

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів та технологій

Кафедра матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»

Фізико-механічні властивості багат шарових
склопластиків на епоксиполімерній матриці /
Physical and mechanical properties of multilayer
fiberglass on epoxy polymer matrix

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Матеріалознавство»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМс-31

Вихриж Іван Боголюбівч

_____ (підпис) _____

Керівник:

к.т.н., професор
Кашицький Віталій Павлович

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«12» червня 2025 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., професор

Кашицький Віталій Павлович

Луцьк – 2025 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
Завідувач кафедри

Мельничук М.Д.

"11" 02 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Вихрику Івану Боголюбовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Різко механічні властивості багатомішарових склопластиків на епіпоксидній матриці

керівник роботи Кашчицький Віталій Павлович к.т.н. професор

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від "07." 02 2025 року № 78/01-0.

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «5» сервіс 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Літературні джерела, властивості вихідних матеріалів, методи дослідження фізико-механічних властивостей

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ

1. Огляд технічної літератури

2. Матеріали та методи дослідження

3. Властивості багатомішарових епоксидних склопластиків

Висновки

Список використаних джерел

Додатки

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

1. Мета та завдання роботи (1 л. ф. А4)

2. Характеристика компонентів (1 л. ф. А4)

3. Формування зразків (1 л. ф. А4)

4. Вміст гель фракції (1 л. ф. А4)

5. Твердість за Брінеллем (1 л. ф. А4)

6. Ударна міцність (3 л. ф. А4)

7. Висновки (1 л. ф. А4)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Н.КОНТРОЛЬ	Мисковець Р.В., фахівець	11.02.2025	05.06.2025

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Огляд технічної літератури	06.05.25р	виконав
2	Матеріали та методики дослідження	20.05.25р	виконав
3	Власноробні дослідження епоксидних склопластиків	03.06.25р	виконав

Здобувач вищої освіти

(підпис) Вихрик Ч.Б
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

Каміньський В.П
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Вихрик І.Б. Фізико-механічні властивості багатошарових склопластиків на епоксиполімерній матриці. Рукопис.

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

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

В роботі подано детальний аналіз літературних джерел, визначено перспективність впровадження полімеркомпозитних матеріалів в техніці і побуті, особливості використання листових синтетичних волокнистих та натуральних наповнювачів, а також полімерних матриць.

В роботі представлено характеристику матеріалів у вихідному стані, подано опис методик визначення фізико-механічних характеристик епоксиполімерних склопластиків та описано технологію формування епоксикомпозитних зразків. Досліджено вплив природи листового наповнювача та кількість шарів тканини на фізико-механічні характеристики епоксикомпозитних матеріалів.

Бакалаврська робота складається з графічної частини та пояснювальної записки.

Пояснювальна записка містить 46 сторінок формату А4, 11 рисунків та 35 літературних джерел. Графічна частина містить 9 листів формату А4 у додатку А.

Ключові слова: склотканина, арамідна тканина, вміст гель-фракції, твердість, ударна міцність.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив		Вихрик		05.06.25		3	46
Перевірив		Кашицький		05.06.25	ЛНТУ, кафедра матеріалознавства, гр. ПМс-31		
Н.контр		Мисковець		05.06.25			
Затв.		Мельничук					
Фізико-механічні властивості багатошарових склопластиків на епоксиполімерній матриці							

ANNOTATION

Vykhryk I.B. Physical and mechanical properties of multilayer fiberglass on epoxy polymer matrix. Manuscript.

Bachelor's qualification work of EP "Materials Science" specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

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

The work presents a detailed analysis of literary sources, determines the prospects for the introduction of polymer composite materials in technology and everyday life, the features of the use of sheet synthetic fibrous and natural fillers, as well as polymer matrices.

The work presents a characteristic of the materials in the initial state, describes the methods for determining the physical and mechanical characteristics of epoxy-polymer fiberglass, and describes the technology for forming epoxy composite samples. The influence of the nature of the sheet filler and the number of fabric layers on the physical and mechanical characteristics of epoxy composite materials is studied.

The bachelor's work consists of a graphic part and an explanatory note.

The explanatory note contains 46 pages of A4 format, 11 figures, and 35 literary sources. The graphic part contains 9 sheets of A4 format in Appendix A.

Keywords: fiberglass, aramid fabric, gel fraction content, hardness, impact strength.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	7
1.1. Характеристика полімеркомпозитних матеріалів.....	7
1.2. Армування полімерних матриць синтетичними та натуральними волоконнами	12
1.3. Властивості полімерних матриць.....	19
1.4. Висновки і постановка задач досліджень.....	22
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	24
2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів.....	24
2.2. Методи дослідження фізико-механічних характеристик.....	30
2.3. Технологія формування епоксикомпозитних зразків.....	32
РОЗДІЛ 3 ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОШАРОВИХ ЕПОКСИДНИХ СКЛОПЛАСТИКІВ.....	34
3.1. Дослідження ступеня структурування та твердості склопластиків.....	34
3.2. Дослідження стійкості склопластиків до дії динамічних навантажень.....	36
ВИСНОВКИ.....	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	43
Додатки	

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку суспільства пластмаси все частіше використовуються в народному господарстві та техніці. Вироби з пластмас у побуті та домашньому господарстві в багатьох випадках перевищують 50% від загальної кількості використовуваних предметів. Причиною такого широкого використання пластмасових виробів є ряд їх переваг перед іншими матеріалами, насамперед пов'язаних з економічністю та практичністю.

Композитні матеріали використовуються в меблях, упаковці, панелях, огорожах, в будівництві, автомобільній та морській промисловості, військовій, космічній та літакобудівній промисловості. У цих сферах застосування, протягом терміну служби, композити піддаються впливу різних умов навколишнього середовища.

Композити є універсальним та цінним сімейством матеріалів, які можна використовувати в багатьох галузях з високою якістю та низькою вартістю. Наразі синтетичні термопластичні композити, армовані волокном, широко використовуються завдяки високим механічним характеристикам та довговічності. Композитні деталі мають високу міцність є легшими порівняно з металами та можуть набувати будь-яку конфігурацію. Композити, армовані волокнами, є одними з найпоширеніших конструкційних матеріалів у сучасному світі, оскільки мають високе співвідношення міцності до ваги, високу жорсткість, низьку щільність, високу корозійну стійкість, високу межу витривалості тощо.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Характеристика полімеркомпозитних матеріалів

Композитні матеріали складаються з двох або більше фаз, які розділені матрицею, в результаті змішування призводить до отримання властивостей, які багато в чому відрізняються від окремих компонентів. Додаткові властивості можуть бути отримані шляхом поєднання матеріалу двох компонентів, головним чином наповнювача та полімерної основи [1]. Матриця утримує та зв'язує волокна разом, рівномірно розподіляючи навантаження всередині волокон, а також захищаючи їх від механічних пошкоджень та впливу навколишнього середовища. Такий спосіб називається армуванням, його використовують для підвищення механічних властивостей, таких як жорсткість та міцність матеріалу тощо.

Полімерні матричні композити набувають більшої популярності як заміна традиційних матеріалів у цивільній інфраструктурі, будівництві та морському застосуванні. Ширший вибір матеріалів та простота виробництва роблять їх ідеальними для інженерних застосувань. Крім того, волокнисто-армовані композити мають багато чудових характеристик, таких як висока питома міцність на розтяг та стиск, контрольована електропровідність та низький коефіцієнт теплового розширення, висока стійкість до втоми та придатність для виробництва матеріалів складної форми. Завдяки цим позитивним властивостям, волокнисто-армовані композити стали альтернативою традиційним конструкційним матеріалам, таким як сталь, дерево або метали, у багатьох сферах застосування. Зокрема, скловолокно є легким, міцним та надійним матеріалом [2].

Деякі жорсткі умови навколишнього середовища збільшують здатність до погіршення механічних властивостей. Властивості волокнистого

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

композиту визначаються властивостями матриці, волокон та межі розділу волокно/матриця в певному середовищі. Завдяки їх широкому використанню в конструкційному застосуванні, композити зазвичай піддаються впливу високої температури. Під час високотемпературного кондиціонування відбуваються помітні фізичні та хімічні зміни в полімерній сітці. Розпад ближнього впорядкування та термоокислювальна деструкція відбувається за підвищеної температури. Через різницю в коефіцієнті теплового розширення матриці та арматури, в композиті виникають термічні напруження, що може призвести до утворення мікротріщин на межі розділу. Таким чином, інтерфейс стає більш схильним до агресивних реакцій за підвищеної температури середовища. Поширені види руйнування при високій температурі включають руйнування волокна, розтріскування матриці та розшарування волокна/матриці [3].

У сфері науки і техніки волокнистих армованих полімерних (FRP) композитних матеріалів, загальні властивості композитів визначаються межею розділу волокно/полімер/ (інтерфейсом). Межа розділу – це тривимірна область між об’ємним волокном та об’ємною матрицею. Розташування атомів, молекулярна конформація та хімічний склад впливають на зв’язок між волокном та матрицею. Крім того, морфологічні властивості волокна та коефіцієнт дифузії елементів у кожному компоненті також мають виражений вплив, тому між окремими системами волокно/матриця існує унікальна межа розділу. Різні механізми, що обумовлюють адгезію волокна/матриці, це адсорбція, змочування, електростатичне притягання, хімічний зв’язок, реакційний зв’язок та обмінний реакційний зв’язок. Поведінка та характеристики вдосконалених структурних композитів FRP враховують вплив існуючої поверхні розділу між фази між волокном та матрицею, а також не можуть бути пояснені з точки зору конкретних властивостей. Їх використання в різних галузях сприяє таким механічним властивостям, як високе співвідношення міцності до ваги, корозійна стійкість, хороша

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ударостійкість, кращі демпфуючі характеристики та покращені втому-міцнісні властивості [4].

