

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів та технологій

Кафедра матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

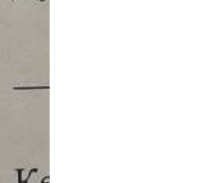
Розробка складу та технології формування
епоксикомпозитних матеріалів для балістичного
захисту / Development of forming technology of epoxy
composite materials for ballistic protection

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Матеріалознавство»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМм-21

Дудич Олександр Васильович



Керівник:
к.т.н., професор
Кашицький Віталій Павлович



Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«01» грудня 2024 р.
к.т.н., доцент

Гарант освітньої програми:
Мельничук Микола Дмитрович



Луцьк – 2024 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій
Кафедра матеріалознавства
Ступінь вищої освіти: магістр
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 132 Матеріалознавство
Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

Гельничук М.Д.

“02” вересня 2024 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Дудигу Олексю Васильовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка складу та технології формування епоксикомпозитних матеріалів для багштичного захисту
керівник роботи Хашинський Віталій Павлович, к.т.н. професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “30” грудня 2023 року № 449/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
«3» грудня 2024 р.

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

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Огляд технічної літератури. 2. Матеріал та методи дослідження властивостей.

3. Розробка складу та технології формування епоксикомпозитних склопластиків.

Висновки. Список використаних джерел
Додатки

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

1. Характеристика конструктивів (1 л. ф. А4)

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

3. Адаптивна міцність епоксикомпозитів (1 л. ф. А4)

4. Твердість епоксикомпозитів (1 л. ф. А4)

5. Ударна міцність епоксикомпозитів (1 л. ф. А4)

6. Стан уразів після дії калійного навантаження (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.контр.	Мисковець С.В. доцент	02.09/2024	01.12/2024

7. Дата видачі завдання «2» вересня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Огляд технічної літератури	15.10.2024	Виконано
2	Матеріали та методи дослідження властивостей	5.11.2024	Виконано
3	Розробка складу та технології формування епоксикомпозитних склопластиків	26.11.2024	Виконано

Здобувач вищої освіти

Керівник кваліфікаційної роботи

Дудлер О.В.
(прізвище та ініціали)

Хайцук В.В.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дудич О.В. Розробка складу та технології формування епоксикомпозитних матеріалів для балістичного захисту. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2024.

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

В роботі виконано аналіз літературних джерел, встановлено основні переваги та недоліки полімеркомпозитних матеріалів, визначено методи покращення властивостей полімеркомпозитів, розглянуто сфери застосування епоксикомпозитів, які містять наповнювачі у вигляді склотканини або арамідних тканин.

В роботі подано характеристику компонентів епоксикомпозитних матеріалів, методи дослідження механічних характеристик та подано технологію формування епоксикомпозитних зразків. Встановлено оптимальний вміст шарів склотканини та визначено режим формування епоксикомпозитних матеріалів, визначено механічні характеристики.

Магістерська робота складається з графічної частини та пояснювальної записки.

Пояснювальна записка містить 54 сторінок формату А4, 1 таблиця, 20 рисунків та 42 літературних джерела. Графічна частина містить 10 листів формату А4 у додатку А.

Ключові слова: склотканина, епоксидне в'язуче, адгезійна міцність, ударна міцність, термічна обробка.

MP 0724.00.000 ПЗ

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Літ.	Арк.	Акрушів
Розробив		Дудич		4.12			
Перевірив		Кашицький		4.12		3	54
Н.контр		Мисковець		4.12			
Затв.		Мельничук		4.12			
Розробка складу та технології формування епоксикомпозитних матеріалів для балістичного захисту					ЛНТУ, кафедра матеріалознавства, гр. ПМм -21		

ANNOTATION

Dudych O.V. Development of forming technology of epoxy composite materials for ballistic protection. Manuscript.

Master's qualification work EP "Materials Science" specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2024.

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

The work analyses literary sources, establishes the main advantages and disadvantages of polymer composite materials, determines methods for improving the properties of polymer composites, considers the scope of application of epoxy composites containing fillers in the form of fiberglass or aramid fabrics.

The work provides a characteristic of the components of epoxy composite materials, methods for studying mechanical characteristics, and presents the technology for forming epoxy composite samples. The optimal content of fiberglass layers is established and the mode of forming epoxy composite materials is determined, mechanical characteristics are determined.

The master's thesis consists of a graphic part and an explanatory note.

The explanatory note contains 55 pages of A4 format, 1 table, 20 figures and 42 literary sources. The graphic part contains 10 sheets of A4 format in Appendix A.

Keywords: fiberglass, epoxy binder, adhesive strength, impact toughness, heat treatment.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	7
1.1. Властивості та сфера застосування полімеркомпозитів з вмістом скляних волокон.....	7
1.2. Методи покращення механічних властивостей склопластиків.....	14
1.3. Висновки і постановка задач досліджень.....	23
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ.....	26
2.1. Характеристика та властивості досліджуваних матеріалів	26
2.2. Методи дослідження структури та механічних характеристик епоксикомпозитів.....	31
2.3. Технологія формування епоксикомпозитних зразків.....	34
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СКЛАДУ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ СКЛОПЛАСТИКІВ.....	36
3.1. Механічні характеристики епоксикомпозитів з підвищеною стійкістю до дії динамічних навантажень.....	36
3.2. Аналіз характеру руйнування епоксикомпозитних зразків.....	40
ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	50
ДОДАТКИ	

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Армовані волокнами полімеркомпозити частіше використовують як альтернативу класичним матеріалам, головним чином через їхню високу питому міцність, специфічну жорсткість і індивідуальні властивості. Завдяки високому співвідношенню міцності до ваги та жорсткості до ваги склопластики широко використовуються для широкого спектру конструкційних застосувань, в аерокосмічній, морській, автомобільній та хімічній промисловості, виготовленні супутників та спортивних товарів. Завдяки вдалому поєднанню властивостей армовані волокном полімеркомпозити використовуються для виробництва ряду деталей машин та механізмів, таких як шестерні, кулачки, колеса, гальма, муфти, підшипники та ущільнення. Склопластики мають відносно низьку щільність і їх також можна пристосувати до впливу різних факторів, змінюючи послідовність укладання, щоб забезпечити високу міцність і жорсткість у напрямку дії високого навантаження.

Вищезазначені властивості залежать від таких факторів, як матеріал матриці та волокон та їхні об'ємні фракції, орієнтація волокон, прикладені рівні напруги та швидкості деформації, а також умови навантаження та природа межі розділу волоконного полімеру. Реакція на межі поділу матриці та волокна відіграє важливу роль у визначенні загальних механічних характеристик, що забезпечує ефективний спосіб передачі напружень від волокна до волокна через матрицю. Останнім часом спостерігається значне зростання широкомасштабного виробництва волокон та армованих скловолокном епоксикомпозитних матеріалів.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Властивості та сфера застосування полімеркомпозитів з вмістом скляних волокон

Полімеркомпозитний матеріал це макроскопічне поєднання двох або більше різних матеріалів, що мають визначену межу між ними. Композити за визначенням можна назвати матеріалом, який складається з двох або більше різних матеріалів, що мають кінцеві властивості, які набагато кращі, ніж в окремих вихідних компонентів. На мікроскопічному рівні можна комбінувати різні матеріали, але кінцевий результат для всіх практичних цілей повинен забезпечувати макроскопічну однорідність. Композитні матеріали широко використовуються не лише через їхні механічні властивості, але й у сферах впливу електричних, теплових та екологічних факторів [1]. Сучасні полімеркомпозитні матеріали зазвичай оптимізовані для досягнення певного балансу властивостей у визначеному діапазоні застосувань. Композити є гетерогенними матеріалами, що є важливою особливістю порівняно з пластмасами.

Полімерні композити, які армовані скловолокнами, мають кілька фаз: волокно, смола та міжфазна фаза. Унікальні характеристики кожної фази впливають на механічні властивості склопластиків [2, 3.]. Склопластики є багатофазним композитним матеріалом з анізотропією властивостей. Механічні властивості полімерної матриці впливають на ефективність передачі навантаження між волокнами, що додатково впливає на механічні властивості склопластиків. Крім того, гладка поверхня скляних волокон (GF), які мають невелику кількість активних функціональних груп, забезпечує формування структури з оптимальним співвідношенням розмірів скловолокон

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

та полімерною матрицею [4]. Механічні властивості склопластиків в основному покращуються за рахунок використання високоефективних волокон і підвищенням адгезії в системі «полімер-волокно». Скловолокно (GF), незважаючи на низьку міцність на розтяг порівняно з іншими армуючими волокнами, таким як вуглецеве, базальтове та арамідне, забезпечує більше економічних переваг. Механічні властивості склопластиків також залежать від продуктивності полімерної матриці та сумісності між волокнами та полімерною матрицею.

Основну складову композиту можна назвати наповнювачем, який відповідає за навантаження на композит, тоді як матриця є середовищем, яке зв'язує арматуру. Якщо говорити про інтерфейс, то це загальна поверхня, яка контактує з наповнювачем і матрицею.

Скляні волокна, як відомо, є одними з найбільш універсальних промислових матеріалів, оскільки виробляються із сировини, яка наразі доступна в постійних запасах [5]. Вони демонструють корисні властивості: стійкість до будь-якого хімічного впливу, твердість, стабільність, прозорість та інертність. Крім того, вони також мають хороші механічні властивості волокон: жорсткість, гнучкість і міцність. Скловолокна мають різноманітне промислове застосування, наприклад, у виробництві конструкційних композитів, у виробництві друкованих плат, а також в інших продуктах спеціального призначення.

Епоксидну смолу називають різновидом реакційноздатного полімеру, а також поліепоксиди [6]. Це тип полімеру, що містить епоксидні групи, і вони схильні реагувати самі з собою або з багатьма реагентами, наприклад, фенолами, амінами, тіолами в присутності каталізатора. Епоксиолімери мають різний спектр застосувань у промисловості для різних цілей, оскільки вони, як правило, мають вищі механічні властивості та більшу термічну та хімічну стійкість порівняно з будь-яким іншим видом смоли. Це також основна причина, чому епоксидні смоли використовують у виробництві

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

компонентів літаків. Відомо, що композитні матеріали є поєднанням двох або більше матеріалів з отриманням унікальних властивостей. Для різних інженерних застосувань композити, армовані волокнами, використовуються вже десятиліттями. Властивості та механічна поведінка армованого волокном композиту в основному залежать від міцності волокна та його модуля пружності. Вони також залежить від хімічної стабільності композиту, міцності його матриці, а також межі розділу, яка діє між волокном і матрицею для надійної передачі напружень [7]. Правильний склад і орієнтація волокон забезпечили подібні функціональні характеристики склопластиків як у сталі, жорсткість вищою, ніж у алюмінію, а їх питома вага є на чверть нижчою від сталі. Для покращення механічних властивостей композитів виготовляються різні армуючі елементи зі скловолокна, такі як тканий мат, довгий поздовжній мат, рубаний мат та багато іншого, оскільки властивості композитів в основному залежать від того, як волокно розміщене в матриці.

Виробничий процес виготовлення скловолокон починається з розплавлення скляних кульок, які мають дві переваги: кульки легко подавати в розплав з контрольованою швидкістю, що полегшує підтримання температури розплаву на заданому рівні, і в прозорих кульках легко виявляються домішки. Скло розплавляють в електричних печах та витискують через перфоровану металеву пластину (фільтеру). Фільтеру виготовляють із платини, платинородієвих сплавів або інших рідкісних матеріалів, оскільки розплавлене скло має дуже сильну корозійний вплив, якому не здатні протистояти більшість металів. Для формування безперервних ниток розплавлене скло після проходження через дрібні отвори фільтери подається на машину намотування, на якій нитки розтягуються і зменшуються в діаметрі до 0,7...4,5 мкм. Сотні паралельних волокон збираються у великому сталевому барабані, де вони з'єднуються в тонку нитку, яка використовується у традиційних процесах текстильного виробництва [8, 9].

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найпростіша технологія виготовлення прийнятій передбачав укладання двонаправлених волокон поверх полірованої поверхні прес-форми, яка попередньо оброблена антиадгезивним засобом. Після цього обробляється поверхня армуючого компонента рідкою термореактивною смолою вручну пензлем або валиком. Процес повторюється кількість разів, що дорівнює кількості шарів необхідні для кінцевого композиту. Смола та затверджувачі є попередньо змішані та зазвичай призначені для зшивання та затвердіння за кімнатної температури. Основна перевага цього виробничого процесу є його велика технологічність, тобто такий спосіб підходить для найбільш поширених розмірів форм і складних форм. Матеріал може бути використаною повторно для кількох циклів і фактична вартість сировини матеріали роблять цей процес економічно доцільним [10]

Виготовлення склопластиків полягає у використанні ряду технологій до яких відносять: метод ручного формування, метод напилення, метод намотування, метод інжекції, метод пресування, метод пултрузії, метод вакуумного формування [11...14].

