

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра прикладного матеріалознавства і ТКМ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Оксана ГАПОНОВА

«__» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності _____ 132 Матеріалознавство
освітньо-професійної програми _____ «Прикладне матеріалознавство»

на тему: «Дослідження впливу складу та технології отримання на фізико-механічні властивості полімерного композитного матеріалу для виготовлення пластинчастих пружин» _____

Здобувача групи _____ МТ.м-31 _____ Давидовича Михайла Сергійовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Михайло ДАВИДОВИЧ

Керівник _____
доцент кафедри ПМ і ТКМ,
к.ф.-м.н., доц. Тетяна ГОВОРУН _____

Нормоконтроль _____
доцент кафедри ПМ і ТКМ
к.т.н., доц. Андрій ДЕГУЛА _____

Сумський державний університет

Факультет технічних систем та енергоефективних технологій

Кафедра «Прикладне матеріалознавство та технології конструкційних матеріалів»
зі спеціальності 132 «Матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ О. П. Гапонова

«__» _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Давидовичу Михайлу Сергійовичу

1. Тема проекту (роботи) Дослідження впливу складу та технології отримання на фізико-механічні властивості полімерного композитного матеріалу для виготовлення пластинчастих пружин затверджена наказом по університету від “22” жовтня 2024 р.№ 1085-VI

2. Термін здачі студентом закінченого проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) зразки полімерних композитних матеріалів зі склопластику та кевлар-карбонового пластику для виготовлення пластинчастих пружин для проведення досліджень впливу на їх фізико-механічні властивості

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

1. Аналіз джерел за темою диплома.

2. Загальна методика та основні методи досліджень.

3. Експериментальні дослідження та узагальнення результатів впливу складу та технології отримання на фізико-механічні властивості полімерного композитного матеріалу для виготовлення пластинчастих пружин.

4. Економічна частина.

5. Охорона праці, довкілля та техніка безпеки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Матеріал для захисту оформлено у вигляді презентації. Креслення відсутні.

6. Консультанти з проекту (роботи), із значенням розділів проекту, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці, довкілля і техніка безпеки	Говорун Т. П.	06.11.2024	
Економічна частина	Берладір Х. В.	06.11.2024	

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пор.	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз джерел за темою диплома	Листопад 2024	Виконано
2	Загальна методика та основні методи досліджень	Листопад 2024	Виконано
3	Експериментальні дослідження та узагальнення результатів впливу складу та технології отримання на фізико-механічні властивості полімерного композитного матеріалу для виготовлення пластинчастих пружин	Листопад 2024	Виконано
4	Економічна частина	Листопад 2024	Виконано
5	Охорона праці, довкілля, та техніка безпеки	Грудень 2024	Виконано

7. Дата видачі завдання _____

Студент _____

(підпис)

Керівник проекту _____

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Давидович Михайло Сергійович. Дослідження впливу складу та технології отримання на фізико-механічні властивості полімерного композитного матеріалу для виготовлення пластинчастих пружин. – Рукопис.

Робота на здобуття кваліфікації магістра зі спеціальності 132 – Матеріалознавство. – Сумський державний університет, Суми, 2024.

В роботі було досліджено вплив складу та технології виготовлення, проаналізовано найвідоміші технології виготовлення полімерних композитів, визначено основні методи випробувань, необхідні для перевірки властивостей пружних елементів, описано сфери використання пластинчастих пружин.

Дослідження дало можливість визначити результат використання ручної формовки та вакуумної формовки у якості технологій виготовлення склопластиків та кевлар-карбонових пластиків, а також подальший вплив на фізико-механічні властивості.

Детальне вивчення впливу складу та технологій виготовлення дозволяє подальше удосконалення знань про діапазон використання комбінації технологій та певних матеріалів для полімерних композитів. Використання результатів даних досліджень може знайти місце при рішенні практичних проблем, пов'язаних з потребою у високоякісних матеріалах.

Ключові слова: полімерний композит, ПКМ, ручне формування, вакуумне формування, щільність, межа міцності, скловолокно, кевлар-карбонове волокно.

ABSTRACTS

Davydovych Mykhailo Serhiyovych. Study of the influence of composition and production technology on the physical and mechanical properties of polymer composite material for the manufacture of leaf springs.

Qualifying paper for obtaining the qualification of master's degree in the specialty 132 – Materials science. – Sumy State University, Sumy, 2024.

The work investigated the influence of composition and manufacturing technology, analysed the most famous technologies for the manufacture of polymer composites, identified the main test methods necessary to test the properties of elastic elements, described the areas of use of plate springs.

The study made it possible to determine the result of using manual moulding and vacuum moulding as manufacturing technologies for GRP and Kevlar-carbon plastics, as well as the subsequent impact on physical and mechanical properties.

A detailed study of the influence of composition and manufacturing technologies allows further improvement of knowledge about the range of use of a combination of technologies and certain materials for polymer composites. The use of the results of these studies can find a place in solving practical problems associated with the need for high-quality materials.

Keywords: polymer composite, PCM, manual moulding, vacuum moulding, density, tensile strength, glass fibre, Kevlar-carbon fibre.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить в собі 95 сторінок, у тому числі 19 рисунків, 15 таблиць, бібліографії із 60 джерел на 8 сторінках.

Метою роботи є дослідження впливу складу та технології отримання на фізико-механічні властивості полімерного композитного матеріалу із склопластика ТК-200 та кевлар-карбонового пластика Hybrid Carbon-Kevlar 200 g/m² для виготовлення пластинчастих пружин.

Об'єктом дослідження є склопластик ТК-200 та кевлар-карбоновий пластик Hybrid Carbon-Kevlar 200 g/m², виготовлені за технологіями ручної та вакуумної формовки.

Предметом дослідження є фізико-механічні властивості полімерних композитів для виготовлення пластинчастих пружин на основі склопластику ТК-200 та кевлар-карбонового пластику Hybrid Carbon-Kevlar 200 g/m².

Методи дослідження. У дослідженні були використані наступні методи: випробування на згин при нормальній, заниженій та підвищеній температурі, випробування на стиск при нормальній, заниженій та підвищеній температурі, випробування на розтяг, визначення щільності та мікроскопічний аналіз.

Наукова новизна. Встановлено вплив технології отримання та складу на фізико-механічні властивості полімерного композитного матеріалу із склопластика ТК-200 та кевлар-карбонового пластика Hybrid Carbon-Kevlar 200 g/m². Показано, що найкращим матеріалом для пластинчастих пружин є кевлар-карбоновий пластик, виготовлений за технологією вакуумного формування, який має найвищі значення щільності та межі міцності на згин, стиск, розтяг.

Ключові слова: полімерний композит, ПКМ, ручне формування, вакуумне формування, щільність, межа міцності, скловолокно, кевлар-карбонове волокно.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1.....	12
ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	12
1.1 Актуальність дослідження полімерних композитних матеріалів	12
1.2 Загальні відомості про пружини.....	14
1.3 Властивості полімерних композитів, необхідні для виготовлення пластинчастих пружин	15
1.4 Вплив складу полімерних композитів на їх властивості	18
1.5 Технології отримання полімерних композитних матеріалів: коротка характеристика	20
1.5.1 Ручне формування.....	21
1.5.2 Вакуумне формування.....	24
1.5.3 Препреги.....	26
1.5.4 Пултрузія.....	28
1.5.5 RTM-технологія.....	31
1.5.6 Намотування	34
Висновки до розділу 1	38
РОЗДІЛ 2.....	39
МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	39
2.1 Тканина кевлар-карбон.....	39
2.2 Склотканина.....	40
2.3 Епоксидна смола Larit L-285.....	42
2.4 Методика визначення фізико-механічних властивостей зразків	44
2.4.1 Межа міцності на згин.....	44
2.4.2 Межа міцності на стиск.....	47
2.4.3 Межа міцності на розтяг.....	51
2.4.4 Щільність (гідростатичне зважування).....	54
2.5 Аналіз мікроструктури	57
Висновки до розділу 2	60

РОЗДІЛ 3.....	61
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	61
3.1 Вибір технології	61
3.2 Виготовлення зразків	61
3.3 Випробування на згин.....	65
3.4 Випробування на стиск.....	65
3.5 Випробування на розтяг	66
3.6 Визначення щільності.....	67
3.7 Аналіз мікроструктур.....	67
Висновки до розділу 3	68
РОЗДІЛ 4.....	71
ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	71
4.1 Загальні відомості	71
4.2 Розрахунок економічних витрат	72
Висновки до розділу 4	74
РОЗДІЛ 5.....	75
ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ	75
5.1 Загальні види небезпек при виробництві полімерних композитних матеріалів	75
5.2 Заходи з техніки безпеки	76
5.3 Протипожежна безпека у виробництві полімерних композитних матеріалів	77
5.4 Засоби індивідуального захисту	78
5.5 Заходи з охорони навколишнього середовища	79
5.6 Організація громадської безпеки та навчання персоналу.....	80
5.6 Потенційні небезпеки карбонового пилу	82
5.7 Заходи на випадок надзвичайних ситуацій	83
Висновки до розділу 5	85
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	86
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	88

ВСТУП

Технологічний розвиток неминуче веде за собою зростання вимог до фізико-механічних та експлуатаційних властивостей матеріалів. Метали та їх сплави досі залишаються актуальними у багатьох сферах завдяки їхнім властивостям, але у сучасній промисловості виникають такі потреби, які класична металургія виявляється нездатною задовольнити. Внаслідок виникнення більш складних задач, пошук інноваційних рішень стає для матеріалознавця необхідністю. У цьому контексті полімерні композитні матеріали (ПКМ) отримують особливу увагу.

Актуальність досліджень. Зростаюча потреба в поліпшенні характеристик матеріалів є ключовим чинником, що визначає актуальність їхнього дослідження. Сучасна інженерія робить фокус на створенні таких матеріалів, які могли б одночасно поєднувати у собі майже полярні характеристики. Порівнюючи їх з металами, можна побачити, що перші справляються з цією задачею набагато краще: вони можуть поєднувати у собі різноманітні характеристики і при цьому мати відносно низьку масу по причині меншої щільності. Плюс до цього, у них присутня можливість підтримувати стабільність властивостей, якщо матеріал працює в умовах різких температурних коливань.

Причиною такого успіху є можливість суттєво впливати на адаптацію властивостей під конкретні проблеми. Якщо характеристики металів визначаються здебільшого вмістом та природною структурою, що можуть бути скореговані легуванням, термічною та хіміко-термічною обробкою, то властивості ПКМ визначаються підбором компонентів у його складі: армувальних наповнювачів та матриці. Це робить такі матеріали особливо цінними в тих галузях, де потребуються широкі можливості в модифікації характеристик.

Об'єктом дослідження є склопластик ТК-200 та кевлар-карбоновий пластик Hybrid Carbon-Kevlar 200 g/m², виготовлені за технологіями ручної та вакуумної формовки.

Предметом дослідження є фізико-механічні властивості полімерних композитів для виготовлення пластинчастих пружин на основі склопластику ТК-200 та кевлар-карбонового пластику Hybrid Carbon-Kevlar 200 g/m².

Метою роботи є дослідження впливу складу та технології отримання на фізико-механічні властивості полімерного композитного матеріалу із склопластика ТК-200 та кевлар-карбонового пластику Hybrid Carbon-Kevlar 200 g/m² для виготовлення пластинчастих пружин.

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити **наступні завдання**:

- провести огляд наукової літератури з питання визначення існуючих технологій виготовлення та вимог до фізико-механічних властивостей матеріалів для пластинчастих пружин;

- виконати обґрунтований вибір методів випробування зразків для отримання матеріалів для пластинчастих пружин із оптимальних властивостями;

- виготовити експериментальні зразки із склопластика ТК-200 та кевлар-карбонового пластику Hybrid Carbon-Kevlar 200 g/m² і дослідити вплив зміни складу та технології отримання на фізико-механічні властивості полімерного композитного матеріалу;

- на основі отриманих результатів зробити висновки та рекомендації щодо вибору матеріалу та технології виготовлення пластинчастих пружин із полімерного композитного матеріалу.