Через зростаюче застосування композитів, армованих волокном полімером (FRP), в аерокосмічних апаратах для кріогенних паливних баків, необхідно розуміти їхню поведінку у кріогенних умовах. Найчастіше зареєстрованими механізмами пошкодження за кріогенної температури є локалізована деструкція поверхні, розшарування та утворення мікротріщин у полімерній матриці та/або на межі розділу волокно/матриця. Ці механізми руйнування погіршують властивості композиту на мікроскопічному рівні. Нещодавньою розробкою в галузі армованого волокном композиту є гібридний композит. Цей композит може мати два або більше типів армування або матричну гібридизацію з деякими наночастинками. Гібриди концептуально виготовляються таким чином, щоб скористатися перевагами всіх складових армування. Оскільки скловолокно має низьку питому міцність та питомий модуль пружності, певну об'ємну частку вуглецевих волокон (з високою питомою міцністю та модулем) слід включити до композиту для покращення механічних властивостей та отримання кращого композиту. Але через низьку стійкість до руйнування та високу вартість вуглецевих волокон доцільно підтримувати баланс між вартістю та експлуатаційними характеристиками отриманого композиту.

З огляду на очікування міцності та покращення паливної ефективності завдяки легким характеристикам вуглецевого волокнистого композитного матеріалу, було визнано застосування полімеркомпозитів в автомобільній галузі як прорив у правилах економії палива. Розробка недорогого вуглецевого волокнистого композитного матеріалу, а також спричинення технологічних інновацій із впровадженням високоефективного виробничого процесу, повномасштабне впровадження вуглецевого волокнистого композитного матеріалу стало реалістичним для виходу на ринок серійних автомобілів. Удосконалення шнекового циліндра для ливарної машини дозволило

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

використовувати традиційний процес лиття композитів без гранулювання компаунду. Можна формувати композитний матеріал, армований коротким волокном (композит, армований коротким волокном), за один крок [5, 6]. Однак, порівняно з короткими гранулами, що містять волокно, які створюються в процесі компаундування, дисперсія потоку волокон стала проблемою. Волокна коротких гранул, що містять волокна, були отримані методом екструзії, яка після плавлення гранул була диспергована. Розподіл волокон після лиття під тиском залежить від потоку всередині форми.

Використання композитів для зовнішніх конструкційних застосувань часто передбачає їх вплив змінних умов навколишнього середовища, що вказує на температуру, вологість та сольовий туман як ключові фактори деградації матеріалу. З цих причин нещодавно зосередили увагу на поведінці композитів при чергуванні впливу сольового туману та сухої фази, оцінюючи таким чином здатність епоксидних композитів, армованих волокнами на основі льону, скла та льону-скла, відновлювати свої механічні властивості при переривчастому впливі агресивних умов навколишнього середовища, типових для морського застосування. Покращення знань про чергування вологих/сухих або вологих/сухих умов відкриває нові виклики для використання NFRC (неперервних композитів з волокнистим волокном) у зовнішніх або морських застосуваннях, де вплив переривчастих вологих або мокрих умов є критичним питанням.

Кожен тип вдосконалених конструкцій охоплений широким спектром застосування FRP. Різні компоненти в літаках, гелікоптерах, космічних апаратах, човнах, кораблях, морських платформах, а також в автомобілях, хімічному обробному обладнанні, спортивних товарах та цивільній інфраструктурі, такій як будівлі та мости, включають їх використання [7]. Протягом терміну служби всі ці компоненти та конструкції піддаються впливу навколишнього середовища.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Деяким впливам навколишнього середовища можуть бути висока температура, низька температура, висока вологість, вплив ультрафіолетового випромінювання, лужне середовище, замерзання, відтавання, вплив морської води, і можуть бути більш суворими, якщо спостерігаються циклічні зміни температури, гіротермічного середовища та космічного середовища на низькій навколоземній орбіті. У цих середовищах полімерні матричні композити вразливі до пошкоджень. Міжфазна адгезія на межі волокно-матриця домінує в механічній поведінці композитів FRP. Деградація межі може відбуватися через різне термічне розширення волокна та матриці при підвищеній температурі, що призводить до зниження міжшарової міцності на зсув композиту [8].

Поведінка більшості полімерних матриць є крихкою за низької температури, а залишкові напруження або концентрація напружень не допускаються для релаксації. Великі розшаровані межі розділу виникають за низьких температур через наявність залишкових напружень. Міжфазна адгезія може бути змінена під дією вологи, що впливає на властивості FRP-композитів. Дисоціація молекулярних зв'язків у полімерній матриці може бути здійснена енергією, пов'язаною з УФ-випромінюванням, і може руйнувати матеріали [9].

Полімерні матричні композити є придатними матеріалами для механічних опор та електричних ізоляторів, інфузійних реакторів для надпровідних магнітів. Вони складно зберігають свою ефективність навіть у суворих космічних умовах

незважаючи на багато позитивних аспектів використання FRP у космічних конструкціях. Одним із частих пошкоджень, що обмежують термін служби ламінованих композитів, є розшарування. Спостерігається значне покращення механічних властивостей полімерів шляхом включення нанорозмірної другої фази шляхом належного перенесення навантаження на межі розділу. Міцність на зсув міжфазної матриці нанонаповнювач/полімер

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

залежатиме від властивостей та структури будь-якої області розділу між об'ємною полімерною смолою та поверхнею армування [10]. Здатність до відновлення межі розділу може бути збільшена шляхом утворення оборотних ковалентних зв'язків між полімерною мережею та армуючим матеріалом, що призводить до збільшення терміну служби композиту. Під час перебування композитів у морській воді ступінь деградації матриці, викликаної вологою, та межі розділу волокно/матриця сильно залежить від досліджуваної композитної системи. Вміст насиченої вологи знижується через наявність солі у ванні для кондиціонування порівняно з дистильованою водою. Прямий вплив заморожування-танення може призвести до мікротріщин в товстих ділянках матриці.

Отже, розробка екологічно чистих матеріалів з покращеною довговічністю є актуальною темою для розширення їхнього потенціалу для використання на зовнішніх конструкціях; тобто гібридизація зі скловолокном потенційно може стати кроком до цієї перспективи. Крім того, це відкриває широкий спектр застосувань у всіх промислових секторах, для яких вибір більш екологічно стійких матеріалів є додатковою цінністю, без шкоди для їхньої механічної стабільності та довговічності з часом [11, 12].

1.2. Армування полімерних матриць синтетичними та натуральними волокнами

Полімерні композити, зміцнені волокнами, зазвичай в один-два рази більш міцні та жорсткі, ніж їхні ненаповнені полімери [13]. Компоненти впливають на пружну поведінку тканих полімерних композитних матеріалів, зміцнених скловолокном.

Армування несе основне навантаження, особливо коли композит складається з волокнистого армування, диспергованого у матриці (наприклад, вуглецевий/епоксидний композит) [14]. Міцність і жорсткість таких

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

композитів, таким чином, контролюються міцністю і жорсткістю складових волокон. Основною перевагою волокнистих композитів є висока міцність і модуль пружності, які однакові або кращі за багато традиційних металевих матеріалів. Завдяки низькій питомій вазі, співвідношенню міцності до ваги та співвідношенню модуля до ваги, ці композитні матеріали значно перевершують металеві. Крім того, співвідношення міцності до ваги, а також стійкість до пошкодження від втоми багатьох композитних матеріалів є високими. Механічні властивості волокнистих композитів залежать від властивостей складових матеріалів (тип, кількість, розподіл та орієнтація волокон, вміст пор). Окрім цих властивостей, важливу роль також відіграють природа міжфазних зв'язків та механізми передачі навантаження на межі розділу. Механічна поведінка полімерних матричних композитів, зокрема, залежить від умов навколишнього середовища. Експериментальні результати показують, що міцність на розтяг скловолоконних плит змінюється на різних рівнях при впливі вибраних умов навколишнього середовища [15].

Різні високопродуктивні волокна, такі як вуглець, бор, графіт та кевлар, з'явилися як нове покоління високопродуктивних матеріалів за останнє десятиліття [16]. Вуглецеві волокна забезпечують вищу міцність і жорсткість, ніж інші волокна, але часто можуть мати обмежену розтяжність і погану стійкість до пошкоджень, тоді як кевларові волокна мають вищий ступінь в'язкості та стійкості до пошкоджень, і їх гібридизація може бути відповідним рішенням для обмежень вуглецевих волокон. Гібридні композити визначаються як використання двох або більше різних матеріалів, поєднаних в одній матриці. Гібридні композити демонструють деякі унікальні характеристики, які можна використовувати для задоволення точних вимог до розглянутої структури. Порівняно з монолітним композитом, гібридні композити отримали технологічний прогрес, оскільки вони забезпечують більш збалансовані властивості [17, 18]. Деякі конкретні переваги гібридного композиту над монолітними композитами включають збалансовану міцність і

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

жорсткість, збалансовані механічні властивості вигину та мембрани, збалансовану стійкість до термічної деформації, зменшену вагу та/або вартість, покращену стійкість до втоми, знижену чутливість до надрізів, покращену в'язкість до руйнування та/або стійкість до розтріскування та покращену ударну стійкість. Існують різні типи гібридних композитів, які визначаються як: взаємодія – де два або більше складових типів волокон армовані разом з регулярною або випадковою орієнтацією; сендвіч-гібриди – у цьому типі композитів один матеріал затиснутий між двома шарами іншого; шаруваті або ламіновані, де шари, що чергуються, двох (або більше) матеріалів укладаються регулярним чином; ретельно змішані гібриди, у цьому типі композитів армуючі волокна змішуються випадково для забезпечення однорідного розподілу; інші види або супергібриди, що базуються на органічному полімері та металевій матриці.