Метод ручного формування являє собою пошарове укладання у форму або на форму армуючого матеріалу (склотканина або скломат) з одночасним просочуванням кожного шару смолою [15]. Просочення армуючого матеріалу смолою здійснюється в даному випадку за допомогою пензля або валика. Після просочення, здійснюють додаткове стискування для усунення бульбашок повітря та рівномірного розподілу смоли. При цьому дуже важливо здійснити ретельне усунення повітря, оскільки згодом такі місця можуть бути дуже м'якими і руйнуватися. Після формування виріб висихає, а потім видаляється з форми і піддається подальшій обробці.

Метод напилення передбачає використання спеціального розпилювального пістолету, який подає дискретні скловолокна. Ці волокна поєднуються з струменем каталізованої смоли в повітрі і наносяться на форму. Як і у випадку з методом ручного формування, після процесу потрібно

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

провести стискування з метою видалення повітряних прошарків. Далі матеріал залишають в умовах кімнатної температури для затвердіння [6].

Метод намотування передбачає пропускання армуючих волокон через ванну з активованою смолою [16]. Після просочення вони намотуються на сердечник, що обертається до отримання потрібної товщини виробу. При цьому можна координувати кут намотування шляхом зміни напрямку подачі волокна. Кути подачі можна змінювати при виготовленні виробу і таким чином задавати механічні характеристики.

Метод інжекції передбачає попереднє викладання скловолоконного армуючого матеріалу (склотканина або скломат) на матрицю і притискання пуансоном, після чого під певним тиском (інжекція) подається смола [17, 18]. Після остаточного просочення інжекцію зупиняють і в такому вигляді залишають матеріал до повного висихання, після чого вже вилучають із матриці і надають подальшій обробці.

Метод пресування здійснюється за рахунок стискання преміксу скловолокна та смоли деталями прес-форми. Одним із видів пресування також є штампування. Цикл пресування триває приблизно п'ять хвилин. Є два різновиди цієї технології: пресування попередньо просочених смолою преміксів та пресування з просоченням усередині самої форми.

Метод пултрузії полягає в отриманні склопластикового профілю шляхом безперервної витяжки через нагріту до 120...150°C формуютьовуючу фільтру склокомпозиції, просоченої термореактивною смолою. Під високим тиском і температурою відбувається формування виробів великої довжини. За допомогою цієї технології з'явилася можливість отримувати склопластикові вироби заданого профілю та заданими властивостями, а також складних форм з високою швидкістю. Отриманий склопластиковий профіль поєднує в собі унікальні властивості: низьку теплопровідність, високу механічну та діелектричну міцність, стійкість до агресивних середовищ та різких перепадів температур, біологічну та атмосферну стійкість. Довговічність конструкцій зі

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

склопластикових профілів значно перевищує термін служби аналогічних конструкцій з інших матеріалів.

Метод вакуумування полягає у використанні вакууму, який створюється в оболонці, що накриває армуючу склотканину разом із шаром смоли. Отримана конструкція міститься в автоклав, де відбувається нагрівання і рахунок вакууму смола починає просочувати армуючий матеріал. Іноді процес відбувається без застосування автоклава, і просочення смолою відбувається за рахунок вакууму без нагрівання. Цей метод добре підходить для виготовлення великих склопластикових частин, наприклад крил для літака, корпусів човнів тощо.

Композитні матеріали розширюють сферу застосування серед матеріалів, що використовуються в промисловості, транспорті та сільському господарстві, оскільки мають особливі характеристики та мають підвищену надійність та довговічність особливо для авіаційної, морської та військової промисловості.

Склопластики застосовуються в багатьох галузях народного господарства та технічних галузей. Механічна міцність, хороший коефіцієнт світлопропускання та здатність фарбуватися в будь-який колір необхідної інтенсивності дозволяють використовувати склопластики у будівництві у вигляді плоских та гофрованих листів, рулонних матеріалів, багатошарових панелей та ліхтарів. Для зберігання хімічних продуктів застосовують склопластики, стійкі до корозії, які виявилися набагато економічнішими за нержавіючу сталь [19].

Застосування склопластиків було розширено, оскільки вони забезпечують покращені властивості. Завдяки своєму високому потенціалу склопластики є новою вершиною в галузі розробки технології матеріалів. Відомо, що скляні волокна є досить універсальним промисловим матеріалом, який забезпечує високу питому міцність полімеркомпозитних матеріалів.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Зміцнення скловолокон призводить до значного покращення їхніх загальних властивостей [20].

Композитні матеріали на полімерній основі мають багато застосувань, таких як автомобільна промисловість, спортивні товари, морські, електротехнічні, промислові, будівельні, побутові прилади тощо [21]. Полімеркомпозитні матеріали представляють собою поєднання волокна та смоли, які змішані у належній формі. Однією з унікальних властивостей композитного матеріалу є те, що він має високу питому міцність. Композитні матеріали використовуються як альтернативний матеріал металам у конструкціях, де вага є основним фактором, наприклад, аерокосмічні конструкції, швидкісні катери та поїзди. Склопластик є композитним матеріалом, що складається зі скляних волокон у матриці з епоксидної смоли. Скляні волокна вплетені в тканину, яка класифікуються за вагою на квадратний метр, типом переплетення та хімічним складом. Механічні властивості склопластиків залежать від співвідношення двох компонентів, а також від властивостей скловолокна і епоксидного компонента окремо.

Останнім часом проводять додаткові дослідження композитів, армованих скловолоконом, завдяки їхнім чудовим механічним властивостям. Дане дослідження [22] стосується аналізу армованих скловолоконом полімерних композитів, виготовлених з різних типів скла, матричних матеріалів та виготовлених за різними технологіями виробництва. Скловолоконно має хороші механічні властивості, такі як висока міцність, гнучкість, жорсткість, довговічність тощо. Зі збільшенням вмісту скловолокна в об'ємі полімерної матриці властивості склопластиків були покращені. Досліджено механічні та термічні властивості різних полімерних композитів, армованих скловолоконом під час механічного навантаження.

В електротехніці склопластики використовують як електроізоляційні та конструкційні матеріали, а також для виготовлення високовольтних

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

вимикачів, траверс, панелей, деталей, електричних машин та корпусів приладів тощо.

Корозійна стійкість, антимагнітні властивості та технологічність визначили використання склопластиків у суднобудуванні у виробництві човнів та катерів, а також річкових та морських суден зі значною водотоннажністю, глибоководними апаратами тощо. У хімічній, нафтовій та гірничодобувній галузях знайшли застосування склопластикові труби та ємності зі склопластиків для транспортування та зберігання агресивних рідин та шахтного водовідливу, а також вентиляційні системи для відведення парів та газів.

Склопластик застосовується в різних галузях машинобудування, з яких слід особливо відзначити автомобільну промисловість, верстатобудування, вагонобудування (дахи та сидіння автобусів та вагонів, кузова та деталі автомашин, контейнери, цистерни). Склопластики також застосовують для виробництва спортивного інвентарю та товарів народного споживання (крісла, жердини для стрибків, вудки, огороження балконів, мотошоломи).

Частка композиційних матеріалів, що застосовуються у будівництві авіаційної техніки [23], постійно збільшується, оскільки інженери-механіки прагнуть використати всі переваги цього матеріалу у вдалому поєднанні «маса-міцність».

1.2. Методи покращення механічних властивостей склопластиків

Композитні матеріали містять два або більше матеріалів із комбінованими властивостями, які не можуть бути досягнуті ні волокном, ні матрицею, доки вони функціонуватимуть окремо. Полімерні композити, армовані скляним волокном (GFRP), використовуються в багатьох інженерних сферах. Механічна поведінка армованих композитів залежить від міцності волокон і модуля Юнга, стабільності, міцності матриці [24]. Відповідна

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

орієнтація та композиція скляних волокон забезпечили бажані характеристики та функціональні властивості склопластиків адекватними тому, що вони мають більшу жорсткість та меншу щільність, ніж алюміній. Композитні матеріали, які армовані скляним волокном, є найменш дорогими та забезпечують високу міцність порівняно з іншими полімеркомпозитами. Матричні матеріали зв'язують волокна разом, а також передають навантаження, напруження між волокнами. Матриця визначає максимальну робочу температуру матеріалу. Взагалі існує два види матричних матеріалів: термопласти та реактопласти. Вони вибираються на основі температури склування. Висока вартість полімерів обмежувала їх використання в комерційних цілях. Через це використання наповнювачів покращило властивості композитів і в кінцевому підсумку знизило собівартість товару. Композитні матеріали мають широкий спектр промислового застосування, а склопластики використовуються в морській і трубопровідній промисловості завдяки хорошій стійкості до навколишнього середовища, здатності до відновлення толерантності, стійкості до пошкоджень при ударних навантаженнях, високій питомій міцності та жорсткості. Більшість полімерних композитів використовують в авіабудівній промисловості, наприклад, для ліфтів, шасі дверей, елементів інтер'єру тощо. Це пов'язано з невеликою вагою та стійкістю до втоми всередині кріплень. Всі полімерні композити мають високу стійкість до впливу температури. Під час досліджень при низькій і високій температурі навколишнього середовища динамічна стабільність скловолоконних полімерних матричних композитів, такі як модуль пружності та коефіцієнти демпфування, були вирішальними.

У композиційних конструкціях існує багато видів руйнувань і пошкоджень. Одним із них є міжшарове руйнування, відоме як розшарування, яке водночас є одним із найважливіших видів руйнування. Розшарування залишається критичним видом руйнування шаруватих композитних конструкцій. Розшарування означає деградацію між сусідніми шарами

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

матеріалу. Композитні матеріали виявляють чудові властивості тільки в напрямку волокон, тому відшарування композитних конструкцій призводить до значної втрати жорсткості та міцності. Міжшаровий опір росту тріщин в композитах, які армовані довгими волокнами, може значно зрости за наявності волокнистих перемичок, які викликають зчеплення, що діють у розширеній зоні вершини тріщини. Стійкість до розшарування є однією з найважливіших характеристик склопластиків та ламінарних композитів [25].

Знайдено багато способів протистояти розшаруванню, наприклад, переплетення волокон збільшує міцність, але активує режими мікрозгинання, що шкодить міцності на стиск. Зміцнення полімерної матриці зменшує розшарування, але часто зменшує модуль, що є важливим фактором у підвищенні міцності полімеркомпозитів. Модифіковані смоли зазвичай використовуються в попередньо просочених матеріалах аерокосмічної галузі, щоб протистояти розшаруванню. Однак вартість використання препрег-матеріалів у широкому виробництві полімеркомпозитних виробів може бути високою. Тому для створення таких виробів шукають недорогі композитні матеріали, такі як скловолокно.

Скловолокно, полімери та вуглецеве волокно мають хороші механічні властивості, але в останній період розвитку їх використання обмежено деякими технологічними застосуваннями. Скловолокна мають порівняно більшу міцність і жорсткість, а також вартість скловолокна низька. Тому в останніх розробках скляні волокна в основному використовуються як армуючий матеріал для виробництва легких і відносно міцних композитних матеріалів.

Механічні властивості склопластиків нижчі, ніж у полімеркомпозитів, які армовані вуглецевими та арамідними волокнами. Методам покращення механічних властивостей склопластиків приділяється постійна увага. Склопластики мають різні механічні властивості завдяки характеристикам його кількох фаз. У роботі [26] розроблено оптимізований метод обробки на

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

основі багатофазних структур для склопластиків, що значно покращує їх міцність на розтяг. Результати показують збільшення на 10,64 % питомого навантаження пучків скловолокон завдяки покращенню зв'язку між волокнами. Крім того, кут змочування між обробленими або необробленими скловолокнами та епоксидною смолою демонструє значне зменшення на 26,69%. Комбінації факторів (товщина шару та хімічний склад смоли) значно впливають на здатність до розтягування та вид руйнування склопластиків. Склопластики з 4-шаровими склотканинами сприяють більш ефективному перенесенню навантаження через межу матриця-волокно, що забезпечує оптимальні властивості на розтяг для скловолокна. Система епоксидної/фенольної амінної смоли з більш реакційноздатними функціональними групами (-ОН) покращує зв'язок волокна зі смолою, що більше покращує властивості склопластиків на розтяг. Покращення багатофазної структури склопластиків відбувається за допомогою використання наноматеріалів та функціональних затверджувачів.