Методи дослідження. У дослідженні були використані наступні методи: випробування на згин при нормальній, зниженій та підвищеній температурі, випробування на стиск при нормальній, зниженій та підвищеній температурі, випробування на розтяг, визначення щільності та мікроскопічний аналіз.

Очікувані результати. Від кваліфікаційної магістерської роботи очікується отримання нових знань щодо взаємозв'язку складу полімерних композитів на прикладі склопластику ТК-200 та кевлар-карбонового пластику Hybrid Carbon-Kevlar 200 g/m², а також використаної технології – ручне та вакуумне формування.

Наукова новизна. Встановлено вплив технології отримання та складу на фізико-механічні властивості полімерного композитного матеріалу із склопластика ТК-200 та кевлар-карбонового пластику Hybrid Carbon-Kevlar 200 g/m². Показано, що найкращим матеріалом для пластинчастих пружин є кевлар-карбоновий пластик, виготовлений за технологією вакуумного формування, який має найвищі значення щільності та межі міцності на згин, стиск, розтяг.

Результати досліджень підтверджують, що за допомогою відповідних технологій виготовлення можна створювати полімерні композитні матеріали із фізико-механічними характеристиками, придатними для використання у виробництві пластинчастих пружин.

Особистий внесок: Власний вклад магістранта полягає в отриманні та аналізі експериментальних даних випробувань склопластику та кевлар-карбонового пластику на фізико-механічні властивості, що сприяє глибшому розуміння закономірностей, пов'язаних з полімерними композитними матеріалами для виготовлення пластинчастих пружин.

Структура й обсяг кваліфікаційної роботи магістра. Робота складається із вступу, п'яти розділів, списку використаних джерел. Повний обсяг кваліфікаційної роботи магістра становить 95 сторінок, у тому числі 19 рисунків, 15 таблиць, бібліографії із 60 джерел на 8 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Актуальність дослідження полімерних композитних матеріалів

Різноманітність сфер використання підкреслює важливість ПКМ у сучасній промисловості. Ці матеріали мають ключову роль в авіакосмічній галузі, де поєднання мінімальної ваги з високою надійністю є критично важливим. На їх основі виготовляють елементи корпусів літальних апаратів, деталі двигунів [1], а також конструкції для внутрішнього оздоблення [2]. В автомобільній промисловості завдяки ним забезпечується можливість створювати легші кузови, компоненти підвісок, внутрішнє оздоблення й навіть частини шин, що, окрім зменшення ваги транспортних засобів, позитивно впливає на їхню паливну ефективність [3].

Будівельна галузь також активно користується полімерними композитами для спорудження конструкцій, які потребують підвищеної міцності та довговічності. Стійкість до корозії та дії агресивних середовищ робить ПКМ важливими в умовах високих експлуатаційних навантажень [1].

В сфері електроніки вони є незамінними у створенні корпусів, електронних плат та інших компонентів, що потребують особливої термостійкості та зносостійкості, а також, завдяки здатності адаптувати властивості під специфічні вимоги, стають важливими у вирішенні найсучасніших технологічних завдань [4].

Крім того, в біомедицині карбонові пластинчасті пружини є основними елементами сучасних протезів для ніг, завдяки яким досягається плавність рухів і значний комфорт під час використання, що особливо важливо для бігових протезів (рис. 1.1). Компоненти функціонують, накопичуючи енергію під час стискання та повертаючи її, що дозволяє моделювати природну еластичність м'язів і суглобів [5].



Рисунок 1.1 – Бігова стопа «Ossur Flex-Run» [6]

Використання карбону надає пружинам високу стійкість до механічних впливів, завдяки чому працездатні навіть у ситуації інтенсивного навантаження. Матеріал має чудові властивості балансу жорсткості й гнучкості, що дозволяє створювати протези зі зменшеною вагою, довговічні та зручні у використанні. Зниження маси конструкції позитивно впливає на легкість експлуатації та тривалість носіння, що є ключовими перевагами таких виробів [5].

Процес виготовлення карбонових пластинчастих пружин передбачає багат шарову структуру, у якій волокна розташовуються в різних напрямках. Таке рішення мінімізує ризики появи дефектів, таких як тріщини чи розшарування, і водночас підвищує міцність [7]. До того ж, можливість індивідуального налаштування жорсткості й гнучкості дозволяє створювати пружини, що ідеально відповідають специфічним потребам користувача [5].

Таким чином, ПКМ являються незамінними у виробництві протезів для людей, які ведуть активний спосіб життя.

1.2 Загальні відомості про пружини

Пластинчаті пружини, які зазвичай виготовляються із високоміцних матеріалів по типу сталі, склопластику або вуглепластику, широко застосовуються в технічних системах завдяки своїм унікальним характеристикам [8]. Їх головне завдання полягає у збереженні енергії, що виникає внаслідок деформації, з подальшим її використанням для виконання механічної роботи.

Конструкція таких пружин може бути як одношаровою, так і багатошаровою, що дозволяє ефективно розподіляти навантаження. У випадках, де потрібне поєднання високої міцності та гнучкості, часто використовуються багатошарові системи, тоді як одношарові частіше застосовуються для легших механічних завдань. Серед матеріалів, які використовуються для виробництва, особливу увагу привертає вуглепластик, адже його унікальні властивості забезпечують оптимальне співвідношення між низькою масою і високою міцністю [4, 7].

Завдяки специфічним конструктивним особливостям ці елементи забезпечують рівномірний розподіл прикладених сил по всій площині, що є надзвичайно важливим за умов циклічного навантаження. Такий підхід дозволяє уникати локальних пошкоджень і тріщин навіть під значними механічними навантаженнями. До того ж, ці системи мають високу стійкість до зношування, що дає змогу експлуатувати їх за різноманітних температурних режимів [7].

Для підвищення експлуатаційних властивостей часто застосовується комбінування матеріалів, коли, наприклад, армувальні волокна з вуглепластику поєднуються з епоксидною основою. Це підсилює їх стійкість до впливу вологи чи агресивних середовищ, що особливо важливо для роботи в складних кліматичних умовах або в контакті з хімічними речовинами [9].

Різновиди пластинчастих пружин наведено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Різновиди пластинчастих пружин [10]

Таке різноманіття дозволяє їм бути у багатьох сферах актуальними, адесь навіть і ключовими деталями.

1.3 Властивості полімерних композитів, необхідні для виготовлення пластинчастих пружин

Фізико-механічні властивості полімерних композитів відіграють вирішальну роль у виготовленні пластинчастих пружин, адже ці характеристики визначають здатність матеріалу витримувати значні навантаження, працювати в умовах агресивного середовища та забезпечувати довговічність і надійність конструкцій.

Одна з найважливіших характеристик, яка робить їх придатними для виготовлення пластинчастих пружин – це високий модуль пружності та міцності на вигин. Ці матеріали здатні витримувати значні механічні навантаження без незворотних змін у структурі, що робить їх придатними до використання в найрізноманітніших умовах (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Можливості використання пластинчастих пружин [6, 8]

Призначення	Обґрунтування
Поглинання ударів і гасіння вібрацій	Пластинчасті пружини відзначаються високою ефективністю при поглинанні ударних навантажень і гасять вібрації, що сприяє мінімізації їхнього впливу на інші елементи системи.
Точне регулювання руху	Ці пружини широко використовуються для точного налаштування і контролю рухових процесів у складних механічних системах, де необхідна максимальна точність.
Стабільність зусилля	Пластинчасті пружини забезпечують стабільну величину зусилля на всьому етапі роботи, що дозволяє досягти високої точності й надійності механізмів.
Рівномірний розподіл навантаження	Завдяки особливій конструкції, ці пружини гарантують рівномірне навантаження та підтримку постійного тиску в різноманітних механічних установках.

У складі ПКМ полімерна матриця виконує функцію зменшення концентрації напружень, тоді як армувальні волокна забезпечують високу жорсткість і міцність. Завдяки такій синергії полімерний композит може ефективно протистояти навантаженням, характерним для пружин, повертаючись до початкового стану після зняття деформацій.

Ще однією ключовою властивістю є довговічність і стійкість до циклічних втомних навантажень. Пластинчасті пружини витримують

багаторазові цикли роботи, запобігаючи утворенню пошкоджень завдяки комбінованій дії армувальних волокон і полімерної матриці. Волокна перешкоджають утворенню тріщин, тоді як матриця розподіляє напруження та мінімізує їх локальну концентрацію. Стійкість до втомних руйнувань значно продовжує термін служби виробів, а також знижує витрати на їх обслуговування. Крім того, міцне зчеплення між компонентами композиту сприяє зменшенню ризику міжшарового розшарування [11].

Терmostійкість також належить до ключових характеристик, необхідних для використання у якості пружинних елементів. Умови експлуатації можуть включати як високі, так і низькі температури, тому матеріал повинен зберігати свої властивості незалежно від впливу цих чинників. Для досягнення стабільності характеристик у широкому температурному діапазоні використовуються матеріали зі зниженою чутливістю до терморозширення, що дозволяє мінімізувати теплові напруження та уникати деформацій навіть за екстремальних температур [12].

Окрім механічних і термічних характеристик, важливим фактором є здатність матеріалу чинити опір впливу зовнішніх середовищ, що наочно проявляється в високій стійкості до вологи, ультрафіолету, хімічних сполук і корозійних чинників. Полімерна матриця ефективно захищає армувальні волокна, а додаткові стабілізатори або антиоксиданти покращують стійкість матеріалу до ультрафіолетового випромінювання. Ця властивість дозволяє значно подовжити термін служби конструкцій, забезпечуючи стабільність роботи навіть у агресивному середовищі [13].

Нарешті, ПКМ дають можливість точного налаштування властивостей залежно від умов експлуатації. Регулюючи склад матриці, тип армувальних волокон і технологію виготовлення, можна створювати матеріали з характеристиками, що відповідають конкретним вимогам.

1.4 Вплив складу полімерних композитів на їх властивості

Склад ПКМ є основним чинником, який визначає їхні фізико-механічні характеристики. Властивості таких матеріалів залежать від багатьох аспектів: вибору полімерної матриці, типу армувальних волокон, їхньої орієнтації та співвідношення компонентів у структурі. Саме ці фактори обумовлюють механічні, термічні й експлуатаційні показники матеріалу, визначаючи його ефективність у конкретних застосуваннях, таких як створення пластинчастих пружин.

Полімерна матриця виконує функцію сполучного елемента, який об'єднує армувальні волокна в єдину систему. Від її складу залежить низка властивостей матеріалу, включно з хімічною стійкістю, тепловою стабільністю, здатністю до адгезії та в'язкістю. Вибір матриці базується на умовах, у яких буде експлуатуватися матеріал. Наприклад, для роботи в умовах високих температур використовуються термостійкі варіанти на основі епоксидних смол, поліамідів чи фенольних сполук [14].

Крім того, матриця впливає на в'язкість у процесі формування композиту. Полімери з низькою в'язкістю забезпечують рівномірний розподіл волокон і зменшують ризик утворення дефектів у структурі [8, 14].

Армувальні наповнювачі, зокрема волокна з вуглецю, скла чи органопластика, відповідають за механічні властивості композиту. Вуглецеві волокна забезпечують високу жорсткість і міцність на розрив, що робить їх ідеальними для конструкцій із високими механічними навантаженнями. Складні волокна пропонують збалансоване співвідношення міцності й вартості, тоді як органопластики відомі своєю відмінною ударною в'язкістю [7].

Суттєве значення має й орієнтація армувальних волокон. В односпрямованих композитах волокна забезпечують високу жорсткість і міцність у конкретному напрямку, але знижують ці показники в перпендикулярній площині [7]. Багатошарові композити, де волокна

орієнтовані у кількох напрямках, створюють більш рівномірний розподіл властивостей, що дозволяє витримувати навантаження з різних боків [7].