Скловолокно зазвичай використовується як армуючий компонент в різних формах, таких як ткане полотно, довге волокно та коротке волокно [19]. Скловолокно виготовляється з надзвичайно тонких скляних волокон. Це легкий, надзвичайно міцний та надійний матеріал. Хоча міцність дещо нижча, ніж у вуглецевого волокна, і він менш жорсткий, матеріал зазвичай набагато менш крихкий, а сировина набагато дешевша. Його об'ємна міцність та вагові властивості також дуже сприятливі порівняно з металами, і його можна легко формувати за допомогою процесів лиття. Скловолокно найбільш широко використовується як сировина для композитних матеріалів. Скловолокно становить близько 90% арматури, що використовується в композитах у світі. Більшість GFRP-композитів використовуються в будівельному та транспортному секторах [21]. Попит на відновлювану енергію у вигляді вітрових турбін, попит на легкі паливоективні літаки та автомобілі, а також попит на труби, резервуари та інше корозійностійке обладнання з GFRP є основними рушійними силами збільшення попиту в найближчі роки.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Як правило, скловолокно використовується з поліестером для виготовлення скловолокнистих листів. Скловолокно – це особливий тип синтетичного волокна, міцність якого є вищою, ніж у інших волокон. Головною властивістю скловолокна є те, що воно вогнестійке та водонепроникне.

Хоча міцнісні властивості скловолокна дещо нижчі, ніж у вуглецевого волокна, зазвичай воно менш крихке та набагато дешевше. Завдяки цим властивостям скловолокно використовується в кількох галузях промисловості. По суті, волокнисті композити складаються з двох або більше фаз: високоміцної та жорсткої волокнистої армуючої фази та матричної фази. Матрична фаза об'єднує матеріал разом у когезійну систему, яка захищає волокна та передає навантаження між волокнами. Завдяки вдалому поєднанню цих властивостей, полімерні композити, армовані скловолокном, використовуються зокрема в автомобільній та авіаційній промисловості, оборонній промисловості, космічних кораблях та морських транспортних засобах [22]. Завдяки своїм унікальним конструкційним особливостям, простоті обробки, низькій вартості виготовлення та чудовим механічним властивостям, ткани композити знаходять все більше застосування в аерокосмічній, автомобільній конструкціях та обладнанні для надпровідних магнітів.

В результаті досліджень встановлено вплив низької температури на пошкодження від удару вуглецевих/епоксидних ламінатів, враховуючи термічно індуковані напруження. Експериментальні дані показали, що низька температура має помітний вплив на руйнування вуглецевого волокна (CFRP), подібно до збільшення енергії удару зі збільшенням розтріскування та розшарування матриці, глибшим втисненням на стороні удару та більш сильним розшаруванням волокна та матриці, а також руйнуванням волокон на протилежній стороні. Крім того, окрихчення полімерної матриці в поєднанні з міжшаровими напруженнями, що виникають за низьких температур, сприяє

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

швидкому поширенню пошкодженої ділянки, зменшуючи так звану порогову енергію, тобто енергію удару, нижче якої в композиті не виникає видимих пошкоджень.

Зі зростанням екологічної обізнаності, екологічних проблем та новим законодавством, полімерні композити, армовані біоволокном, отримали дедалі більшу увагу протягом останніх десятиліть. Наприкінці 1980-х років дослідники зосередилися на виробництві продукту з біорозкладного полімерного композиту, армованого натуральним волокном, щоб уникнути глобальних екологічних проблем. Використання натуральних волокон у кількох промислових застосуваннях привернуло значну увагу в останні роки завдяки їхнім позитивним властивостям, таким як низька вартість, легка вага та біорозкладність, що робить їх потенційним варіантом для розробки стійких композитів, армованих волокнами [23, 24]. Тим не менш, одним з головних недоліків цих матеріалів, який перешкоджає їх ширшому використанню, є низька стійкість до вологи або вологого середовища, що може призвести до деградації матеріалу та втрати механічних характеристик з часом. Ці проблеми є найбільшою перешкодою, що сприяє застосуванню композитів, армованих натуральними волокнами, обмежуючи їх використання на відкритому повітрі або в морському середовищі, де очікується вплив води або вологи. Використання біорозкладних волокон як арматури в полімерній матриці досліджується останніми роками. Натуральні волокна, такі як койра, джут, рамі, банан, олійна пальма, коноплі, пальміра та сизаль, як арматура в полімерній матриці, є легкодоступними, низьковартісними, низької щільності, неабразивними та біорозкладними. Використання натуральних волокон як арматури в композитах дає хороші можливості для ефективного використання сільськогосподарських побічних продуктів. Їх можна формувати у плоскі плити та використовувати як заміну будівельних матеріалів.

Збільшення міцності на розтяг та модуля пружності зафіксовано в композитах деревне волокно/нейлонова матриця, однак зниження міцності на

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

розтяг відбувається у композитах деревне волокно/поліпропілен матриця зі збільшенням вмісту деревного волокна. Але порівняно з полімерами вартість обробки натуральних волокон вища, а також вони мають низьку міцність та жорсткість. Джут є другим поширеним природним волокном, що вирощується у світі після бавовни. Матеріали, армовані натуральним волокном (NF), пропонують багато екологічних переваг, таких як зменшення залежності від невідновлюваних джерел енергії/матеріалів, зменшення забруднення та викидів парникових газів. Натуральні наповнювачі (льон, коноплі тощо) представляють собою екологічно чисту альтернативу традиційним армуючим волокнам (скло, вуглець). Перевагами натуральних наповнювачів над традиційними є їхня низька вартість, висока в'язкість, низька щільність, хороші питомі властивості міцності, зменшене зношування інструментів (неабразивні для обробного обладнання) та підвищена енергетична рекуперація [25]. Останнім часом зростає інтерес до сільськогосподарських відходів та рослин як заміни деревної сировини.

Оскільки в деяких частинах світу штучні волокна, такі як сталеві або скляні волокна (волокна), не є легкодоступними, були зроблені спроби поєднати природно доступні волокна, виділені з рослин, у композитних матеріалах. Особливістю цих волокон є легкість їх обробки для екстракції. Варто зазначити, що при використанні цих волокон з матрицею є те, що вони мають шорстку поверхню в лужному середовищі, що, відповідно, викликає занепокоєння щодо довговічності композиту. Оскільки ці волокна є ефективними, були зроблені спроби подолати проблеми міцності або шляхом використання наповнювачів для зниження його лужності, або забезпечення міцності волокон шляхом хімічної обробки. Натуральні волокна, що використовуються як складова композиту, включають аквара, бамбук, койра, сизаль, цукровий очерет, деревину та слонову траву [26]. Раніше багато дослідників використовували натуральні волокна як альтернативний матеріал для синтетичних волокон у виробництві композитів.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перемішування двох або більше видів волокон у спільній матриці утворює гібридні композити. У цьому контексті гібридизація із синтетичними волокнами, такими як скляні волокна, може покращити загальні характеристики полімеркомпозитів, тим самим продовжуючи термін їхньої служби [27]. Дійсно, скляні волокна відіграють екрануючу роль, запобігаючи проникненню як вологи, так і води в натуральні волокна та перешкоджаючи деградації полімерної матриці. Додавання скловолокна може покращити стійкість до старіння полімеркомпозитів у складних умовах навколишнього середовища, також показавши, що послідовність укладання гібридних композитів помітно впливає на їх водопоглинання. Аналогічно, гібридизація композитів, армованих лляним волокном, з використанням базальтових волокон дозволяє стримувати зниження механічних властивостей через старіння, тим самим покращуючи загальну довговічність композитів. Наявність вуглецевих волокон на поверхні призводить до кращої гідротермічної стійкості, ніж в інших гібридних послідовностях укладання, завдяки бар'єрному ефекту вуглецевих волокон проти молекул води. Дисперсне волокно, диспергований волокнистий шар, волокниста оболонка з ядром, волокниста оболонка без волокнистого ядра – це різні форми гібридів, які часто використовуються. Властивості гібридних композитів залежать від довжини та вмісту волокон в окремому волокні, розташування волокон у матриці, міжфазного зв'язку волокнистої матриці та міцності волокон. Механічні властивості композитів з натуральних волокнистих матеріалів можна покращити шляхом гібридизації скловолокна з натуральними волокнами [28].

У цьому контексті спрощений підхід, спрямований на прогнозування погіршення експлуатаційних характеристик та відновлення гібридних композитів під час впливу переривчастих вологих або сирих умов, міг би забезпечити цінну наукову обґрунтованість цих матеріалів, крім того, що матиме значні наслідки для їх використання в різних сферах застосування. Цей

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

підхід також дозволить розширити цю стратегію не лише для проектування композитів, але й для моніторингу технічного обслуговування в реальних умовах експлуатації.

З цією метою порівнювали поведінку старіння льону, скла та гібридних композитів, армованих льоном та скловолокном, шляхом піддавання їх циклу сольового туману/сухості та моніторингу їх властивостей адсорбції та десорбції води разом з їх згинальними характеристиками.

Пальмірове волокно – це натуральне волокно, яке знаходяться в основі листя та стеблі пальміри. Їх відокремлюють вручну або механічно подрібнюють, а потім видаляють серцевину за допомогою пристрою. Волокна темно-коричневого кольору та мають довжину 200...500 мм. Під час відокремлення цих волокон від основи листя утворюється велика кількість волокнистих відходів, які не мають подальшого використання. Вони містять серцевину та короткі волокна низької міцності довжиною від 30 до 100 мм. Ці волокнисті відходи довго розкладаються в навколишньому середовищі, а при спалюванні (що є звичайним методом утилізації) у відкритому середовищі створюють забруднення навколишнього середовища. Тому важливо, щоб ці відходи використовувалися в тій чи іншій формі для різних застосувань.