В роботі [27] використано різні методи підвищення механічних характеристик полімеркомпозитів за рахунок використання наноматеріалів, геополімерів, волокон та функціональних затверджувачів. Наноматеріали та функціональні затверджувачі виявилися особливо ефективними у зміцненні склопластиків. Використовуючи вуглецеві нанотрубки, збільшено на 27 % міцність на розрив скловолокнистих епоксидних композитів. Однак більш високі концентрації наноматеріалів мають тенденцію до агломерації, що призводить до збільшення пористості в модифікованих полімерних системах. Для вирішення такої проблеми в роботі [28] розроблено епоксидні нанокompозити шляхом щеплення поліакрилової кислоти на графену, що покращує дисперсію графену в смолі та його сумісність з епоксидною смолою. Введення графену, який модифікований поліакриловою кислотою, призвело до збільшення міцності на розрив на 41 % і модуля пружності на 43 %. Автором роботи [29] підвищено ефективність передачі напружень полімерної

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матриці за допомогою використання багатошарових вуглецевих нанотрубок з карбоксильними групами, що призвело до покращення механічних властивостей склопластиків.

Як правило, висока сумісність між полімерною матрицею та волокнами визначає адгезійну міцність, яка є вирішальною для ефективного перенесення навантаження через межу матриця-волокно. Для підвищення міцності міжфазного з'єднання застосовують різні методи, включаючи шорсткість, наноматеріали, плазмову обробку та обробку силаном для модифікації поверхні волокна. Тип поверхневої обробки, що застосовується до скловолокна, впливає на міжфазне з'єднання композитів і міцність на розрив. Підвищення міжфазної адгезії між волокном та матрицею можливо шляхом щеплення оксиду графену на поверхні скловолокнистої тканини. Розроблено багатофункціональні скловолокна з покриттям оксиду графену, що досягається за допомогою простого процесу електрофоретичного осадження. Це призвело до збільшення на 8,1 % міцності на розрив скловолокон та збільшення на 22,4 % міжфазної міцності на зсув композитів. Вуглепластик продемонстрував вищу стійкість до розшарування, міцність на вигин і міцність на міжшаровий зсув навіть у криогенних умовах. Однак технологія зміни топографії поверхні волокна для досягнення більшої міцності міжфазного зв'язку залишається складною. У випадку армування скловолокном механічне зчеплення за рахунок підвищення шорсткості поверхні є менш значимим [30]. З іншого боку, обробка поверхні силановим агентом ефективно підвищує міжфазну міцність завдяки утворенню міцного фізичного та хімічного зв'язку між волокнами та матрицею. Силановий сполучний агент створений для підвищення сумісності та міжфазного зв'язку між наноматеріалами, епоксиполімерною матрицею та скловолокном. Модифікування скловолокон з використанням активатора з'єднання, сприяє утворенню ковалентного зв'язку між волокном і полімерною матрицею. Це пов'язано з ростом ланцюга з частин активатора, що призвело до підвищення

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

механічних характеристик на 20...28 % і покращення в'язкості руйнування композитів на 10...30 %. Завдяки значному покращенню міжфазної взаємодії між компонентами нанокompозитів, механічні властивості склопластиків, які армовані силанізованими волокнами та наночастинками, значно покращені [31].

У роботі [32] представлені експериментальні результати випробувань на триточковий згин для композиту, який виготовлений з скловолнистої тканини та епоксидної смоли. Досліджено два композити, один з 8 шарами, а інший з 16 шарами; обидва мали однакову матрицю (епоксидну смолу). Випробування проводилися з п'ятьма різними швидкостями від 10 мм/хв до 1000 мм/хв. Експериментальні дані не виявляють чутливості для цих матеріалів на основі показників тестування, але характеристики більш товстого композиту з 16 шарами тканини трохи нижчі, ніж для більш тонкого композиту з 8 шарами. Результати показали, що для однакової товщини композиту певні характеристики, такі як напруження на першому піку, модуль пружності при вигині, деформація на першому піку та енергія на першому піку, не чутливі до швидкості випробування в діапазон 10...1000 мм/хв. Енергія на першому піку вдвічі вища для 16-шарового композиту порівняно з 8-шаровим композитом, але питома енергія (як енергія на площу поперечного перерізу) має близькі значення: 103,47 кДж/м² для 8-шарового композиту та 106,51 кДж/м² для 16-шарового композиту. Результати рекомендують цей композит для застосування в компонентах зі стійкістю до згинання або для захисту від ударів на низькій швидкості.

Поведінка композитів у реальних умовах контролюється багатьма факторами, і їх слід брати до уваги під час тестування; від лабораторних випробувань, які допомагають виявити механізми відмови, до фактичних випробувань, оскільки форма та розміри надзвичайно впливають на реакцію структур з точки зору фактичного функціонування.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Серед інших механічних випробувань для композитів, випробування на триточковий згин є важливими для оцінки механічних властивостей композитних матеріалів [33]. Такі випробування корисні для оцінки механічних властивостей, оскільки вони надають важливі дані щодо жорсткості, міцності та пластичності композитних матеріалів. Піддаючи композит навантаженням на вигин, інженери можуть оцінити його поведінку під різними навантаженнями та геометрією, що дозволяє визначити його придатність для певних застосувань.

Багато конструкційних компонентів у інженерних конструкціях, таких як балки та панелі, використовують дуже різні матеріали [34], але піддаються навантаженню на вигин протягом свого терміну служби. Проведення випробувань на триточкове згинання допомагає інженерам зрозуміти, як композити працюватимуть у цих реальних умовах, дозволяючи їм відповідно проектувати та оптимізувати композитні структури.

Поведінка композитів під навантаженнями на згин дозволяє отримати важливу інформацію про їх внутрішню структуру та властивості щодо таких факторів як орієнтація волокон, жорсткість матриці та міжфазне з'єднання [35]. Ця характеристика важлива для розуміння загальної міцності композиту та для контролю якості під час виготовлення, а також для моніторингу функціонування та оцінки пошкоджень.

Такі випробування зазвичай використовуються як інструмент забезпечення якості композитних матеріалів. Порівнюючи результати випробувань на згинання з використанням встановлених стандартів і специфікацій, виробники можуть переконатися, що їхні композити відповідають необхідним механічним властивостям і критеріям ефективності. Крім того, новий композит можна порівняти зі старими результатами щодо характеристик вигину.

Отримані дані можуть бути використані для оптимізації проектування композитних конструкцій для конкретних застосувань. Інженери можуть

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

регулювати такі фактори, як орієнтація та об'єм волокон, послідовність укладання та склад матриці, щоб покращити характеристики матеріалу на вигин.

У разі структурної несправності або проблем з продуктивністю триточкові випробування на вигин можуть допомогти інженерам проаналізувати причину несправності та визначити рішення для покращення композиту чи конструкції. Випробування на триточковий згин також є цінним інструментом для дослідників і дизайнерів у розробці нових композитів або виробничих процесів. Систематично вивчаючи поведінку різних композицій або технологій обробки при вигині, вони можуть впроваджувати інновації, розвивати та вдосконалювати асортимент композитних матеріалів.

Випробування на вигин у трьох точках передбачає застосування навантаження до зразка, який розміщений на двох опорах, при цьому третя точка є центром прикладання сили. Метою досліджень є визначення характеристик матеріалу при згині, таких як модуль пружності, напруження при вигині та деформація при руйнуванні. В роботі [36] досліджено поведінку гібридних композитів, зокрема тих, що містять вуглецеві та скляні волокна, щодо вигину за допомогою триточкового випробування, як статично, так і на втому. Квазістатичні випробування проводили зі швидкістю 2 мм/хв, а довжина прольоту становила 64 мм. В результаті встановлено, що напруження вигину збільшується разом із міцністю зчеплення. Це означає, що якість зчеплення матриці з армуванням має значний вплив на поведінку при вигині.

Автори роботи [37] протестували два поліефірних композитів, які армовані скловолокном з об'ємною часткою волокна 12,5% і 15% відповідно. Швидкість випробування була дуже малою (1,0 мм/хв) з двома різними довжинами проміжків (177,8 мм і 264,2 мм). Механічна міцність зростала від нижчої до більшої об'ємної частки волокна, а також зростала деформація (~17%), максимальні напруження при вигині (~22%) і модуль пружності при вигині (~8%). На результати вплинула також товщина (4,6 мм та 8,7 мм) та

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

концентрація (для 12% та 15%) скловолокна, а не тільки підвищений вміст скловолокна.

В роботі [38] досліджено полімеркомпозити з вуглецевими волокнами в епоксидній матриці, в результаті чого враховано міцність на вигин як вихідний параметр, а вхідними параметрами були орієнтація шару, технологія виготовлення, ширина, товщина та відсоток графітового наповнювача. Для виготовлення композиту використовували полотно з вуглецевого волокна масою 200 г/м² і щільністю 1,8 г/см³, епоксидну смолу ER550 і графітовий наповнювач (розмір частинок 5 мкм). Швидкість випробування становила 5 мм/хв, довжина прольоту 100 мм.

В роботі [39] досліджено поведінку під час випробувань на згин і розтяг двох типів композитів, які мають однакові вуглецеві волокна. При цьому один тип композитів містив як матрицю термопластичний полімер Nylon 6, а інший – термореактивну епоксидну смолу. Термопластичні полімери не дозволяють отримати композити мають з рівномірним розподілом волокон і мають більший вміст пустот, а епоксидна смола за однакового об'єму волокон забезпечує майже рівномірний розподіл волокон і менший об'єм пустот. Випробування на розтягування та вигин до 90° епоксидних композитів зафіксували майже подвоєні значення напружень на розтягування та згинання при розриві порівняно з композитом із матрицею нейлону 6 із подібною об'ємною часткою волокон.

Визначено вплив орієнтації скловолокна (0°, 45° 90°) в епоксидній матриці (межа розтягу 100 МПа, модуль розтягу 7,94 ГПа) з 12 шарами. В результаті випробувань на згин були отримані такі характеристики: напруження на згин 138,4 МПа для 0° та 77,26 МПа для 90°. Випробування проводилися зі швидкістю випробування 1 мм/хв і відношенням прольоту до товщини 16. Встановлено, що напруження при вигині мають однаковий нахил для цих двох згаданих орієнтацій приблизно до 75 МПа.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Скловолокнисті композити, розроблені в роботі [40] мають шість шарів скловолокнистої тканини щільністю 270 г/м² і двокомпонентної епоксидної смоли з масовим співвідношенням 100:35,2. Випробування на згин проводили за швидкості 2 мм/хв, і для найменшої фракції волокна було отримано більш високе значення напруження на згин (464,8 МПа), а найменше 415,5 МПа. Крім того, деформація при вигині зменшується зі збільшенням масової частки, причому модуль пружності досить зменшився (15 ГПа) для найнижчого значення масової частки. Але напруження розтягування зростає зі збільшенням ваги. Ці випробування показали, що склопластики мають особливу поведінку залежно від типу навантаження (згинання або розтяг) у цьому дослідженні.

Механізми руйнування включали розшарування, поширення тріщин між волокнами, розрив волокон, руйнування композиту під завантажувальним роликком. Зображення фрактограм зламу показують, що розшарування має різні аспекти, враховуючи товщину композиту. Поглинена питома енергія, як відношення енергії при максимальному навантаженні до площі поперечного перерізу зразків, має подібні значення для композитів з різним вмістом шарів склотканини. Це можна пояснити тим, що збільшення товщини композиту може призвести до більшої кількості локальних дефектів і нерівномірності розподілу компонентів, які накопичуються під час виготовлення композиту.

1.3. Висновки і постановка задач досліджень

Полімеркомпозитні матеріали отримали високу ефективність серед матеріалів, що використовуються в промисловості, транспорті та сільському господарстві, оскільки розробка склопластиків враховує їх особливі характеристики, підвищену надійність та довговічності у конструктивних рішеннях, особливо у сфері авіаційної, морської та військової промисловості.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Випробування полімеркомпозитів є важливим етапом впровадження їх у реальні системи. Якщо моделювання та імітація допомагають оцінити навантаження та довговічність композитів, то експериментальна робота є необхідною для отримання склопластиків з високими механічними характеристиками. Поведінка композитів у реальних умовах визначається багатьма факторами, які необхідно брати до уваги під час випробувань: від лабораторних випробувань, які допомагають виявити механізми руйнування до великих, фактичних випробувань, оскільки форма та розміри надзвичайно впливають на реакцію структур з точки зору фактичного функціонування.