Кількість армувальних наповнювачів також впливає на їхні характеристики. Збільшення частки волокон підвищує міцність, жорсткість і модуль пружності, однак занадто висока концентрація може зробити матеріал менш пластичним, а також знизити його здатність до поглинання ударної енергії. Для пластинчастих пружин важливо досягти оптимального балансу між міцністю та пружністю. Занадто жорсткий композит може бути крихким, тоді як недостатня кількість волокон зменшує загальну несучу здатність матеріалу [7].

До складу ПКМ входять не лише матриця й армувальні волокна, а й інші компоненти, які мають вагомий вплив на їхні характеристики. Це можуть бути модифікуючі добавки, що покращують експлуатаційні властивості. Серед них стабілізатори, антиоксиданти й пластифікатори, які мають безпосередній вплив на властивості матеріалу:

Стабілізатори захищають матеріал від впливу ультрафіолету й високих температур, подовжуючи термін його служби [15, 16].

Антиоксиданти сповільнюють окислювальні процеси [15, 16].

Пластифікатори підвищують еластичність і стійкість до ударів, що важливо для матеріалів, які зазнають динамічних навантажень [15, 16].

Гібридні композити з кількома типами наповнювачів демонструють унікальні властивості: комбінація вуглецевих і скляних волокон забезпечує як високу жорсткість, так і відмінну ударостійкість. Завдяки цьому такі матеріали ідеально підходять для конструкцій зі змішаними навантаженнями [17].

Інноваційний підхід до створення полімерних композитів передбачає також використання наночастинок. Вони знижують вологопоглинання, підвищують термічну стабільність і збільшують стійкість до утворення тріщин [4].

Застосування різноманітних типів наповнювачів і модифікуючих компонентів дозволяє не тільки вдосконалити властивості композитів, а й адаптувати їх до конкретних умов експлуатації.

1.5 Технології отримання полімерних композитних матеріалів: коротка характеристика

Виробничі методи відрізняються залежно від складу матеріалу, вимог до експлуатації та призначення готового виробу. Вони спрямовані на реалізацію конкретних завдань, таких як створення складних форм, забезпечення якості при серійному виробництві або розробка конструкцій із заданими властивостями. Для оптимального вибору технологічного процесу важливо враховувати можливості основних методів виготовлення ПКМ і межі їхнього застосування.

Різні технології забезпечують відповідність матеріалу вимогам сучасної промисловості, зокрема досягнення високої точності та масштабованості виробництва. В таблиці 1.3 представлено короткий опис деяких з технологій, які будуть детально проаналізовані у наступних пунктах.

Таблиця 1.2

Коротка характеристика основних технологій виробництва ПКМ

Назва технології	Короткий опис
Ручне формування	Армувальний матеріал укладають вручну у форму і просочують полімерною матрицею за допомогою пензлів або валиків.
Вакуумне формування	Технологія вакуумного формування ґрунтується на використанні вакууму для рівномірного заповнення армуючого матеріалу рідкою полімерною матрицею в герметичній формі.

Продовження таблиці 1.2

Препрег	Попередньо просочені полімерною матрицею армувальні волокна, які укладаються у форму і тверднуть за підвищеної температури та тиску.
Пултрузія	Технологія безперервного виробництва довгомірних виробів постійного перерізу, під час якої армувальні волокна просочуються рідкою матрицею і протягуються через формувальну матрицю, де відбувається їх затвердіння.
RTM-технологія	Введення рідкої полімерної матриці під тиском у замкнуту форму з попередньо покладеним армувальним матеріалом.
Намотування	Нанесення армувальних волокон, просочених полімерною матрицею, на обертову оправку з точним контролем орієнтації шарів.

1.5.1 Ручне формування

Технологія ручного формування передбачає багатоступінчастий процес, під час якого армувальні матеріали послідовно укладаються та просочуються полімерною матрицею в рідкому стані. Цей підхід зазвичай застосовується у виробництві великих та геометрично складних елементів, наприклад, корпусів човнів, деталей для вітроустановок, резервуарів або панелей [18].

Підготовка до формування починається з очищення та обробки форми, що задає кінцеву геометрію виробу. Поверхня повинна бути ретельно очищена й покрита розділовим складом, який запобігає прилипанню матеріалів і сприяє легкому вилученню готового продукту. На цьому етапі часто наносять гелькоут – спеціальний захисний шар, який забезпечує як декоративну

функцію, так і стійкість до впливу вологи, ультрафіолету та хімічних речовин [14, 19].

Далі на поверхню форми вручну розміщується армувальний матеріал, який ретельно вирізають і орієнтують залежно від вимог до міцності готового виробу. У роботі можуть використовуватися такі матеріали, як склотканина, вуглеволокно або арамідні волокна, а також їхні комбінації. Укладання виконується вручну, що дозволяє точно працювати зі складними геометріями і контролювати кожен етап процесу [19].

На наступній стадії проводиться просочення армувальних матеріалів рідкою полімерною матрицею, що зазвичай складається з поліефірних, епоксидних або вінілефірних смол. Матрицю розподіляють по поверхні за допомогою валиків, пензлів чи розпилювачів, приділяючи особливу увагу ретельності просочення, адже навіть найменші повітряні включення чи недостатньо оброблені ділянки можуть негативно вплинути на характеристики міцності кінцевого виробу. Для ущільнення матеріалу використовують валики або шпателі, які забезпечують рівномірне проникнення матриці в структуру волокон [14, 20].

Процес формування повторюється шляхом додавання наступних шарів армувального матеріалу, кожен з яких знову просочується полімерною матрицею. Загальна товщина виробу залежить від його функціональних вимог. Наприклад, у випадках, коли деталь піддаватиметься значним механічним навантаженням, кількість шарів може бути збільшена, а орієнтація волокон адаптована для забезпечення міцності в потрібних напрямках [14, 19].

Завершальним етапом є затвердіння виробу, яке може відбуватися як у природних умовах при кімнатній температурі, так і з використанням нагріву. Для прискорення полімеризації часто застосовуються каталізatori або прискорювачі. Контроль температурного режиму є критично важливим, адже від нього залежить уникнення дефектів, таких як деформації або нерівності структури [14].

Після затвердіння виріб витягується з форми. Цей процес потребує обережності, щоб уникнути пошкоджень, тому використовуються спеціальні інструменти. На завершення готовий виріб може бути доопрацьований: обрізка країв, шліфування, нанесення додаткових захисних покриттів чи створення отворів, залежно від його подальшого призначення [14, 20].

Схему ручного формування ПКМ показано на рисунку 1.3.

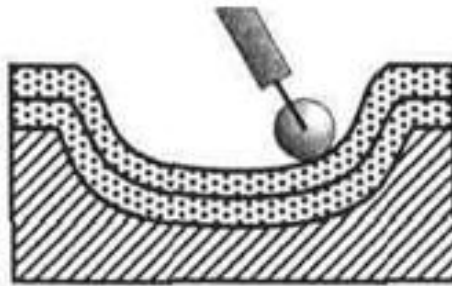


Рисунок 1.3 – Схема ручного формування ПКМ [21]

Метод ручного формування характеризується універсальністю і відносною простотою, що робить його придатним для невеликих виробництв, де важливими є гнучкість і адаптивність технології. Ця технологія дозволяє створювати великогабаритні вироби складної геометрії, а також використовувати різні типи матеріалів для отримання необхідних характеристик [19].

Водночас метод має свої обмеження: трудомісткість і залежність якості від кваліфікації виконавця. Недоліками також є низька продуктивність і труднощі з контролем товщини й однорідності матеріалу без додаткового обладнання [19].

Незважаючи на недоліки, на сьогоднішній день ручне формування знаходить застосування в суднобудуванні, енергетиці та будівництві, а також у транспортній галузі для створення прототипів і нестандартних деталей.

Завдяки цьому методу виготовляють корпуси суден, лопаті вітрових турбін, резервуари, будівельні панелі та інші конструкції [18].

1.5.2 Вакуумне формування

Технологія вакуумної формовки є провідним методом виготовлення ПКМ, який дозволяє отримувати вироби зі складними формами та однорідними фізико-механічними характеристиками. Вона ефективно використовується для виробництва пластинчастих пружин, оскільки дозволяє оптимально адаптувати матеріал до вимог, що висуваються під час експлуатації. Така методика включає кілька послідовних етапів, що забезпечують отримання виробів найвищої якості [22, 23].

Процес розпочинається з ретельного добору та підготовки вихідних компонентів. Армуючий матеріал зазвичай представлений такими варіантами, як скловолокно, вуглецеві волокна або кевлар, тоді як матрицею виступають полімери, наприклад, поліефірні чи епоксидні смоли. Розташування армуючих волокон у визначеному напрямку забезпечує бажані параметри міцності та жорсткості. На цьому етапі створюється багатошаровий пакет, у якому волокна укладаються за схемою, що сприяє оптимальному розподілу майбутніх навантажень. Цей пакет поміщається у форму, що покрита антипригарним складом. Герметичність конструкції забезпечується накладанням вакуумної плівки, після чого за допомогою вакуумного насоса видаляють повітря та надлишкову смолу, що сприяє рівномірному просоченню армуючих елементів [24, 25].

Наступний етап передбачає полімеризацію, яка може виконуватися у печі або автоклаві, залежно від вибраного типу матриці та розмірів виробу. Нагрівання до певної температури забезпечує затвердіння смоли, а тривалість процесу визначається товщиною і складом матеріалу. Після охолодження форми виріб виймають і проводять завершальні операції: обрізання,

шліфування чи нанесення захисного покриття для підвищення експлуатаційної довговічності [24, 25].

Схему процесу вакуумної інфузії показано на рисунку 1.4.

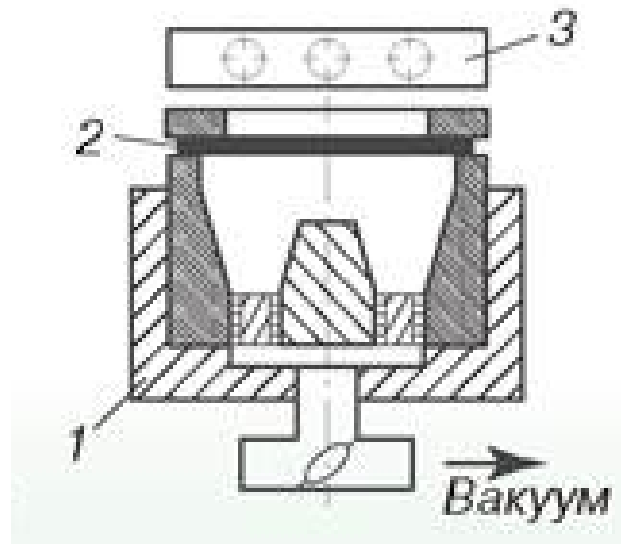


Рисунок 1.4 – Схема процесу вакуумної формовки: 1 – герметичний корпус, приєднаний до вакуумного насосу; 2 – листовий термопластичний матеріал; 3 – нагрівальний елемент [26].

Серед головних переваг технології варто зазначити її здатність забезпечувати рівномірне просочення армуючих волокон смолою та уникати дефектів, таких як повітряні включення або пустоти. Видалення надлишкової смоли з матеріалу дозволяє зменшити вагу виробу без погіршення механічних характеристик. Цей метод підходить для роботи з широким спектром полімерних матриць і армуючих матеріалів, що робить його універсальним [24, 25].

Втім, технологія має і певні недоліки. Її реалізація вимагає спеціалізованого обладнання: вакуумні насоси, автоклави та герметичні плівки, що підвищує вартість виробництва. Крім того, час, необхідний для

полімеризації та охолодження, може бути значним, особливо якщо йдеться про вироби великого розміру або значної товщини. Також виготовлення надто габаритних елементів часто ускладнюється через технічні обмеження обладнання [25].

1.5.3 Препреги

Армувальні волокна, що попередньо насичені полімерною матрицею, використовуються для досягнення високої точності виготовлення, однорідності матеріальної структури та покращення механічних характеристик кінцевого продукту. Ця технологія, відома як препреги, знайшла застосування в галузях із підвищеними вимогами до матеріалів, таких як аерокосмічний сектор, автомобільна індустрія, енергетика та суднобудування, де необхідна максимальна надійність і стабільність властивостей виробів [14].

