

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності
Кафедра матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»
Формування епоксиполімерних склопластиків
методом одноосьового пресування / Forming epoxy
polymer fiberglass by uniaxial compression

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Індустріальний інжиніринг і менеджмент»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ(ІІМ)-41
Новосад Тарас Олександрович

(підпис)

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

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«___» _____ 2026 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Гусачук Дмитро Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Індустріальний інжиніринг і менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Імбирович Н.Ю.

“03” січня 2026 року

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

Новосаду Тарасу Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Формування епоксиполімерних склопластиків методом одноосового пресування / Forming epoxy polymer fiberglass by uniaxial compression*

керівник роботи *Кашицький Віталій Павлович, к.т.н., професор*,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 31.12.25 року № 540/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «19» травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи *літературні джерела, властивості вихідних матеріалів, методики досліджень фізико-механічних характеристик*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Вступ; розділ 1 Огляд технічної літератури; розділ 2 Матеріали та методики досліджень; розділ 3 Властивості епоксикомпозитних 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 наповнювача - 1 л ф.А4,

3. Формування та дослідження епоксикомпозитів - 1 л ф.А4, 4. Дослідження динамічної стійкості - 2 л ф.А4, 5. Макроструктура склопластиків - 1 л ф.А4, 6. Висновки - 1 л ф.А4.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Н. контоль</i>	<i>Мисковець С.В., доцент</i>		

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ, розділ 1 Огляд технічної літератури</i>	<i>05.05.26</i>	
<i>2</i>	<i>Розділ 2 Матеріали та методики досліджень</i>	<i>12.05.26</i>	
<i>3</i>	<i>Розділ 3 Властивості епоксикомпозитних склопластиків</i>	<i>19.05.26</i>	

Здобувач вищої освіти _____ *Новосад Т.О.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ *Кашицький В.П.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Новосад Т.О. Формування епоксиполімерних склопластиків методом одноосьового пресування. Рукопис.

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

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

В роботі подано критичний аналіз літературних джерел, визначено сучасні аналоги композитних матеріалів на основі епоксидних смол та основні методи формування виробів на їх основі.

В роботі подано характеристику матеріалів у вихідному стані, описано методику визначення динамічної стійкості епоксикомпозитних склопластиків та описано технологію формування епоксикомпозитних зразків. Досліджено вплив температурно-часового режиму формування виробів з різним ступенем ущільнення композиції на стійкість епоксикомпозитів до динамічних навантажень.

Бакалаврська робота складається з графічної частини та пояснювальної записки.

Пояснювальна записка містить 38 сторінок формату А4, 1 таблицю, 7 рисунків та 32 літературних джерела. Графічна частина містить 7 листів формату А4 у додатку А.

Ключові слова: склотканина, питоме навантаження, динамічна стійкість, температурно-часовий режим.

					БР 2026.00.00.000 ПЗ					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Формування епоксиполімерних склопластиків методом одноосьового пресування			Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив		Новосад								
Перевірів		Кашицький							3	38
								ЛНТУ, кафедра матеріалознавства, гр. ПМ(ПМ)-41		
Н.контр		Мисковець								
Затв.		Імбірович								

ANNOTATION

Novosad T.O. Forming epoxy polymer fiberglass by uniaxial compression. Manuscript.

Bachelor's qualification work EP "Industrial Engineering and Management" specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

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

The work presents a critical analysis of literary sources that identifies modern analogues of composite materials based on epoxy resins and the main methods of forming products based on them.

The work presents a characteristic of materials in the initial state, describes a method for determining the dynamic stability of epoxy composite fiberglass and describes the technology for forming epoxy composite samples. The influence of the temperature-time regime of forming products with different degrees of composition compaction on the resistance of epoxy composites to dynamic loads is investigated.

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

The explanatory note contains 38 pages of A4 format, 1 table, 7 figures and 32 literary sources. The graphic part contains 7 sheets of A4 format in Appendix A.

Keywords: fiberglass, specific load, dynamic stability, temperature-time regime.

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	7
1.1. Властивості та використання епоксиполімерних склопластиків.....	7
1.2. Сучасні методи формування епоксикомпозитних виробів.....	16
1.3. Висновки і постановка задач досліджень.....	20
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	23
2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів.....	23
2.2. Методи дослідження динамічної стійкості епоксикомпозитів	26
2.3. Технологія формування епоксикомпозитних зразків.....	27
РОЗДІЛ 3 ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ СКЛОПЛАСТИКІВ.....	30
3.1. Дослідження динамічної стійкості склопластиків.....	30
3.2. Макроструктура епоксикомпозитних склопластиків.....	32
ВИСНОВКИ.....	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	35
Додатки	

ВСТУП

Сучасний розвиток промисловості, будівництва, транспортного машинобудування, авіаційної та суднобудівної галузей характеризується зростанням потреби у високоміцних, легких і довговічних конструкційних матеріалах. Одним із найбільш перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є використання полімерних композиційних матеріалів, які поєднують високі експлуатаційні характеристики з відносно невеликою густиною. Особливе місце серед таких матеріалів займають склопластики на основі епоксидних полімерів, що відзначаються високою міцністю, корозійною стійкістю, теплостійкістю та добрими діелектричними властивостями.

Властивості епоксиполімерних склопластиків значною мірою визначаються не лише складом композиції, але й технологією їх формування. Серед існуючих методів виготовлення композиційних матеріалів особливу увагу привертає метод термічного пресування, який забезпечує отримання виробів із високою щільністю структури, мінімальною кількістю дефектів та стабільними фізико-механічними характеристиками. Під час термічного пресування під дією підвищених температур і тиску відбувається ущільнення армувального наповнювача, видалення повітряних включень та інтенсифікація процесів структурування епоксидної матриці. У результаті формується матеріал із покращеними показниками міцності, жорсткості та довговічності.

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Властивості та використання епоксиполімерних склопластиків

Епоксиполімерні склопластики являють собою композитні матеріали, що складаються з полімерної матриці на основі епоксидних смол та армувального наповнювача у вигляді скляних волокон, тканин або матів. Завдяки поєднанню властивостей армувального наповнювача та полімерної матриці такі матеріали широко застосовуються у виробництві корпусних деталей транспортних засобів, трубопроводів, резервуарів, будівельних конструкцій, електротехнічних виробів та елементів спеціального призначення. Високий рівень механічних характеристик, стійкість до впливу агресивних середовищ і тривалий термін експлуатації забезпечують їх конкурентоспроможність порівняно з традиційними металами [1].

Особливий інтерес становлять дослідження, спрямовані на підвищення ефективності процесу формування композитів шляхом використання сучасних отверджувачів, каталізаторів, нанодисперсних модифікаторів і функціоналізованих наповнювачів. Такі підходи дозволяють інтенсифікувати процес структурування епоксидної матриці, зменшити тривалість технологічного циклу та покращити експлуатаційні характеристики готових виробів. Крім того, сучасні тенденції розвитку композиційних матеріалів орієнтовані на створення ресурсозберігаючих технологій та забезпечення стабільності властивостей виробів в умовах тривалої експлуатації.

Композитні матеріали на основі полімерів набули значного розповсюдження в різних галузях, що зумовлено швидким технологічним прогресом. Більш економічно доцільним розробляти високоефективні

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

полімерні матричні композити шляхом армування недорогих полімерів відповідними наповнювачами, адаптованими до конкретних потреб [2].

Як правило, композитні матеріали складаються з однієї або кількох переривчастих фаз, вбудованих у безперервну фазу. Коли присутні кілька переривчастих фаз різних типів, композит класифікується як гібридний. Безперервна фаза називається матрицею, тоді як переривчасті фази відомі як армування або армуючі агенти. Ці матеріали поєднують компоненти з додатковими фізичними та механічними характеристиками [3].