Багато конструкційних елементів (балки та панелі) у інженерних розрахунках потребують аналізу впливу різних навантажень, але всі піддаються навантаженню на вигин протягом свого терміну служби. Проведення випробувань на вигин у трьох точках допомагає інженерам зрозуміти, як композити працюватимуть у реальних умовах, дозволяючи їм проектувати та оптимізувати композитні структури відповідно. Поведінка полімеркомпозитів під навантаженнями на згин дозволяє отримати важливу інформацію про їх внутрішню структуру та властивості щодо таких факторів впливу як орієнтація волокон, жорсткість матриці та міжфазне з'єднання. Ці характеристики є важливими для розуміння загальної ефективності композиту та для контролю якості під час виготовлення, а також для моніторингу функціонування та оцінки дефектів.

Полімерні композити мають дуже хорошу механічну міцність і жорсткість, а також стійкість до корозії. Полімерні матеріали мають переваги перед звичайними матеріалами, які використовуються в різних конструкціях. Однією з ключових властивостей є невелика вага з одночасним забезпеченням питомої міцності, завдяки чому загальна вага зменшується до 40 %. Причиною їх найбільшого поширення є їх низька вартість, висока міцність, проста технологія виготовлення та гнучкість конструкції. Синтетичні волокна, такі як вуглець, скло та кевлар, які використовуються в полімерних композитах

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

забезпечують високу питому міцність полімермполімерів. Полімерні композити забезпечують високу міцність при малій вазі, корозійну стійкість до більшості хімічних речовин і створюють високоміцні матеріали в жорстких атмосферних умовах.

Метою магістерської роботи є визначення оптимального вмісту листових наповнювачів та дослідження їх впливу на стійкість до дії динамічних навантажень склопластиків на основі епоксикомполімерів.

В результаті аналізу літературних джерел визначено основні завдання, які необхідно вирішити для розробки склопластиків на основі епоксикомполімерів з підвищеною стійкістю до впливу динамічних навантажень:

- визначити оптимальну кількість шарів склотканини, гуми та листів металу в епоксикомполімерних матеріалах для балістичного захисту;
- визначити механічні властивості епоксикомполімерних склопластиків;
- дослідити характер руйнування епоксикомполімерних матеріалів під впливом динамічного навантаження.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ

2.1. Характеристика та властивості досліджуваних матеріалів

Епоксидна смола – це хімічна речовина, що містить щонайменше 3 епоксидні кільця в структурній формулі. Коли вона реагує з затверджувачем, тоді утворюється епоксиполімер з унікальними хімічними та механічними властивостями, а також електричною ізоляцією та високою адгезією [41].

Епоксидні смоли класифікуються як сполуки з однією або кількома епоксидними групами. Більшість епоксидних смол можна класифікувати як гліцидовані, епоксидні масла або циклоаліфатичні смоли. Найпопулярнішими епоксидними смолами є дигліцидилові ефіри бісфенолу А, які утворюються шляхом взаємодії бісфенолу А з епіхлоргідрином.

У цьому випадку збільшення вмісту бісфенолу додає міцність у вигляді жорсткості та високотемпературну стійкість і навпаки вміст епіхлоргідрину додає хімічну стійкість, а гідроксильні та епоксидні групи додають адгезійні властивості.

Затвердіння є важливою частиною забезпечення фізичних і хімічних властивостей епоксидних полімерів. Процес затвердіння епоксидних смол часто ініціюється за рахунок додавання затверджувача. Особливою популярністю користуються затверджувачі на основі амінів. На відміну від затвердіння поліефірної смоли, де смола каталізується додаванням невеликої кількості каталізатора (наприклад, 1...4 % МЕКР), епоксидні смоли потребують додавання затверджувача у значно більшій кількості. Як правило, співвідношення смоли до затверджувача коливається в діапазоні від 1:1 до 2:1. Подальшого зміцнення епоксидної смоли можна досягти додаванням термопластичного полімеру.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Сировина, яка використовується для виробництва епоксидної смоли, в основному одержується з нафти. Однак все частіше використовуються матеріали рослинного походження. Епоксидні смоли зазвичай містять чотири основні інгредієнти: мономерну смолу, затверджувач, прискорювач і пластифікатор. Властивості затверділої смоли, а саме твердість і гнучкість, можна забезпечити згідно заданих умов, змінюючи співвідношення доданих інгредієнтів.

Епоксидну смолу поділяють на гліцидилову та негліцидилову. Гліцидилові епоксиди поділяються на підкатегорії гліцидиловий ефір і гліцидиламін. Негліцидилові епоксиди є аліфатичними або циклоаліфатичними. Гліцидил-ефірні епоксиди складають більшу частку, особливо бісфенольні та новолачні.

Дігліцидиловий ефір бісфенолу-А (DGEBA) – популярна комерційна епоксидна смола, яку отримують шляхом взаємодії бісфенолу-А з епіхлоргідрином. Цей різновид епоксидної смоли має найменшу молекулярну масу.

Аліфатичні епоксиди отримують шляхом епоксидування з подвійним зв'язком (через циклоаліфатичні епоксиди та епоксидовані рослинні олії) або шляхом реакції з епіхлоргідрином (гліцидилові ефіри та складні ефіри).

Циклоаліфатичні епоксиди мають одне або більше аліфатичних кілець у молекулі, що містить оксиранове кільце. Ці епоксидні смоли мають аліфатичну структуру, високий вміст оксирану та не містять хлору. Вони мають низьку в'язкість, хорошу атмосферостійкість та низьку діелектричну проникність.

Новолачні епоксидні смоли отримують реакцією фенолу з метанолом (формальдегідом). Ці смоли не містять розчинників, тому їх можна використовувати без респіратору, якщо це необхідно. Мають хорошу адгезію, довговічність і міцність.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Галогеновані епоксидні смоли змішуються з іншими інгредієнтами для досягнення заданих характеристик. Бромовані та фторовані інгредієнти додаються для забезпечення вогнестійкості (через бромований бісфенол А) і фторовані сполуки для електричних застосувань. Одним з недоліків таких смол є висока вартість.

Епоксидні розріджувачі – це смоли, до складу яких входять інші інгредієнти, наприклад розчинники, для зміни в'язкості смоли. Виробництво вимагає гліцидилювання аліфатичних спиртів або поліолів. Продукти є монофункціональними (наприклад, гліцидиловий ефір додеканолу), біфункціональними (дигліцидиловий ефір бутандіолу) або мають більш високу функціональність (наприклад, тригліцидиловий ефір триметилпропану).

У процесі розробки епоксикомпозитів епоксидна смола виконує функцію «матричної» фази, тоді як вуглецеве волокно, арамідне волокно та скловолокно виконують функцію «зміцнюючої» фази. Епоксидні смоли досить сумісні з матами на порошковій основі, кевларом і тканим ровінгом. Вуглецеве волокно є досить міцним і забезпечує жорстке армування. У багатьох сферах застосування волокна використовуються для зміцнення епоксидних матриць.

В роботі використано епоксидну смолу марки ЕД-20 та затверджувач – поліетиленполіамін (ПЕПА).

Тканини та полотна на основі вуглецю, що складаються з волокнистих структур у різноманітних плетіннях. Арамідне волокно (рисунок 2.1) відноситься до класу надзвичайно пружних і термостійких синтетичних волокон. Високе співвідношення міцності до ваги перевершує за механічними характеристиками вуглецеве волокно. Волокна мають відмінну стабільність розмірів (завдяки високому модулю Юнга), жорсткість і низьке подовження при розриві, є стійкими до порізів і зношування.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

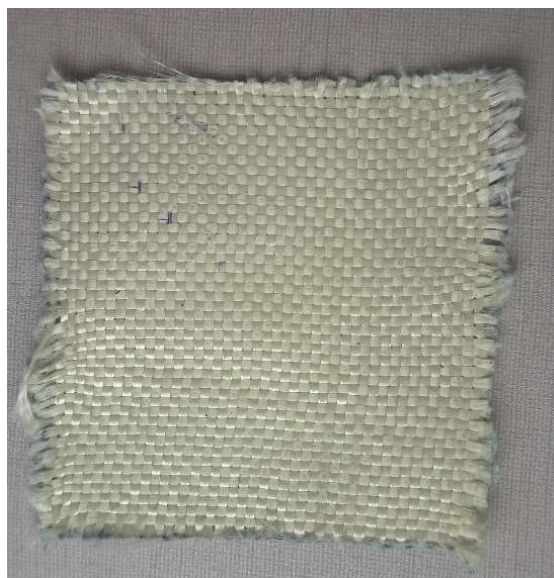


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд
тканини на основі арамідних волокон

Скловолокнисті мати і тканини (рисунок 2.2) складаються зі скляних волокон у різноманітних плетіннях [42]. Використовуються з епоксидними, поліефірними та іншими смолами. Скловолокно має більшу міцність на розрив, ніж сталевий дріт такого ж діаметру, але за меншої ваги. Скловолокно не чутливе до коливань температури та гігрометрії. Має низький коефіцієнт лінійного розширення. Склотканини зберігають 50 % міцності на розрив при кімнатній температурі 370°C та 25% за 480°C , температура плавлення становить 1135°C .

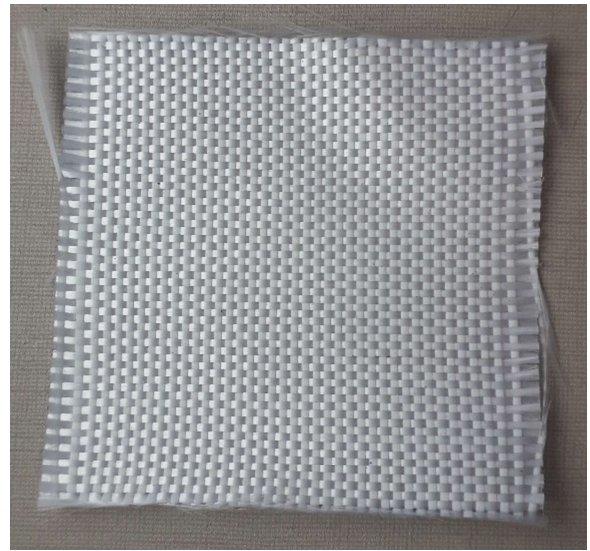
Скловолокно є чудовим теплоізолятором через високе співвідношення площі поверхні до ваги та має високу вогнестійкість, оскільки є мінеральним матеріалом. Під впливом тепла скловолокно не виділяє диму або токсичних продуктів. Скловолокно дуже стійке до дії більшості хімічних речовин.

Скловолокно має високу сумісність з органічними матрицями і має здатність поєднуватися з багатьма синтетичними смолами та певними мінеральними матрицями.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29



а



б

Рисунок 2.2 – Загальний вигляд склотканини:

а – щільність 600 г/м²; б – щільність 140 г/м²

Поліфеніленсульфідне волокно є одним з найміцніших волокон з високоефективною термостійкістю. Ці волокна у 2 рази міцніші за арамідні волокна (наприклад, кевлар, номекс) і приблизно у 10 разів міцніше сталі. Температура розкладання є вищою на 100 °С порівняно з арамідом.

Дискретне вуглецеве волокно виробляється з рубаного джгута та використовується для ручного формування полімеркомпозитних виробів.

Вибір відповідного армування повинен враховувати сумісність із смолою, міцність, жорсткість/гнучкість, хімічну стійкість, вагу, придатність до роботи та вартість. Армування на основі волокна покращує механічні властивості та зазвичай використовується для виготовлення твердих деталей.