Препреги – це проміжний етап у виробництві ПКМ, який поєднує армувальні волокна (наприклад, вуглецеві, скляні чи арамідні) з полімерною матрицею. Матриця зазвичай представлена термореактивними смолами: епоксидні, або термопластичними полімерними матеріалами. Особливістю препрегів є те, що матриця перебуває в напівзатверділому стані, що зберігає гнучкість і полегшує процес обробки. У промисловості вони виготовляються у формі рулонів або плоских аркушів, що зручно для подальшого розкрою і формування виробів із заданою геометрією [27].

Процес створення виробів із препрегів починається з виготовлення форми, яка визначає фінальну геометрію компонента. Матеріалом для форми можуть слугувати метали, композити чи інші міцні матеріали, які здатні витримати умови виробництва. Поверхню форми необхідно ретельно очистити й обробити розділовим складом, щоб уникнути прилипання та спростити видалення готового виробу. За необхідності на поверхню форми

може наноситися гелькоут, що виконує функцію декоративного або захисного шару [14, 20].

Укладання препрегів здійснюється шарами, причому напрямок волокон і послідовність шарів підбираються відповідно до експлуатаційних характеристик майбутнього виробу. Орієнтація армувальних волокон у кожному шарі значною мірою впливає на механічні властивості композиту в конкретних напрямках. Наприклад, для конструкцій, які піддаються комбінованим навантаженням, використовується чергування шарів із різними кутами орієнтації волокон. Щоб запобігти утворенню повітряних порожнин чи нерівностей, кожен шар матеріалу щільно прилягає і ретельно вирівнюється [27, 28].

Нарешті, фінальна стадія – це процес затвердіння, що зазвичай відбувається в автоклаві – спеціальному обладнанні, яке забезпечує високий тиск і температуру. Підвищена температура активує полімерну матрицю, яка остаточно твердне, утворюючи єдину монолітну структуру. Одночасно високий тиск видаляє залишки повітря і запобігає утворенню пор, що підвищує загальну міцність композиту. Якщо у виробництві застосовуються термопластичні матриці, затвердіння може виконуватися за допомогою нагрівальних пресів чи альтернативних методів [28].

Схему процесу просочення ПКМ показано на рисунку 1.5.

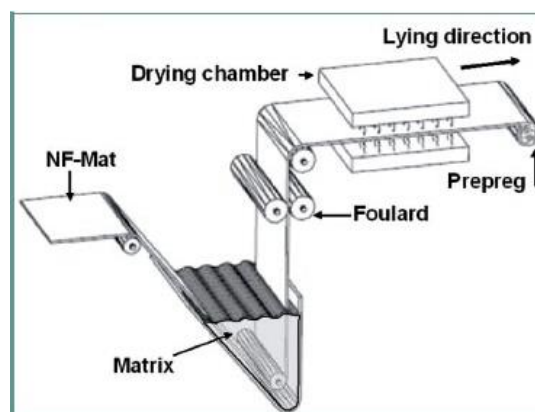


Рисунок 1.5 – Схема процесу просочення ПКМ [29]

Використання препрегів забезпечує відмінну однорідність, оскільки полімерна матриця рівномірно розподілена по волокнах ще на етапі виготовлення напівфабрикату. Це дозволяє уникнути таких дефектів, як нерівномірне просочення чи включення повітря, які часто виникають під час застосування рідких полімерів. Контрольований вміст матриці сприяє стабільності фізичних і механічних характеристик кінцевих виробів. Гнучкість матеріалу значно спрощує створення складних форм, а заздалегідь виконане просочення скорочує час підготовчих операцій. Крім того, ця технологія сприяє зниженню обсягів відходів і впливу на довкілля завдяки точному дозуванню матеріалів [27, 28].

Головний недолік препрегів полягає в їхній високій вартості, що обмежує використання таких матеріалів лише галузями, де якість виробів є критично важливою. Додатково, для роботи з ними потрібне спеціалізоване обладнання, що збільшує витрати на організацію виробничого процесу [14].

1.5.4 Пултрузія

Назва технології «пултрузія» походить від англійських слів, які позначають основні аспекти методу: pull (тягнути) і extrusion (видавлювання). Цей процес передбачає витягування армувальних волокон, попередньо просочених рідкою полімерною матрицею, крізь формувальну матрицю, яка задає кінцеву форму виробу та забезпечує його затвердіння. Головна відмінність пултрузії від екструзії полягає в тому, що замість виштовхування тут застосовується витягування. Такий підхід гарантує однорідний розподіл матеріалів у заготовці та високу точність геометрії [30, 31].

Процес виготовлення розпочинається з підготовки армувального матеріалу, основою якого є безперервні волокна. Найчастіше застосовують скляні, вуглецеві чи арамідні волокна, які подаються з котушок або мотків. Їх встановлюють на спеціальні розмотувальні механізми, що забезпечують стабільне надходження у виробничу лінію. У деяких випадках волокна

додатково комбінують із матами або тканинами для створення багатошарової структури, яка підвищує міцність кінцевих виробів. Максимальна жорсткість досягається завдяки орієнтації волокон уздовж напрямку витягування, що особливо важливо для навантажень на розтягування [30].

На наступному етапі волокна повністю просочуються полімерною матрицею, яка є основним зв'язувальним компонентом. У залежності від вимог, застосовуються матриці з термореактивних чи термопластичних полімерів, серед яких найбільш поширені епоксидні, поліефірні чи вінілефірні смоли. Рівномірне насичення волокон смолою є критичним для забезпечення якості готових виробів, адже наявність сухих ділянок може викликати дефекти, що знижують експлуатаційні характеристики матеріалу [30].

Далі просочені волокна проходять крізь формувальну матрицю, яка виготовляється зі спеціальних матеріалів і має внутрішній канал, що точно повторює форму профілю майбутнього виробу. У процесі ущільнення видаляється зайва смола, а заготовка набуває заданих розмірів. Цей етап є ключовим для забезпечення стабільної геометрії виробу, оскільки найменші відхилення на цьому етапі можуть негативно вплинути на якість кінцевого продукту [30, 31].

Заключна фаза полягає у затвердінні виробу. Якщо використовується термореактивна матриця, полімеризація відбувається під дією високої температури в нагрівальній камері. Для термопластичних матеріалів застосовують охолодження, яке забезпечує затвердіння композиту. У зоні затвердіння відбувається остаточне формування композитного матеріалу, де полімерна матриця щільно зв'язує армувальні волокна, створюючи монолітний виріб із високими механічними характеристиками [30, 31].

Фінальним етапом є витягування затверділого профілю, яке виконується за допомогою спеціальних тягових механізмів, що забезпечують рівномірний рух без провисань. Після цього заготовка ріжеться на потрібну довжину автоматизованими пилами. Довжина профілю визначається лише вимогами з

транспортування чи зберігання, оскільки технологія дозволяє виробляти елементи практично необмеженої довжини [30].

На рисунку 1.6 показано детальну схему процесу пултрузії.

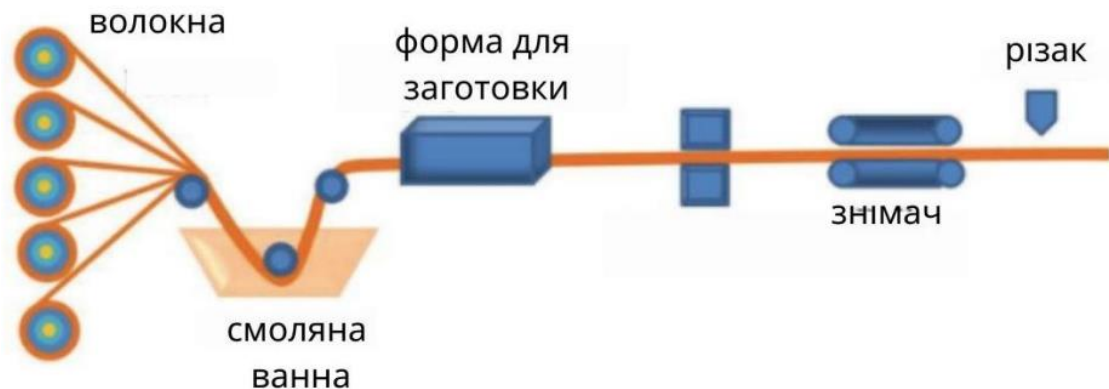


Рисунок 1.6 – Схема процесу пултрузії [30]

Лінія пултрузії може працювати безперервно, забезпечуючи постійний потік готових виробів, що значно скорочує час виробництва і знижує витрати. Використання формувальної матриці дає змогу створювати профілі з мінімальними відхиленнями за розміром, що важливо для багатьох технічних застосувань, а також забезпечує високу якість композитів, оскільки виключає пористість і дефекти, які часто виникають під час ручних методів формування [30].

Лінія пултрузії забезпечує безперервне виробництво, що значно зменшує витрати часу та фінансів. Завдяки точності формувальної матриці готові профілі мають мінімальні розміри відхилень, що є вирішальним для багатьох технічних застосувань. До того ж, цей процес усуває ймовірність пористості або інших дефектів, які притаманні ручним методам формування [30].

Попри численні переваги, технологія обмежується виготовленням виробів із постійним перетином, а також потребує значних інвестицій у обладнання, включно з матрицями та системами витягування. Основними

галузями застосування пултрузії є будівництво, енергетика та транспорт. Наприклад, у будівельній сфері вона використовується для створення балок, профілів і огорожувальних елементів із високою корозійною стійкістю. В енергетиці технологія застосовується у виготовленні компонентів вітрових турбін, таких як ребра жорсткості чи стійки. У транспорті її використовують для конструктивних елементів вагонів, кузовів та мостів, де важливими є легкість і міцність матеріалу [30, 31].

1.5.5 RTM-технологія

Метод RTM базується на використанні рідкої полімерної матриці, яка вводиться у форму, наповнену армувальним матеріалом. Такий підхід дозволяє створювати вироби складної геометрії з високими стандартами точності, рівномірною структурою та чудовими механічними характеристиками. Технологія знаходить своє застосування у високотехнологічних секторах, серед яких авіаційна галузь, автомобілебудування, енергетика та інші інноваційні сфери промисловості [32].

Виробничий процес розпочинається з підготовки форми, що складається з двох елементів – матриці та пуансона. Ці компоненти щільно прилягають один до одного, утворюючи замкнуту порожнину. Матеріал для виготовлення форми обирається залежно від вимог до кінцевого виробу та може включати метали або спеціалізовані композити. Для запобігання адгезії полімерної матриці поверхні форми очищають та обробляють спеціальними розділювальними складами. У разі потреби на внутрішню поверхню форми наноситься захисний гелькоут, який покращує якість поверхні готового виробу [32, 33].

Наступним етапом є розміщення армувального матеріалу всередині порожнини форми. Волокна, які можуть бути скляними, вуглецевими або арамідними, попередньо розкроюють за геометрією виробу. Їх укладають

шарами відповідно до заданої орієнтації, що дозволяє забезпечити міцність готового ПКМ у необхідних напрямках. Особливо важливо правильно розташувати волокна, оскільки це впливає на розподіл навантаження у виробі. У деяких випадках для складних конструкцій використовують багат шарові комбінації волокон, що додає матеріалу додаткової жорсткості [33, 34].

Після цього порожнину форми заповнюють рідкою термореактивною смолою, яка подається через впускні канали під контрольованим тиском. Повітря з порожнини одночасно виводиться через випускні отвори, що забезпечує рівномірне розподілення матриці та відсутність дефектів у структурі. Ключовими параметрами цього етапу є в'язкість смоли, тиск і швидкість подачі, які підбираються з урахуванням типу армувального матеріалу та форми виробу [33].