Композити, армовані скловолокном, особливо привабливі, оскільки їхні властивості можна налаштувати для широкого спектру застосувань. Оскільки скловолокно становить близько 70...75% за вагою (або 50...60% за об'ємом), вибір відповідного типу скла має вирішальне значення.

Скловолокнисті композити є видом волокнисто-армованих полімерних композитів. Вони цінуються за низьку щільність, високу міцність та легкість обробки, що робить їх популярними в таких секторах, як аерокосмічна, автомобільна та будівельна промисловість. Сьогодні ці волокна знаходять застосування в електроніці, авіації, цивільному будівництві, автомобільній промисловості та спорті завдяки своїм винятковим властивостям, таким як висока міцність, гнучкість, жорсткість та хімічна стійкість. Вони виготовляються в різних формах, таких як ровінг, подрібнені пасма, пряжа, тканини та мати, кожна з яких має унікальні характеристики, що підходять для конкретних композитів. Дослідження повідомляли про термічні, трибологічні, водопоглинальні, механічні та вібраційні властивості цих армованих матеріалів [4].

Механічні характеристики композитів, армованих волокном, фундаментально залежать від властивостей їхнього компонента: типу, кількості, орієнтації та розподілу волокон, а також від природи межі волокно-матриця, який керує механізмами передачі навантаження. Крім того, додавання наповнювачів та добавок стало поширеною практикою для

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

покращення або модифікації властивостей композитів, відіграючи життєво важливу роль у їхніх механічних та фізичних характеристиках для промислового застосування [5].

Скловолокно виробляють із розплавленої сировини, наприклад із кремнезему пісок, глинозем з глини, оксид кальцію з кальциту і бор оксид з колеманіту, що призводить до різноманітних композицій, що демонструють такі властивості, як лугостійкість або підвищена механічна міцність. Вони класифікуються за призначенням і включають такі форми, як рубані пасма, ровінги, ткани тканини та мати, які використовуються в таких процесах, як лиття під тиском, намотування ниток, пултрузія, листове формування та ручне накладання. У роботі авторів [6] розглянули властивості полімерних (GFRP) композитів армованих різними скловолокнами, отримані за допомогою різних технології виготовлення, зробивши висновок, що високоякісні композити зазвичай використовують скло S-типу в поєднанні з епоксидною смолою або поліестером матриці, головним чином для аерокосмічних цілей. Це дорого, але пропонується чудова продуктивність. І навпаки, для загальнопобутових і випадків, скло E-Туре менш міцне, але більше економічно є кращим для масового виробництва.

Доступні різні типи скловолокна, включаючи E-glass, C-скло, S-скло, A-скло, D-скло, R-скло, EGR-скло та базальт волокна. Наприклад: A-Glass (багате лугом, використовується як недорогий наповнювач, незважаючи на низьку хімічну стійкість.), C-скло (хімічно стійке, але менш міцне), D-Glas (покращені електричні властивості, але низька міцність), S-Glass (висока міцність і жорсткість, але складність виготовлення підвищує витрати.), AR-Glass (стійкі до цирконію, але висока температура плавлення обмежує використання.).

E-скло найпоширеніше (складає 50% ринку) через доступність, електроізоляційну здатність і водостійкість, але існують екологічні проблеми, пов'язані з вмістом оксиду бору та фтору [7].

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Скловолокно доступне в різних формах, наприклад безперервні нитки, ткани тканини, довільні килимки та нарізані пасма, кожен підходить для конкретних процесів виробництва композитів.

Епоксидна смола — це термореактивний полімер, що містить щонайменше одну реакційноздатну епоксидну групу, цінну за свою високу реакційну здатність з функціональними групами, такими як карбоксильні, аміно- та гідроксильні групи [8]. Її універсальність зумовлена цими реакційними центрами, що робить її придатною для застосування, зокрема у друкованих платах, конструкційних клеях, герметиках для електроніки та інших сферах. Близько 90% епоксидних смол у світі базуються на диґліцидиловому ефірі бісфенолу А (ДГЕБА), який отримують реакцією бісфенолу А з епіхлоргідрином.

Доступні різні епоксидні смоли, включаючи водорозчинні на основі поліефірів або сорбітолу, на основі евгенолу, варіанти на основі сірки, похідні бісфенолу А та гідрогенізовану епоксидну смолу типу терпінен-малеїнового ефіру. Властивості епоксидних систем залежать від їхньої хімічної структури та відповідають конкретним вимогам застосування.

Рідкі епоксидні смоли, такі як DGEBA, широко використовуються завдяки своїм відмінним адгезійним та механічним властивостям. Тверді смоли на основі DGEBA, похідні від DGEBA, відомі своєю високою ефективністю та адгезією. Феноксильні смоли – це високомолекулярні похідні, відомі своєю хімічною стійкістю та чудовими ізоляційними здібностями. Епоксидні термопласти поєднують епоксидну структуру з термопластичними властивостями, підвищуючи міцність та легкість обробки. Галогеновані епоксидні смоли, що містять атоми галогену, такі як бром або фтор, розроблені для покращення вогнестійкості та хімічної стійкості. Багатофункціональні епоксидні смоли, з кількома реакційними центрами, збільшують щільність зшивання, тим самим підвищуючи теплові та механічні характеристики. Епоксидні новолаки, на основі фенолформальдегідних смол,

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

включаючи бісфенол F, крезолі, та різні гліцидилові ефіри, пропонують розглянуті властивості. Інші поліадерні фенол гліцидилові ефіри, такі як похідні тетракіс(4гідроксифеніл)етану, призначені для специфічних застосувань. Ароматичні гліцидиламінові смоли вирізняються високою термічною стабільністю та механічною міцністю.

Затверджувачі життєво важливі для структурування водних епоксидних смоляних систем. Однак їх застосування дещо обмежене через низьку ефективність емульгування [9]. Епоксидні смоли знаходять широке застосування в електронних компонентах, ливарних застосуваннях, упаковці, клеях, захисті від корозії та процесах нанесення покриттів зануренням.

У поєднанні з затверджувачами епоксидні смоли перетворюються на жорсткі, неплавкі матеріали. Еволюція властивостей, пов'язаних з вулканізацією, зараз робить акцент на екологічності та покращених механічних характеристиках. Затверджувачі використовуються для модифікації поверхні, оптимізації термодинамічних властивостей, функціональної обробки в терапевтичних підходах, і вони сприяли нещодавніми інноваціями у різних секторах, включаючи комерційне та промислове застосування.

Введення волокон у матрицю створює композити, які зв'язують, передають навантаження та захищають волокна. Ключові фактори, що впливають на характеристики, включають орієнтацію волокон, міцність волокон, фізичні властивості та міжфазну адгезію. Міцність волокон визначає несучу здатність, а модуль впливає на жорсткість та жорсткість, які є вирішальними для ефективності композиту.

Міцність на згин та модуль оцінюють здатність композиту протистояти силам згину та його жорсткість під навантаженням на згин. У роботі [10] було підкреслено використання природних гібридів, армованих волокнами, таких як Е-скло та волокно з листя ананаса, для економічно ефективних, легких, високоміцних матеріалів. Їхні механічні випробування були зосереджені на

властивостях на розтяг та вигин зразків, виготовлених методом ручного укладання, з метою оптимізації характеристик композиту.

В іншому дослідженні розробили гібридні композити на основі епоксидної смоли, використовуючи процес ручного укладання з затискним навантаженням, армуючи епоксидну смолу скловолокном (за допомогою багатожильних матів) та нановуглецевими частинками з різною ваговою часткою. У їхньому дослідженні вивчалася ударна та вигинна міцність, використовуючи методологію поверхні відгуку для аналізу. Результати показали, що вміст армування суттєво впливає як на згинальні, так і на ударні властивості, причому композити, що містять як скловолокно, так і вуглецеві наночастинки, демонструють кращі характеристики в цих областях.