1.3. Властивості полімерних матриць

Матричні матеріали відіграють вирішальну роль у виготовленні композитних матеріалів. Навантаження передається на арматуру через матрицю та забезпечує композитам міцність, стійкість до пошкоджень та ударостійкість. Терморезистивні та термопласти – це два різних типи матриць, які зазвичай використовуються в полімерних композитних матеріалах [29]. Терморезистивні матриці включають, вінілові естери, епоксидні смоли, бісмалеїміди, ціанатні естери, полііміди та фенольні тощо. З іншого боку, поліетеретеркетон (РЕЕК), поліетерокетонкетон (РЕК), поліфеніленсульфід

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

(PPS) та PP – це напівкристалічні термопласти, тоді як поліетеримід (PEI) – це аморфні термопластичні матриці. Матриці впливають на кінцеві термомеханічні характеристики композиту, а також мають значний вплив на міжшаровий зсув та на властивості зсуву в площині. Хоча термопластичні матриці домінують у композиті, армованому коротким волокном, серед довгих та безперервних волокнистих композитів переважають термореактивні матриці через їхню придатність для просочення волокнистої арматури. Хоча вони використовуються дуже широко, вони мають деякі недоліки, такі як низька температура зберігання, складний та тривалий процес затвердіння тощо, що призводить до дефектів виробничого процесу. У цій ситуації термопластичні матриці можуть бути хорошим варіантом, але потрібна вища температура обробки. Отже, в'язкість ускладнює обробку. Крім того, вартість термопластичних матриць вища, ніж термореактивних. У цьому відношенні варіації матриць безпосередньо впливають на властивості та обробку композитних матеріалів.

Полімерні матриці мають багато переваг, таких як легкодоступність, низька вартість, можливість формувати будь-яку форми та розмір, технологічність [30, 31]. Порівняно з іншими смолами, термореактивна епоксидна смола використовується в багатьох промислових сферах, оскільки вона утворює тривимірну зшити сполуку за рахунок хімічної реакції. Епоксиполімери мають наступні переваги: висока когезійна та адгезійна міцність, високу стійкість до хімічних реагентів та низький коефіцієнт усадки.

Полімери особливо привабливі як матричні матеріали, оскільки вони легко обробляються, а їхня щільність порівняно низька в порівнянні з іншими матеріалами. Вони демонструють чудові механічні властивості. Високотемпературні смоли використовуються як композитні матеріали, які зараз використовуються у виробництві високошвидкісних літаків, ракет та інших пов'язаних з ними космічних пристроїв та електроніки.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Наразі синтетичні армовані волокном термопластичні композити широко використовуються завдяки їх добрим механічним властивостям та довговічності. Скловолокно армовані полімерні (GFRP) композити найчастіше використовуються в виробництві композитних матеріалів завдяки їхній низькій вартості, високій міцності на розрив, високій хімічній стійкості та ізоляційним властивостям [32]. Композитні матеріали на основі ненасиченої полієфірної смоли, армованої скловолокном (UPR), стали альтернативою традиційним конструкційним матеріалам, таким як деревина та сталь у деяких застосуваннях, завдяки своїм добрим механічним властивостям. Механічні властивості волокнистих UPR-композитів залежать від властивостей складових матеріалів, природи міжфазних зв'язків, механізмів передачі навантаження на межі фаз та міцності адгезії між волокном та матрицею.

Термопластичні композити (ТК) викликають зростаючий інтерес, головним чином завдяки своїм специфічним властивостям, таким як високе співвідношення міцності та жорсткості до ваги, технологічність, покращена стійкість до корозії та впливу навколишнього середовища. Крім того, відповідний вибір термопластів також може дозволити використання композитних виробів у важких умовах, таких як дуже низькі температури, при яких власна крихкість термореактивних матриць є обмеженою. Попередні дослідження були в основному зосереджені на вуглецевих волокнистих пластиках (CFRP) на основі термореактивних матриць, які досі широко використовуються в літаках та космічних конструкціях, де композити можуть піддаватися дуже низькій температурі (до $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Було виявлено лінійну залежність між енергією удару та площею розшарування, а також збільшення площі пошкодження при зниженні температури [33]. При низькій енергії удару кількість максимально поглиненої енергії майже постійна та не залежить від температури, але зі збільшенням рівня енергії поглинена енергія стає все більш залежною від температури. Більше того, як і очікувалося, максимальна сила та показник пластичності зменшуються з температурою випробування.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Температуру, за якої полімерні матриці демонструють склоподібну поведінку, можна значно знизити, використовуючи термопластичні матриці з температурою склування нижчою, ніж температура експлуатації виробів. Це стосується термопластичних поліуретанів (ТПУ), які поєднують легку оброблюваність термопластів з високою еластичністю еластомерів та мають температуру склування нижче мінус 40 °С.

1.4. Висновки і постановка задач досліджень

Композитні матеріали створюють комбіновану властивість з двох або більше матеріалів, яку неможливо отримати окремо кожним з компонентів. Композити, армовані волокном, успішно використовувалися протягом багатьох десятиліть для різних інженерних конструкцій. Полімерні композити, армовані скловолоком (GFRP), найчастіше використовуються у виробництві композитних матеріалів завдяки своїй низькій вартості, високій міцності на розрив, високій хімічній стійкості та ізоляційним властивостям. Матриця може складатися з поліефірних, вінілестерових, фенольних та епоксидних смол. Відповідні склади та орієнтація волокон забезпечили задані властивості та функціональні характеристики композитів GFRP подібними до сталі, оскільки мають вищу жорсткість, ніж алюміній, та питому вагу, що становить чверть ваги сталі. Різні армуючі елементи GF, такі як тканий мат, рубане волокно та рубаний мат у композитах використовують для покращення механічних та триботехнічних властивостей композитів. Композитні матеріали на основі ненасиченої поліефірної смоли (UPR), армованої скловолоком, стали альтернативою традиційним конструкційним матеріалам, таким як деревина та сталь у деяких застосуваннях, завдяки своїм високим механічним характеристикам. Механічні властивості композитів,

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

армованих волокном, залежать від властивостей складових матеріалів, природи міжфазних зв'язків, механізмів передачі навантаження на межі розділу та адгезійної міцності між волокном та матрицею.

В результаті детального аналізу літературних джерел встановлено основні завдання, які необхідно виконати для визначення природи наповнювача та кількісного вмісту в епоксиполімерній матриці:

- визначити ступінь структурування епоксиполімерних склопластиків;
- визначити механічні характеристики епоксикомпозитних матеріалів з різним вмістом наповнювачів;
- дослідити характер руйнування епоксиполімерних склопластиків під впливом динамічних навантажень;
- визначити вплив природи наповнювача та його вміст на фізико-механічні характеристики епоксиполімерних склопластиків.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів

Скловолокно – це матеріал, що складається з кількох тонких скляних волокон. Цей продукт є одним із найуніверсальніших промислових матеріалів, які відомі сьогодні. Він має задовільні механічні властивості, порівнянні з іншими волокнами, такими як вуглецеве волокно та полімери. Скловолокно використовується як армуючий агент для багатьох полімерних виробів, щоб утворити дуже міцний та легкий матеріал, відомий як склопластик [34].

Скловолокно пропонує деякі унікальні переваги порівняно з іншими матеріалами завдяки своїй товщині, вазі та міцності. Завдяки такому широкому діапазону властивостей, матеріал може задовольнити конструкторські та проектні завдання в багатьох промислових застосуваннях.

Властивості скловолокна:

- висока міцність на розтяг. Скло має більшу міцність на розтяг, ніж сталевий дріт того ж діаметра, за меншої ваги;
- стабільність розмірів. Скловолокно не чутливе до коливань температури та гігromетрії. Воно має низький коефіцієнт лінійного розширення;
- висока термостійкість. Скловолокно зберігає 50% міцності на розтяг за кімнатної температури, 25% за температури 480°C, температуру розм'якшення 845°C та температуру плавлення 1135°C;
- хороша теплопровідність. Скловолокна є чудовими теплоізоляторами завдяки високому співвідношенню площі поверхні до ваги, що визначає корисну властивість у будівельній галузі;
- висока вогнестійкість. Скловолокно є мінеральним матеріалом, воно природно негорюче, не поширює та не підтримує полум'я, а також не виділяє

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

диму чи токсичних продуктів під впливом тепла.

– висока хімічна стійкість. Скловолокно дуже стійке до впливу більшості хімічних речовин.

– задовільні електричні властивості. Скловолокно має високу діелектричну міцність та низьку діелектричну проникність. Це чудовий електричний ізолятор за малої товщини;

– діелектрична проникність. Ця властивість скловолокна робить його придатним для електромагнітних вікон.

– сумісність з органічними матрицями. Скловолокно може відрізнятися за розміром і має здатність поєднуватися з багатьма синтетичними смолами та деякими мінеральними матрицями, такими як цемент.

– висока атмосферостійкість. Скловолокно не схильне до сонячного світла, грибків чи бактерій.

– біологічна стійкість. Скловолокно не гниє та не піддається дії гризунів та комах.

Усі види скловолокна мають високу аморфну природу. Між волокнами немає сили когезії через відсутність міжмолекулярного притягання. Більша здатність катіонних елементів, таких як оксид бору та оксид алюмінію, збільшує міцність матеріалу.

Основним компонентом скловолокна є кремнезем (діоксид кремнію). Сировиною для кремнезему є пісок або пісковик. Скло має високу аморфну природу через сильну мережеподібну структуру в його хімічній структурі.

Основні інгредієнти:

– вапно $[Ca(OH)_2]$ – стабілізуючий агент;

– магнезія $[MgO]$ – стабілізуючий агент;

– глинозем $[Al_2O_3]$ – підвищує міцність і довговічність скловолокна завдяки більшій зв'язувальній здатності;

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

- сода;
- оксид бору – утворює зшивання в структурі, що допомагає покращити міцність.

