежує температуру переробки композиту. Крім того, неоднорідність структури волокон ускладнює прогнозування точних механічних властивостей кожної партії. Для усунення цих мінусів часто потрібна додаткова хімічна обробка наповнювача.

На основі огляду використаних джерел сформульовано основні задачі, які необхідно вирішити в роботі:

- дослідити комплексний вплив наповнювача на механічні властивості епоксикомпозитного матеріалу;
- дослідити вплив порошку крохмалю на ступінь структурування ЕКМ;
- визначити внутрішні напруження розроблених епоксикомпозитних матеріалів.

					БР 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів

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

Твердником у композитному матеріалі слугувала поліетилеполіамін інакше кажучи твердник ПЕПА. За зовнішніми ознаками рідина світло-жовтого до темно-бурого кольору без механічних включень допускається зеленувата забарвлення. Призначення ПЕПА призначений для застосування в якості затверджувачів епоксидних смол, у виробництві різних іонообмінних смол, присадок і в різних хімічних виробництвах.

У якості смол використовувалась епоксидна смола марки ЕД-20. Епоксидна смола – це синтетична термореактивна смола, що являє собою пластиків маси епоксиду, полімеризація молекул в яких відбувається при додаванні отверджувача, 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. Через 15 хвилин маса починає затвердівати, а через годину її вже можна обробляти – в тому числі і напильником, свердлити.

Твердник поліетиленполіамін ПЕПА. Основне призначення поліетиленполіамін (ПЕПА) – затверджувач епоксидних смол. Епоксидна смола ЕД-20 має двокомпонентний склад. Для її затвердіння потрібні спеціальні отверджувачі для епоксидних смол (ПЕПА, дельта, тощо.). При

					БР 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використанні затверджувача марки ПЕПА (поліетиленполіамін), в залежності від виду робіт, середнє рекомендоване співвідношення 1:10. На десять частин смоли, одна частина затверджувача. З'єднання смоли з затверджувачем повинно проводитися при температурі не нижче ніж +20 °С. Затверджувач ПЕПА необхідно лити в смолу, дуже повільно, постійно перемішуючи.

Як наповнювач використано крохмаль. Крохмаль – дрібнодисперсний білий порошок з частинками розміром від 3 нм до 100 нм; не плавиться, стійкий до нагрівання під час відсутності вологи, що робить можливим його використання в якості наповнювача в ряді пластиків на основі таких полімерів як поліетилен, полістирол, поліпропілен. Такі матеріали в компості повністю руйнуються мікроорганізмами протягом 2...3 місяців з утворенням CO₂ і H₂O. Для приготування композиційного матеріалу може слугувати як картопляний крохмал так і кукурудзяний. Склад розроблених ЕКМ приведено в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Склад ЕКМ, наповнених порошком крохмалю

№ складу ЕКМ	Матриця	Наповнювач	Вміст наповнювача мас. ч.
1	ЕД-20 100 мас. ч. + ПЕПА 12 мас. ч.	порошок крохмалю	40
2			50
3			60
4			70
5			80
6			90
7			100
8			110

2.2. Технологія формування епоксикомпозитних

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.

Формування композиту. У підготовлену форму викладали матеріал, який складається з крохмалю, епоксидної смоли та твердника ПЕПА. Епоксидну смолу та твердник змішували разом в процесі було чути характерний звук потріскування у результаті взаємодії. Після чого у суміш добавляли наповнювач крохмал. Процес проводили чотири рази але змінюючи масову частку крохмалю. Уже готовий композит напівфабрикат вкладали у форму.

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 епоксикомпозитів при нормальних умовах тривало 24 год. Після чого зразки формуються і піддаються термічній обробці за ступінчастим режимом: 1 година – 50 °С, 2 години – 100 °С і 4 години – 120 °С.

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 епоксикомпозитних систем.

					БР 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Границю адгезійної міцності за нормального відриву визначали за ДСТУ ISO 4624:2019. 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:

$$\sigma_a = P/S, \quad (2.1)$$

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

S – площа клейового з'єднання, см².

Границю міцності на стискання визначали за ДСТУ EN ISO 604:2019. Зразки у формі циліндрів діаметром $10 \pm 0,5$ і висотою 15 мм піддавали стисненню за рівномірно зростаючого зусилля з швидкістю наближення площинок 2 мм/хв. Межу міцності при стисненні розраховували за формулою:

$$\sigma_{cm} = P/S, \quad (2.2)$$

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

S – площа поперечного перерізу зразка, см².

Твердість матеріалу за методом Брінеля визначали за ДСТУ ISO 6506. Дослідження проводили на зразках у формі бруска з гладкою поверхнею товщиною не менше 5 мм і шириною не менше 15 мм. Під час дослідження сталеву кульку діаметром 10 мм втискували в поверхню досліджуваного матеріалу з навантаженням 2,5 кН протягом 60 с. Розрахунок твердості матеріалу проводили за формулою:

$$HB = P / \pi dh, \quad (2.3)$$

де P – зусилля, прикладене до кульки, Н;

d – діаметр кульки, мм;

h – глибина відбитку кульки, мм.

					БР 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Метод визначення ступеня структурування. Ступінь тверднення матеріалів і покриттів визначали за вмістом гель-золь-фракції. 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 епоксикомпозитній плівці наповненій дисперсними частинками визначали за формулою:

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

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

Загальний вигляд зразків на дослідження подано на рисунку 2.1.