В роботі [11] досліджували вплив вмісту волокна на механічну поведінку епоксидних композитів, армованих скловолокном. Їхні результати показали, що як міцність на розтяг, так і вигин суттєво залежать від об'ємної частки волокна в матриці. Армовані композити постійно перевершували неармовану епоксидну смолу, зі збільшенням вмісту скловолокна на 20%, що призвело до збільшення міцності на розтяг на 14,5% та збільшення міцності на згин на 123,65%. Більше підвищення міцності на згин пояснюється внеском волокон у загальну жорсткість.

Ударостійкість вимірює, наскільки добре композит може поглинати енергію та витримувати раптові сили без руйнування. Мікроструктурні ефекти призвели до збільшення тривалості прискорення та зміни швидкості хвиль, при цьому пошкодження накопичувалися лише після певних порогових значень тиску.

Втома описує, як композити реагують на повторне навантаження, яке може спричинити прогресуюче пошкодження з часом [12]. Композити були виготовлені за допомогою вакуумного вливання смоли. Випробування включали циклічне навантаження на розтяг, з аналізом поверхонь зламу та режимів руйнування при різних рівнях напруження. Результати показали, що

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

композити, армовані SMA, продемонстрували більш ніж удвічі більшу довговічність порівняно зі звичайними композитами GF/епоксидна смола. SEM-аналіз тріщинних поверхонь дозволив зрозуміти механізми руйнування. Результати продемонстрували значні покращення завдяки включенню SMA.

Швидкісний удар досліджує вплив на композити під час впливу високошвидкісних ударів, що важливо для застосування в аваріях та балістичних застосуваннях [13].

Випробування на високій швидкості показали розтріскування волокон та матриці, при цьому Е-скло/епоксидна смола зазнала менших пошкоджень, що вказує на більшу міцність завдяки більшому об'єму та щільності волокон. Результати дослідження свідчать про те, що Е-скло/епоксидна смола (800 г/м²) краще підходить для конструкцій літаків.

Теплопровідність композиту визначає, наскільки ефективно він переносить тепло по своїй структурі. Теплопровідність збільшується зі збільшенням вмісту скловолокна, досягаючи піку 45 мас.%, потім дещо знижуючись при меншій вазі, що сприяє економічному проектуванню композитів для конкретних структурних потреб. Композит з більшою кількістю джуту поглинає більше води та втрачає більше маси при вищих температурах, тоді як вищий вміст скловолокна покращував термічну стабільність. Кевларові волокна демонструють високотемпературні піки (приблизно від 472°C до 536°C), однак близько 800°C ці волокна зазнали втрати маси близько 68,8%. Гібридні композити з модифікованим кевларом та склом покращують теплові властивості та збільшують тангенс кута діелектричних втрат без погіршення стабільності. В роботі [14] також досліджували термомеханічне покращення епоксидної смоли шляхом додавання вуглецевих та скловолокон. Використовуючи ручне укладання та вакуумне фасування, були виготовлені композити з різним співвідношенням волокон (40:60, 50:50, 60:40). Диференціальна скануюча калориметрія показала, що як вуглецеве, так і скловолокнисте армування значно збільшують

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

міцність на розтяг та температуру склування. Вуглецеві композити показали значно більше покращення міцності на розтяг до 1122%, а температура склування збільшилася з 71°C для чистої епоксидної смоли до 110°C, що робить вуглецеві композити загалом кращими за характеристиками.

Хімічна стійкість вказує на здатність композиту протистояти деградації під впливом хімічних речовин навколишнього середовища. Волокнисті полімерні композити мають чудову корозійну [15], хімічну та зносостійкість, а також зменшену вагу, що робить їх придатними для таких застосувань, як резервуари для зберігання хімікатів, підземні паливні резервуари, резервуари для травлення та гальванічного покриття, димоходи, барабани для промивання целюлози та трубопроводи в нафтогазовій та енергетичній промисловості. Вуглецеві волокна виявилися найміцнішими з мінімальною втратою маси. Базальтові волокна добре протистояли кислотам, але сильніше реагували на лужні розчини. Скловолокна Е-типу показали найменшу стійкість до кислот, з втратою маси 21,9...35,1%, а також реагували в лужних умовах. Скловолокна ECR мали чудову кислотостійкість, перевершуючи базальт. Композити з вищим вмістом наповнювача та пустотами поглинають більше хімічних речовин та кислот. Композити з вмістом 2% за вагою продемонстрували чудову хімічну стійкість до різних кислот, таких як HCl, HNO₃ та CH₃COOH, а також розчинників, таких як NaOH та Na₂CO₃, та лугів, включаючи бензол, толуол та CCl₄. Це вказує на їх потенційну придатність для використання в резервуарах для зберігання хімікатів.

В процесі порівнювання механічних та теплових властивостей необробленого джуту та епоксидних гібридних композитів, армованих скловолокном, виявлено, що додавання джутового волокна та скловолокна до епоксидної смоли збільшує щільність, енергію удару, міцність на розтяг та міцність на вигин, але зменшує втрату маси залежно від температури та водопоглинання. Автори роботи [16] покращили міцність на розтяг та модуль епоксидної смоли, додавши скловолокно та вуглецеве волокно. В результаті

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

досліджень гібридних матеріалів з епоксидної смоли та кремнезему виявлено, що їхні механічні властивості та термічна стабільність покращилися завдяки високому модулю та великій площі поверхні наночастинок. Зокрема, органічно-неорганічні гібридні матеріали можуть мати переваги як неорганічних матеріалів (жорсткість та висока стабільність), так і органічних полімерів (гнучкість, пластичність та технологічність).

Полімерні композити, армовані скловолокном, широко використовуються в інженерних конструкціях, таких як підводні човни, космічні кораблі, літаки, автомобілі та спортивне обладнання завдяки своїй легкій вазі, високим показникам стійкості до корозії, втоми, міцності на розрив, вогнестійкості, зносостійкості, високому співвідношенню міцності до ваги, високому модулю та низькому коефіцієнту розширення [17].

В останні десятиліття прагнення до паливної ефективності та полегшення транспортних засобів спонукало виробників замінити традиційні матеріали, такі як сталь, на композити зі скловолокна. Ці композити використовуються в різних формах, включаючи пасма, ткани тканини та мати завдяки їхній високій питомій жорсткості та міцності. Легкі полімери, посилені наповнювачами, покращують механічні, хімічні, електричні та теплові властивості, одночасно знижуючи вартість та усадку, що робить їх ідеальними для автомобільної галузі.

Композити все частіше використовуються в цивільному будівництві для армування колон, балок та плит у будівлях, мостах та тротуарах завдяки їхній міцності та довговічності.

Скловолокно найпоширеніше в морських конструкціях, а для зменшення ваги використовуються FRP-сендвіч-панелі та стільникові перегородки. Композити життєво важливі для корпусів суден, гвинтів, турбін та морського обладнання, забезпечуючи тривалий термін служби в складних умовах, зокрема в солоній воді [18].

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Спортивна індустрія швидко розвивається, спираючись на передові матеріали для підвищення безпеки, продуктивності та стійкості. Волокнисті композити є важливими у спортивному спорядженні завдяки своїй легкій вазі, міцності, жорсткості, амортизації та простоті використання.

Натуральні волокна стають екологічно чистою альтернативою синтетичним армувальним матеріалам, що стимулює подальші дослідження екологічно чистих композитів для спортивних товарів. Ці матеріали дозволяють створювати легше, міцніше та довговічніше спортивне спорядження, покращуючи продуктивність та безпеку спортсменів. Застосування включає структурні компоненти, бандажі, набивку та протези, при цьому постійні розробки спрямовані на заміну традиційних матеріалів, таких як дерево та алюмінієві сплави.