Далі процес переходить у фазу затвердіння, що проходить під впливом підвищеної температури. Полімеризація матриці дозволяє досягти стабільності виробу та забезпечує його високу механічну міцність. Час і температура затвердіння визначаються властивостями смоли та вимогами до кінцевого продукту. Контроль цього етапу здійснюється за допомогою датчиків, які відстежують тиск і температуру в реальному часі. У деяких випадках затвердіння можна проводити за кімнатної температури, що знижує енергоспоживання, але продовжує тривалість циклу виробництва [32, 33].

Коли затвердіння завершено, виріб виймають із форми. Готові деталі можуть потребувати незначної додаткової обробки, такої як обрізка країв або нанесення захисного шару. Продукція, створена методом RTM, вирізняється високою точністю, механічною стабільністю та довговічністю, що робить її придатною для використання без подальшого доопрацювання [33].

Схему RTM-технології зображено на рисунку 1.7.

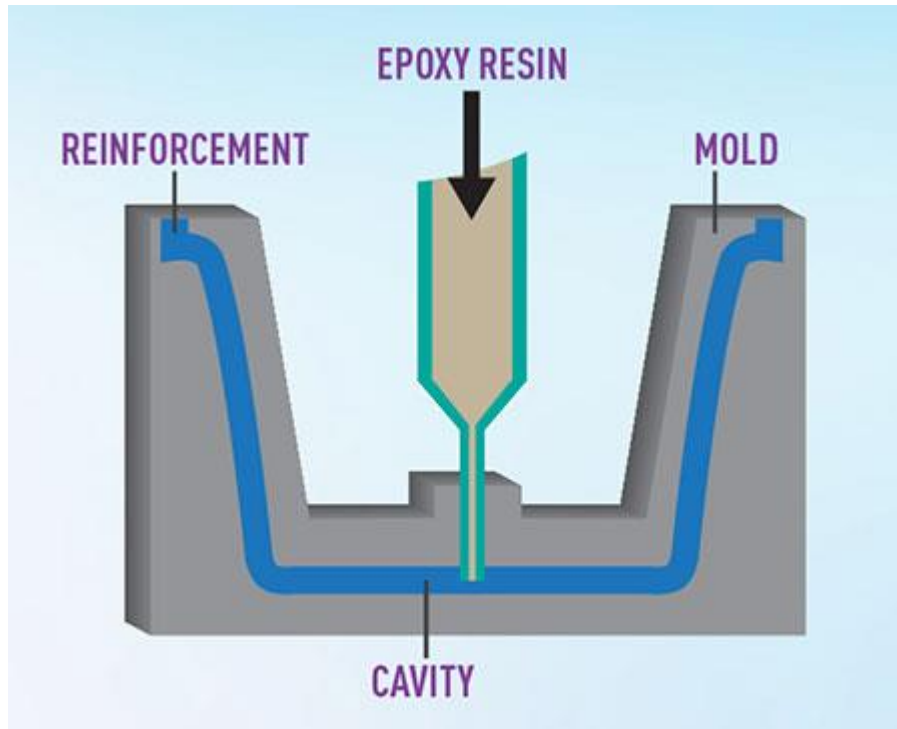


Рисунок 1.7 – Схема RTM-технології [35]

Серед основних переваг технології можна виділити можливість створення складних форм із мінімальними допусками, ефективне використання матеріалів і високий рівень автоматизації, який зменшує ризики людського фактору. Однак, RTM-технологія вимагає значних капіталовкладень у спеціалізоване обладнання та підготовку, а також займає час через необхідність ретельної підготовки форм і укладання армувальних матеріалів [34].

У промисловості цей метод широко застосовується:

В автомобілебудуванні він дозволяє створювати кузовні панелі, елементи підвіски та інші деталі, що поєднують легкість і міцність [34].

В авіаційній сфері RTM використовується для виробництва обшивок літаків і лопатей турбін [35].

В енергетиці – для корпусів вітрогенераторів і резервуарів [35].

Суднобудування також активно застосовує цю технологію для створення корпусів катерів і палубних конструкцій, здатних витримувати агресивні умови експлуатації [35].

1.5.6 Намотування

Ця технологія використовується у виробництві циліндричних компонентів, серед яких труби, резервуари для рідин або газів, балони високого тиску та подібні осесиметричні конструкції. Основний принцип полягає в обмотуванні армувальних волокон, попередньо просочених рідкою полімерною матрицею, навколо спеціальної оправки, яка обертається. Такий метод дозволяє досягти високої жорсткості та міцності кінцевого продукту, забезпечуючи точний контроль товщини стінок і орієнтації волокон. Завдяки цьому намотування стає ключовим підходом для створення виробів, здатних витримувати значні механічні навантаження [36].

На початковому етапі підготовки проводиться обробка оправки, що визначає геометрію майбутнього виробу. Оправка, як правило, має форму циліндра і виготовляється з матеріалів, здатних витримати навантаження під час намотування та затвердіння. Поверхня оправки очищується і покривається розділовим шаром для полегшення вилучення готового виробу після затвердіння. У певних випадках застосовують одноразові оправлення, які згодом видаляються шляхом механічного впливу чи розчинення [36, 37].

Армувальні волокна спрямовуються через напрямну систему, яка гарантує їх точне розташування на поверхні оправки. До того, як потрапити на оправку, волокна просочуються полімерною смолою у спеціальній ванні. Полімерна матриця зазвичай містить термореактивні або термопластичні матеріали, такі як епоксидні чи вінілефірні смоли. Орієнтація армування, що формується в процесі намотування, залежить від механічних характеристик, які необхідно забезпечити в готовому виробі. Наприклад, якщо конструкція

має витримувати значний внутрішній тиск, волокна розташовуються під кутами, що підвищують стійкість до розтягувальних сил [36, 38].

Процес складається з укладання декількох шарів матеріалу до досягнення бажаної товщини. При цьому кожен новий шар розташовується під ретельно визначеним кутом, щоб запобігти утворенню внутрішніх дефектів і забезпечити рівномірний розподіл напружень. Застосування комбінованого армування, коли чергуються шари з різною орієнтацією волокон, дозволяє підвищити механічні властивості виробу. Багато сучасних установок для намотування оснащені комп'ютеризованими системами управління, які значно полегшують контроль точності процесу і знижують ймовірність помилок [36].

Заключний етап полягає в затвердінні матеріалу. Для термореактивних смол цей процес відбувається під впливом підвищеної температури, яка активує полімеризацію матриці та сприяє її щільному зчепленню з волокнами. Така обробка зазвичай здійснюється в автоклавах або спеціальних печах, що забезпечують рівномірний розподіл температури по всій поверхні виробу. У випадку термопластичних матриць виріб охолоджується для формування твердого монолітного матеріалу. Час затвердіння залежить від властивостей смоли, температури процесу та товщини виробу. Дотримання параметрів температури й часу критично важливе для уникнення внутрішніх напружень і створення однорідної структури [36].

По завершенні процесу затвердіння виріб видаляють з оправки. Якщо використовувалася одноразова оправка, вона видаляється механічним способом або хімічно розчиняється. Фінальна обробка включає обрізку, полірування чи нанесення захисного покриття. Після цього виріб готовий до експлуатації [36, 37].

Схему намотування виробів з ПКМ показано на рисунку 1.8.

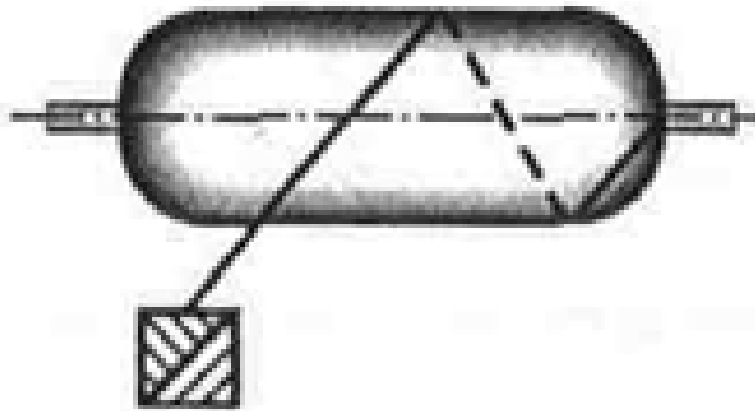


Рисунок 1.8 – Схема намотування виробів з ПКМ [21]

Технологія намотування забезпечує високу міцність завдяки ретельному контролю розташування волокон у структурі. Це дозволяє створювати компоненти, стійкі до значних механічних навантажень, таких як внутрішній тиск чи осьові сили. Намотування також є універсальним методом для виготовлення великих або складних циліндричних виробів. Однак технологія обмежена лише виробами осесиметричної форми, що може стати перешкодою в певних галузях [36, 39].

Ця методика широко застосовується в енергетиці для виготовлення газових балонів чи трубопроводів, в авіації – для створення легких паливних баків і ракетних корпусів, а також у суднобудуванні та спортивній індустрії, де потрібна міцність і мала вага [39].

Підсумки аналізу технології отримання полімерних композитних матеріалів наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Підсумки аналізу технологій отримання ПКМ

Технологія	Переваги	Недоліки
Ручне формування	<ul style="list-style-type: none"> - Простота та низька вартість обладнання. - Підходить для виготовлення великих деталей складної форми. 	<ul style="list-style-type: none"> - Низька повторюваність якості виробів. - Високий вміст смоли, що може знижувати механічні властивості. - Висока трудомісткість процесу.
Вакуумна формовка	<ul style="list-style-type: none"> - Вища якість виробів завдяки кращому просоченню волокон. - Зменшення кількості повітряних включень. - Можливість виготовлення великих деталей. 	<ul style="list-style-type: none"> - Потребує спеціального обладнання та матеріалів. - Вимагає високої кваліфікації персоналу. - Триваліший час підготовки процесу.
Препрег	<ul style="list-style-type: none"> - Висока якість та однорідність матеріалу. - Контрольований вміст смоли. - Можливість зберігання та транспортування перед використанням. 	<ul style="list-style-type: none"> - Висока вартість матеріалу. - Потребує умов зберігання при низьких температурах. - Необхідність використання автоклавів або пресів для затвердіння.
Пултрузія	<ul style="list-style-type: none"> - Висока швидкість виробництва. - Висока повторюваність та якість виробів. - Економічно вигідна для масового виробництва. 	<ul style="list-style-type: none"> - Обмежена геометрія виробів (переважно профілі постійного перерізу). - Високі початкові витрати на обладнання. - Обмеження у виборі типів волокон та смол.
RTM	<ul style="list-style-type: none"> - Висока якість поверхні з обох сторін виробу. - Можливість виготовлення складних форм. - Ефективне використання матеріалів. 	<ul style="list-style-type: none"> - Високі витрати на виготовлення прес-форм. - Обмеження за розміром деталей через розмір прес-форм. - Потребує точного контролю параметрів процесу.

Продовження таблиці 1.3

Намотування	<ul style="list-style-type: none"> - Висока міцність виробів завдяки орієнтації волокон. - Підходить для виготовлення циліндричних та сферичних форм. - Економічно вигідна для виробництва труб, балонів та резервуарів. 	<ul style="list-style-type: none"> - Обмежена геометрія виробів. - Потребує спеціалізованого обладнання. - Складність у забезпеченні рівномірного розподілу смоли та відсутності дефектів.
-------------	---	---

Висновки до розділу 1

Аналіз літератури свідчить про те, що дослідження ПКМ належить до ключових напрямів сучасного матеріалознавства. Завдяки винятковим фізико-механічним характеристикам, ці матеріали відкривають перспективи створення передових конструкційних рішень, які здатні ефективно функціонувати навіть за умов значних механічних навантажень. Окрему увагу привертає можливість їх використання у виробництві пластинчастих пружин, які мають застосування як у технічних системах, так і в медичних розробках.

Вивчення базових властивостей пластинчастих пружин підтверджує їх важливість для забезпечення стабільної роботи різноманітних механізмів. У медичній сфері такі елементи, наприклад у протезуванні, дозволяють значно покращити якість життя пацієнтів. Карбонові пружини, завдяки комбінації міцності, малої ваги та здатності імітувати природні рухи, є особливо перспективними у цьому напрямі.