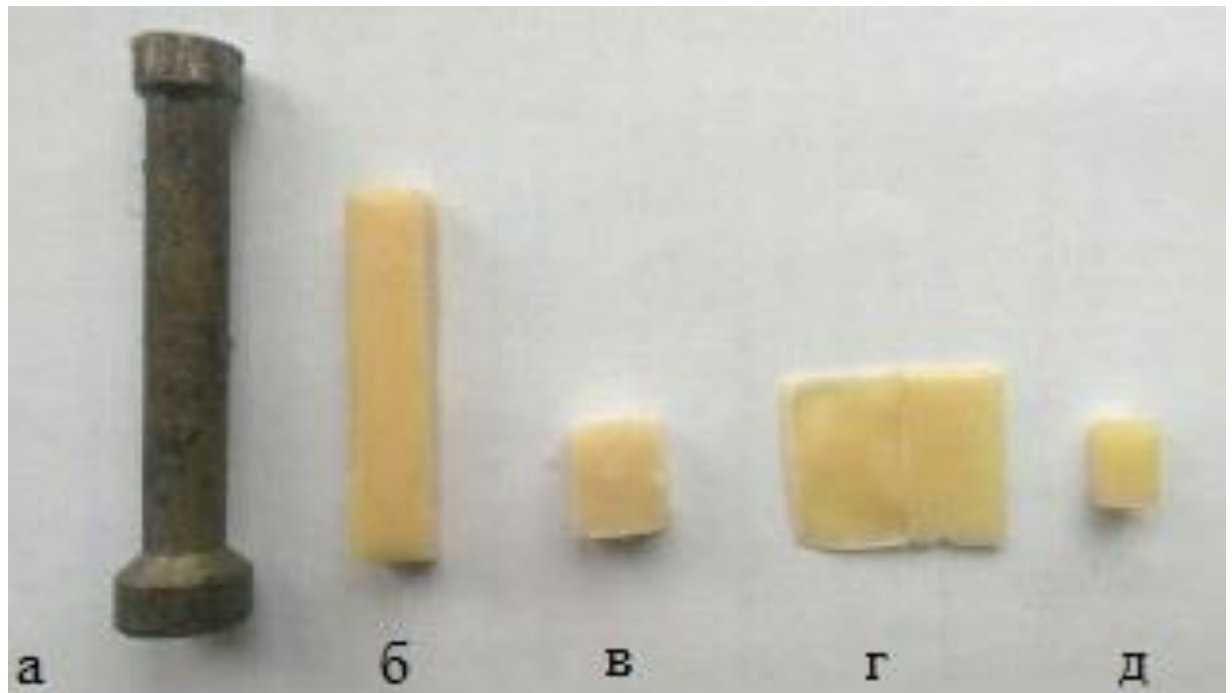


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд зразків на дослідження:

а – адгезійної міцності;

б – ударної в'язкості;

в – твердості;

г – ступеня структурування;

д – межі міцності на стискання

Дослідження мікроструктури матеріалу проводили на металографічних мікроскопах МИМ-10 ($\times 100 \dots 600$) та МПЦ-14 ($\times 50 \dots 600$) [2].

					БР 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1. Дослідження властивостей епоксикомпозитних матеріалів, наповнених порошком крохмалю

Встановлено, що адгезійна міцність збільшується у 1,4 рази (рисунок 3.1) при збільшенні вмісту порошку крохмалю від 40 мас. ч. (9,35 МПа) до 60 мас. ч. (13,45 МПа). При збільшенні вмісту порошку до 80 мас. ч. спостерігається пониження властивостей в 3,8 рази і становить 355 МПа. Дослідження показали, що найвищу адгезійну міцність (13,45 МПа) має епоксикомпозитний матеріал, наповнений крохмалем в кількості 65 мас. ч. Це пояснюється оптимальним вмістом високодисперсного наповнювача з його рівномірним розподілом в об'ємі полімерної матриці, що забезпечує однорідність композитного матеріалу.

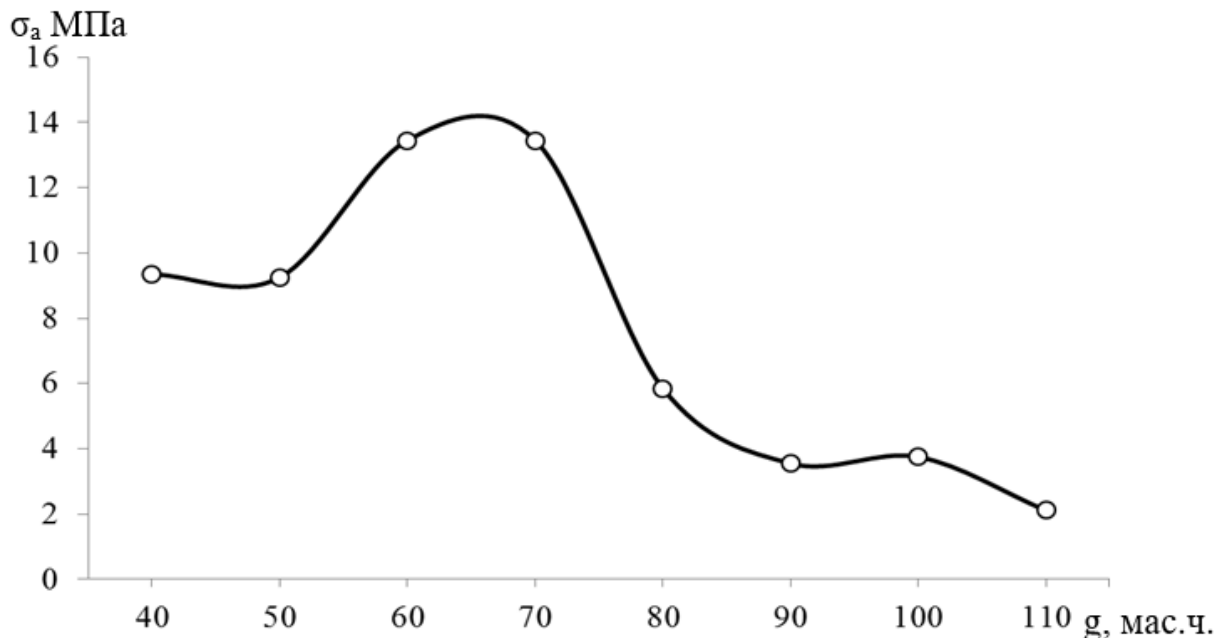


Рисунок 3.1 – Залежність адгезійної міцності епоксикомпозитів від вмісту порошку крохмалю

Загальний вигляд поверхні після дослідження адгезійної міцності представлено на рисунок 3.2. Встановлено, для розроблених композитних матеріалів характерний адгезійно-когезійний характер руйнування.



а

б

в

г



д

е

є

ж

Рисунок 3.2 – Загальний вигляд поверхні епоксикомпозитів після досліджень на адгезійну міцність, наповнених крохмалем в кількості:

а – 40 мас.ч.; б – 50 мас.ч.; в – 60 мас.ч.; г – 70 мас.ч.; д – 80 мас.ч.; е – 90 мас.ч.; є – 100 мас.ч.; ж – 110 мас.ч.

При подальшому збільшенні вмісту наповнювача до 80 мас. ч. (5,89 МПа) спостерігається різке зниження даної характеристики в 2 рази. Далі при збільшенні кількості порошку крохмалю до 110 мас. ч. відбувається поступове зниження адгезійної міцності. Мінімальне значення адгезійної міцності становить 2,11 МПа. Зниження значень адгезійної міцності пов'язано із високим вмістом порошку крохмалю, що призводить до гіршого змочування частинок через утворення конгломератів.

Експериментально встановлено, що міцність на стискання зменшується в 1,75 разів (рисунок 3.3) при збільшенні кількості порошку крохмалю від 20 мас. ч. (70,7 МПа) до 50 мас. ч. (40,4 МПа). Це пояснюється низьким вмістом наповнювача, що є недостатнім для опору полімерної системи руйнуванню. При збільшенні вмісту порошку крохмалю до 80 мас. ч. спостерігається підвищення даної характеристики в 2,34 рази і становить 94,5 МПа. Отримані високі значення міцності на стискання вказують на достатню взаємодію полімерної матриці із високодисперсним наповнювачем.