1.2. Сучасні методи формування епоксикомпозитних виробів

Процес формування епоксиполімерних склопластиків методом термічного пресування є складним комплексом фізичних і хімічних явищ, які включають просочення армувального наповнювача полімерною композицією, ущільнення матеріалу під тиском, тепломасообмінні процеси та реакції тверднення епоксидної смоли. Кінцеві властивості виробу залежать від багатьох факторів, серед яких важливе значення мають температура пресування, величина прикладеного тиску, тривалість витримки, склад епоксидної композиції, тип отверджувача, співвідношення компонентів та характеристики армувального матеріалу. Оптимізація зазначених параметрів дозволяє забезпечити високий ступінь структурування полімерної матриці та формування якісної міжфазної взаємодії між волокном і полімером [19].

Вакуумна інфузія – це виробничий процес, у якому вакуумний тиск втягує смолу в сухі волокнисті арматурні елементи у формі, що призводить до отримання високоякісних композитів з хорошим співвідношенням волокна та

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

смоли [20]. Цей метод також відомий як інфузія плівки смоли. Він зазвичай використовує низьков'язкі смоли, а іноді й текучі середовища для полегшення течії смоли. Хоча він пропонує такі переваги, як зниження викидів, кращу консистенцію продукту та менше використання смоли, проблеми включають повільний час циклу, вищі витрати на витратні матеріали та труднощі із забезпеченням рівномірного вакуумного тиску для великих конструкцій. Досягнення включають розробку термопластичних смол, таких як PA-12 та Elium [21], які дозволяють проводити обробку за кімнатної температури, хоча процес все ще стикається з обмеженнями, такими як проблеми з гелеутворенням смоли та контролем вакууму.

Методи лиття під тиском створюють компоненти, які є дуже однорідними та близькими до своєї кінцевої форми з мінімальними зусиллями, часто маючи дві або більше полірованих поверхонь. Ці методи охоплюють такі процеси, як лиття під тиском, лиття силіконової гуми, лиття стисненням, лиття під низьким тиском, трансферне лиття, лиття під тиском смоли та реакційне лиття під тиском [22].

Лиття під тиском (ЛТ), яке часто називають «термопластичним литтям», включає впорскування нагрітого або розплавленого термопластику в закриту форму під високим тиском. Це оборотний процес, що включає такі деталі, як сопло, рухомі та нерухомі пластини, нагрівальні елементи, бункер для подачі та різні механічні системи. Форми зазвичай виготовляються з алюмінієвих сплавів для економічної ефективності, що дозволяє швидше обробляти. Процес включає подачу гранульованого або порошкоподібного композитного матеріалу в машину, де він нагрівається (до 200 °C), розм'якшується, а потім впорскується в порожнину форми за допомогою гідравлічної системи. Після охолодження затверділа деталь викидається.

Рідке формування (RTM) – це процес, що підходить для виробництва високопродуктивних композитних деталей у помірних об'ємах. Він включає в себе введення низьков'язкої термореактивної смоли в герметичну форму, що

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

містить попередньо підготовлені армуючі тканини, часто під низьким тиском (3,5...7 бар). RTM підходить для різних форм волокон: тканих тканин, килимків та джгутів, а також підвищує міцність і жорсткість при використанні скляних або вуглецевих волокон в армуванні [23].

У роботі [24] вивчали виробництво композитів PLLA, армованих скловолокном, шляхом полімеризації з використанням RTM. Низька в'язкість лактиду покращила його проникнення у волокна, досягши 100% конверсії для GFRP та 91,9% для PLLA. Додавання скляних волокон збільшило кристалічність до 55,65% порівняно з 36,5% для чистого PLLA. Отриманий композит продемонстрував чудові механічні властивості, з міцністю на розтяг 122,3 МПа та модулем 4,485 ГПа. Під час деградації відбувалася як поверхнева, так і об'ємна ерозія, що свідчить про те, що ці композити можуть служити альтернативою металевим імплантатам у медичних застосуваннях.

Вакуумне перенесення смоли (VARTM) було розроблено протягом останніх двох десятиліть. Це варіант RTM, що використовує вакуум для покращення течії смоли. Також відомий як VARI, VBRTM або VIM, він замінює частину форми гнучким вакуумним мішком. Процес включає попереднє розміщення армуючих тканин, скріплених зв'язуючими речовинами, у формі, герметизацію за допомогою [25] вакуумного мішка та впорскування смоли під вакуумом. Після просочення композит твердіє при кімнатній температурі, з додатковим подальшим затвердінням.

У роботі [26] досліджували сорбцію води в гібридних поліефірних композитах, армованих скловолокном та джутовими тканинами, виготовлених за допомогою стиснення та VARTM. У роботі було протестовано п'ять послідовностей укладання за кімнатної температури, 50°C та 70°C. Коефіцієнти водопоглинання та дифузії були проміжними порівняно з одноволокнистими композитами, без суттєвих відмінностей після насичення. Вищі швидкості дифузії спостерігалися у зразках з джутом на зовнішніх поверхнях, особливо за підвищених температур. Спосіб виробництва не

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

впливав на поглинання води при насиченні. Загалом, вміст джуту та температура занурення переважно впливали на поглинання вологи, тоді як процес виготовлення мав незначний вплив на сорбцію води при насиченні. Інші методи цієї категорії включають силіконову гуму та процеси компресійного формування.

Методи контактного формування є економічно ефективними для виготовлення окремих оброблених поверхонь та скорочують час розробки завдяки спрощенню інструментів [27].

Сухе ручне формування – це базовий та давній метод передбачає ручне розміщення шарів армування у формі та нанесення смоли. Він широко використовується для великих деталей малого обсягу, таких як корпуси човнів, панелі кузовів автомобілів, лопаті вітрових турбін та побутові вироби, такі як басейни та ванни.

Напилення схоже за простотою на ручне формування, але є швидшим та може створювати складніші форми. Воно використовує відкриті форми та зазвичай твердіє при кімнатній температурі, з можливим нагріванням для прискорення твердіння. Ідеально підходить для більших деталей, таких як ванні кімнати та вентиляційні витяжки, у малих та середніх виробничих серіях.

Намотування нитками – це автоматизований процес підходить для виготовлення циліндричних конструкцій та конструкцій посудин під тиском шляхом намотування препрегових волокон (скло, вуглець, кевлар) навколо обертових сердечників за допомогою спіральних, окружних або полярних схем [28].

Пультрузія – це безперервний процес, у якому волокна протягуються через ванну зі смолою, а потім потрапляють у нагріту матрицю, створюючи високоміцні, жорсткі компоненти з однаковим поперечним перерізом.

В роботі [29] запровадили модифікований процес пултрузії, замінивши традиційну ванну зі смолою спеціальним просочувачем зі смолою, у поєднанні

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

з розподілом волокон для кращого просочення. Автори використовували диференціально скануючу калориметрію для оптимізації температури матриці та швидкості процесу. Було розроблено безрозмірне число просочення для оцінки ефективності просочення з урахуванням різних режимів просочення. Експерименти з різними швидкостями показали, що модифікований метод дещо покращив механічні властивості та значно зменшив використання розчинника та відходи смоли, пропонуючи помітні екологічні переваги порівняно з традиційною пултрузією.

Автоклавне формування – це передовий процес, який використовує високий тиск (близько 5 бар) у герметичному автоклаві, що дозволяє виробляти щільні, високоякісні композити зі змінною орієнтацією волокон. Він переважно використовується в аерокосмічній галузі завдяки своїм перевагам у вартості та продуктивності [30].

1.3. Висновки і постановка задач досліджень

Епоксиполімерні склопластики займають провідне місце серед конструкційних полімерних матеріалів завдяки поєднанню високої міцності, хімічної стійкості та технологічної універсальності. Метод одноосьового пресування, як один із найбільш поширених способів формування прес-композитів, забезпечує контрольоване ущільнення та орієнтацію армуючих волокон, що безпосередньо впливає на експлуатаційні характеристики готових виробів. Даний метод дозволяє досягати оптимального співвідношення між структурною однорідністю та економічною ефективністю процесу.