Сітка з нержавіючої сталі має гладку поверхню (рисунок 2.3), кислотостійкість, стійкість до лугів, антистатичність, стійкість до корозії та високотемпературного окислення. Рівномірність плетіння сітки визначає високу довговічність, високу міцність, міцність на розрив, зносостійкість та довговічність. В роботі використано сітку з нержавіючої сталі з розміром комірки 1,1 мм та діаметром дроту 0,22 мм.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

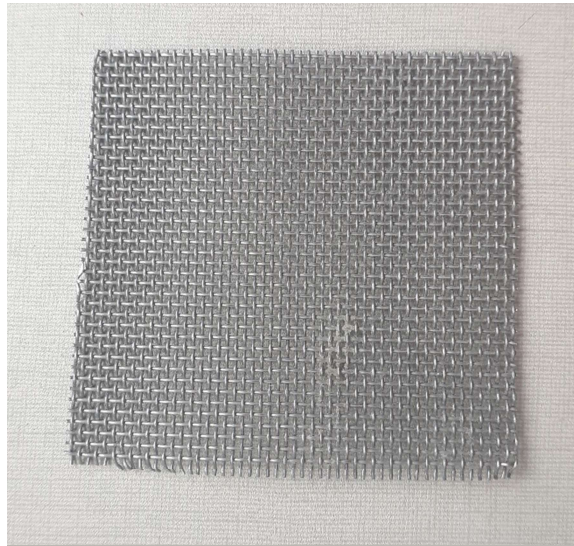


Рисунок 2.3 – Загальний вигляд сітки з нержавіючої сталі

Гума має низький модуль пружності і здатна витримувати деформацію до 1000 відсотків. При цьому гума має пружні властивості і проявляє внутрішню амортизацію. Гумові вироби можна виготовляти різних розмірів або прикріплювати до металевих вставок та монтажних пластин. Гума не піддається корозії і зазвичай не потребує змащення. В роботі використано гумові пластини товщиною 3 мм.

2.2. Методи дослідження структури та механічних характеристик епоксикомпозитів

Визначення механічних характеристик біокомпозитних зразків проводили за класичними методиками визначення адгезійної міцності, твердості та ударної міцності.

Адгезійну міцність визначали на методом нормального відриву циліндричних зразків, які з'єднували в торцях за допомогою досліджуваного матеріалу. Зразки розтягували під впливом зростаючого навантаження з швидкістю 2 мм/хв до руйнування з'єднання.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Розрахунок адгезійної міцності за нормального відриву проводили за формулою:

$$\sigma_a = \frac{P}{S},$$

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

S – площа клейового з'єднання, см².

Твердість епоксикомпозитних матеріалів визначали за методом Брінелля відповідно до ISO 6506. При цьому індентор втискується в зразок) із навантаженням 2,5 кН протягом 60 с. Під час випробування сталеву кульку діаметром 10 мм втискували в поверхню досліджуваного епоксикомпозитного матеріалу. Значення твердості матеріалу розраховували за формулою:

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

де P – навантаження, яке прикладене до індентора, Н;

D – діаметр кульки, мм;

d – діаметр відбитку, мм.

Ударну міцність біокомпозитних матеріалів визначали на епоксикомпозитних пластинах розміром 100x100 мм з товщиною в діапазоні 1...10 мм за формулою:

$$KC = mgh,$$

де m – маса вантажу, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

h – висота падіння вантажу, м.

Визначення ударної міцності проводили з використанням установки типу У-1 (рисунок 2.4). Пристрій представляє собою конструкцію, що складається з направляючої основи, опори та вантажу з ударником каліброваного розміру 8 мм.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32



а



б

Рисунок 2.4 – Загальний вигляд установки типу У-1 для дослідження ударної міцності:

а – плоска опора; б – дискова опора з отвором

Для імітації динамічного впливу у реальних умовах використано дискову опору з отвором діаметром 15 мм (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд сталеві опори для визначення енергії удару епоксикомпозитних зразків

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP 0724.00.000 ПЗ

Арк.

33

Дослідження структурних параметрів епоксикомпозитних зразків проводили з використанням оптичного мікроскопу типу МБС-9 із можливістю отримувати збільшення в діапазоні 20...30 раз.

2.3. Технологія формування епоксикомпозитних зразків

Формування епоксикомпозитних матеріалів проводили з використанням технологічних операцій: підготовки компонентів, змішування композиції, формування зразків, термічної та механічної обробки. На початковому етапі проведено дозування компонентів в'язучого ваговим методом з використанням стехіометричного співвідношення. Отримання епоксикомпозитних зразків виконували методом ручного ормування. Для цього підготовлену епоксидну композицію наносили на основу матриці (металева пластина товщиною 5 мм), після чого накладали армуючий компонент, який просочували епоксидним в'язучим. Після просочення всіх шарів армувального компоненту форму піддавали стисненню на гідравлічному пресі типу 2ПГ-10 (рисунок 2.6) із зусиллям 5 кН. Структурування епоксикомпозитів проводили на першому етапі за кімнатної температури $20\pm 2^\circ\text{C}$ протягом 24 год. З метою підвищення механічних характеристик проведено термічну обробку за ступінчастим режимом в сушильній шафі моделі СНОЛ75/400 (рисунок 2.7) з початковою температурою 50°C та кінцевою температурою $150\text{...}190^\circ\text{C}$.

Для видалення залишків епоксидного полімеру та отримання правильної форми зразків епоксикомпозитні пластини обрізали та піддавали шліфуванню з використанням засобів індивідуального захисту та витяжної вентиляції.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд гідравлічного пресу типу 2ПГ-10.



Рисунок 2.7 – Камера сушильної шафи типу СНОЛ75/400

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP 0724.00.000 ПЗ

Арк.

35

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА СКЛАДУ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ

ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ СКЛОПЛАСТИКІВ

3.1. Механічні характеристики епоксикомпозитів з підвищеною стійкістю до дії динамічних навантажень

Формування епоксикомпозитних матеріалів проведено згідно з режимом термічної обробки за ступінчастим режимом для уникнення появи залишкових напружень, що можуть спричинити зниження механічних характеристик та короблення виробу (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Режими формування епоксикомпозитних пластин

1 режим	2 режим	3 режим	4 режим	5 режим
ТО: 50° С – 1 год, 100° С – 1 год, 150° С - 3 год	ТО: 50° С - 1 год, 100° С – 1 год, 150° С- 5 год	ТО: 50° С – 1 год, 100° С – 1 год, 170° С - 3 год	ТО: 50° С – 1 год, 100° С – 1 год, 170° С - 5 год	ТО: 50° С – 1 год, 100° С – 1 год, 190° С - 3 год

Адгезійна міцність епоксиолімерів, які сформовані за режимом №1 термічної обробки, становить 18 МПа (рисунок 3.1). У випадку збільшення тривалості на другому етапі термічної обробки до 2 год за температури 100° відбувається незначне підвищення адгезійної міцності до 18,3 МПа, що пов'язано з підвищенням рухливості сегментів макромолекул епоксидного в'язучого за підвищеної температури. Це призводить до утворення додаткових хімічних зв'язків між кінцевими групами епоксидних макромолекул.

Використання режиму №2 забезпечує підвищення адгезійної міцності на 2..3 % порівняно з адгезійною міцністю епоксиолімерів, які сформовані за режимом №1, оскільки тривалість витримки за температури 150° С зростає до

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

5 год. Це дозволяє забезпечити утворення додаткових фізико-хімічних зв'язків між компонентами епоксиполімерної матриці. Витримка в межах даного режиму протягом 2 год за температури 100° С дозволяє підвищити адгезійну міцність до 18,9 МПа, що зумовлено перерозподілом реакційноздатних груп в епоксиполімерному в'язучому.

Значне підвищення досліджуваної характеристики відбувається за умови зростання температури на кінцевому етапі до 170° С, що визначається здатністю системи забезпечити вищий ступінь структурування за рахунок активізації швидкості хімічної реакції. Підвищення тривалості витримки за температури 100° С забезпечує зростання адгезійної міцності до 20,8 МПа, що дозволяє активізувати рухливість сегментів макромолекул епоксидного в'язучого.

Адгезійна міцність епоксиполімерів, які сформовані за режимом №4, мають найвищі значення досліджуваної характеристики (25,4 МПа). За таких умов відбувається формування максимальної кількості фізико-хімічних зв'язків, оскільки тривалість термічної обробки становить 5 год за температури 170° С. Підвищення тривалості витримки до 2 год за температури термічної обробки 100° С забезпечує підвищення адгезійної міцності до 25,4 МПа, що пов'язано з високою тривалістю витримки в тепловому полі.

Використання температури термічної обробки 190° С призводить до різкого зниження досліджуваної характеристики, оскільки після структурування на початковому етапі формування епоксикомпозитних виробів відбуваються процеси деструкції, які пов'язані з руйнуванням фізико-хімічних зв'язків. Це обумовлено високим тепловим впливом на епоксиполімерну систему, межа таплостійкості якої становить 180...190° С. Підвищення тривалості витримки за температури 100° С є недоцільним, оскільки незначне підвищення адгезійної міцності на 8...9 % не забезпечує необхідних значень, які отримано за температури 170° С.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

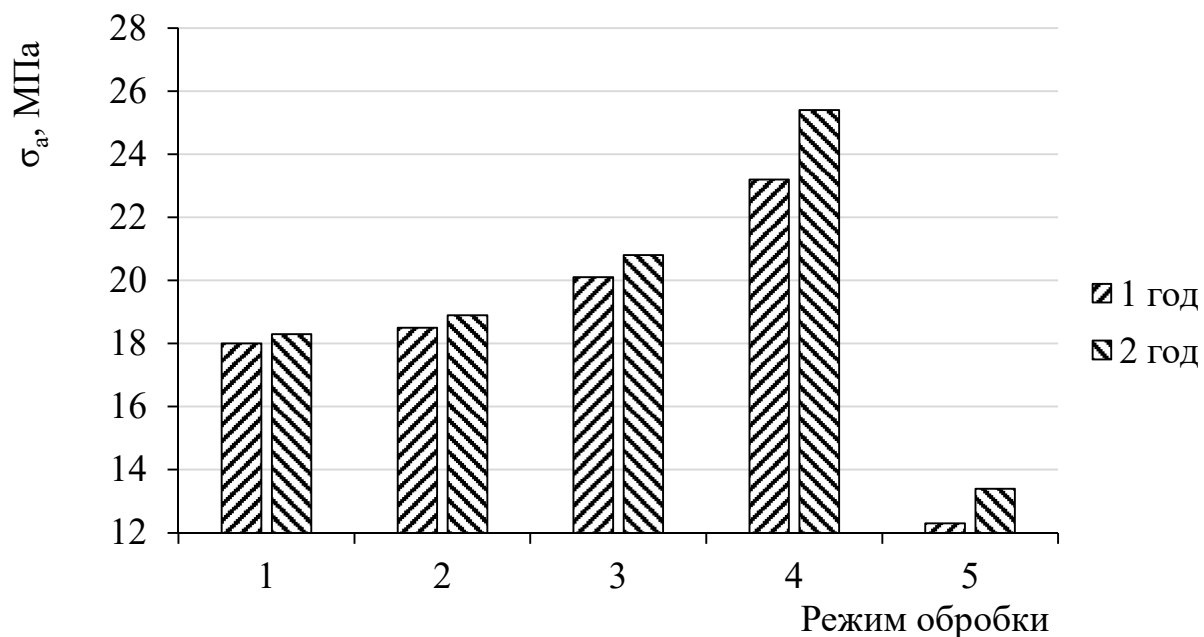


Рисунок 3.1 – Адгезійна міцність епоксиполімерів сформованих за режимом (таблиця 3.1) термічної обробки

Дослідження твердості та ударної міцності склопластів проводили на епоксикомпозитних пластинах, що містили до 6 шарів склотканини із щільністю 140 г/м².

Найнижчі значення твердості (76 МПа та 80 МПа) епоксикомпозитів мають склопластини (рисунок 3.2), які сформовані за режимом термічної обробки №1, оскільки мала тривалість витримки у тепловому полі не дозволяє отримати велику кількість фізико-хімічних зв'язків. У випадку формування епоксикомпозитів за температури 170° С відбувається підвищення твердості до 96 МПа та 110 МПа, що обумовлено завершенням процесу структурування епоксиполімерної матриці протягом 5 год за оптимальної температури.

Формування епоксикомпозитів за температури 190° С призводить до отримання значення твердості 105 МПа та 108 МПа. Зниження твердості епоксикомпозитів за такої кінцевої температури пов'язано з підвищенням крихкості системи через процеси деструкції.