Скло Е – найміцніше волокно з високими ізоляційними властивостями. Його здатність до відновлення вологи становить лише 0,5%. Тому в ньому немає полярних груп або носіїв електричного заряду, тому воно має високі ізоляційні властивості. Завдяки високій міцності його використовують для армування. Завдяки низькому MR воно має низьку електропровідність.

Етапи виробництва скловолокна:

- підготовка скляних кульок;
- додавання всіх інгредієнтів для утворення суміші;
- інтенсивне перемішування для однорідності;
- плавлення суміші;
- підготовка кульок діаметром 2 см;
- плавлення та екструзія нитки;
- плавлення здійснюється в електричній печі;
- різання скла з високим потоком повітря виконується під час екструзії

для створення скловолокна;

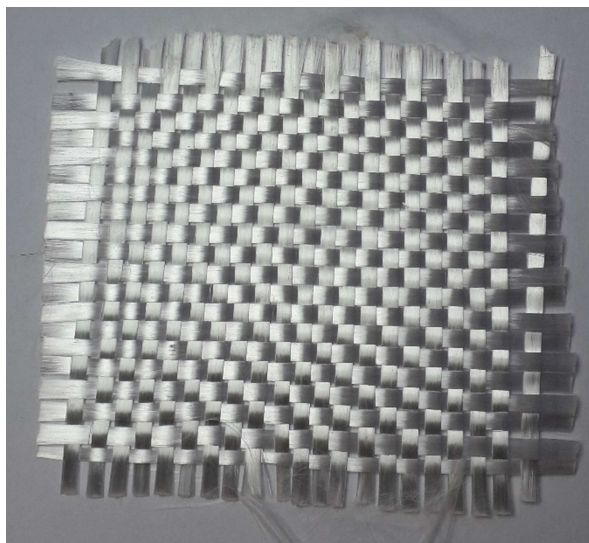
- плавлення суміші відбувається за температури 800°C.

Сфери застосування:

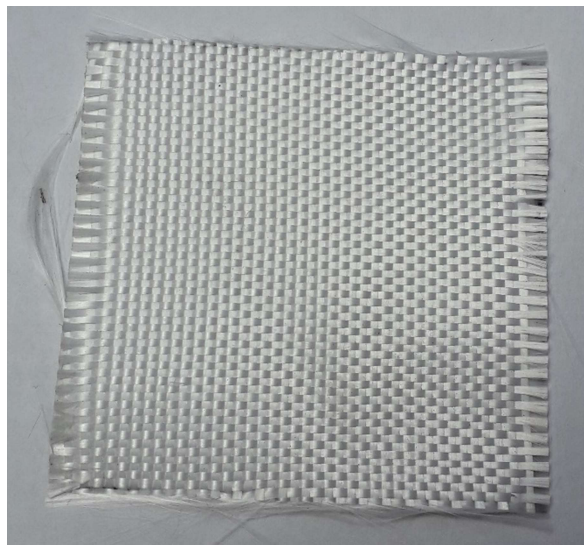
- теплова, електрична та звукоізоляція;
- високоміцні тканини;
- термостійкі та корозійностійкі тканини;
- біомедичне застосування для заміни суглобів;
- виготовлення композитів;
- текстурована скляна пряжа (використовується для виготовлення фільтрів, стійких до високих температур);
- захисний одяг;
- промислові тканини та меблеві тканини.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

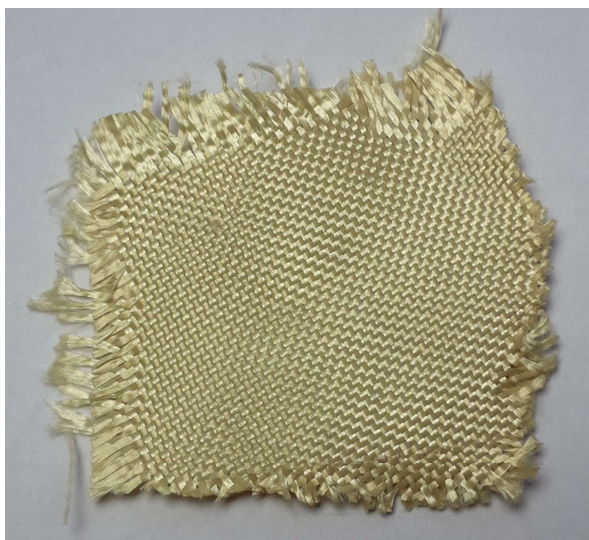
В роботі використано склотканину щільності 600 г/м² (рисунок 2.1, а) та 160 г/м² (рисунок 2.1, б).



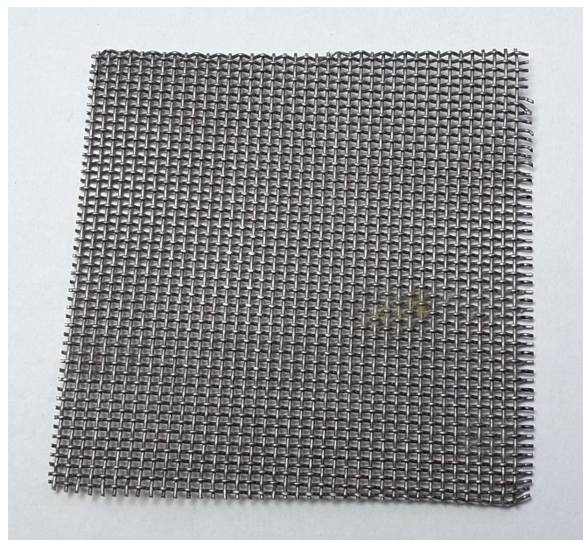
а



б



в



г

Рисунок 2.1 – Згальний вигляд наповнювачів склопластиків:

а – склотканина щільності 600 г/м²; б – склотканина щільності 160 г/м²;

в – арамідна тканина; г – сталева сітка

Арамідні волокна, скорочення від ароматичного поліаміду, – це клас термостійких та міцних синтетичних волокон [35]. Вони використовуються в аерокосмічній та військовій галузі, для виготовлення бронежилетів

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

балістичного класу та балістичних композитів, у морських мотузках, армуванні корпусів морських судів, як замітник азбесту та в різних легких споживчих товарах, починаючи від чохла для телефонів і закінчуючи тенісними ракетками.

Арамід – це синтетичне волокно, яке виробляється шляхом прядіння твердого волокна з розчину. Початкова підготовка полімеру зазвичай досягається хімічною реакцією між аміногрупою та галогенідною групою карбонової кислоти. Після виробництва полімеру арамідне волокно створюється прядінням. Зазвичай їх використовують як волокнисту арматуру для полімерно-матричних композитів (рисунок 2.1, в).

Арамід має низку корисних механічних властивостей:

- низька щільність;
- висока міцність;
- хороша ударостійкість;
- хороша стійкість до стирання;
- хороша хімічна стійкість;
- хороша стійкість до термічного розкладання;
- міцність на стиск, подібна до волокна Е-скла.

Деякі марки арамідного волокна можуть руйнуватися під впливом ультрафіолетового світла

Ланцюгові молекули у волокнах високо орієнтовані вздовж осі волокна. В результаті більша частка хімічного зв'язку сприяє міцності волокна, ніж у багатьох інших синтетичних волокнах у світі. Арамідні мають дуже високу температуру плавлення (>500 °C).

Поширені торгові марки арамідних волокон включають кевлар, номекс та тварон. Арамідні зазвичай отримують реакцією між аміногрупою та галогенідною групою карбонової кислоти. Прості гомополімери АВ мають зв'язність $-(NH-C_6H_4-CO)_n-$. Відомі арамідні полімери, такі як Kevlar,

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Twaron, Nomex, New Star та Teijinconex, отримують з діаміну та дикислот (або еквівалентних) попередників.

Арамідиди поділяються на два основні типи залежно від місця приєднання зв'язків до кілець. Якщо атоми вуглецю нумерувати послідовно навколо кільця, то пара-арамідиди мають зв'язки, приєднані в положеннях 1 та 4, тоді як мета-арамідиди мають їх у положеннях 1 та 3. Тобто, точки приєднання розташовані діаметрально протилежно одна одній у пара-арамідиди та на відстані двох атомів одна від одної в мета-арамідиди.

Сталева сітка, особливо сітка з нержавіючої сталі, пропонує поєднання міцності, довговічності та стійкості до корозії, що робить її придатною для різних застосувань. Її можна зварювати або плести, а її властивості можна змінювати, використовуючи різні марки сталі та розміри сітки (рисунки 2.1, г).

Сталева сітка – це матеріал з універсальним застосуванням. Зазвичай її виготовляють зі зварних сталевих дротів або переплетеного заліза для створення сітчастого візерунка. Завдяки своїй міцності, довговічності та гнучкості вона широко використовується в різних галузях промисловості. Вона характеризується спеціальними отворами в сітці, які різняться за розміром і формою. Вона чудово підходить для багатьох застосувань сталевих сіток, таких як будівництво, безпека, промислові об'єкти та декоративні роботи.

Архітектурну ткану сітку також називають декоративною гофрованою ткану сіткою. Вона виготовляється переважно з нержавіючої сталі, алюмінію, міді та латуні, що іноді дозволяє краще підходити до цього продукту. Архітектурна ткану сітка широко використовується як для зовнішніх, так і для внутрішніх робіт. Вона не тільки має кращі характеристики, ніж оригінальні архітектурні елементи, але й гарний зовнішній вигляд, який легко приверне увагу. Вона стає все більш популярною серед дизайнерів для декорування будівель.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

2.2. Методи дослідження фізико-механічних характеристик

Дослідження механічних властивостей епоксикомпозитів проведено з використанням стандартних методик визначення вмісту гель-фракції, твердості та ударної міцності.

Вміст гель-фракції визначали методом видалення неструктурованої частини полімерного матеріалу за допомогою розчинником в екстракторі Сокслета. Тривалість витримки зразків в екстракторі становила 8 год.