Дослідження показують, що процес формування епоксиполімерних склопластиків складається з кількох взаємопов'язаних стадій: ущільнення прес-порошку, полімеризації епоксидної матриці та структуроутворення композиту. Важливим чинником є швидкість і рівномірність теплопередачі в об'ємі матеріалу, що визначає ступінь зшивання полімерної матриці. У ряді

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

робіт акцентується увага на необхідності інтенсифікації процесу за рахунок використання каталізаторів, модифікаторів та фізико-хімічних методів (мікрохвильове опромінення, ультразвукова обробка), які скорочують час формування та покращують якість структури.

Процес формування виробів визначається такими факторами як температура пресування, тиск та тривалість витримки. Оптимізація цих параметрів дозволяє досягти високої щільності композиту, мінімізувати внутрішні дефекти та забезпечити прогнозовані механічні властивості. При цьому надмірне підвищення температури або тиску може призвести до термічної деградації матриці чи руйнування волокон, що підкреслює необхідність точного регулювання режимів.

Значна частина сучасних досліджень спрямована на пошук шляхів підвищення міцності та довговічності епоксиполімерних склопластиків. Серед перспективних напрямів – введення нанонаповнювачів (графен, наноглини, оксиди металів), використання інтерпенетруючих полімерних мереж (IPN), а також застосування комбінованих методів пресування з додатковим термо- чи електрофізичним впливом. Такі підходи дозволяють не лише інтенсифікувати процес формування, а й розширити функціональні можливості матеріалів.

Епоксиполімерні склопластики, сформовані методом одноосьового пресування, знаходять широке застосування у машинобудуванні, авіаційній та будівельній галузях. Висока питома міцність, стійкість до агресивних середовищ та можливість виготовлення складних деталей роблять їх конкурентоспроможними порівняно з традиційними металами та іншими полімерними композитами. Перспективи розвитку технології пов'язані з подальшою автоматизацією процесів, впровадженням цифрового моделювання режимів пресування та використанням екологічно безпечних модифікаторів.

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Метою роботи є оптимізація температурно-часового режиму формування епоксикомпозитних склопластиків під впливом одноосьового навантаження стиснення.

В роботі для досягнення мети необхідно виконати основні завдання:

- визначити оптимальну температуру та тривалість витримки в тепловому полі композиції на основі епоксиолімерних склопластиків;
- визначити ударну міцність епоксикомпозитних склопластиків сформованих за різних режимів структурування;
- дослідити макроструктуру епоксикомпозитних склопластиків сформованих за різних режимів структурування.

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів

Епоксидна смола марки ЕД-20 є однією з найбільш поширених епоксидних смол загального призначення, яка широко використовується у виробництві композитних матеріалів, захисних покриттів, клеїв, герметиків та електроізоляційних виробів. Завдяки комплексу цінних фізико-механічних і технологічних властивостей смола ЕД-20 протягом багатьох років залишається основною сировиною для виготовлення полімерних композитних матеріалів у різних галузях промисловості [31].

Епоксидна діанова смола ЕД-20 є продуктом взаємодії епіхлоргідрину з дифенілолпропаном (бісфенолом А) у лужному середовищі. Основу смоли становлять олігомерні сполуки, які містять реакційноздатні епоксидні групи. Загальна структурна формула смоли може бути представлена як продукт поліконденсації бісфенолу А та епіхлоргідрину з наявністю кінцевих епоксидних груп. Саме наявність епоксидних циклів забезпечує можливість подальшого тверднення смоли під дією отверджувачів з утворенням просторово зшитої полімерної структури.

За зовнішнім виглядом смола ЕД-20 являє собою в'язку прозору рідину від світло-жовтого до бурштинового кольору. Молекулярна маса олігомерів становить приблизно 390...470 г/моль. Масова частка епоксидних груп зазвичай перебуває в межах 20...22 %, а епоксидне число становить 0,50...0,60 моль/100 г. Густина смоли за температури 20 °С становить близько 1,16...1,20 г/см³. В'язкість залежить від температури та може досягати 12...25 Па·с при кімнатній температурі. Смола добре розчиняється в ацетоні, толуолі, ксилолі та інших органічних розчинниках.

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Однією з найважливіших властивостей ЕД-20 є висока реакційна здатність щодо різноманітних заверджувачів. Для її затверднення застосовують поліетиленполіамін (ПЕПА), триетилентетрамін (ТЕТА), ангідриди кислот, ароматичні аміни та інші сполуки. У процесі тверднення відбувається утворення тривимірної просторової сітки, яка забезпечує високу механічну міцність та хімічну стійкість матеріалу. Залежно від типу отверджувача та режиму термообробки можна отримувати матеріали з різними експлуатаційними характеристиками.

Поліетиленполіамін (ПЕПА) є одним із найбільш поширених затверджувачів амінного типу, який широко використовується для тверднення епоксидних смол при нормальній температурі. Завдяки високій реакційній здатності та відносно низькій вартості ПЕПА знайшов широке застосування у виробництві полімерних композитних матеріалів, клеїв, герметиків, захисних покриттів та склопластиків [32].

Поліетиленполіамін являє собою суміш лінійних і розгалужених поліамінів, що утворюються в результаті взаємодії етилендихлориду з аміаком або інших методів синтезу аміносполук. До складу ПЕПА входять етилендіамін, діетилентриамін, триетилентетрамін, тетраетиленпентамін та інші поліаміни. Загальну структурну формулу поліетиленполіаміну можна подати у вигляді повторюваних фрагментів $\text{—NH—CH}_2\text{—CH}_2\text{—}$, які містять первинні, вторинні та третинні аміногрупи. Наявність великої кількості активних амінних груп обумовлює високу реакційну здатність ПЕПА щодо епоксидних сполук.

Скловолокно є одним із найпоширеніших армувальних матеріалів, що використовується для виготовлення полімерних композиційних матеріалів. Завдяки поєднанню високої механічної міцності, малої густини, хімічної стійкості та доступної вартості воно широко застосовується у виробництві склопластиків, будівельних конструкцій, транспортних засобів, електротехнічних виробів та інших композиційних матеріалів. У поєднанні з

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

епоксидними смолами скловолокну забезпечує отримання матеріалів із високими експлуатаційними характеристиками та тривалим терміном служби.

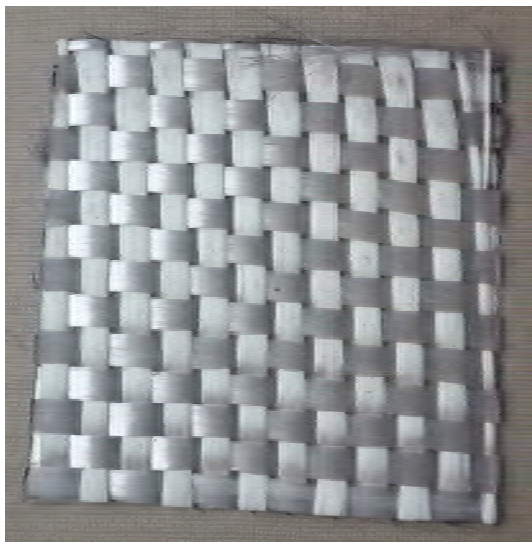
Скловолокну являє собою тонкі безперервні або штапельні нитки, отримані шляхом витягування розплавленого скла через спеціальні фільтри. Найбільш поширеним для виготовлення композиційних матеріалів є електротехнічне скло марки Е (E-glass), яке характеризується оптимальним поєднанням міцності, діелектричних властивостей і вартості. Основу хімічного складу Е-скла становить діоксид кремнію (SiO_2), вміст якого зазвичай становить 52...56 %. Крім того, до складу входять оксиди алюмінію (Al_2O_3), кальцію (CaO), магнію (MgO), бору (B_2O_3) та незначні кількості оксидів натрію і калію. Такий склад забезпечує високу механічну міцність, термічну стабільність і стійкість до впливу навколишнього середовища.