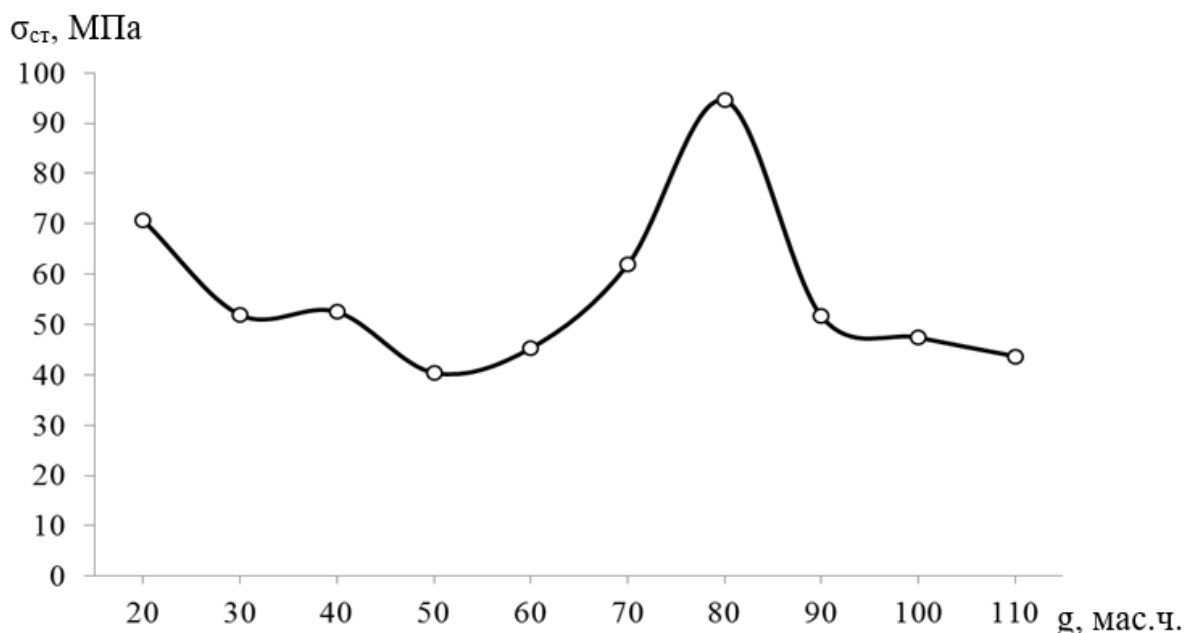


Рисунок 3.3 – Залежність міцності на стискання епоксикомпозитів від вмісту порошку крохмалю

При збільшенні порошку крохмалю до 90 мас. ч. відбувається різке зниження даної характеристики в 1,7 рази. При подальшому підвищенні вмісту наповнювача до 110 мас. ч. спостерігається зниження міцності на стискання в 2,2 рази. Це пов'язано із утворенням більшої кількості конгломератів за рахунок високої дисперсності порошку крохмалю, які виступають концентраторами напружень та полегшують руйнування матеріалу.

Твердість епоксикомпозитних матеріалів зростає у 1,4 рази (рисунок 3.4) при підвищенні вмісту порошку крохмалю 20 мас. ч. (227 МПа) до 50 мас. ч. (329 МПа), що є максимальним значенням. Це забезпечується однорідністю структури епоксикомпозитів за рахунок утворення оптимальної кількості вузлів зшивання між активними групами на поверхні наповнювача та функціональними групами епоксидного в'язучого. При збільшенні наповнювача до 100 мас. ч. значення твердості зменшується на 29,4 %.

НВ, МПа

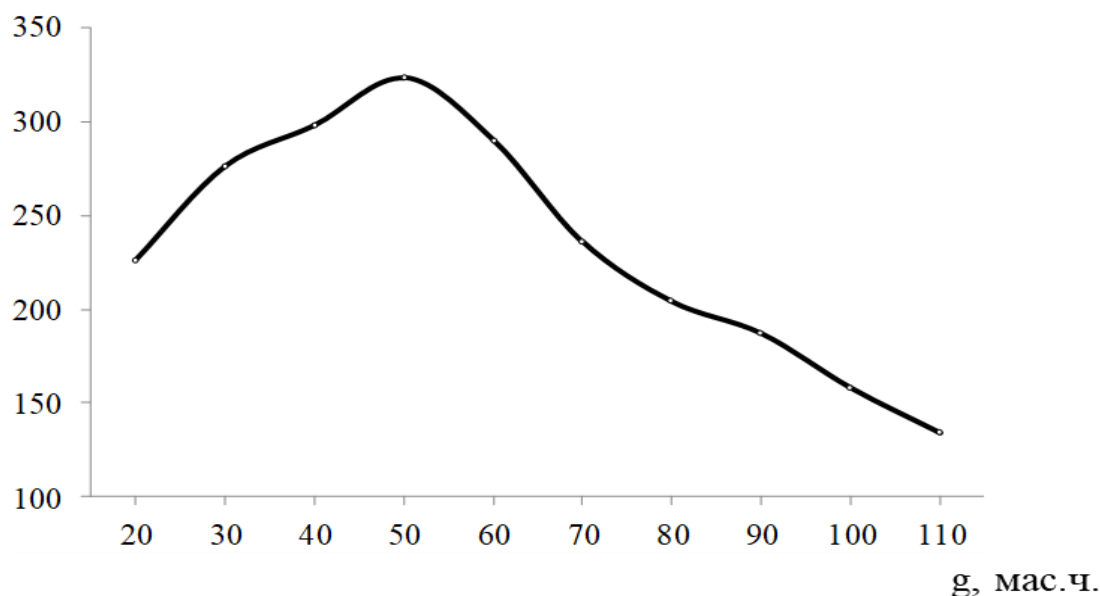


Рисунок 3.4 – Залежність твердості епоксикомпозитів від вмісту порошку крохмалю

Підвищення вмісту порошку крохмалю в епоксикомпозитах від 50 мас. ч. до 110 мас. ч. спричиняє поступове зниження твердості в 2,5 рази. Найнижчу твердість (132 МПа) мають епоксикомпозити з вмістом 110 мас. ч. порошку крохмалю. Зниження твердості пов'язане з погіршенням змочуваності високодисперсних частинок наповнювача епоксиполімером через їх високу поверхневу енергію, що призводить до утворення конгломератів. Це підтверджується отриманими попередніми результатами дослідження міцності на стискання.

Аналогічні результати досліджень отримано при дослідженні ударної міцності. При збільшенні вмісту високодисперсного порошку крохмалю від 20 мас. ч. (3,9 кДж/м²) до 50 мас. ч. (17,2 кДж/м²) спостерігається підвищення ударної міцності в 4,4 рази (рисунок 3.5). Це пояснюється низьким вмістом високодисперсного порошку крохмалю, який нерівномірно розподіляється в епоксиполімерній матриці.