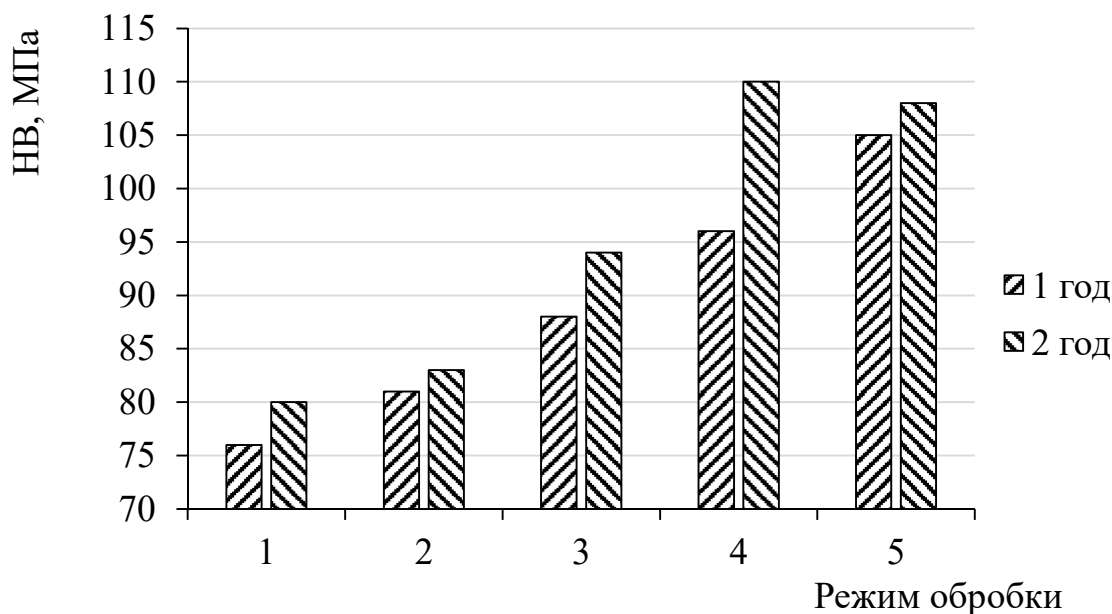


Рисунок 3.2 – Твердість епоксикомполімерів сформованих за режимом (таблиця 3.1) термічної обробки

Ударна міцність епоксикомполімерів, які сформовані за режимом №1 термічної обробки, становить 3,4 Дж та 3,8 Дж (рисунок 3.3). Підвищення даної характеристики на 70...75% відбувається у випадку застосування термічної обробки за режимом №4, що відповідає витримці епоксикомполімерних зразків за температури 170° С протягом 5 год. В такому випадку відбувається рівномірне структурування епоксиполімерної системи з максимальної кількістю фізико-хімічних зв'язків, які утворюються між кінцевими активними групами епоксидно в'язучого та реакційноздатними групами –ОН на поверхні скляних волокон.

Використання термічної обробки за температури 190° С призводить до різкого зниження ударної міцності епоксикомполімерів через процеси деструкції епоксиполімерної матриці. Висока температура структурування призводить до нерівномірного розподілу локальних об'ємів епоксидної матриці, які характеризуються підвищеним ступенем структурування системи порівняно з іншим об'ємом епоксиполімеру.

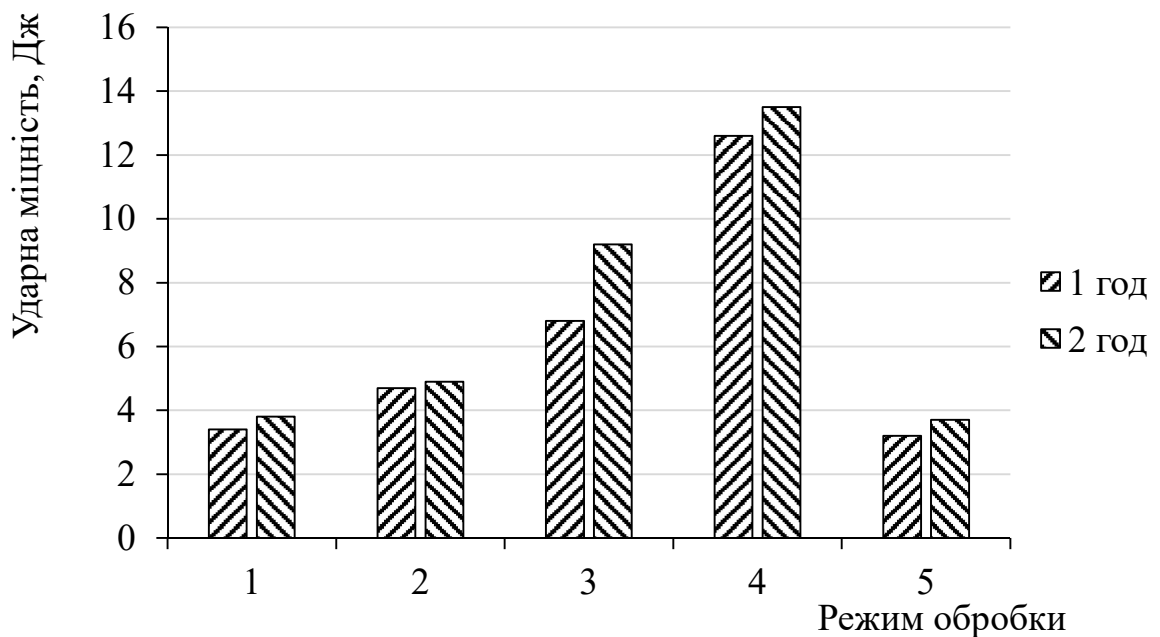
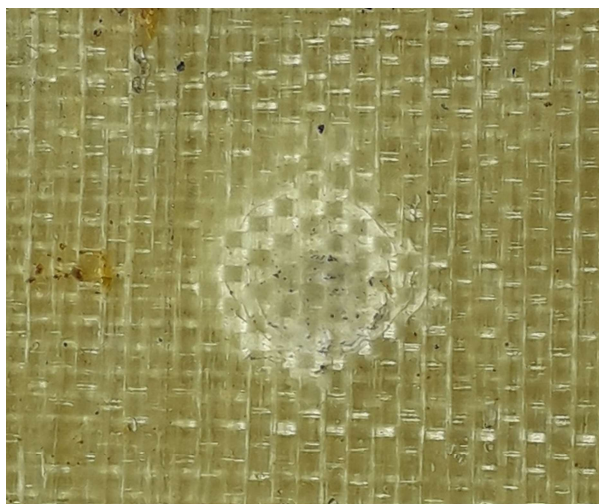


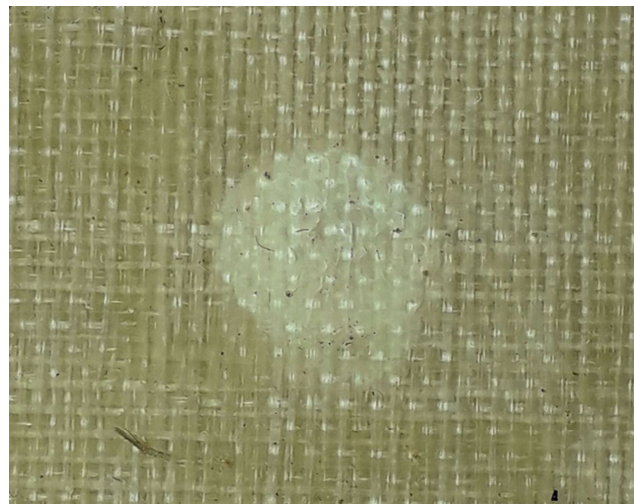
Рисунок 3.3 – Ударна міцність епоксикомполітів сформованих за режимом (таблиця 3.1) термічної обробки

3.2. Аналіз характеру руйнування епоксикомполітичних зразків

У випадку нанесення динамічного навантаження на епоксикомполітну пластину, яка розташована на площині відбувається утворення зони руйнування на фронтальній поверхні пластини зафіксовано з діаметром 7,5 мм (рисунок 3.4). На тильній стороні епоксикомполітної пластини діаметр зони руйнування становить 8,4 мм. Це пов'язано поглинанням та розсіюванням частини енергії удару на поверхні металеві пластини, в результаті чого зона руйнування майже не відрізняється від діаметру ударника (8 мм). Підвищення діаметру зони руйнування на тильній стороні пов'язано з поширенням коливань у жорсткій структурі епоксикомполітного матеріалу, оскільки відбувається підвищення модуля пружності через зниження рухливості сегментів макромолекул. Використання склотканини дозволяють сформувати структуру епоксикомполітного матеріалу, яка є стійкою до поширення тріщин через наявність перешкод у вигляді скляних волокон.



а



б

Рисунок 3.4. Загальний вигляд зони руйнування епоксикомпозитного матеріалу на сталевій пластині з формуванням за режимом №1 термічної обробки (1 год – 50 °С; 1 год – 100 °С; 3 год – 150 °С):

а – фронтальна сторона зразка; б – тильна сторона зразка

У випадку нанесення динамічного навантаження на епоксикомпозитний зразок, який розташований на сталевому диску, відбувається утворення наскізної зони руйнування (рисунок 3.5).



а



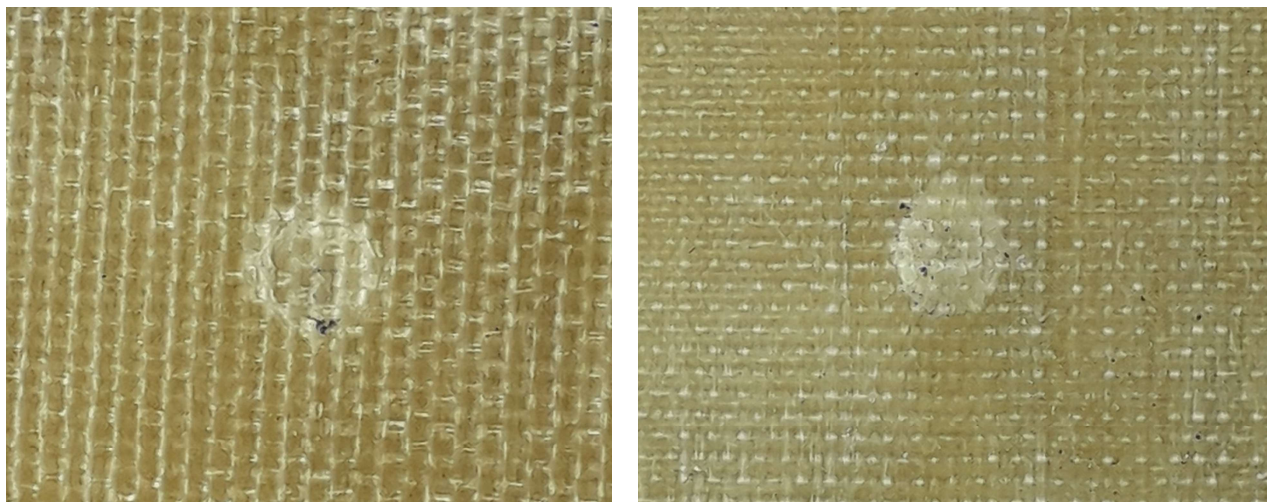
б

Рисунок 3.5. Загальний вигляд зони руйнування епоксикомпозитного матеріалу на сталевому диску з формуванням за режимом № 1 термічної обробки (1 год – 50 °С; 1 год – 100 °С; 3 год – 150 °С):

а – фронтальна сторона зразка; б – тильна сторона зразка

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

На фронтальні поверхні епоксикомпозитного зразка, який структурований за режимом №2 та розташованих на плоскій опорі, відбувається утворення зони у вигляді кола діаметром 6...6,5 мм після нанесення динамічного навантаження (рисунок 3.6). Утворення зони руйнування меншого діаметру порівняно з епоксикомпозитом, який структурований за режимом №1 пов'язано з вищими механічними характеристиками епоксидної матриці.