За зовнішнім виглядом скловолокну являє собою тонкі волокна діаметром переважно від 5 до 25 мкм. Густина матеріалу становить приблизно 2,5...2,6 г/см³, що значно менше густини більшості конструкційних металів. Однією з найважливіших властивостей скловолокну є висока міцність на розтяг, яка може досягати 2000...3500 МПа залежно від типу волокна та технології його виготовлення. Модуль пружності зазвичай перебуває в межах 70...85 ГПа, що забезпечує високу жорсткість композиційних матеріалів.

Скловолокну характеризується високою хімічною стійкістю до впливу води, розчинів солей, мастил та багатьох агресивних середовищ. Воно не піддається корозії, не гниє та не підтримує розвиток мікроорганізмів. Важливою перевагою є також негорючість і теплостійкість матеріалу. Температура розм'якшення скловолокну становить близько 800...850 °С, а температура плавлення перевищує 1100 °С. Завдяки цьому склопластики можуть експлуатуватися в умовах підвищених температур без істотної втрати властивостей.

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

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25



а



б

Рисунок 2.1 – Загальний вигляд склотканини:

а – щільність 600 г/м²; б – щільність 160 г/м²

2.2. Методи дослідження динамічної стійкості епоксикомпозитів

Дослідження динамічної стійкості епоксикомпозитів проведено з використанням стандартної методики визначення ударної міцності полімеркомпозитних покриттів.

Ударну стійкість епоксикомпозитних склопластиків визначали згідно методики ISO 20567-3:2012 «Фарби та лаки». Дана методика полягає у розрахунку енергії необхідної для руйнування епоксикомпозитних матеріалів в результаті падіння із визначеної висоти ударника каліброваного розміру.

Стійкість матеріалів до динамічних навантажень розраховували за даною формулою:

$$A = mgh, \quad (2.1)$$

де m – маса ударника, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

h – висота вільного падіння ударника, м.

Дослідження динамічної стійкості епоксикомпозитних матеріалів проводили за допомогою приладу типу У1 (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Прилад типу У1 для досліджень на динамічну стійкість

2.3. Технологія формування епоксикомпозитних зразків

Формування епоксикомпозитних склопластиків починається з приготування епоксидного в'язучого, тверднення якого відбувається за допомогою затверджувача поліетиленполіаміну (ПЕПА). Дозування компонентів проводять ваговим методом з врахуванням, що затверджувача вводять 12 мас.ч. затверджувача на 100 мас.ч. епоксидної смоли. Змішування компонентів проводять механічним способом за допомогою лабораторного змішувача. Швидкість обертання лопатей є невисокою з метою уникнення нагрівання композиції, щоб недопустити інтенсивного тверднення в'язучого та зменшити кількість повітряних включень.

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Формування епоксикомпозитних зразків проводили за допомогою гідравлічного пресу моделі 2ПГ-10 (рисунок 2.3). Композицію наносили на підготовлені металеві пластини, які покриті антиадгезійним покриттям з метою відділення епоксикомпозитних зразків після формування. Епоксидну композицію (епоксидна смола + затверджувач) наносять тонким шаром на поверхню склотканини з двох сторін рівномірним шаром. Аналогічну операцію повторюють для наступних шарів, після чого накривають ще однією металевою пластиною та стискають.



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд гідравлічного пресу моделі 2ПГ-10

Після стиснення надлишкову композицію видаляють та піддають впливу теплового поля за визначеної температури та встановленого часу витримки. Після охолодження металеві пластини відділяють і отримані склопластики піддають термічній обробці у камері сушильної шафи (рисунок 2.4) за класичним ступінчастим режимом: 70° С протягом 1 год, 100° С протягом 1 год та 140° С протягом 4 год.

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28



Рисунок 2.4 – Камера сушильної шафи моделі СНОЛ 400

Після охолодження епоксикомпозитні зразків досліджують на динамічну стійкість за кімнатної температури.

РОЗДІЛ 3

ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ СКЛОПЛАСТИКІВ

3.1. Дослідження динамічної стійкості склопластиків

Епоксикомпозитні склопластики, що містять склотканину зі щільністю 600 г/м² мають значення динамічної стійкості 5,1 Дж за умови формування за режимом №1 (таблиця 3.1) та питомого навантаження 0,7 МПа (рисунок 3.1).

Таблиця 3.1 – Режими формування склопластиків

Режим	1	2	3	4	5	6	7
Температура, °С	40	50	50	60	60	70	70
Час, хв	40	20	25	15	20	10	15

У випадку підвищення температури термічної обробки до 50 °С тривалість витримки скорочують до 20 хв через інтенсивне структурування і формування дефектної структури. В таких умовах динамічна стійкість підвищується (5,7 Дж) завдяки кращому структуруванню за вищої температури, яка забезпечує утворення більшої кількості хімічних зв'язків між комонетами епоксикомпозитного матеріалу. З підвищенням тривалості витримки досліджувана характеристика знижується через інтенсивне структурування. Застосування температури 60 °С призводить до подальшого зростання характеристики через кращі умови структурування. Найвищу динамічну стійкість мають епоксикомпозитні склопластики структуровані на першому етапі з температури 70 °С та витримці 10 хв, що відповідає оптимальним умовам, за яких підвищується рухливість сегментів макромолекул і утворюється максимальна кількість хімічних зв'язків. Підвищення тривалості витримки знижує дану характеристику через інтенсивне структуруванні і підвищення напруженого стану системи. Використання питомого навантаження 3,5 МПа забезпечує краще просочування склотканини і формування щільнішої структури

епоксикомпозитного склопластика, в результаті чого динамічна стійкість підвищується на 23...27%.