Характеристики ПКМ, необхідні для створення пластинчастих пружин, визначаються співвідношенням компонентів матриці та армувальних волокон. Крім того, ефективність матеріалу значною мірою залежить від технологічних аспектів його виробництва, що також є важливим об'єктом дослідження.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1 Тканина кевлар-карбон

Тканина Hybrid Carbon-Kevlar 200 g/m² (табл. 2.1) із щільністю 200 г/м² та полотняним плетінням є прикладом гібридного матеріалу, що поєднує властивості карбонових і кевларових (арамідних) волокон. Така структура забезпечує стабільність і рівномірність механічних характеристик, що робить її затребуваною у виробництві композитів. Особливість цієї тканини полягає у здатності одночасно поєднувати низьку вагу, високу міцність і значну ударостійкість [40].

Матеріал досягає оптимального балансу завдяки взаємодії компонентів: карбонові волокна відповідають за високу жорсткість, стійкість до розтягувальних навантажень та естетичний чорний відтінок, тоді як кевларові волокна підвищують стійкість до ударів, зносу і запобігають розшаруванню. Поєднання цих властивостей забезпечує створення міцної, довговічної та легкої тканини, яка широко використовується в технологіях виробництва композитних матеріалів [40, 41].

Таблиця 2.1

Фізико-механічні властивості тканини Hybrid Carbon-Kevlar 200 g/m² [40, 41]

Властивість	Величина
Товщина одного шару	0,2 мм
Поверхнева щільність	200 г/м ²
Співвідношення волокон	50% карбон, 50% кевлар
Міцність на розтяг	3000-3500 МПа
Ударна в'язкість	7-10 кДж/м ²
Теплостійкість	до +200°C

Матеріал Hybrid Carbon-Kevlar 200 g/m² відзначається чудовою здатністю просочуватися епоксидними та поліефірними смолами, що сприяє високій зчепності волокон у структурі. Завдяки особливостям полотняного плетіння його зручно укласти на поверхні з плавними контурами або рівними ділянками, що значно полегшує роботу з деталями складної геометрії. Після завершення процесу виробництва вироби набувають гладкої текстури, яка слугує не лише функціональним елементом, а й підвищує декоративну цінність, дозволяючи використовувати цей матеріал у видимих шарах композитів [41].

Тканина створюється завдяки точному переплетенню волокон карбону й кевлару, що забезпечує дотримання необхідних пропорцій. У складі матеріалу волокна поєднані у співвідношенні 50:50, що дозволяє досягти оптимального балансу механічних характеристик. Полотняна структура сприяє підтриманню стабільної форми тканини, забезпечуючи її рівномірність, що є важливим для серійного виготовлення композитних елементів [40, 41].

2.2 Склотканина

Склотканина ТК-200 (табл. 2.2) виготовляється з високоміцних скляних волокон типу «Е», що проходять спеціалізовану обробку, спрямовану на забезпечення стабільності та довговічності матеріалу. Характерною рисою цієї тканини є полотняне плетіння, яке сприяє рівномірному розподілу механічних навантажень у кінцевих виробах, а також мінімізує ризик структурних пошкоджень за умов інтенсивних фізичних впливів. Завдяки щільності 200 г/м² та товщині шару приблизно 0,2 мм, матеріал демонструє універсальність у багатьох галузях [42].

Під час виготовлення тканини використовуються скляні волокна з певним діаметром, які піддаються термічній і хімічній обробці. Це дозволяє досягти високої стійкості до впливу агресивних речовин, включно з лугами,

кислотами та органічними розчинниками. Ще однією важливою властивістю матеріалу є його негорючість і здатність витримувати температури до +550°C, що забезпечує надійність у складних експлуатаційних умовах [42, 43].

Таблиця 2.2

Фізико-механічні властивості склотканини ТК-200 [43]

Властивість	Величина
Товщина одного шару	0,2 мм
Поверхнева щільність	200 г/м ²
Міцність на розрив	1500-2000 Н/50 мм
Температурна стійкість	до +550°C
Щільність матеріалу	2,6 г/см ³
Ударна в'язкість	5-7 кДж/м ²

Завдяки ретельно вивіреній структурі тканина легко інтегрується у виробництво багат шарових ПКМ. Під час укладання шарів вона зберігає свою цілісність, що сприяє створенню якісних і довговічних виробів. Одним із ключових факторів її популярності є відмінна здатність до просочення полімерними смолами, такими як епоксидні або поліефірні. Це забезпечує високу адгезію шарів, формуючи однорідну структуру композитів. Процес виробництва з використанням ТК-200 не потребує високотемпературної обробки, що значно спрощує технологію в умовах обмежених ресурсів [43].

Основними сферами застосування цього матеріалу є авіабудування та автомобільна промисловість, де важливим є поєднання легкості й міцності. У суднобудуванні тканина використовується для створення деталей і корпусів, які працюють в умовах високої вологості, а в енергетичному секторі – як ізоляційний матеріал для трубопроводів та теплових установок. Її також

цінують у виготовленні електроізоляційних елементів, що використовуються в складних умовах експлуатації [43].

Під час роботи з ТК-200 необхідно дотримуватися вимог безпеки. Через можливий вплив дрібних частинок скла рекомендовано використовувати засоби захисту, зокрема рукавички, маски й окуляри. Дотримання технологічних вимог під час укладання шарів і затвердіння матеріалу гарантує високу якість готових виробів без дефектів.

2.3 Епоксидна смола Larit L-285

Епоксидна смола Larit L-285 характеризується низькою в'язкістю, що сприяє ефективному насиченню армуючих волокон, серед яких скловолокно та вуглецеве волокно. Це дозволяє отримувати композити з відмінними механічними показниками і рівною, гладкою поверхнею. Однією з важливих властивостей матеріалу є його прозорість після затвердіння, що робить його популярним у виготовленні декоративних деталей і захисних покриттів, де висока естетична якість є ключовою [8].

Для досягнення найкращих характеристик смоли її необхідно поєднувати із затверджувачем H-285 у пропорції 100:50 по об'єму. Така суміш залишається придатною до роботи протягом 40-60 хвилин, що дає можливість зручно обробляти матеріал до початку його полімеризації. Після завершення цього процесу отриманий матеріал демонструє термічну стабільність у межах 40°C-110°C, що дозволяє застосовувати його в умовах із підвищеним тепловим навантаженням [8].

Більш детальні дані щодо фізико-механічних властивостей епоксидної смоли Larit L-285 наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Фізико-механічні властивості епоксидної смоли Larit L-285 [8]

Властивість	Величина
В'язкість при 20°C	4300 МПа·с
Щільність при 20°C	1,19-1,28 кг/м ³
Ударна в'язкість	7-33 кДж/м ²
Температура полімеризації	від 22°C
Міцність при розтягуванні	45-95 МПа
Міцність при стисканні	95-205 МПа
Теплостійкість	60-180°C
Водопоглинання за 24 години	0,03-0,2%
Міцність при згині	85-145 МПа
Час полімеризації	2 години
Співвідношення смола:затверджувач	100:50

Обробка смоли Larit L-285 можлива в широкому температурному діапазоні від 15°C до 55°C, що робить її придатною для експлуатації в умовах різних кліматичних зон. Для забезпечення кращих термомеханічних характеристик матеріалу рекомендується проводити додаткову термообробку при температурі 40-80°C. Такий підхід дозволяє підвищити теплостійкість готового виробу до 95°C, що значно розширює можливості його застосування в умовах впливу високих температур [8].

Епоксидна смола Larit L-285 відома своїм універсальним використанням у виготовленні композитних виробів для суднобудівної галузі, спортивного обладнання та інших сфер, де необхідні матеріали, що поєднують високу міцність із невеликою масою. Ще одним важливим напрямом її застосування є формування верхнього шару для штучного каменю, що дозволяє отримати поверхню з привабливим блиском і гладкістю [8].

Слід враховувати, що для досягнення найкращих результатів у роботі зі смолою потрібно ретельно дотримуватися рекомендованих пропорцій компонентів і суворо підтримувати температурні режими, зазначені виробником. Це забезпечує не лише довговічність готових виробів, але й оптимальні фізико-механічні властивості композитного матеріалу.

Окремо варто підкреслити, що за умов зберігання або обробки при низьких температурах (у межах від 0°C до 10°C) ця смола зберігає прозорість, не зазнаючи помутніння, що є її конкурентною перевагою в порівнянні з багатьма іншими видами епоксидних матеріалів [8].

Завдяки своєму балансу технічних характеристик і широким можливостям адаптації до різних завдань, смола Larit L-285 стає оптимальним рішенням для виробництва як високоякісних композитних матеріалів, так і декоративних покриттів із високими естетичними вимогами.

2.4 Методика визначення фізико-механічних властивостей зразків

2.4.1 Межа міцності на згин

Межа міцності на згин – один із ключових показників механічних властивостей ПКМ. Цей параметр визначає, наскільки матеріал здатний протистояти руйнуванню під впливом згинального навантаження. Значущість цього показника особливо висока для тих конструкцій, які працюють у середовищі складних механічних впливів. Тестування виконується в умовах, що максимально наближені до реальних, включаючи різні температурні режими. Такі дослідження дають змогу оцінити стабільність матеріалу за підвищеної (+70°C), зниженої (-20°C) та звичайної температури (+23°C) [44].

Методика дослідження розроблена відповідно до положень стандарту ДСТУ EN ISO 14125:2019 [44]. Вона передбачає суворі вимоги до параметрів зразків, обладнання й умов проведення випробувань. Для тестування використовуються зразки прямокутної форми, виготовлені зі спеціальних

панелей ПКМ. При цьому товщина, ширина та довжина зразка мають відповідати наступним співвідношеннями (2.1) і (2.2) [44]:

$$L = 16h, \quad (2.1)$$

$$b = 10h. \quad (2.2)$$

Це забезпечує правильний розподіл напружень під час тесту. Напрямок армуючих волокон у зразках завжди орієнтують таким чином, щоб він збігався з напрямком максимального навантаження в майбутніх умовах експлуатації [44].

Краї зразків перед випробуванням ретельно обробляються. Поверхня полірується для усунення нерівностей, здатних спричинити локальні концентрації напружень, що можуть спотворити результати тесту. Після цього зразки кондиціонують у контрольованих умовах: їх витримують 24 години за температури $+23 \pm 2^\circ\text{C}$ і відносної вологості $50 \pm 5\%$. Коли випробування здійснюються за екстремальних температур, зразки розміщують у камеру з регульованими умовами, де вони стабілізуються протягом двох годин [44].

Основним обладнанням для визначення межі міцності на згин є універсальна машина для випробувань МПП-100. Вона складається з двох опор, на яких закріплюється зразок, і центрального штампа, який прикладає навантаження. Відстань між опорами регулюється залежно від товщини зразка, що забезпечує оптимальну розстановку напружень. Точність вимірювання сили становить $\pm 1\%$, а відхилення у вимірюванні прогину – не більше 0,01 мм, що відповідає сучасним стандартам точності. Для тестів за різних температур до машини підключається камера, здатна підтримувати стабільні умови в діапазоні від -70°C до $+150^\circ\text{C}$ із точністю до $\pm 2^\circ\text{C}$ [44].

Зображення універсальної машини для випробувань МПП-100 наведено на рисунку 2.1.