Екстракцію епоксикомпозитних зразків у формі тонких пластин товщиною до $0,5 \pm 0,1$ мм та розміром $30 \times 50 \pm 1$ мм проводили в ацетоні з наступним сушінням до постійної маси. Масу зразків до і після екстракції визначали на аналітичних лабораторних вагах з точністю вимірювання 0,5 мг.

Вміст гель-фракції в епоксикомпозитному зразку розраховували:

$$G = 100\% - \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

де M_1, M_2 – маса зразка до і після екстракції відповідно, г.

Твердість епоксикомпозитних зразків визначали методом Брінелля. Відповідно до ISO 6506 сталеву кульку діаметром 5 мм втискували в поверхню зразка з навантаженням 1875 Н протягом 10 с. Твердість епоксикомпозитів розраховували:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (2.2)$$

де P – навантаження, прикладене до індентора, Н;

D – діаметр кульки, мм;

d – діаметр відбитку, мм.

Ударну міцність епоксикомпозитних покриттів визначено згідно методики ISO 20567-3:2012 «Фарби та лаки». Методика полягає у визначенні

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

енергії для руйнування полімеркомпозитних матеріалів в результаті падіння із заданої висоти ударника.

Міцність покриттів до динамічних навантажень розраховували за формулою:

$$A = mgh, \quad (2.3)$$

де m – маса ударника, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

h – висота вільного падіння ударника, м.

Визначення ударної міцності епоксикомпозитних матеріалів проводили за допомогою приладу типу У1 (рисунок 2.2).

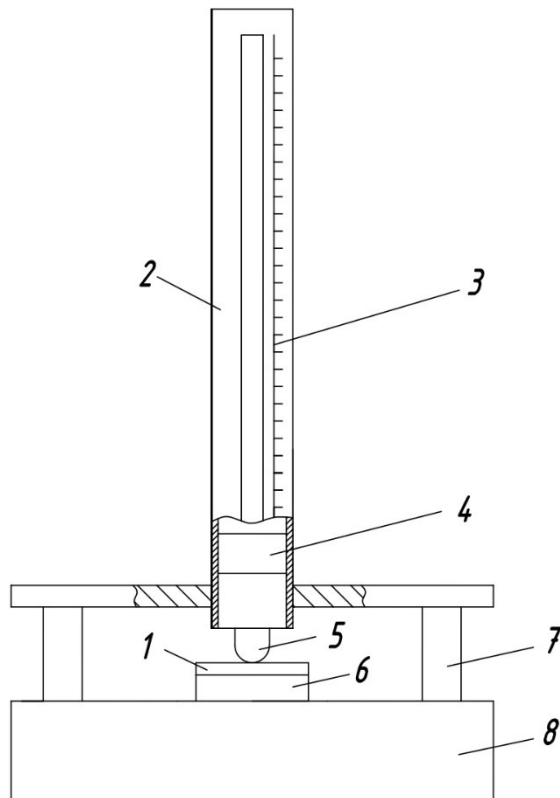


Рисунок 2.2 – Прилад типу У1 для досліджень на ударну міцність:

- 1 – зразок; 2 – направляюча частина;
- 3 – шкала; 4 – змінний вантаж;
- 5 – бійник; 6 – стіл; 7 – опора; 8 –плита

2.3. Технологія формування епоксикомпозитних зразків

На першому етапі відбувається формування композиції на основі епоксидної смоли та затверджувача поліетиленполіаміну (ПЕПА). Дозування компонентів відбувається ваговим методом з врахуванням стехіометричного співвідношення: 12 мас.ч. затверджувача на 100 мас.ч. епоксидної смоли. Змішування компонентів відбувається механічно з використанням лабораторного змішувача з невисокою частотою обертання лопатей для недопущення надмірного нагрівання суміші, щоб уникнути інтенсивного структурування та зменшити кількість повітряних ключень.

Формування зразків відбувається на металевій підлозці розміром підлозці Підготовлені частини склотканини розміром 120 x 120 мм. На поверхню нанесено антиадгезійне покриття для уникнення склеювання зразка з поверхнею підлозки. Епоксидну композицію наносять тонким шаром на поверхню склотканини з двох сторін та розміщують на підлозці. Залежно від кількості шарів склотканини формують сендвіч-панель, після чого зверху накривають ще однією металевою пластиною та піддають стисненню (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Формування склопластиків

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Налишкову композицію потрібно зібрати та залишити конструкцію на 24 год за кімнатної температури. Після відділення підложок склопластики піддають термічній обробці у камері сушильної шафи (рисунок 2.4) за ступінчастин режимом: 70° С протягом 1 год, 100° С протягом 1 год та 140° С протягом 4 год.



Рисунок 2.4 – Камера сушильної шафи з аеродинамічним переміщенням потоків повітря моделі СНОЛ 400

Після видалення зразків проводять охолодження за кімнатної температури та піддають механічним випробуванням на твердість та ударну міцність.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

РОЗДІЛ 3

ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОШАРОВИХ ЕПОКСИДНИХ СКЛОПЛАСТИКІВ

3.1. Дослідження ступеня структурування та твердості склопластиків

Вміст гель-фракції епоксикомпозитних матеріалів з вмістом склотканини (щільність 600 г/м²) становить 92,2% (рисунок 3.1). З підвищенням кількості шарів до 4 та 8 відбувається зростання досліджуваної характеристики до 92,8% та 93,4% відповідно, що відповідає максимальним значенням, оскільки скловолокна розміщені не достатньо щільно, що дозволяє епоксидному в'язучому краще проникати всередину волокна та утворювати хімічні зв'язки. У випадку використання склотканини (2 шари) зі щільністю 160 г/м² вміст гель-фракції зменшується до 91,8%, що пов'язано з ущільненням волокон у нитці, в результаті чого погіршується змочування. З підвищенням кількості шарів до 4 вміст гель-фракції дещо зростає (92,4%) порівняно з вмістом гельфракції епоксикомпозитів з вмістом шарів склотканини в кількості 2 штуки. Підвищення пояснюється збільшенням загальної кількості шарів, що забезпечує додаткове структурування через утворення додаткових хімічних зв'язків між реакційноздатними групами на поверхні склотканини та епоксидного в'язучого. В результаті підвищення кількості шарів до 8 вміст гель-фракції знижується (91,5%) через ускладнене змочування поверхні скловолокон в'язучим.

У випадку використання арамідної тканини (кевлар) вміст гель-фракції знижується (89,3%), оскільки процеси структурування сповільнюються через органічну структуру кевлару дуже низькою хімічною реактивністю. З підвищенням кількості шарів вміст гель-фракції знижується, оскільки підсилюється ефект поганого змочування через високу щільність волокон у нитці.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

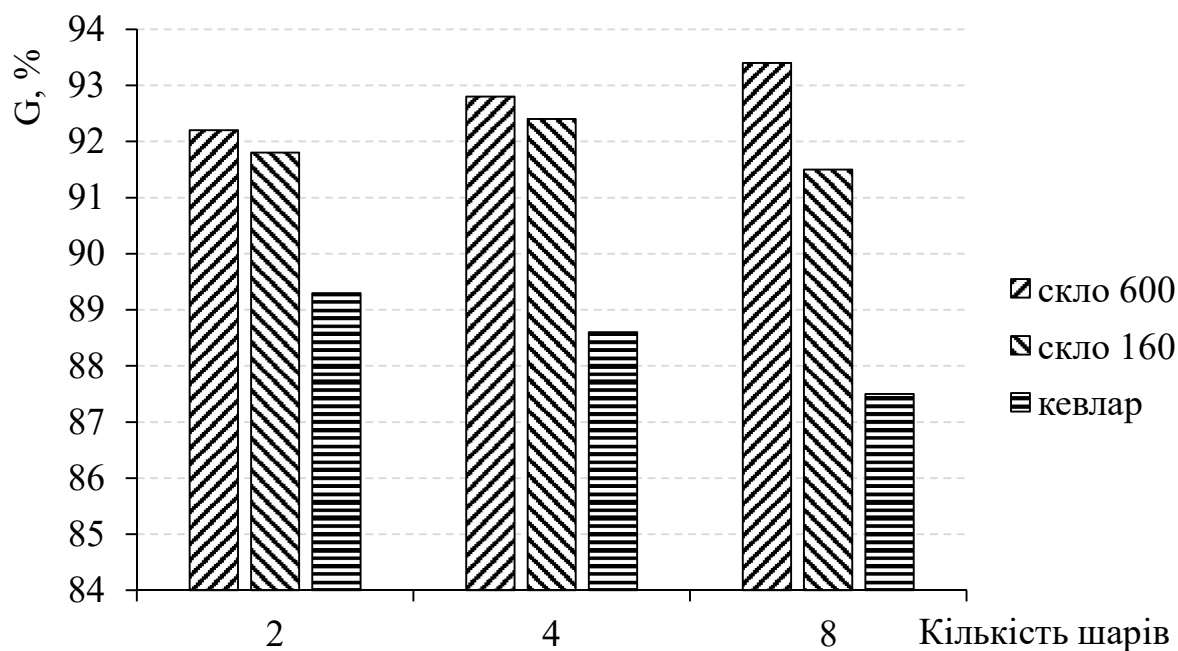


Рисунок 3.1 – Залежність вмісту гель-фракції склопластиків від кількості шарів та природи наповнювача

Твердість склопластиків з вмістом склотканини щільності 600 г/м^2 та кількістю шарів 2 штуки становить $269,9 \text{ МПа}$ (рисунок 3.2). У випадку зростання кількості шарів до 4 та 8 штук твердість зростає 25% та 40% відповідно порівняно з твердістю епоксикомполімерів з вмістом наповнювача в кількості 2 шари. Підвищення досліджуваної характеристики пов'язано з утворення значної кількості хімічних зв'язків між компонентами системи, які запобігають локальній пластичній деформації, оскільки відбувається ускладнення переміщення сегментів макромолекул епоксиполімерної матриці.