а

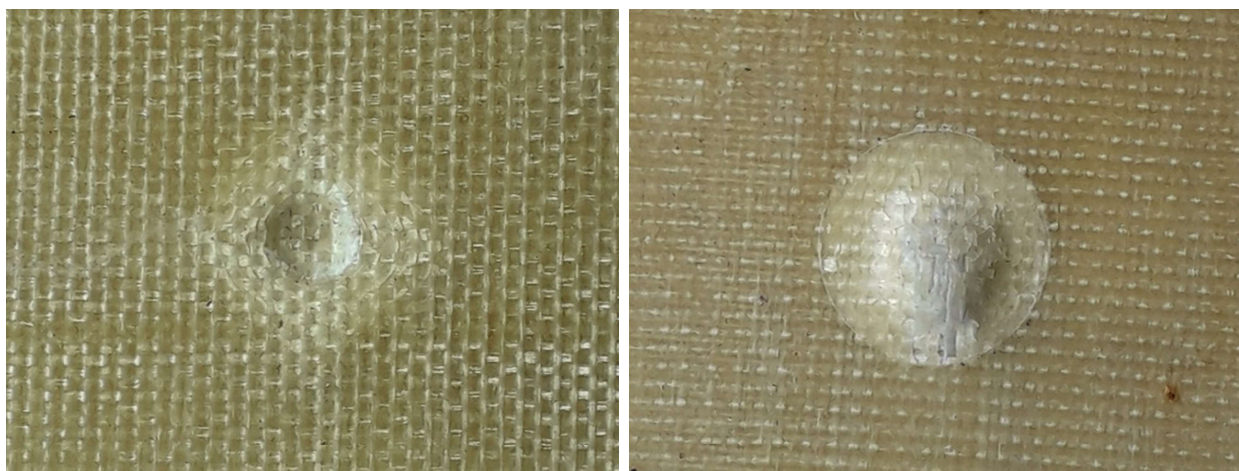
б

Рисунок 3.6. Загальний вигляд зони руйнування епоксикомпозитного матеріалу на сталевій пластині з формуванням за режимом №2 термічної обробки (1 год – 50 °С; 1 год – 100 °С; 5 год – 150 °С)

а – фронтальна сторона зразка; б – тильна сторона зразка

На тильній стороні епоксикомпозитного зразка зафіксовано зону деформації без руйнування епоксикомпозитної пластини, що вказує на вищу стійкість матеріалу до впливу динамічних навантажень (рисунок 3.7). Зона відшарування епоксидної матриці від склотканини має діаметр 17...18 мм, що вказує на поширення тріщини в епоксикомпозитному матеріалі. Завдяки підвищенню адгезійної міцності в результаті більшої витримки 5 год за температури 150° С зона відшарування є меншою на 2..3 мм порівняно з руйнування епоксикомпозитної пластини, яка сформована за витримки 3 год за температури 150° С.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42



а

б

Рисунок 3.7. Загальний вигляд зони руйнування епоксикомпозитного матеріалу з формуванням за режимом №2 термічної обробки (1 год – 50 °С; 1 год – 100 °С; 5 год – 150 °С):

а – фронтальна сторона зразка; б – тильна сторона зразка

Зона відшарування на фронтальній поверхні епоксикомпозитної пластини має діаметр 6...6,5 мм у випадку нанесення динамічного навантаження на плоску опору (рисунок 3.8). З тильної сторони епоксикомпозитної пластини утворюється зона відшарування, яка в діаметрі є аналогічною за розміром зоні відшарування фронтальної поверхні пластини. Це вказує на вищу стійкість епоксикомпозитного матеріалу до впливу динамічних навантажень у випадку формування за режимом №3 (температура 170°С, тривалість витримки 3 год).

За умови нанесення динамічного навантаження на епоксикомпозитну пластину, яка розташована на сталевому диску на тильній стороні утворюється заглибина, а діаметр зони відшарування становить 16...17 мм (рисунок 3.9). На тильній стороні пластини зона руйнування являє собою виступ з наскрізним пошкодженням епоксикомпозитного матеріалу в локальній зоні з сегментом 50 °. Такий матеріал здатний чинити вищий опір динамічним навантаженням порівняно з термічною обробкою за режимом №2 та №3.

					МП 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43



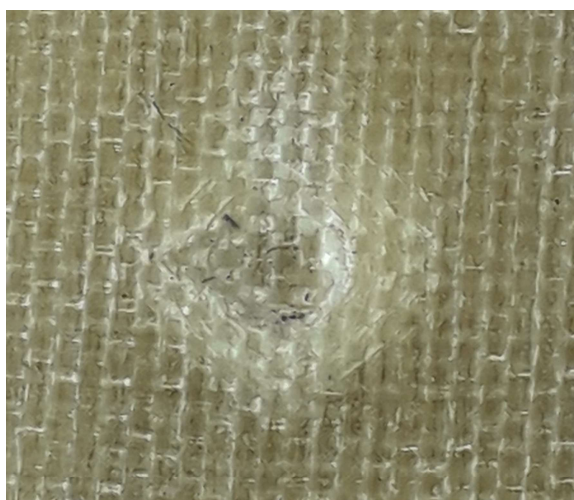
а



б

Рисунок 3.8. Загальний вигляд зони руйнування епоксикомпозитного матеріалу на сталевій пластині з формуванням за режимом №3 термічної обробки (1 год – 50 °С; 1 год – 100 °С; 3 год – 170 °С):

а – фронтальна сторона зразка; б – тильна сторона зразка



а



б

Рисунок 3.9. Загальний вигляд зони руйнування епоксикомпозитного матеріалу на сталевому диску з формуванням за режимом №3 термічної обробки (1 год – 50 °С; 1 год – 100 °С; 3 год – 170 °С):

а – фронтальна сторона зразка; б – тильна сторона зразка

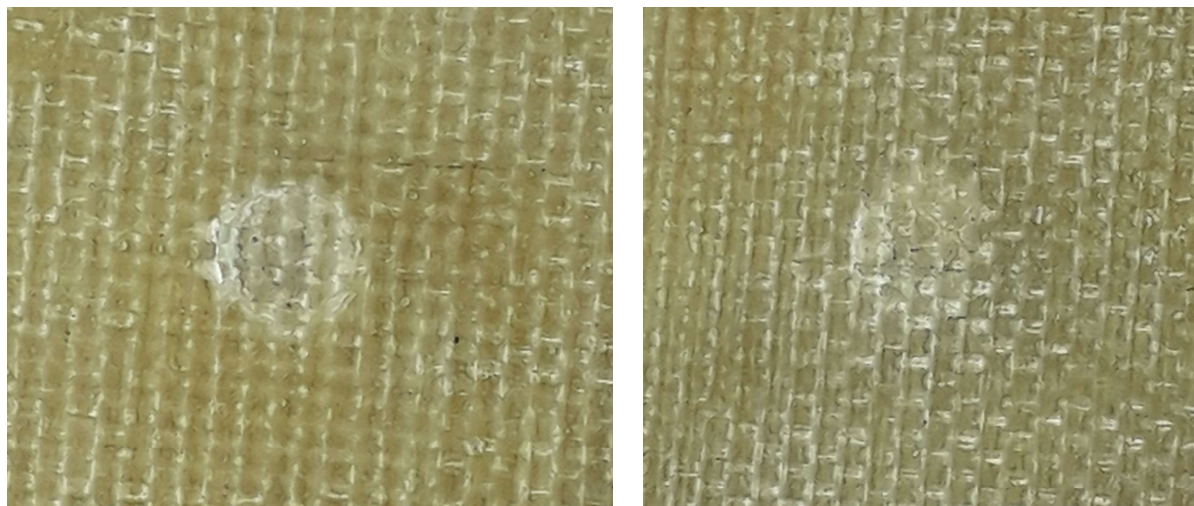
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP 0724.00.000 ПЗ

Арк.

44

Структурування за режимом №4 термічної обробки сприяє формуванню епоксикомпозитного матеріалу з високою ударною міцністю, оскільки зона відшарування у випадку нанесення динамічного навантаження на зразок, що знаходиться на плоскій поверхні, становить 5,5...6 мм. На тильній стороні епоксикомпозитної пластини знаходиться в межах 6,5...7 мм (рисунок 3.10).



а

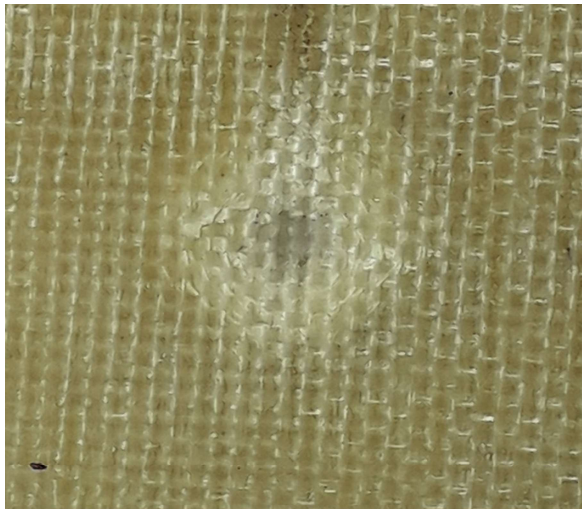
б

Рисунок 3.10. Загальний вигляд зони руйнування епоксикомпозитного матеріалу на сталевій пластині з формуванням за режимом №4 термічної обробки (1 год – 50 °С; 1 год – 100 °С; 5 год – 170 °С):

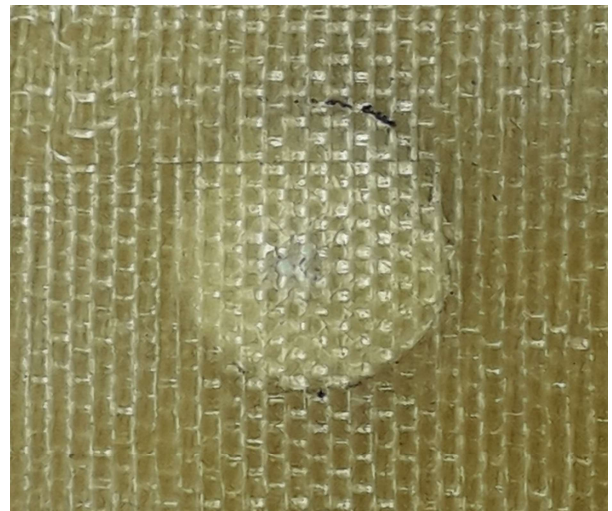
а – фронтальна сторона зразка; б – тильна сторона зразка

За умови нанесення динамічного навантаження на епоксикомпозитну пластину, яка розташована на сталевому диску, на фронтальній стороні утворюється зона відшарування без значного ступеня деформації зразка (рисунок 3.11). Діаметр зони відшарування на фронтальній стороні становить 11..12 мм, а діаметр зони відшарування тильної сторони пластини становить 15...16 мм. Основним показником стійкості епоксикомпозитного матеріалу до впливу динамічного навантаження є відсутність наскрізного руйнування епоксикомпозитної пластини, що вказує на ефективність термічної обробки за режимом №4 (температура 170° С, тривалість витримки 5 год).

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45



а



б

Рисунок 3.11. Загальний вигляд зони руйнування епоксикомпозитного матеріалу на сталевому диску з формуванням за режимом №4 термічної обробки (1 год – 50 °С; 1 год – 100 °С; 5 год – 170 °С):

а – фронтальна сторона зразка; б – тильна сторона зразка

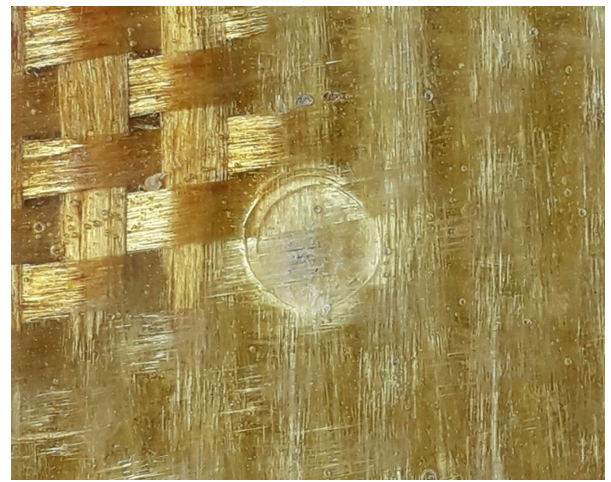
У випадку нанесення динамічного навантаження на епоксикомпозитну пластину, що містить арамідну тканину (6 шарів), відбувається руйнування зразка з утворенням зони наскрізного руйнування (рисунок 3.12, а). Це вказує на невисоку стійкість арамідних волокон чинити опір руйнуванню під впливом динамічного навантаження порівняно з ударною міцністю епоксикомпозитів, які містять склотканину з щільністю 140 г/м².