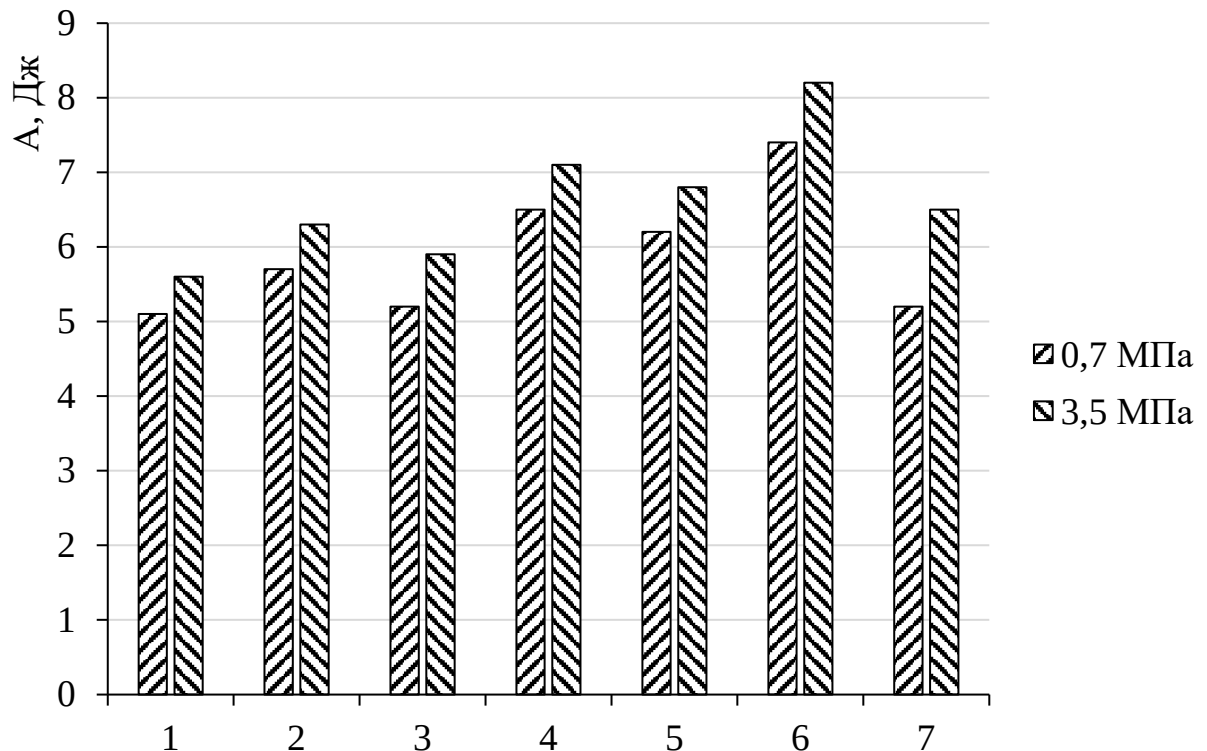


Рисунок 3.1 – Залежність динамічної стійкості склопластиків наповнених склотканиною зі щільності 600 г/м² від режиму формування

Епоксикомпозитні склопластики, що містять склотканину зі щільністю 160 г/м² мають значення динамічної стійкості 4,2 Дж за умови формування за режимом №1 (таблиця 3.1) та питомого навантаження 0,7 МПа (рисунок 3.2). Зниження пов'язано з використанням склотканини меншої щільності, в результаті чого епоксидне в'язуче гірше змочує поверхню волокон склотканини і утворюється менша кількість хімічних зв'язків.

Використання температури 70°C за тривалості витримки 10 хв та питомого зусилля 3,5 МПа забезпечує максимальне значення динамічної стійкості, однак ці значення на 15% нижчі за значення динамічної стійкості епоксикомпозитів з вмістом склотканини щільністю 600 г/м² через погане змочування поверхні волокон.

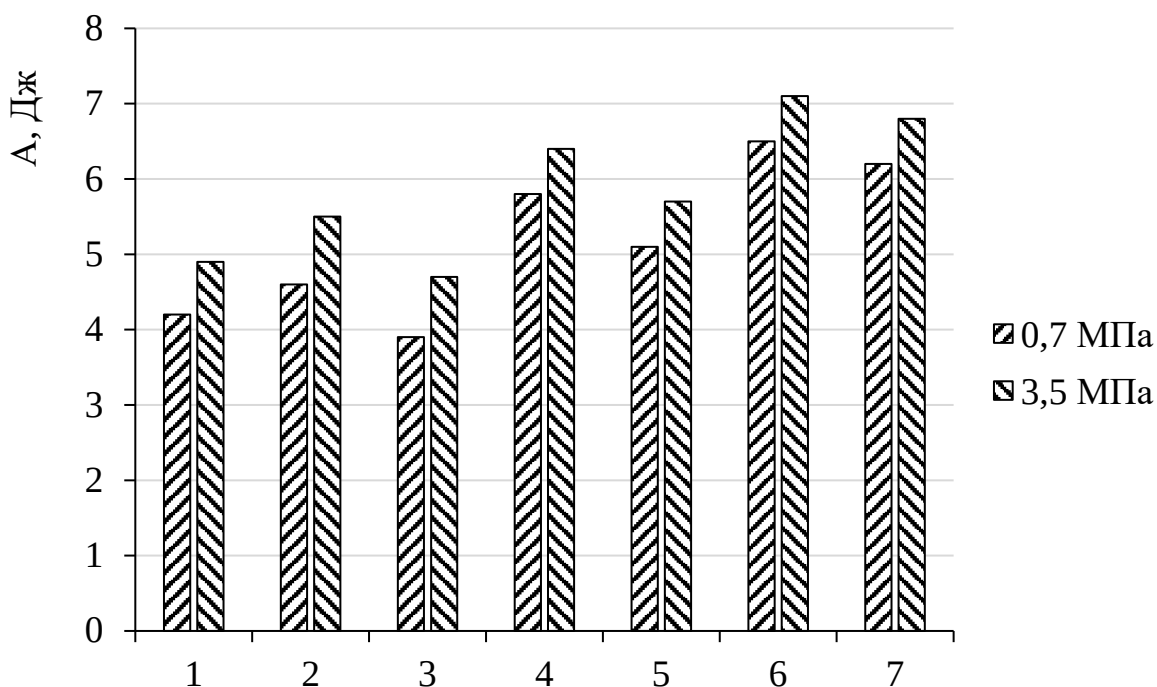


Рисунок 3.2 – Залежність динамічної стійкості склопластиків наповнених склотканиною зі щільності 160 г/м² від режиму формування

3.2. Макроструктура епоксикомпозитних склопластиків

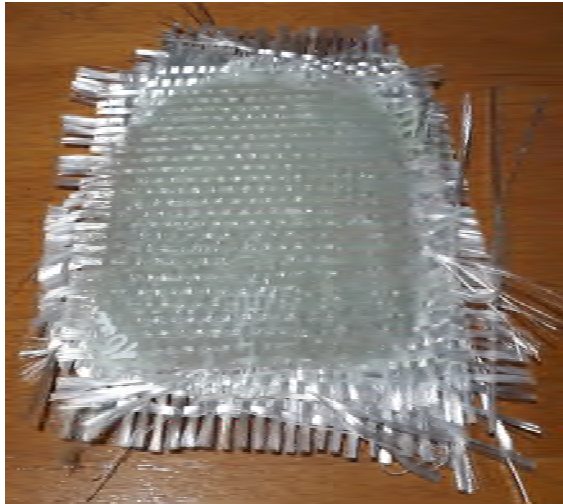
Використання питомого навантаження 0,7 МПа не дозволяє повністю змочити поверхню склотканини щільністю 600 г/м², в результаті чого частина склотканини не покрита епоксидним в'язучим (рисунок 3.3, а).

У випадку пресування композиції з питомим навантаженням 3,5 МПа епоксидне в'язуче повністю просочує шари склотканини, в результаті чого епоксикомпозитна пластина не містить дефектів структури (рисунок 3.3, б).

Склотканина зі щільністю 160 г/м² краще просочується епоксидним в'язучим через меншу кількість волокон, однак питоме навантаження 0,7 МПа не дозволяє повністю забезпечити змочування склотканини (рисунок 3.3, в).

Використання питомого навантаження 3,5 МПа призводить до рівномірного заповнення поверхні склотканини щільності 160 г/м²

епоксидним в'язучим, що дозволяє отримати епоксикомпозити з рівномірним просочуванням шарів наповнювача (рисунок 3.3, г).



а



б



в



г

Рисунок 3.3 – Макроструктура склопластика:

а – питоме навантаження 0,7 МПа для склотканини щільності 600 г/м²;

б – питоме навантаження 3,5 МПа для склотканини щільності 600 г/м²;

в – питоме навантаження 0,7 МПа для склотканини щільності 160 г/м²

г – питоме навантаження 3,5 МПа для склотканини щільності 160 г/м²

ВИСНОВКИ

Найвищу динамічну стійкість мають епоксикомпозитні склопластики структуровані на першому етапі за температури 70 °С та витримці 10 хв, що відповідає оптимальним умовам, за яких підвищується рухливість сегментів макромолекул і утворюється максимальна кількість хімічних зв'язків.

З підвищенням тривалості витримки досліджувана характеристика знижується через інтенсивне структурування і формування дефектної структури.

Використання питомого навантаження 3,5 МПа забезпечує краще просочування склотканини і формування щільнішої структури епоксикомпозитного склопластика, в результаті чого динамічна стійкість підвищується на 23...27%.