Кількість зв'язків між епоксиполімерною матрицею та поверхнею склопластиків, які містять склотканину щільності 160 г/м^2 , є меншою, тому значення твердості також знижуються.

Твердість склопластиків, які наповнені 2 шарами арамідної тканини, є вищою (328 МПа) порівняно з твердістю склопластиків, які наповнені склотканиною. В такому випадку підвищення твердості пояснюється компактним розташуванням арамідних волокон у нитці.

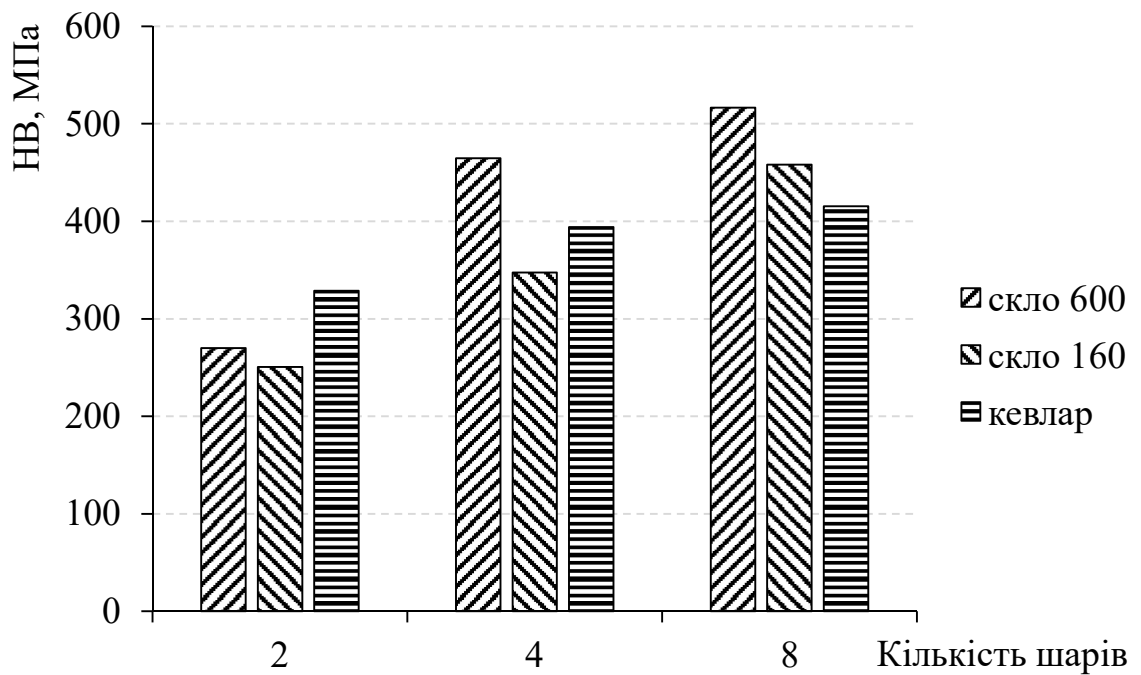


Рисунок 3.2 – Залежність твердості склопластиків від кількості шарів та природи наповнювача

З підвищенням кількості шарів твердість дещо підвищується, однак ці значення є нижчими порівняно з твердістю склопластиків, які містять шари склотканини.

3.2. Дослідження стійкості склопластиків до дії динамічних навантажень

Склопластики, які наповнені склотканиною (600 г/м²) мають найвище значення ударної міцності (6,1Дж), що визначається високою кількістю хімічних зв'язків між компонентами системи (рисунок 3.3). З підвищенням кількості шарів до 4 штук та 8 штук ударна міцність зростає до 7,8 Дж та 8,5 Дж, що відповідає максимальному значенню ударної міцності.

У випадку використання склотканини щільності 160 г/м² ударна міцність знижується порівняно з склопластиками, які наповнені склотканиною зі щільністю 600 г/м². Це пов'язано з меншою кількістю хімічних зв'язків, які утворюються між поверхнею епоксиполімерної матриці та наповнювача. З

підвищенням кількості шарів до 4 штук та 8 штук ударна міцність зростає до 6,5 Дж та 7,2 Дж відповідно. Це визначається появою більшої кількості перешкод у вигляді шарів склотканини для поширення тріщини, яка виникає під впливом динамічного навантаження.

У випадку використання арамідної тканини склопластики мають нижчі значення ударної міцності, оскільки утворюється порівняно низька кількість хімічних зв'язків. З підвищенням кількості шарів арамідної тканини відбувається покращення стійкості склопластиків до дії динамічних навантажень завдяки збільшенню кількості перешкод.

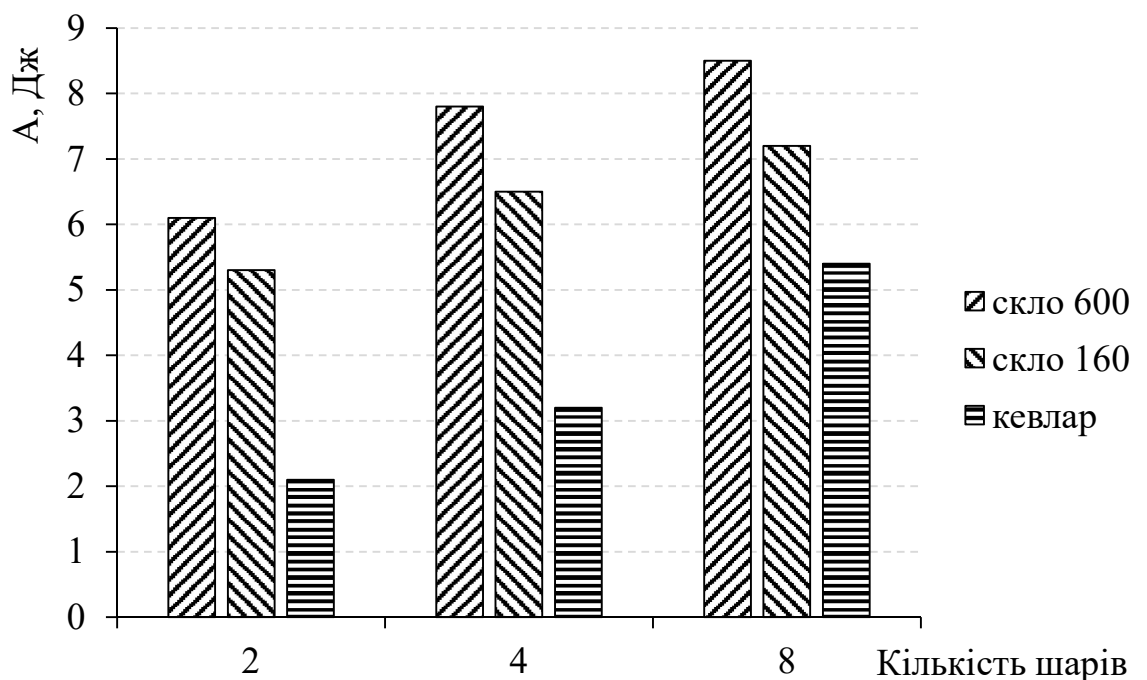


Рисунок 3.3 – Залежність ударної міцності склопластиків від кількості шарів та природи наповнювача

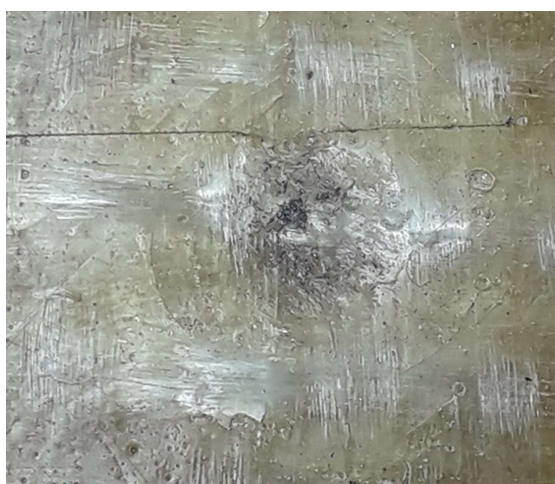
В результаті нанесення динамічного навантаження ударником із заокругленням радіусом 8 мм відбувається утворення лунки з наскрізним руйнуванням пластини епоксикомпозитного матеріалу з вмістом 2 шарів склотканини (600 г/м²). Необхідно зауважити, отвір закритий шром епоксикомпозитного матеріалу, що вказує на відносну стійкість склопластика до динамічного руйнування (рисунки 3.4, а). Склопластики з 4-ма шарами

склотканини мають заглибину без наскрізного руйнування матеріалу (рисунок 3.4, б). У випадку використання 8 шарів склотканини утворюється невелика заглибина діаметром 6 мм, що вказує на високу стійкість матеріалу до динамічного навантаження (рисунок 3.4, в).



а

б



в

Рисунок 3.4 – Загальний вигляд ділянки склопластика з склотканиною (600 г/м²) з кількістю шарів: а – 2 шт.; б – 4 шт.; в – 8 шт.

В результаті нанесення динамічного навантаження на поверхню склопластика з вмістом 2-х шарів склотканини (160 г/м²) утворюється наскізний отвір з рваними краями, містять зруйновані скловолокна (рисунок 3.5, а). Якщо кількість шарів склотканини збільшити до 4-х

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

також відбувається наскрізне руйнування, однак отвір закритий, що вказує на вищу динамічну стійкість матеріалу (рисунок 3.5, б). У випадку використання 8 шарів склотканини матеріал поводить себе аналогічно як у випадку руйнування склопластику з 4-ма шарами склотканини (рисунок 3.5, в).



а



б



в

Рисунок 3.5 – Загальний вигляд ділянки склопластику з склотканиною (160 г/м²) з кількістю шарів: а – 2 шт.; б – 4 шт.; в – 8 шт.