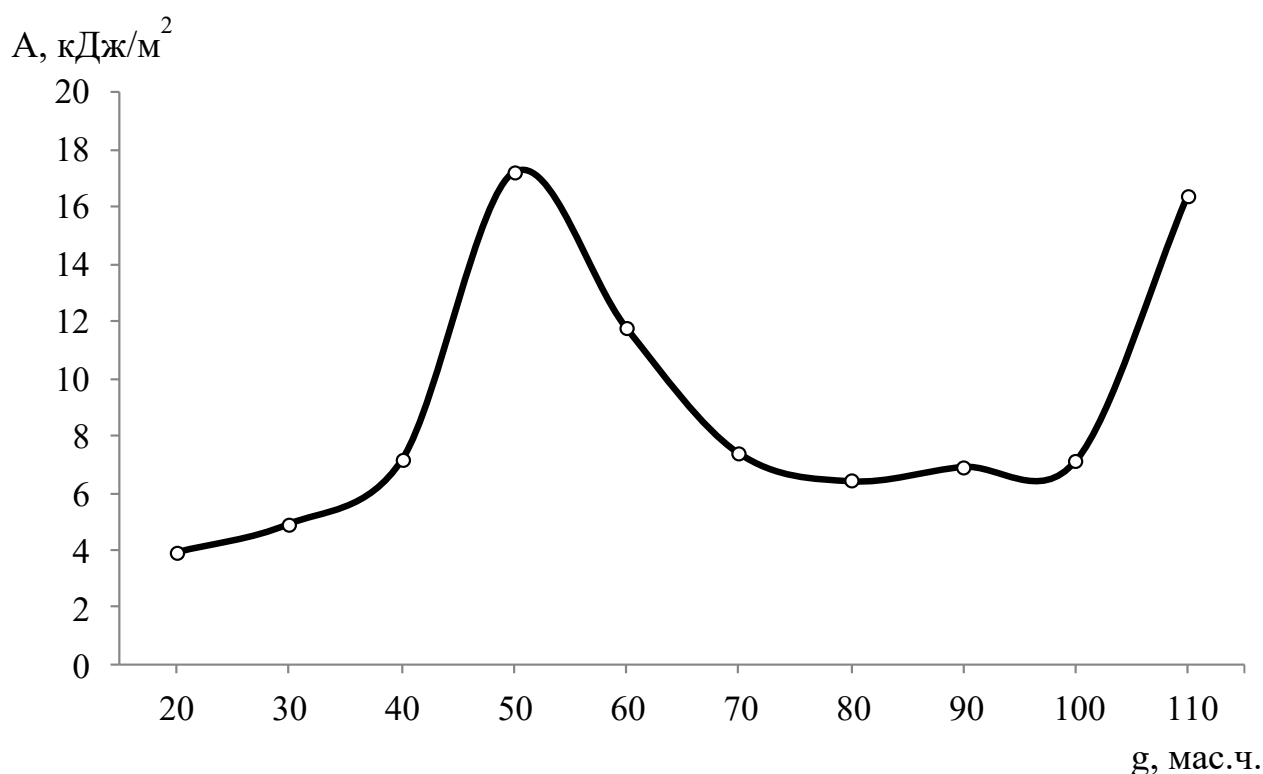


Рисунок 3.5 – Залежність ударної міцності епоксикомпозитів від вмісту порошку крохмалю

Значення ударної міцності знижуються в 1,8 раз при збільшенні кількості порошку крохмалю від 50 мас. ч. ($17,2 \text{ кДж/м}^2$) до 100 мас. ч. ($9,6 \text{ кДж/м}^2$). Зниження ударної міцності пов'язане з погіршенням змочування високодисперсних частинок наповнювача епоксиполімером через їх високу поверхневу енергію, що призводить до утворення конгломератів, а також низькою твердістю порошку крохмалю. Це підтверджується отриманими попередніми результатами дослідження твердості епоксикомпозитів з відповідним вмістом крохмалю.

При збільшенні вмісту наповнювача від 100 мас. ч. до 110 мас. ч. значення ударної міцності зростають у 2,5 рази. Це пояснюється здатністю протистояти ударним навантаженням за рахунок високого вмісту наповнювача.

Найвищі показники ударної в'язкості $0,56 \text{ кДж/м}^2$ (рисунок 3.6) отримано для епоксикомпозитного матеріалу, наповненого порошком крохмалю в кількості 20 мас.ч. (рисунок 3.5). При підвищенні вмісту наповнювача від 20 мас. ч. до 60 мас. ч. спостерігається зниження ударної в'язкості в 2 рази.

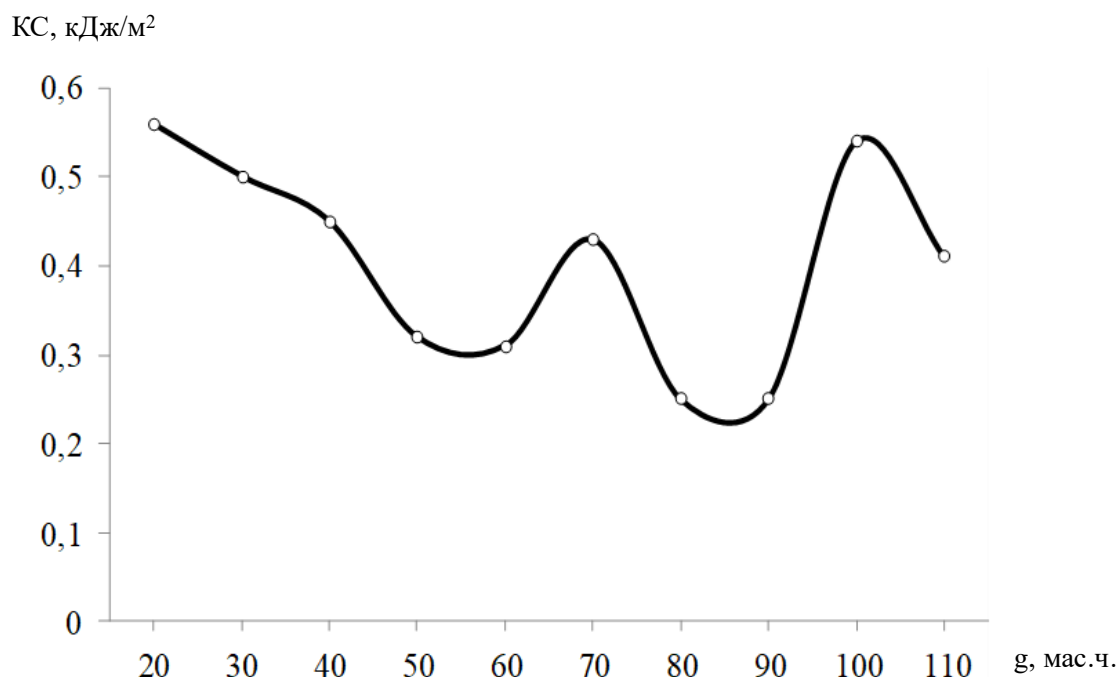


Рисунок 3.6 – Залежність ударної в'язкості епоксикомпозитів від вмісту порошку крохмалю

Найнижчі значення ударної в'язкості отримано для епоксикомпозитних матеріалів з вмістом порошку крохмалю в межах 80...90 мас. ч. і становить 0,25 кДж/м². При наповненні епоксисистеми в кількості 110 мас. ч. ударна в'язкість епоксикомпозитного матеріалу знижується в 1,4 рази. Отримані низькі значення даної характеристики пояснюються утворенням конгломератів порошку в об'ємі полімерної матриці, які виступають концентраторами напружень. У свою чергу це призводить до інтенсивного поширення тріщин у епоксикомпозитах під час удару та полегшують руйнування матеріалу. Вищі показники ударної в'язкості зафіксовано при вмісті наповнювача 70 мас. ч. (0,45 кДж/м²) та 100 мас. ч. (0,54 кДж/м²). За результатами досліджень можна зробити висновок, що розроблені матеріали є крихкими порівняно з іншими композитними матеріалами, що містять наповнювачі різні за природою та дисперсністю.