Використання температури 70°С за тривалості витримки 10 хв та питомого зусилля 3,5 МПа забезпечує також максимальне значення динамічної стійкості епоксикомпозитів з вмістом склотканини щільністю 160 г/м², однак ці значення на 15% нижчі порівняно з епоксикомпозитами з вмістом склотканини зі щільністю 600 г/м² через меншу кількість волокон.

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Paluvai N.R., Mohanty S., Nayak S.K. Synthesis and Modifications of Epoxy Resins and Their Composites: A Review // Polymer-Plastics Technology and Engineering. – 2014. – Vol. 53, №16. – P. 1723–1758.
2. Kumar D.S., Sathish T., Rangappa S.M., Boonyasopon P., Siengchin S. Mechanical property analysis of nanocarbon particles/glass fiber reinforced hybrid epoxy composites using RSM // Composites Communications. – 2022. – Vol. 32. – Art. №101147.
3. Diniță R.G., Ripeanu C.N., Ilincă D., Cursaru D., Matei R.I., Naim M., Tănase A.I., Portoacă A.I. Advancements in Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Comprehensive Analysis // Polymers. – 2024. – Vol. 16, №1. – Art. №2.
4. Torkian P., Baseri H. The Computational Study of Epoxy-based Nanocomposites Electromechanical Performance under External Force: Molecular Dynamics Approach // Journal of Composites and Compounds. – 2023. – Vol. 5, №16. – P. 153–158.
5. Devendra K., Rangaswamy T. Strength characterization of E-glass fiber reinforced epoxy composites with filler materials // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. – 2013. – Vol. 1, №6. – P. 353–357.
6. Morampudi P., Namala K.K., Gajjela Y.K., Barath M., Prudhvi G. Review on glass fiber reinforced polymer composites // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 43. – P. 314–319.
7. Safwat E.M., Khater A.G., Abd-Elsatar A.G., Khater G.A. Glass fiber reinforced composites in dentistry // Bulletin of the National Research Centre. – 2021. – Vol. 45. – Art. №9.
8. Sweet K.R., Stanzione J.F. III. Epoxy-functional thermoplastic copolymers and their incorporation into a thermosetting resin // Journal of Applied Polymer Science. – 2021. – Vol. 138, №26. – Art. №50608.

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

9. Aziz T., Haq F., Farid A., Cheng L., Chuah L.F., Bokhari A., Mubashir M., Tang D.Y.Y., Show P.L. The epoxy resin system: function and role of curing agents // Carbon Letters. – 2024. – Vol. 34, №1. – P. 477–494.

10. Sundeep M., Limbadri K., Manikandan N., Savio A.P., Joseph J. Study of mechanical properties of pineapple leaf fiber and E-glass fiber reinforced hybrid epoxy matrix composite materials // Materials Today: Proceedings. – 2023.

11. Singh S., Kumar P., Jain S. An experimental and numerical investigation of mechanical properties of glass fiber reinforced epoxy composites // Advanced Materials Letters. – 2013. – Vol. 4, №7. – P. 567–572.

12. Zhou S., Li Y., Fu K., Wu X. Progressive fatigue damage modelling of fibre-reinforced composite based on fatigue master curves // Thin-Walled Structures. – 2021. – Vol. 158. – Art. №107173.

13. Mahesh V., Joladarashi S., Kulkarni S.M. Comparative study on ballistic impact response of neat fabric, compliant, hybrid compliant and stiff composite // Thin-Walled Structures. – 2021. – Vol. 165. – Art. №107986.

14. Khan Z.I., Arsad A., Mohamad Z., Habib U., Zaini M.A.A. Comparative study on the enhancement of thermo-mechanical properties of carbon fiber and glass fiber reinforced epoxy composites // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 39. – P. 956–958.

15. Feng P., Wang J., Wang Y., Loughery D., Niu D. Effects of corrosive environments on properties of pultruded GFRP plates // Composites Part B: Engineering. – 2014. – Vol. 67. – P. 427–433.

16. Naresh K., Shankar K., Rao B.S., Velmurugan R. Effect of high strain rate on glass/carbon/hybrid fiber reinforced epoxy laminated composites // Composites Part B: Engineering. – 2016. – Vol. 100. – P. 125–135.

17. Kulhan T., Kamboj A., Gupta N.K., Somani N. Fabrication methods of glass fibre composites—a review // Functional Composites and Structures. – 2022. – Vol. 4, №2. – Art. №022001.

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

18. Rubino F., Nisticò A., Tucci F., Carlone P. Marine application of fiber reinforced composites: a review // Journal of Marine Science and Engineering. – 2020. – Vol. 8, №1. – Art. №26.

19. Mohan P. The modification, properties, and applications of epoxy resins: A critical review // Polymer-Plastics Technology and Engineering. – 2012. – Vol. 52. – P. 107–125.

20. Awais H., Nawab Y., Amjad A., Anjang A., Akil H.M., Abidin M.S.Z. Environmental benign natural fibre reinforced thermoplastic composites: A review // Composites Part C: Open Access. – 2021. – Vol. 4. – Art. №100082.

21. Porras J., Morales M.A., Hernandez C., Maranon A., Michaud V., Porras A. Development of a Sustainable Thermoplastic Composite Material Using Manicaria saccifera Fabric and Elium® Resin // Journal of Natural Fibers. – 2025. – Vol. 22, №1. – Art. №2462977.

22. Tatara R.A. Compression molding // Applied Plastics Engineering Handbook. – Elsevier, 2024. – P. 389–424.

23. Agwa M., Youssef S.M., Ali-Eldin S.S., Megahed M. Integrated vacuum assisted resin infusion and resin transfer molding technique for manufacturing of nano-filled glass fiber reinforced epoxy composite // Journal of Industrial Textiles. – 2022. – Vol. 51, №3_suppl. – P. 5113S–5144S.

24. Kim S.J., Pandey K., Poddar D., Yoo H.M. In-situ fabrication of poly-lactide & its application as a glass fiber polymer composites using resin transfer molding // Polymer Composites. – 2025. – Vol. 46, №4. – P. 3251–3263.

25. Miranda Campos B., Bourbigot S., Fontaine G., Bonnet F. Thermoplastic matrix-based composites produced by resin transfer molding: A review // Polymer Composites. – 2022. – Vol. 43, №5. – P. 2485–2506.

26. Aranha R., Filho M.A.A., de Lima Santos C., Fonseca V.M., Rivera J.L., de Lima A.G., de Amorim W.F. Jr, Carvalho L.H. Water sorption in hybrid polyester/glass/jute composites processed via compression molding and vacuum-assisted resin transfer molding // Polymers. – 2023. – Vol. 15, №22. – Art. №4438.

					БР 2026.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

27. Rajak D.K., Wagh P.H., Linul E. Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: A review // Polymers. – 2021. – Vol. 13, №21. – Art. №3721.

28. Al-Furjan M., Shan L., Shen X., Zarei M., Hajmohammad M., Kolahchi R. A review on fabrication techniques and tensile properties of glass, carbon, and Kevlar fiber reinforced polymer composites // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – Vol. 19. – P. 2930–2959.

29. Irfan M.S., Shotton-Gale N., Paget M.A., Machavaram V.R., Leek C., Wootton S., Hudson M., Helsmans S., Bogonez F.N., Pandita S.D. A modified pultrusion process // Journal of Composite Materials. – 2017. – Vol. 51, №13. – P. 1925–1941.

30. Hu J., Zhan L., Yang X., Shen R., He J., Peng N. Temperature optimization of mold for autoclave process of large composite manufacturing // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1622. – Art. №032086. – DOI: 10.1088/1742-6596/1622/3/032086.

31. Властивості епоксидної смоли [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.specialchem.com/plastics/guide/epoxy-resin>

32. Властивості скловолокон [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Fiberglass>