Склопластики з вмістом арамідної тканини в кількості 2 шари руйнуються з утворенням наскрізного отвору з рівними краями, що вказує на низьку стійкість матеріалу до впливу динамічних навантажень через низький опір арамідних волокон до зсувних напружень та малу кількість хімічних

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

зв'язків (рисунок 3.6, а). Аналогічну поведінку проявляє епоксикомпозитний матеріал з вмістом 4-х шарів арамідної тканини, тобто відбувається утворення наскрізного отвору з рваними краями у вигляді зруйнованих волокон наповнювача (рисунок 3.6, б). Епоксикомпозити з арамідною тканиною в кількості 8 шарів витримують динамічне навантаження, хоча відбувається утворення лунки невеликої глибини (рисунок 3.6, в).



а



б



в

Рисунок 3.6 – Загальний вигляд ділянки склопластика з арамідною тканиною з кількістю шарів: а – 2 шт.; б – 4 шт.; в – 8 шт.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

У випадку нанесення динамічного навантаження на поверхню склопластику, який містить 2 шари склотканини (600 г/м²) та два шари сталеві сітки, відбувається утворення лунки без наскрізного руйнування матеріалу (рисунок 3.7, а). У випадку використання 2-х шарів склотканини (600 г/м²) та два шари гумової пластини відбувається утворення лунки більшої глибини без наскрізного руйнування матеріалу (рисунок 3.7, б). Якщо наносити динамічне навантаження на зразок з 6-ма шарами склотканини (600 г/м²) утворюється лунка діаметром 6 мм (рисунок 3.7, в).



а



б



в

Рисунок 3.7 – Загальний вигляд ділянки склопластику з склотканиною (600 г/м²): а – 2 шт.+2 шт. металеві сітки; б – 2 шт.+2 шт. гумових пластин; в – 6 шт.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

ВИСНОВКИ

В результаті використання склотканини в якості наповнювача зі щільністю 600 г/м² вміст гель-фракції епоксикомпозитних матеріалів становить 93,4%, оскільки скловолокна розміщені не достатньо щільно, що дозволяє епоксидному в'язучому краще проникати всередину волокна та утворювати хімічні зв'язки.

Твердість склопластиків з вмістом склотканини щільності 600 г/м² та кількістю 8 шарів зростає на 40% порівняно з меншою кількістю шарів, що пов'язано з утворення значної кількості хімічних зв'язків між компонентами системи, які запобігають локальній пластичній деформації, оскільки в такому випадку відбувається ускладнення переміщень сегментів макромолекул епоксиполімерної матриці.

Склопластики, які наповнені склотканиною (600 г/м²) мають найвище значення ударної міцності (8,5 Дж), що визначається високою кількістю хімічних зв'язків між компонентами системи та кращою здатністю скловолокон витримувати зсувні навантаження порівняно з арамідною тканиною. Висока динамічна стійкість склопластиків з вмістом 8-ми шарів склотканини (600 г/м²) підтверджується утворенням невелика лунки діаметром 6 мм без наскрізного руйнування матеріалу.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mahato K.K., Shukla M.J., Kumar D.S., Ray B.C. (2014). In-service Performance of Fibre Reinforced Polymer Composite in Different Environmental Conditions: A Review. *Journal of Advanced Research in Manufacturing, Material Science & Metallurgical Engineering*, 1.
2. Gao G., Li Y. (2016). Mechanical Properties of Woven Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Emerging Materials Research*, 5(1), 1-8.
3. Karnoub A., Huang H., Antypas I. (2020). Mechanical Properties of Composite Material Laminates Reinforced by Woven and Non-Woven Glass Fibers. Institute of Polymers, ETH Zurich & Don State Technical University.
4. Sathishkumar T.P., Satheeshkumar S., Naveen J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites – a review, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(13) 1258-1275.
5. Honchar V. A. (2024). Research on the wear resistance of the material cylinder of an automatic injection molding machine during plastics processing. *Problems of Tribology*, 29(4/114), 47-53.
6. Nakao R., Inoya H., Hamada H. (2016). Mechanical Properties of Injection Molded Products Fabricated by Direct Fiber Feeding Injection Molding. *Energy Procedia*, 89, 307-312. Elsevier.
7. Kuttner C., Hanisch A., Schmalz H. (2013). Influence of the Polymeric Interphase Design on the Interfacial Properties of (Fiber-Reinforced) Composites, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 5(7): 2469-78.
8. Peterson A.M., Jensen R.E., Palmese G.R. (2011). Thermoreversible and remendable glass–polymer interface for fiber reinforced composites, *Compos. Sci. Technol.*, 71(5), 586-92.
9. Wang K., Young B., Smith S.T. (2011). Mechanical properties of pultruded carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) plates at elevated temperatures, *Eng. Struct.*, 33(7), 2154-61.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

10. Ray B.C. (2004). Thermal shock on interfacial adhesion of thermally conditioned glass fiber/epoxy composites, Mater. Lett., 58(16), 2175-77.
11. Shukla M.J., Kumar D.S., Mahato K.K., Rathore D.K., Prusty R.K., Ray B.C. (2015). A Comparative Study of the Mechanical Performance of Glass and Glass/Carbon Hybrid Polymer Composites at Different Temperature Environments. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 75, 012002.
12. Sayer M., Bektas N.B., Demir E. (2012). The effect of temperatures on hybrid composite laminates under impact loading, Compos. Part B Eng., 43(5), 2152
13. Shivakumar S. (2010). Temperature on the Hygrothermal and Mechanical Behaviour of Glass-Epoxy laminates, Int. J. Adv. Eng. Technol., 1(3), 225-31.
14. Gopal Krishna U.B., Srinivasa C.S., Amara N.S., Gudoor S. (2021). Processing, characterization and property evaluation of seashell and glass fibre added epoxy based polymer matrix composite. Materials Today: Proceedings, 35, 417-422. Elsevier.
15. Calabrese L., Badagliacco D., Sanfilippo C., Fiore V. (2023). Flax–Glass Fiber Reinforced Hybrid Composites Exposed to a Salt-Fog/Dry Cycle: A Simplified Approach to Predict Their Performance Recovery. Polymers, 15(11), 2542.
16. Hossain M.M., Khan M.A., Khan R.A., Siddiquee M.A., Islam T. (2015). Carbon/kevlar reinforced hybrid composite: impact of matrix variation. Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy (ICMERE-2015), Chittagong, Bangladesh.
17. Velmurugan R., Manikandan V. (2005). Mechanical Properties of Glass/Palmyra Fiber Waste Sandwich Composites. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, 12(6), 563-570.
18. Ray B.C. (2006). Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites, J. Colloid Interface Sci., 298(1), 111-17.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

19. Elahi A.H., Hossain M.M., Afrin S., Khan M.A. (2014). Study on the Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites. International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering.
20. El-Wazery M.S., El-Elamy M.I., Zoalfakar S.H. (2017). Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites. International Journal of Applied Science and Engineering, 14(3), 121-131.
21. Etcheverry M., Barbosa S.E. (2012). Glass Fiber Reinforced Polypropylene Mechanical Properties Enhancement by Adhesion Improvement, Materials, 5, 1084-1113.
22. Luo W., Wang X., Huang R. (2014). FANG Pengfei, "Interface Enhancement of Glass Fiber/Unsaturated Polyester Resin Composites with Nano-Silica Treated Using Silane Coupling Agent", Wuhan University Journal of Natural Sciences, 19, 1, 34-40.
23. Alsubari S., Zuhri M.Y.M., Sapuan S.M., Ishak M.R., Ilyas R.A., Asyraf M.R.M. (2021). Potential of natural fiber reinforced polymer composites in sandwich structures: A review on its mechanical properties. Polymers, 13, 423.
24. Gholampour A., Ozbakkaloglu T.A. (2020). Review of natural fiber composites: Properties, modification and processing techniques, characterization, applications. J. Mater. Sci., 55, 829-892.
25. Pickering K.L., Efendy M.G., Le T.M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., 83, 98-112.
26. Azwa Z.N., Yousif B.F., Manalo A.C., Karunasena W. (2013). A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. Mater. Des., 47, 424-442.
27. Thwe M.M., Liao K. (2003). Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. Compos. Sci. Technol., 63, 375-387.

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

28. Abdel-baky M.A., Attia M.A., Abdelhaleem M.M., Hassan M.A. (2020). Mechanical characterization of hybrid composites based on flax, basalt and glass fibers. *J. Compos. Mater.*, 54, 4185-4205.
29. Russo P., Langella A., Papa I., Simeoli G., & Lopresto V. (2016). Low-Velocity Impact and Flexural Properties of Thermoplastic Polyurethane/Woven Glass Fabric Composite Laminates. *Procedia Engineering*, 167, 190-196.
30. Bockenheimer C., Fata D., Possart W. (2004). New aspects of aging in epoxy networks. I. Thermal aging, *J. Appl. Polym. Sci.*, 91(1): 361-68.
31. Sugita Y., Winkelmann C., Saponara V.L. (2010). Environmental and chemical degradation of carbon/epoxy lap joints for aerospace applications, and effects on their mechanical performance, *Compos. Sci. Technol.*, 70(5), 829-39.
32. Behl S., Rajan G., Ellakwa A., Farrar P., Prusty B.G. (2020). Physical and mechanical characterisation of flowable dental composites reinforced with short aspect ratio micro-sized S-Glass fibres. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl* 111:110771.
33. Papanicolaou G.C., Херападаки A.G., Тагарис G.D. (2009). Effect of thermal shock cycling on the creep behavior of glass epoxy composites, *Compos. Struct.*, 88(3), 436-42.
34. Властивості скловолокон [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.pfh.de/en/blog/properties-glass-fibre>
35. Властивості арамідних волокон [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aramid>

					БР 0825.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46