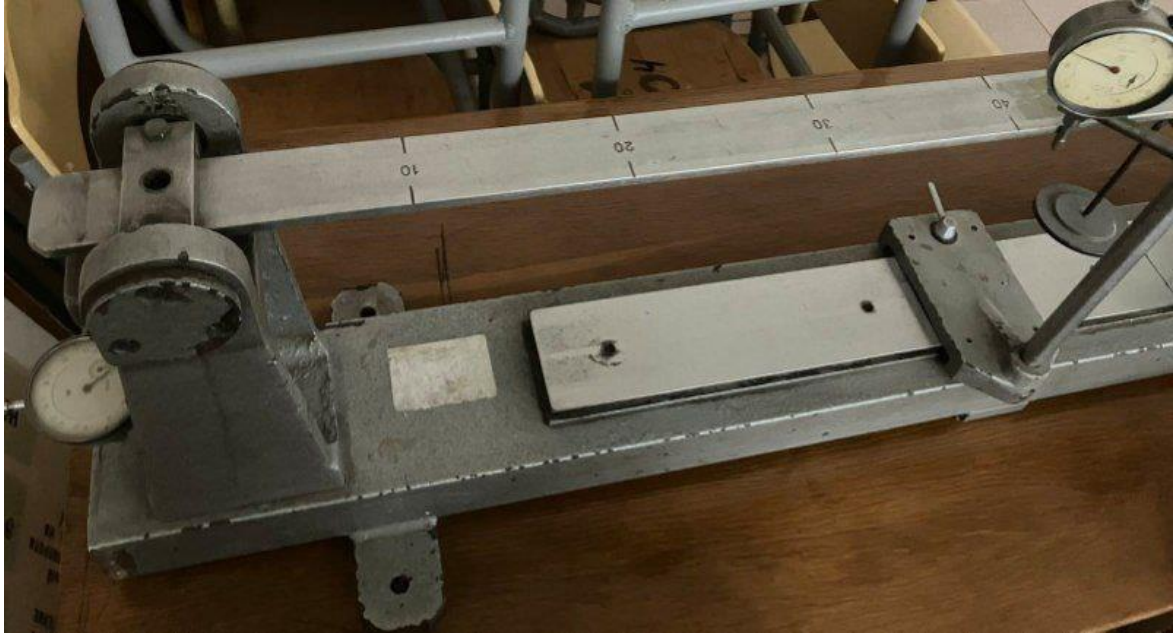


Рисунок 2.1 – Випробувальна машина на згин МПП-100

Під час тестування зразок поступово навантажується у центрі зі швидкістю 1 мм/хв. Випробування тривають до моменту руйнування матеріалу або досягнення максимальної деформації, що ще не порушує його структуру (рис. 2.2).

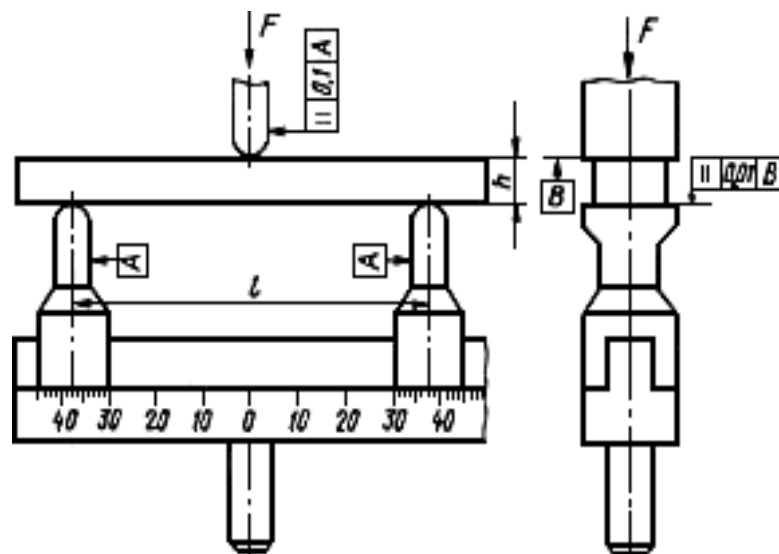


Рисунок 2.2 – Схема випробування зразка на згин [8]

Умови тесту моделюються залежно від температурного режиму: за звичайної температури (+23°C) випробування виконуються у стандартній лабораторії, а для екстремальних температур (+70°C або -20°C) зразки безпосередньо тестуються в камері після попереднього нагрівання чи охолодження. Це дозволяє точно оцінити вплив температури на механічні властивості ПКМ [44].

Дані випробувань автоматично збираються й обробляються за допомогою системи збору інформації. Машина фіксує не лише прикладене навантаження, але й відповідний прогин. Це значно прискорює процес аналізу, знижуючи ризик людської помилки. Отримані результати є основою для розрахунку межі міцності на згин, що використовується для подальшої оцінки придатності у різних умовах експлуатації [44].

Максимальне навантаження ($F_{\text{макс}}$) фіксується автоматично за допомогою датчиків, після чого розраховується межа міцності на згин за формулою (2.3) [44]:

$$\sigma_{\text{згин}} = \frac{3F_{\text{макс}}L}{2bh^2} \quad (2.3)$$

де L – відстань між опорами, b – ширина зразка, h – товщина. Результати тестування зберігаються в електронному вигляді, що дозволяє аналізувати поведінку зразка у різних температурних умовах.

2.4.2 Межа міцності на стиск

Випробування на стиск є важливим етапом дослідження фізико-механічних характеристик полімерних композитних зразків, оскільки саме ці параметри визначають їхню здатність витримувати експлуатаційні навантаження. Основою для точності та достовірності отриманих результатів

є правильна підготовка зразків. Зразки, які використовуються для цього типу досліджень, повинні строго відповідати геометричним і якісним вимогам, які регламентуються стандартом ДСТУ EN ISO 604:2019 [45]. Залежно від структури матеріалу, зразки можуть мати форму прямокутного паралелепіпеда або циліндра. Вибір форми залежить також і від специфіки експерименту. Для матеріалів із рівномірним армуванням, наприклад, циліндрична форма є оптимальним вибором, адже вона дозволяє звести до мінімуму вплив анізотропності. У той же час, якщо матеріал має шарувату структуру, прямокутні зразки стають кращим варіантом, оскільки вони дозволяють оцінити поведінку ПКМ у напрямках, паралельних і перпендикулярних до армуючих шарів [45].

Габарити зразків залежать від вихідного матеріалу та особливостей процесу виготовлення. Проте стандарт передбачає певні співвідношення розмірів, що є універсальними для різних типів матеріалів. Зразки повинні мати висоту, яка вдвічі перевищує ширину або діаметр. Для прямокутних зразків ширина коливається у межах 10-20 мм, тоді як висота варіюється від 20 до 40 мм. Важливим аспектом є обробка поверхонь зразків: вони мають бути абсолютно рівними, без будь-яких дефектів, таких як тріщини чи нерівності. Це необхідно для уникнення концентрації напружень, які можуть призвести до передчасного руйнування зразка й отримання некоректних результатів [45].

Перед випробуваннями зразки повинні бути кондиціоновані відповідно до умов дослідження. Це важливий процес, який гарантує, що характеристики матеріалу будуть вимірюватися в стабільному стані. Наприклад, у лабораторних умовах при нормальній температурі (+23 °C) кондиціонування передбачає витримування зразків протягом щонайменше 24 годин. Для оцінювання властивостей матеріалів у більш екстремальних умовах використовуються спеціальні температурні камери. У таких випадках зразки витримуються в камері мінімум дві години, що дозволяє забезпечити

стабільність температури по всьому їхньому об'єму. Таке кондиціонування є критичним, оскільки неоднорідність температури може значно вплинути на точність вимірювань [45].

Випробування на стиск виконуються на пресових машинах, які забезпечують можливість прикладати високі навантаження із заданою точністю. Обладнання складається з двох паралельних сталевих плит, між якими розміщується зразок. Ці плити повинні бути жорсткими, ідеально рівними та паралельними одна до одної, щоб забезпечити рівномірний розподіл навантаження по поверхні зразка. Для запобігання пошкодженням плит між ними та зразком можуть використовуватися прокладки або вставки з високоміцних матеріалів. У конструкцію пресових машин інтегровані електронні датчики навантаження, які забезпечують точність вимірювань на рівні $\pm 1\%$, а також системи, що фіксують деформації з точністю до 0,01 мм. Це дає можливість отримувати високоточні дані, необхідні для подальшого аналізу [45].

Особливу роль відіграють температурні камери, які інтегруються з пресовими машинами. Вони дозволяють проводити дослідження властивостей зразків за умов, максимально наближених до реальних експлуатаційних. Такі камери забезпечують точність підтримання температури в межах ± 2 °C і дозволяють працювати в діапазоні від -70 °C до +150 °C. Це забезпечує всебічну оцінку матеріалів за різних температурних режимів. Під час випробувань на стиск температура підтримується постійною протягом усього тесту, що запобігає некоректним змінам властивостей матеріалу [45].

Процес випробування передбачає поступове прикладення навантаження до зразка зі сталою швидкістю. Відповідно до стандарту ДСТУ ISO 604, швидкість деформації становить 1 мм/хв. Навантаження прикладається до моменту руйнування зразка або до досягнення максимальної деформації, яка залежить від характеристик ПКМ. Для кожного зразка система автоматично фіксує зміну сили та відповідної деформації. Ці дані є основою для побудови

графіків, що відображають залежність між навантаженням і деформацією матеріалу [45].

Випробування за підвищених температур (+70 °С) вимагають попереднього нагрівання зразків у температурній камері протягом двох годин. Під час тесту температура залишається стабільною, що виключає ймовірність неконтрольованих змін у структурі матеріалу. Для випробувань при низьких температурах (-20 °С) зразки попередньо охолоджуються, після чого тест проводиться за тих самих умов, що й для інших температурних режимів. Отримані результати дозволяють оцінити, як температура впливає на здатність композита протистояти стискаючим навантаженням [45].

Після завершення випробувань результати аналізуються на основі методик, визначених стандартом. Для кожного зразка обчислюється межа міцності на стиск, після чого визначається середнє значення для всієї вибірки. Якщо результати деяких зразків суттєво відрізняються від середнього, це може свідчити про наявність дефектів у матеріалі чи похибок під час тестування. У таких випадках рекомендовано проводити повторні дослідження. Дані оформлюються у вигляді графіків і таблиць, що дозволяють візуалізувати поведінку матеріалу під навантаженням [45].

Також аналізуються зміни межі міцності за різних температурних режимів. Наприклад, підвищення температури часто супроводжується зниженням міцності через зменшення жорсткості полімерної матриці, тоді як за низьких температур матеріал стає більш жорстким, але водночас крихким. Такий підхід дозволяє повною мірою оцінити експлуатаційні можливості ПКМ [45]. Основним показником є межа міцності на стиск, яка розраховується за формулою (2.4) [45]:

$$\sigma_{\text{стиск}} = \frac{F_{\text{макс}}}{A}, \quad (2.4)$$

де $F_{\text{макс}}$ – максимальне зусилля, A – площа поперечного перерізу зразка.

2.4.3 Межа міцності на розтяг

Процес випробування на розтяг регламентується стандартом ДСТУ EN ISO 527-1:2017 [46], що визначає чітку методику проведення тестів, встановлює вимоги до параметрів зразків, обладнання та способів фіксації результатів. Основна мета випробувань – це не лише оцінка механічних властивостей матеріалу, але й забезпечення можливості порівняння результатів між різними партіями ПКМ або їх виробниками. Окрім цього, такі тести дозволяють прогнозувати поведінку композиту під навантаженням у реальних умовах експлуатації [46].

Зразки, які використовуються для тестів, мають відповідати строгим розмірам і технічним характеристикам, закладеним у стандартах. Їх товщина може варіюватися в межах 2-10 мм, ширина – 10-25 мм, а мінімальна довжина – 150 мм. Ці параметри є ключовими, оскільки їх дотримання гарантує точність і порівнюваність отриманих результатів. Виготовлення зразків супроводжується шліфуванням країв для усунення можливих концентрацій напружень, які можуть призвести до передчасного руйнування або спотворення даних. Однорідність поверхні також є критичним чинником: найменші тріщини, залишки матеріалу чи інші дефекти здатні суттєво вплинути на рівномірність розподілу навантаження, що в підсумку позначиться на точності тесту [46].