Ударна міцність епоксикомпозитних матеріалів, які містять склотканину в кількості 6 шарів зі щільністю 600 г/м², є значно вищою (рисунок 3.12, а) порівняно з склопластиками на основі епоксидного полімеру, який наповнений оарамідними тканинами або склотканинами меншої щільності (140 г/м²). В даному випадку відсутня зона наскрізного руйнування, а також відсутні сліди пластичної деформації в зоні нанесення динамічного навантаження.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46



а



б

Рисунок 3.12 – Епоксикомпозити з вмістом наповнювача:

а – арамідна тканина; б – склотканина (щільність 600 г/м²)

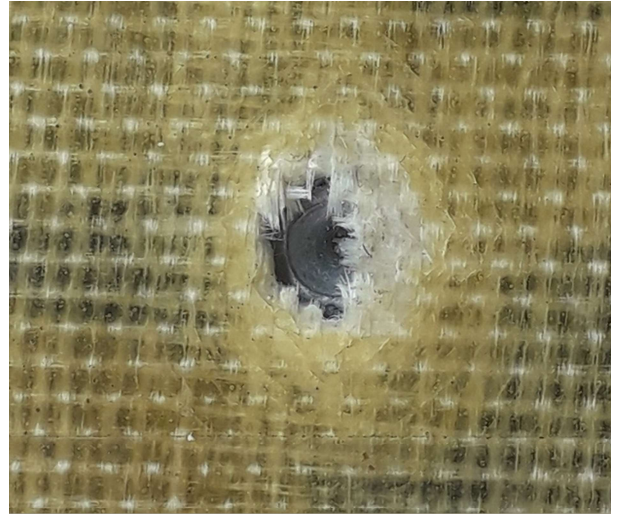
Для забезпечення лабораторних досліджень до реальних умов проведено визначення стійкості розроблених епоксикомпозитних матеріалів до впливу динамічного навантаження, що являє собою постріл з пневматичної гвинтівки калібру 4,5 мм. В такому випадку енергія удару становить 24...26 Дж, що відповідає динамічному навантаженню, яке створюється на лабораторній установці У-1.

У випадку випробування епоксикомпозитної пластини, яка містить 3 шари сталеві сітки, на фронтальній поверхні пластини відбулася фіксація кулі (рисунок 3.13, а), що вказує на стійкість епоксикомпозитного матеріалу до динамічного навантаження.

Епоксикомпозитні зразки, які містять 3 шари гуми, також мають стійкість до впливу динамічного навантаження, оскільки куля від пострілу залишилася на фронтальній частині (рисунок 3.13, б) епоксикомпозитної пластини. На тильні стороні епоксикомпозитних зразків відсутні будь-які сліди руйнування матеріалу, що вказує на здатність епоксикомпозитів утримувати сторонні предмети та забезпечувати балістичний захист.



а



б

Рисунок 3.13 – Епоксикомпозити з вмістом наповнювача:

а – скловолокно та сталева сітка (Зшари); б – скловолокно та гумові пластини (Зшари)

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

ВИСНОВКИ

Адгезійна міцність епоксиполімерів, які сформовані за оптимальним режимом термічної обробки (температура 170° С, витримка 5 год), є найвищою та становить 25,4 МПа. Це пов'язано з формуванням додаткових фізико-хімічних зв'язків, оскільки підвищено тривалість термічної обробки.

У випадку формування епоксикомпозитів за температури 170° С відбувається підвищення твердості до 96 МПа та 110 МПа, що обумовлено завершенням процесу структурування епоксиполімерної матриці протягом 5 год за оптимальної температури.

Структурування за оптимальним режимом термічної обробки забезпечує формуванню епоксикомпозитного матеріалу з високою ударною міцністю 13,5...14 Дж. В такому випадку відбувається рівномірне структурування епоксиполімерної системи з максимальної кількістю фізико-хімічних зв'язків, які утворюються між кінцевими активними групами епоксидного в'язучого та реакційноздатними групами –ОН на поверхні скляних волокон.

Епоксикомпозитні матеріали з вмістом склотканини в кількості 6 шарів забезпечують стійкість до динамічних навантажень, оскільки на поверхні склопластиків відсутні зони пластичної деформації та наскрізного руйнування епоксикомпозитної пластини.

Епоксикомпозитні пластини, які містить 3 шари сталеві сітки або 3 шари гумових пластин забезпечують стійкість до проникнення кулі пневматичної гвинтівки (4,5 мм) з енергією удару 24...26 Дж, що вказує на ефективність епоксикомпозитів забезпечувати балістичний захист.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Samad A. (2020). A Study on Different Compositions of Epoxy Resin Reinforced with Natural Fibers and Glass Fiber. International Journal of Engineering Research, V.9 10.17577/IJERTV9IS090193.
2. Zhang S., Zhong T., Xu Q., Su Z., Jiang M., Liu P. (2022). The effects of chemical grafting 1,6-hexanediol diglycidyl ether on the interfacial adhesion between continuous basalt fibers and epoxy resin as well as the tensile strength of composites. Construction and Building Materials, Volume 323, 126563.
3. Katagiri K., Honda S., Nakaya S., Kimura T., Yamaguchi S., Sonomura H., Ozaki T., Kawakita S., Takemura M., Sasaki K. (2021). Tensile strength of CFRP with curvilinearly arranged carbon fiber along the principal stress direction fabricated by the electrodeposition resin molding, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 143, 106271.
4. Keusch S., Haessler R. (1999). Influence of surface treatment of glass fibres on the dynamic mechanical properties of epoxy resin composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 30, Issue 8, Pages 997-1002.
5. Rudresh B., Ravikumar N. (2014). Effect of Short Glass Fibers on Mechanical Properties of Polyamide66 and Polypropylene (PA66/PP) Thermoplastic Blend Composites. Procedia Materials Science, 5.
6. Aramide F., Atanda P., Olorunniwo O. (2012). Mechanical Properties of a Polyester Fibre Glass Composite. International Journal of Composite Materials.
7. Ehsan U. (2015). Effect of various forms of glass fiber reinforcements on tensile properties of polyester matrix composite.
8. Cevahir A. (2017). Glass fibers, In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites, Woodhead Publishing, Pages 99-121.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

9. Rajak D. Wagh P., Linul E. (2021). Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review, *Polymers*, 13.

10. Prasad K., Prasad N., Saptharish G., Madhava P., Venkatanarayanan P. (2020). Experimental Investigation of CNT Infused GFRP Hollow Box Beams. *Thermoplastic Blend Composites*, 5.

11. Weiland K., Jones M.P., Zinsser F., Kontturi E., Mautner A., Bismarck A. (2021). Grow it yourself composites: Delignification and hybridisation of lignocellulosic material using animals and fungi. *Green Chem.*, 19, 7506-7514.

12. Park S., Alammari A., Fülöp Z., Pulido B., Nunes S., Szekely G. (2020). Hydrophobic thin film composite nanofiltration membranes derived solely from sustainable sources. *Green Chem.*, 23, 1175-1184.

13. Upton R.L., Fedosyuk A., Edel J.B., Crick C.R. (2021). Carbon Nanofiber/SiO₂ Nanoparticle/HDPE composites as physically resilient and submersible water-repellent coatings on HDPE Substrates. *ACS Appl. Nano Mater.*, 4, 10090-10102.

14. Bonten C. (2019). *Plastics Processing Technology*, Editor(s): Christian Bonten, *Plastics Technology*, Hanser, Pages 247-357.

15. Rajak D.K., Wagh P.H., Linul E. (2021). Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review. *Polymers*, 13, 3721.

16. Astashkin V.M., Mishnev M.V. (2016). On The Development of the Manufacturing Technology of Fiberglass Cylindrical Shells of Gas Exhaust Trunks by Buildup Winding, *Procedia Engineering*, Volume 150, Pages 1636-1642.

17. Zema L., Loreti G., Melocchi A., Maroni A., Gazzaniga A. (2012). Injection Molding and its application to drug delivery. *J. Control. Release*, 159, 324-331.

18. Stanek M., Manas D., Manas M., Suba O. (2011). Optimization of injection molding process. *Int. J. Math. Comput. Simul*, 5, 413-421.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

19. Lamm, M. (2007). The Fiberglass Story. Invention & Technology Spring. V. 22, Issue 4.

20. Kishore C., Jaiswal R., Bhatt V., Jugran S., Rawat D., Verma D. (2021). Analysis of glass fiber reinforced with epoxy resin using FEM. Materials Today: Proceedings, Volume 46, Part 20, Pages 11120-11128.

21. Chavan V.B., Gaikwad M.U. (2016). Review on Development of Glass Fiber/Epoxy Composite Material and its Characterizations International Journal of Science. Engineering and Technology Research (IJSETR), Volume 5, Issue 6, 2224-2228.

22. Morampudi P., Namala K.K., Gajjela Y.K., Barath M., Prudhvi G. (2021). Review on glass fiber reinforced polymer composites. Materials Today: Proceedings, Volume 43, Part 1, pages 314-319.

23. Davydova I., Kavun, N. (2012). Glass plastics in aviation and rocket engineering. Glass and Ceramics, 69(3-4).

24. Cui H. (2013). Glass Fiber Reinforced Biorenewable Polymer Composites and the Fabrication with Pultrusion Process., Iowa State University of Science and Technology, Digital Repository.

25. Ojoc G.G. (2022). A Theoretical and Experimental Study of Ballistic Protection Packages Made of Glass Fibers. Ph.D. Thesis, "Dunarea de Jos" University, Galati, Romania.

26. Cao Y., Gao G., Zhang P., Bao J., Feng P., Li R., Wang W. (2024). Improving tensile properties of glass fiber-reinforced epoxy resin composites based on enhanced multiphase structure: The modification of resin systems and glass fibers, Materials Today Communications, Volume 40, 110225.

27. R. Pothnis J., Kalyanasundaram D., Gururaja S. (2021). Enhancement of open hole tensile strength via alignment of carbon nanotubes infused in glass fiber - epoxy - CNT multi-scale composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 140, 106155.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

28. Fulmali A., Kar R., Ray B., Prusty R. (2023). Superior flexural, interlaminar- shear and fracture performance of glass fiber/epoxy laminates employing 3-D reinforcement approach: Emphasis on through thickness functionalized CNT alignment. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 175, 107795.

29. Yang K., Wu Z., Zhou C., Cai S. (2022). Comparison of toughening mechanisms in natural silk-reinforced composites with three epoxy resin matrices, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 154, 106760.

30. Fadlurrahman Z., Alandro D., Santos G., Muflikhun M. (2023). Mechanical and chemical properties of matrix composite: Curing agent ratio, degassing process, and filler effect perspectives, *Journal of Engineering Research*, Volume 11, Issue 4, Pages 488-497.

31. Chen Z., Tu Q., Shen X., Fang Z., Bi S., Yin Q., Zhang X. (2023). Enhancing the thermal and mechanical properties of carbon fiber/natural rubber composites by co-modification of dopamine and silane coupling agents, *Polymer Testing*, Volume 126, 108164.

32. Chiracu I.G., Ojoc G.G., Cristea G.C., Boțan M., Ceoromila A., Pîrvu C., Vasiliu A.V., Deleanu L. (2024). Behavior of Composites Made of Quadriaxial Glass Fiber Fabrics and Epoxy Resin under Three-Point Bending. *Polymers*, 16(13):1925.

33. Chawla K.K. (2023). *Composite Materials*, Springer: New York, NY, USA, pp. 120-121.

34. Liu C., Du D., Li H., Hu Y., Xu Y., Tian J., Tao G., Tao J. (2016). Interlaminar failure behavior of GLARE laminates under short-beam three-point-bending load. *Compos. Part B Eng.*, 97, 361-367.

35. Kucukkalfa E., Isikci G., Yildiz K., Cebeci H. (2023). Mechanical performance of 3D woven glass fiber I-beam composites with in-situ polyurethane foaming. *Compos. Struct.*, 326, 117636.

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

36. Fan W., Dang W., Liu T., Li J., Xue L., Yuan L., Dong J. (2019). Fatigue behavior of the 3D orthogonal carbon/glass fibers hybrid composite under three-point bending load. Mater. Des., 183, 108112.

37. Nazariipoor H., Ashrafizadeh H., Schultz R., Runka J., Mertiny P. (2022). Acoustic Emission Damage Detection during Three-Point Bend Testing of Short Glass Fiber Reinforced Composite Panels: Integrity Assessment. J. Compos. Sci., 6, 48.

38. Phunpeng V., Saensuriwong K., Kerdphol T., Uangpairroj P. (2023). The Flexural Strength Prediction of Carbon Fiber/Epoxy Composite Using Artificial Neural Network Approach. Materials, 16, 5301.

39. Ma Y., Ueda M., Yokozeki T., Sugahara T., Yang Y., Hamada H. (2017). Investigation of the Flexural Properties and Failure Behavior of Unidirectional CF/Nylon 6 and CF/Epoxy Composites. Open J. Compos. Mater., 7, 227-249.

40. Birleanu C., Cioaza M., Serdean F., Pustan M., Bere P., Contiu G. (2024). Tribological Investigation of Glass Fiber Reinforced Polymer Composites against 52100 Chrome Alloy Steel Based on ELECTRE Decision-Making Method. Polymers, 16, 62.

41. Епоксидна смола [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.resinlibrary.com/knowledge/article/epoxy-resin/>

42. Скловолокна [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.pfh.de/en/blog/properties-glass-fibre>

					MP 0724.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Додатки