При дослідженні внутрішніх напружень розроблених епоксикомпозитів (рисунок 3.6) встановлено, що найвищі показники (1,24 МПа) мають епоксикомпозити, наповнені порошком крохмалю є в кількості 30 мас. ч., а найнижчі – 0,23...0,26 МПа в кількості 60...80 мас. ч. При підвищенні вмісту порошку крохмалю від 20 мас. ч. до 30 мас. ч. (0,5 МПа і 1,24 МПа відповідно) спостерігається підвищення внутрішніх напружень у 3,5 рази. Це обумовлене локальним зшиванням макромолекул матриці та високодисперсного наповнювача, що приводить до високого напруженого стану наповненої епоксисистеми. Підвищення вмісту наповнювача до 60 мас. ч. супроводжується спадом внутрішніх напружень у 4,8 рази і становить 0,26 МПа.

При наповненні епоксисистеми порошком крохмалю вище 80 мас. ч. спостерігається підвищення значень внутрішніх напружень у 2,3 рази (0,61...0,64 МПа). Це пояснюється схильністю високодисперсного порошку

					БР 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

крохмалю до утворення конгломератів, які призводять до росту напружень в епоксикомпозитних матеріалах.

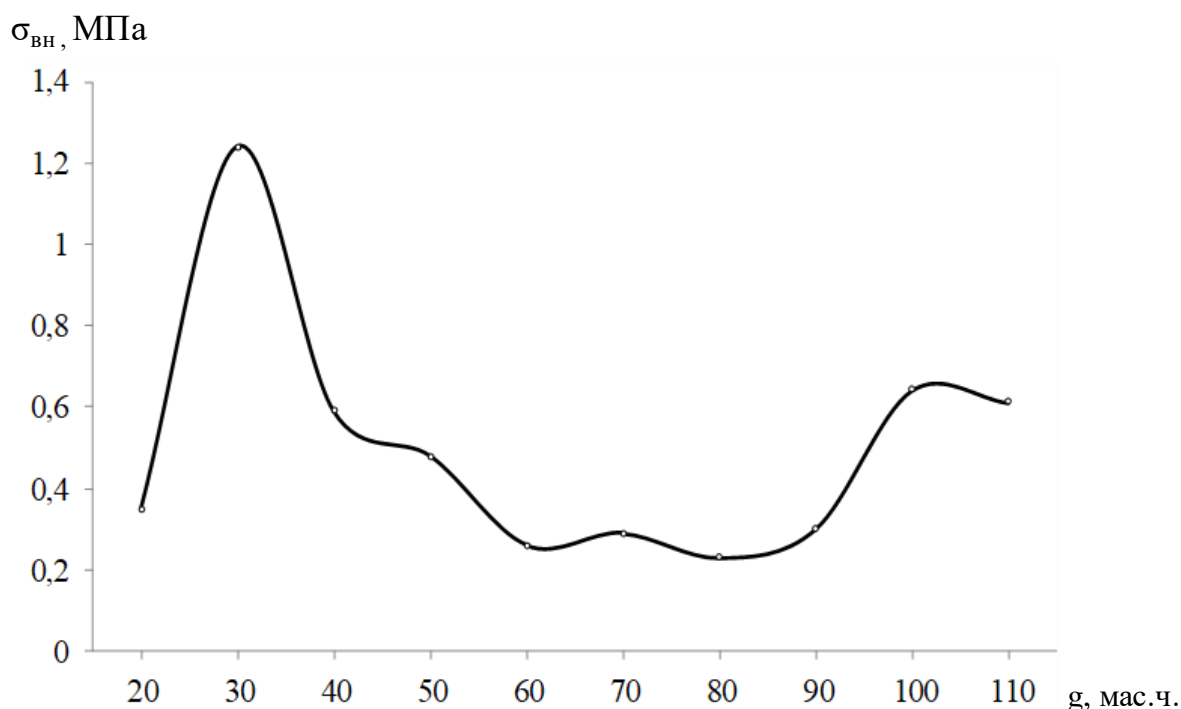


Рисунок 3.7 – Залежність внутрішніх напружень епоксикомпозитів, наповнених крохмалем від вмісту наповнювача

3.2. Дослідження ступеня структурування епоксикомпозитів, наповнених порошком крохмалю

Ступінь зшивання визначається кількістю фізичних та хімічних зв'язків між макромолекулами полімеру і поверхнею дисперсних часток. Для розроблених епоксикомпозитів, що містять 80 мас. ч. (рисунок 3.8) високодисперсного порошку крохмалю, спостерігається незначне підвищення ступеня структурування на 0,4 % до вмісту наповнювача 90 мас. ч. Максимальне значення ступеня структуруванні наповненої високодисперсним порошком крохмалю епоксиолімерної системи зафіксовано 98,09 % при вмісті наповнювача 90 мас. ч. Це свідчить про зростання ступеня зшивання

матриці у зовнішніх поверхневих шарах навколо наповнювача, що підвищує експлуатаційні характеристики даних епоксиполімерних систем.

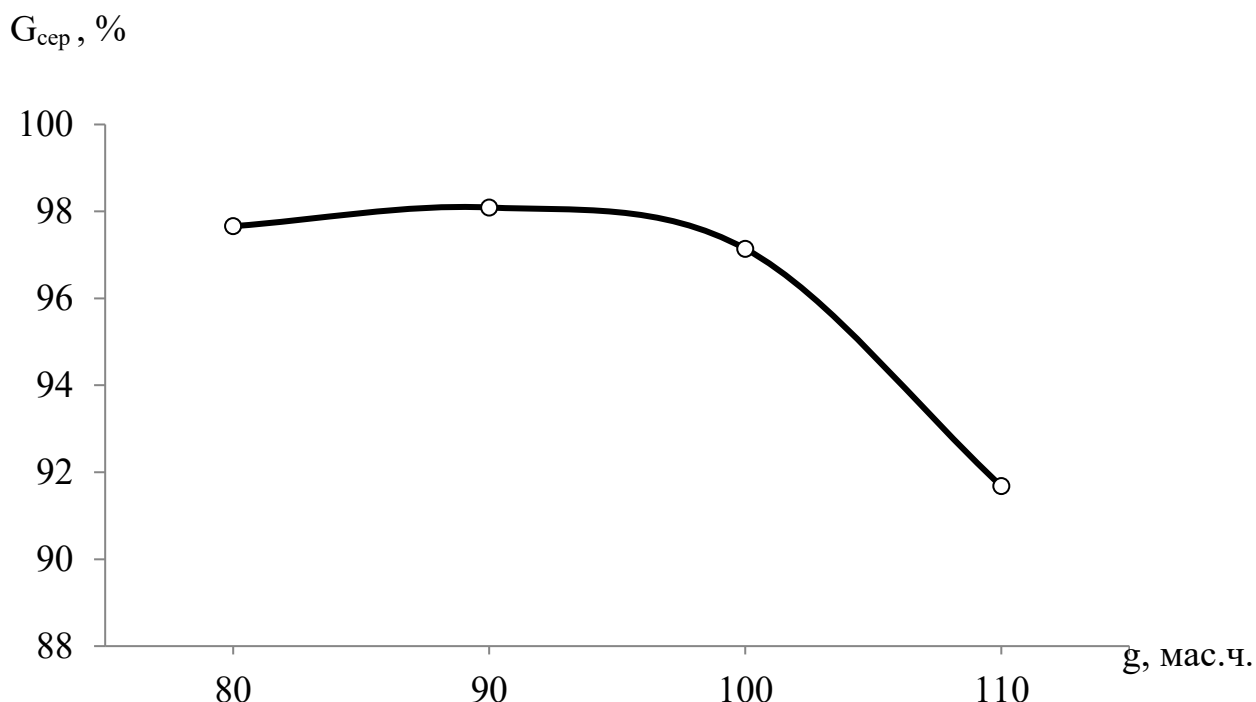


Рисунок 3.8 – Залежність вмісту гель-фракції епоксикомпозитів, наповнених крохмалем, від вмісту наповнювача

Подальше підвищення вмісту порошку крохмалю до 100 мас. ч. дещо знижує ступінь структурування на 0,9 %. При збільшенні вмісту крохмалю до 110 мас. ч. ступінь структурування знижується на 6,1 %. Зниження ступеня структурування пов'язане з тим, що частинки крохмалю, крім полісахаридів містять воду (10...20 %), що призводить до зменшення твердості при збільшенні вмісту наповнювача. Це послаблює взаємодію компонентів системи між собою.

3.3. Дослідження хімічної стійкості та водопоглинання епоксикомпозитів

Дослідження водопоглинання (таблиця 3.1) епоксикомпозитів виявило, що мінімальний приріст маси зразків (+1,13) властивий матеріалам із низьким вмістом крохмального порошку (20 мас. ч.). Зі збільшенням ступеня наповнення до 40...80 мас. ч. водопоглинання зростає. Це зумовлено високою концентрацією самого крохмалю та меншою кількістю утворених мікропор, які здатні утримувати вологу, що в сукупності призводить до набухання композитів.

Таблиця 3.1 – Водопоглинання та хімічна стійкість епоксикомпозитів

Вміст наповнювача, мас. ч.	Середовище занурення					
	H ₂ O	NaOH	HCl	HNO ₃	H ₂ SO ₄	NaCl
20	+1,13	+1,22	+17,65	+17,97	+2,09	-25,5
40	+2,11	+2,42	-10,38	+12,79	+2,62	+2,57
60	+1,75	+1,34	+2,68	-3,79	-4,45	+2,02
80	+1,94	+1,62	+2,2	+2,18	+3,24	+2,87

У ході аналізу хімічної стійкості встановлено, що меншою зміною маси під дією агресивних середовищ характеризуються високонаповнені епоксикомпозитні матеріали (60...80 мас. ч.).

Розчин гідроксиду натрію викликає появу на поверхні зразків білих продуктів корозії. Після дії соляної кислоти зафіксовано зміну кольору матеріалу та вимивання і розчинення компонентів, причому максимальну втрату маси (-10,48) зафіксовано за наповнення у 40 мас. ч.

Взаємодія з азотною кислотою зумовлює значний приріст маси (+12,79...+17,97) у слабконаповнених композитів (20...40 мас. ч.), проте зі збільшенням частки крохмалю об'єм утворюваних продуктів корозії зменшується.

При зануренні в розчини сірчаної кислоти та хлориду натрію зміна маси зразків є значно меншою, що свідчить про вищу стійкість до цих середовищ.

Водночас за мінімального наповнення (20 мас. ч.) у розчині хлориду натрію відбувається деградація та руйнування структури епоксикомпозиту, що супроводжується великою втратою маси (-25,5).

Таким чином, найкращу хімічну стійкість виявляють епоксикомпозити з максимальним вмістом порошку крохмалю (80 мас. ч.). Це підтверджує, що даний наповнювач є хімічно стабільнішим за епоксиолімерну матрицю. Водночас для процесів водопоглинання характерна зворотна залежність, оскільки стійкість до вологи знижується із ростом частки наповнювача.

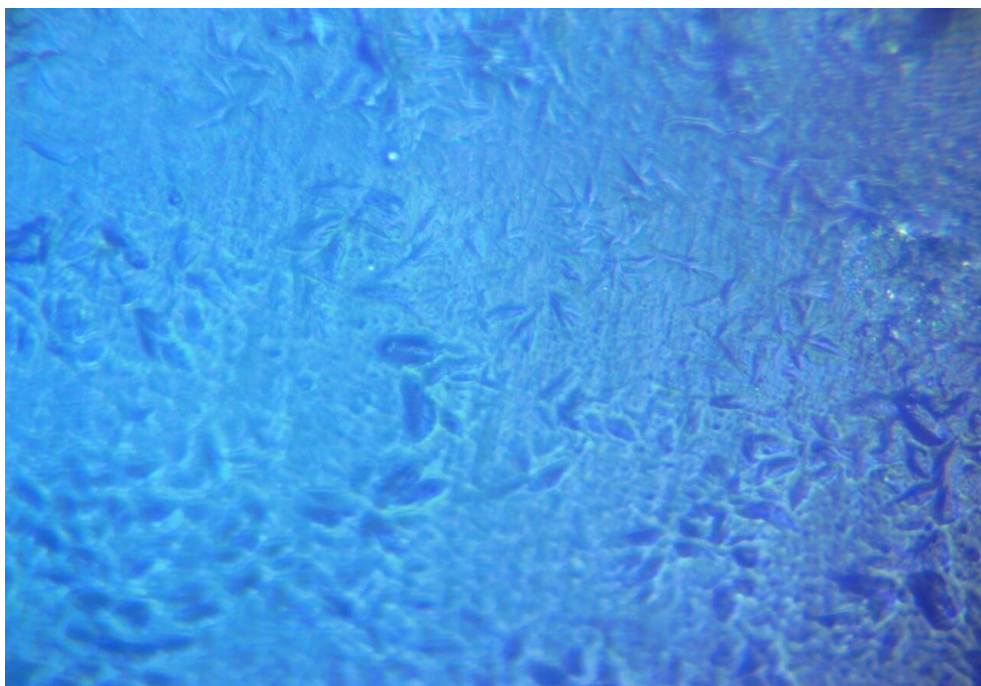
3.4. Аналіз мікроструктури епоксикомпозитів, наповнених порошком крохмалю

На зображеннях мікроструктури (рисунок 3.9) можна спостерігати білі круглі включення різного розміру, що свідчить про те, що частинки порошку крохмалю схильний до скупчення в епоксиолімерній системі. Із зображень мікроструктури можна зробити висновок про високу пористість матеріалів. Різні за формою та розмірами пори характерні для епоксикомпозитів із нижчим вмістом порошку крохмалю (рисунок 3.9, а, б). Для епоксикомпозитного матеріалу, наповненого 80 мас. ч. порошку крохмалю пори мають продовгувату овальну форму з гострими вершинами, які можуть виступати концентраторами напружень та знижувати теоретичні характеристики міцності матеріалу. Також для даних матеріалів спостерігається неоднорідне розміщення пор в об'ємі полімерної матриці.

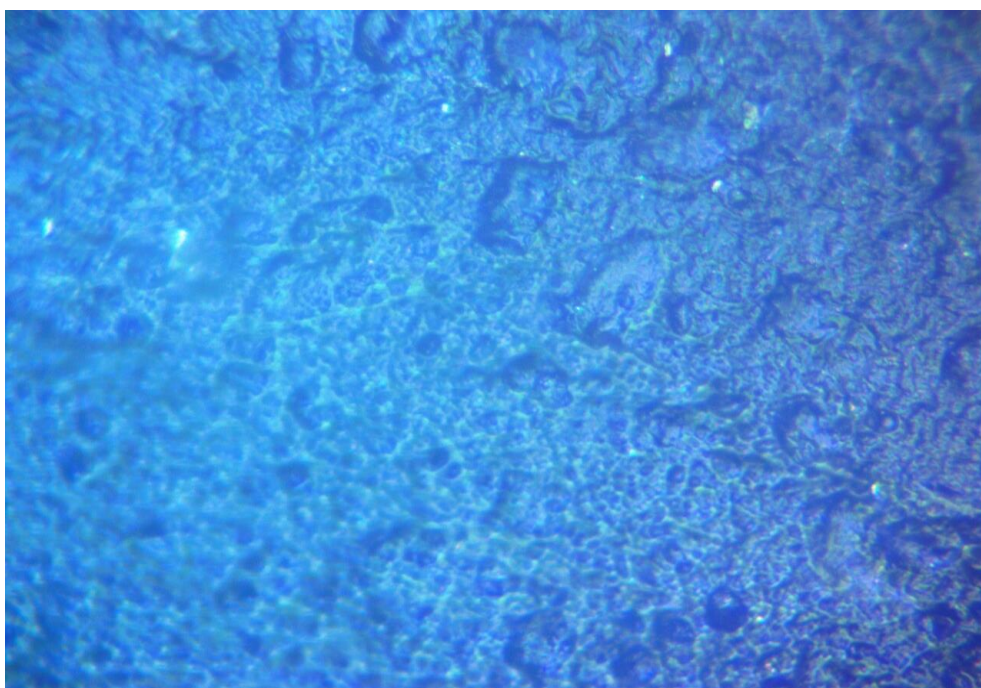
Порівнюючи мікроструктуру можна зробити висновок, що найбільші пори за розміром має епоксикомпозитний матеріал, наповнений порошком крохмалю в кількості 90 мас. ч., найменші – наповнений 110 мас. ч. На зображенні мікроструктури епоксикомпозитів із нижчим вмістом порошку візуально видно глибші пори, коли ж на зображеннях мікроструктури епоксикомпозитів із вищим вмістом майже не помітно заглиблення. Для

					БР 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

епоксикомпозитів, наповнених порошком крохмалю в кількості 100 мас. ч. та 110 мас. ч. (рисунок 3.9, в, г) спостерігається однорідність утворення малих за розміром пор в об'ємі матеріалу.



а

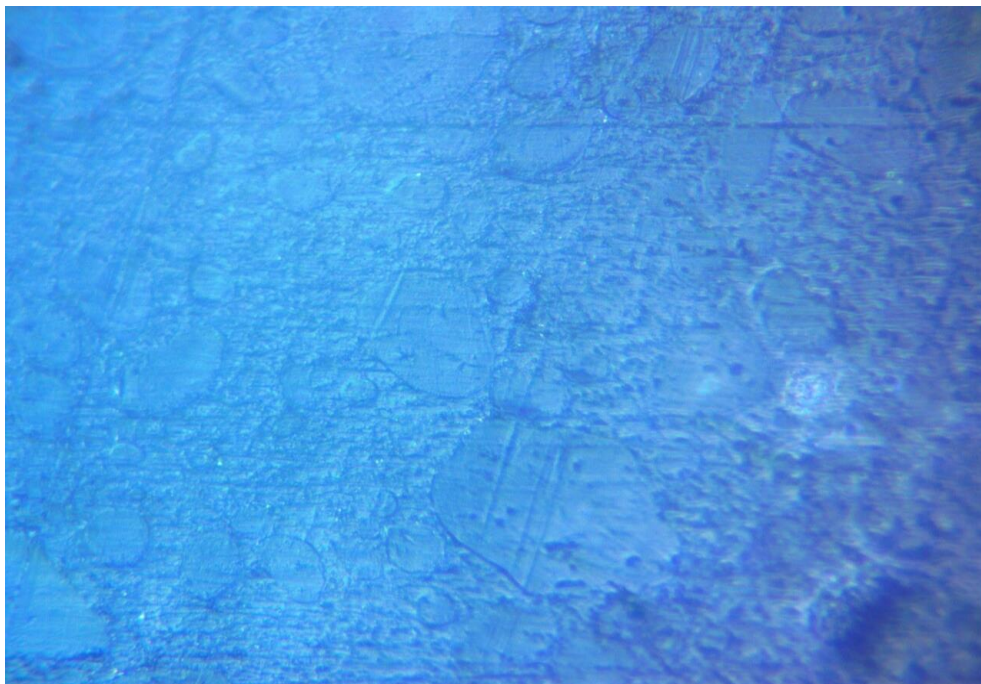


б

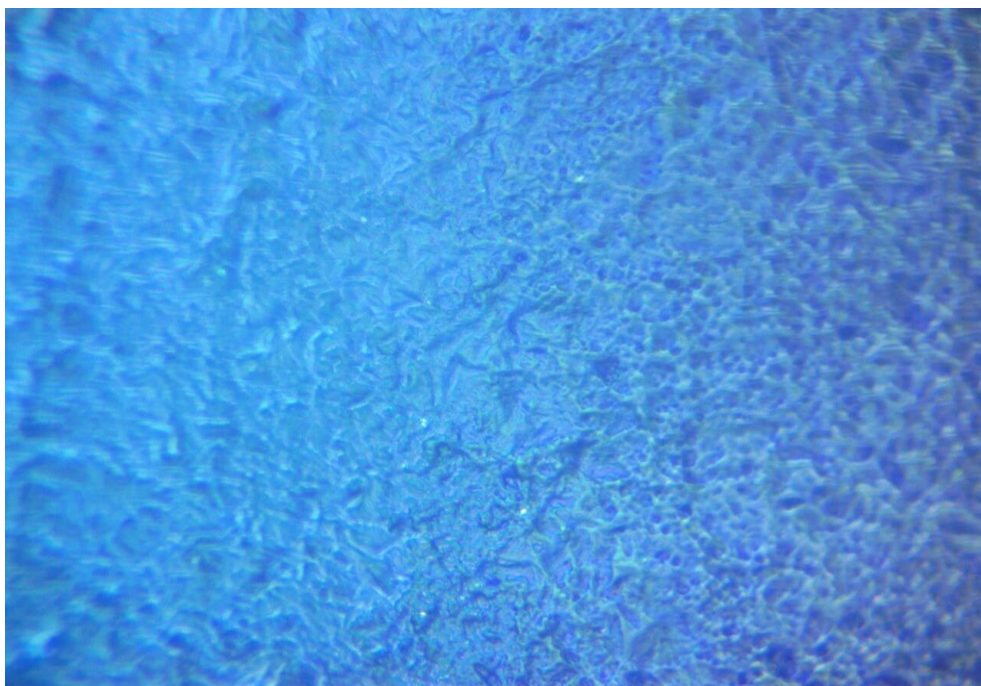
Рисунок 3.9 – Мікроструктура епоксикомпозитів, наповнених порошком крохмалю в кількості:

а – 80 мас. ч.;

б – 90 мас. ч.;



В



Г

Рисунок 3.9, лист 2

в – 100 мас. ч.;

г – 110 мас. ч.

					БР 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проаналізувавши мікроструктури розроблених епоксикомпозитів, наповнених крохмалем виявлено, що найбільш однорідна структура з найменш проявленими дефектами (пори, конгломерати) зафіксовані при вмісті наповнювача в кількості 110 мас. ч.

					БР 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

ВИСНОВКИ

В роботі визначено оптимальний вміст порошку крохмалю в епоксикомпозитах. Максимальна адгезійна міцність на рівні 13,45 МПа досягається при введенні 65 мас. ч. крохмалю, тоді як для отримання найвищих показників міцності на стиск (94,5 МПа) вміст наповнювача слід збільшити до 100...110 мас. ч. Найвищі значення твердості (322 МПа) отримано для біокомпозитів, наповнених 80 мас. ч. порошку крохмалю.

Експериментально встановлено, що найвищі значення ступеня структурування для розроблених епоксикомпозитів, наповнених крохмалем, від вмісту наповнювача характерні при вмісті крохмалю 90...100 мас. ч. (98,1 %).

Дослідження хімічної стійкості показали, що найменший вплив агресивними середовищами та найменше утворення продуктів корозії зафіксовано для зразка, наповненого 80 мас. ч. порошку крохмалю.

При аналізі мікроструктури зразків, наповнених крохмалем зробили висновки, що найбільш однорідна структура, та з найменш проявленими дефектами (пори, скупчення, риски від шліфування) були у епоксикомпозиту, наповненого порошком крохмалю в кількості 110 мас. ч.

Експериментально встановлено, що оптимальним є вміст наповнювача в кількості 50...80 мас. ч., що підтверджується отриманими високими показниками властивостей композитів та низькими внутрішніми напруженнями.

Розроблені біокомпозитні матеріали мають меншу вартість порівняно з аналогічними полімеркомпозитами за рахунок вмісту дешевого наповнювача. Дані матеріали можуть бути піддані вторинній переробці, оскільки містять наповнювач органічного походження, який є відновлюваною сировиною. Розроблені біокомпозити можуть бути використані для виготовлення елементів декору та тари.

					БР 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Recent advances in epoxy resin, natural fiber-reinforced epoxy composites and their applications / N. Saba, M. Jawaid, O. Y. Alothman et al. // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2016. – Vol. 35, Iss. 6. – P. 447–470.
2. Epoxy Composites: [monograph] / J. Parameswaranpillai, H. Pulikkalparambil, S. M. Rangappa, S. Siengchin. – Hoboken: Wiley, 2021. – 528 p.
3. Azman N. N., Siddiqui S., Low I. Characterisation of micro-sized and nano-sized tungsten oxide-epoxy composites for radiation shielding of diagnostic X-rays // Materials Science and Engineering: C. – 2013. – Vol. 33, Iss. 8. – P. 4952–4957.
4. Xiang Q., Xiao F. Applications of epoxy materials in pavement engineering // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 235. – Art. 117529.
5. Effects of rod size and fiber hybrid mode on the interface shear strength of carbon/glass fiber composite rods exposed to freezing-thawing and outdoor environments / G. Xian, R. Guo, C. Li, B. Hong // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 14. – P. 2812–2831.
6. A Review on Mechanical and Thermal Properties of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites: Recent Developments and Applications / N. Saba, M. Jawaid, M. T. Paridah et al. // Polymers. – 2022. – Vol. 14, Iss. 2. – Art. 265.
7. Production of epoxy composites reinforced by different natural fibers and their mechanical properties / E. Sarikaya, H. Çallioğlu, H. Demirel // Composites Part B: Engineering. – 2019. – Vol. 167. – P. 461–466.
8. Mechanical properties of epoxy resin toughened with cornstarch / Z. Wang, H. Lv, Y. Yang // e-Polymers. – 2022. – Vol. 22, Iss. 1. – P. 851–857.

					БП 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

9. Natural Fiber-Reinforced Thermoplastic and Thermosetting Polymer Composites for Mechanical, Thermal and Barrier Properties / Y. G. Thyavihalli Girijappa, S. M. Rangappa, J. Parameswaranpillai et al. // Materials. – 2023. – Vol. 16, Iss. 8. – Art. 3149.

10. Soumyalata D. B. A., Latheef A., Mathew A. J. Fabrication and Comparative Study on the Mechanical Properties of Epoxy based Polymer Composites with Coconut Shell Powder and Rice Husk Powder as Filler Materials // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2020. – Vol. 9, Iss. 07. – P. 719–723.

11. Bria V., Chirica I., Bria M. Some Properties of Starch/Epoxy Composites. Materiale Plastice. 2011. Vol. 48, no. 2. P. 151–154.

12. Mechanical properties, water absorption, and chemical resistance of Napier grass fiber strand–reinforced epoxy resin composites / V. P. Kommula, K. O. Reddy, M. Shukla et al. // International Journal of Polymer Analysis and Characterization. – 2014. – Vol. 19, Iss. 8. – P. 693–708.

13. Kiziltas A., Erbas Kiziltas E. Mechanical properties of epoxy resin toughened with cornstarch. International Polymer Processing. 2022. Vol. 37, no. 5. P. 504–512.

14. Oleksy M., Oliwa R., Budzik G. Epoxy Resin-Based Materials Containing Natural Additives of Quercetin Hydrate and Potato Starch. Polymers. 2023. Vol. 15, no. 22. Art. 4376.

15. Baxter L., Al-Oqla F. M. Effect of Starch-Based Hybrid Additive on Mechanical and Thermal Properties of Epoxy-Based Composites. SPE Automotive Composites Conference & Exhibition (ACCE). 2023. P. 12–19.

16. Chaudhary V., Bajpai P. K. Mechanical Behavior Modelling and Filler Geometry Effect of Starch Filled Polymer Composites. Materials. 2021. Vol. 14, no. 21. Art. 6587.

					БП 1326.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36