Важливим аспектом підготовки є правильна фіксація зразка. З цією метою використовуються спеціальні затискачі, які забезпечують міцне, але обережне закріплення, щоб уникнути пошкодження матеріалу в зоні контакту. Затискачі часто виготовляють із надміцних матеріалів, їх поверхня може мати абразивний або ребристий шар, що запобігає ковзанню зразка в процесі навантаження. Надійність фіксації є особливо важливою, оскільки такі матеріали можуть мати змінні фізико-механічні характеристики залежно від умов експлуатації [46].

Методи реєстрації сили та деформацій також відповідають стандарту. У процесі тестування застосовуються високоточні датчики сили з похибкою не більше 1% від максимального навантаження. Для контролю подовження зразка використовуються контактні та безконтактні екстензометри, які закріплюються на центральній частині зразка, де розподіл напружень є найбільш рівномірним. Це обладнання забезпечує отримання детальних даних про поведінку матеріалу під дією розтягуючих сил. Наприклад, у зоні, де матеріал переходить з еластичного в пластичний стан, екстензометри фіксують подовження з точністю до 0,01 мм, що є важливим для подальшого аналізу [46].

Процес випробувань проводиться на універсальних випробувальних машинах, які обладнані комп'ютерними системами для автоматичної реєстрації даних. Ці машини працюють за принципом поступового прикладання навантаження до зразка зі сталою швидкістю. Зазвичай для ПКМ рекомендована швидкість деформації становить 1 мм/хв, але вона може бути скоригована залежно від товщини або складу матеріалу. Випробувальна машина забезпечує рівномірність зростання сили, фіксуючи кожен етап подовження зразка, починаючи з моменту початкового навантаження до точки руйнування [46].

Момент руйнування, що зазвичай супроводжується раптовим падінням сили, реєструється обладнанням із високою точністю. Важливо, що система не тільки фіксує максимальну силу ($F_{\text{макс}}$) та відповідне подовження, але й створює графічні залежності між прикладеною силою та деформацією, які використовуються для оцінки механічної поведінки матеріалу. Ці графіки дозволяють виділити еластичну фазу (де матеріал поводить лінійно), пластичну фазу (з появою залишкової деформації) та момент руйнування [46].

Тестування механічних властивостей композиту вимагає високої точності та дотримання технологічних вимог. Будь-які відхилення в процесі випробування, наприклад, нерівномірний розподіл напружень через дефекти

чи неправильно зафіксовані зразки, можуть суттєво вплинути на результати. Саме тому стандарт вимагає використання мінімум п'яти зразків для кожного типу матеріалу, що дозволяє обчислити середні значення та оцінити розкид отриманих даних. Аналіз відхилень дозволяє визначити, чи є вони результатом дефектів матеріалу або похибок у проведенні випробувань [46].

Додатково під час тесту можуть оцінюватися інші механічні характеристики, такі як відносна деформація у момент руйнування, модуль пружності або поведінка матеріалу на різних етапах навантаження. Наприклад, для ПКМ з армуванням волокнами модуль пружності може значно відрізнятись у залежності від напрямку армування, що важливо враховувати для реальних умов експлуатації [46].

Універсальні випробувальні машини також оснащуються додатковими датчиками для вимірювання температури та вологості, що дозволяє проводити тести в умовах, наближених до експлуатаційних. Це відкриває можливості для комплексної оцінки властивостей у широкому діапазоні навантажень та умов. Наприклад, зміна температури може суттєво вплинути на міцність матеріалу: при підвищених температурах міцність зменшується через розм'якшення матриці, тоді як при низьких температурах матеріал стає більш жорстким, але крихким. Такі дані дозволяють визначити оптимальні умови використання у конкретних галузях [46].

Підсумовуючи, випробування на розтяг згідно з ДСТУ EN ISO 527-1:2017 забезпечують детальну характеристику механічних властивостей матеріалів, їх надійності та придатності до використання у різних умовах. Отримані результати мають важливе значення для проектування виробів із ПКМ, підбору матеріалів для конкретних застосувань і порівняння характеристик різних композитів [46].

Межа міцності на розтяг розраховується за формулою (2.5) [47]:

$$\sigma_{\text{розтяг}} = \frac{F_{\text{макс}}}{A}, \quad (2.5)$$

де A – початкова площа поперечного перерізу. Обладнання має бути оснащено високоточними датчиками деформації для точного визначення характеристик матеріалу.

2.4.4 Щільність (гідростатичне зважування)

Визначення щільності полімерних композитних матеріалів методом гідростатичного зважування є одним із найбільш точних способів, передбачених для аналізу фізико-механічних властивостей. Ця методика, розроблена відповідно до вимог стандарту ДСТУ EN ISO 1183-1:2022 [47], забезпечує отримання достовірних результатів навіть для матеріалів із низькими показниками густини, що робить її ідеальною для використання у сучасних дослідженнях композитів. Основний принцип методу базується на визначенні різниці мас зразка в повітрі та у воді, що дозволяє врахувати об'єм рідини, витісненої матеріалом. Саме цей підхід дає змогу отримати точне значення щільності, уникаючи впливу сторонніх факторів [47].

Для проведення випробувань застосовують спеціалізоване обладнання – аналітичні ваги Shimadzu AUW-D (рис. 2.3) з точністю не менш ніж 0,001 г. Це забезпечує максимальну достовірність вимірювань навіть для невеликих зразків. Ваги обладнуються додатковим модулем для підвішування зразків, що дозволяє занурювати їх у рідину без контакту зі стінками або дном посудини, зводячи до мінімуму ризик викривлення даних через сторонні впливи. Уся процедура проводиться в кілька етапів, кожен із яких має відповідати встановленим вимогам для забезпечення точності результатів [47].



Рисунок 2.3 – Аналітичні ваги Shimadzu AUW-D [48]

На першому етапі зразок очищується від пилу, сторонніх частинок або залишків, що могли б вплинути на його масу. Після цього його маса вимірюється в сухому стані, у повітрі. Ця процедура здійснюється на аналітичних вагах із точністю до 0,001 г. Зразок розташовується на платформі, причому фіксація показників маси проводиться лише після стабілізації значень, щоб уникнути похибок через вібрації чи рух повітря. Цей етап отримав назву «визначення маси у повітрі» ($m_{\text{сух}}$) [47].

Наступний крок включає вимірювання маси зразка у воді. Для цього використовується підвісний модуль ваг, який дозволяє зразку повністю зануритися в рідину. Вода, застосовувана для тестування, має бути чистою, зі стабільною температурою в межах $+23 \pm 2$ °C, щоб уникнути змін фізичних властивостей. Зразок підвішується на тонкій нитці або дроті, а його маса фіксується після повного занурення. Важливо, щоб під час занурення уникати утворення бульбашок повітря на поверхні матеріалу, оскільки це може змінити результати через помилкове збільшення об'єму витісненої води [47].

Критично важливим етапом є контроль температури води. Якщо вона відрізняється від стандартної температури, коригування результатів проводиться відповідно до таблиць густини води, наведених у ДСТУ EN ISO 1183-1:2022. Вони дозволяють врахувати зміни густини рідини при різних температурних умовах, що особливо важливо для високоточних вимірювань. Ваги мають зчитувати дані лише після повної стабілізації, коли рухи води не впливають на вимірювання. Масу зразка, визначену у воді, позначають як m_w у воді [47].

Щільність матеріалу обчислюється за допомогою стандартної формули, яка враховує різницю між масою у повітрі та у воді. Ця різниця безпосередньо відповідає об'єму витісненої рідини, а отже, дозволяє визначити значення густини. Отримані дані порівнюються з нормативними показниками, наведеними в технічній документації для досліджуваного матеріалу [47].

Однак навіть при точному виконанні всіх процедур можливі відхилення. Якщо результати не відповідають очікуванню, це може бути наслідком дефектів у структурі матеріалу, таких як пористість або наявність сторонніх включень. Крім того, порушення умов зберігання або транспортування зразків також здатні вплинути на щільність. У таких випадках виконуються додаткові дослідження для виявлення причин невідповідностей [47].

Ще одним важливим аспектом є перевірка відповідності результатів досліджень вимогам стандарту. Для цього кожен тест виконується на кількох зразках (зазвичай не менше п'яти), що дозволяє отримати статистично обґрунтоване середнє значення. Аналізуються також розбіжності між окремими вимірюваннями, адже значні відхилення можуть свідчити про проблеми з однорідністю матеріалу або похибки під час виконання тестів [47].

На завершальному етапі результати вимірювань використовуються для підтвердження або спростування якості матеріалу. Графічні залежності, що створюються на основі отриманих даних, демонструють, як досліджуваний матеріал поводить себе в умовах контрольованих експериментів. Вони можуть

також слугувати основою для подальшого аналізу та оптимізації технології виробництва [47].

Таким чином, метод гідростатичного зважування є надійним і точним засобом визначення щільності ПКМ, який дає змогу всебічно оцінити якість матеріалу, виявити потенційні дефекти та забезпечити відповідність продукції технічним стандартам. Завдяки своїй чутливості до найменших змін у масі та об'ємі цей метод залишається незамінним у сучасних дослідженнях композитів [47].

Обробка результатів гідростатичного зважування передбачає розрахунок щільності зразка за формулою (2.6) [47]:

$$\rho = \frac{m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}} - m_{\text{у воді}}} \cdot \rho_{\text{води}} \quad (2.6)$$

де $m_{\text{сух}}$ – маса зразка у повітрі, $m_{\text{у воді}}$ – маса зразка у воді, а $\rho_{\text{води}}$ – густина води при заданій температурі. Формула враховує різницю між масою зразка в повітрі та його привидною масою у воді, яка прямо пов'язана з об'ємом витісненої рідини.

2.5 Аналіз мікроструктури

Проведення первинного аналізу структури здійснюється за допомогою оптичної мікроскопії. Цей метод дозволяє оцінити основні елементи структури, такі як армуючі волокна, наявність порожнин, тріщин або інших дефектів, які можуть впливати на фізико-механічні властивості матеріалу. Для отримання достовірних результатів застосовуються мікроскопи зі змінним збільшенням, яке зазвичай варіюється у межах 50-500 разів. Однією з ключових переваг таких пристроїв є можливість точного налаштування освітлення, що дозволяє досліджувати навіть ті зразки, які мають низький

контраст або неоднорідну поверхню. Це забезпечує якісну візуалізацію та дозволяє виявити загальні дефекти структури [49, 50].

Більш поглиблені дослідження здійснюються з використанням скануючого електронного мікроскопа МИМ-7 (рис. 2.4), який забезпечує надвисоку роздільну здатність і дозволяє детально аналізувати мікроструктуру ПКМ [49, 50].



Рисунок 2.4 – Мікроскоп МИМ-7 [49, 50]

Одним із важливих аспектів підготовки зразка є забезпечення його електропровідності. Оскільки більшість полімерних матеріалів є діелектриками, їх поверхня покривається тонким шаром провідного матеріалу, найчастіше золота, платини чи інших металів, методом вакуумного напилення. Цей крок необхідний для уникнення накопичення зарядів, які можуть спотворювати результати аналізу [50].

Додатково до мікроскопії може застосовуватися рентгеноструктурний аналіз, що дозволяє дослідити фазовий склад. Цей метод дає змогу визначити, які фази присутні в матеріалі, і оцінити їх стабільність за різних умов

експлуатації. Рентгеноструктурний аналіз є особливо корисним для композитів, у яких наповнювачі мають здатність змінювати свою кристалічну структуру під впливом механічних навантажень або температурних коливань. Використовуючи цей підхід, можна не лише підтвердити гомогенність матеріалу, але й оцінити вплив окремих компонентів на загальні властивості [49].

Перед початком аналізу важливо виконати правильну підготовку зразків. Для оптичної мікроскопії зразок розміщують на предметному столику та налаштовують освітлення відповідно до особливостей матеріалу. Дослідження розпочинається з малих збільшень, що дає можливість оцінити загальний розподіл волокон, виявити дефекти у матриці та перевірити однорідність матеріалу. У процесі переходу до великих збільшень фокус спрямовується на конкретні ділянки, які можуть становити інтерес із точки зору потенційного виникнення дефектів або зон напруження. Це дозволяє отримати цілісну картину структури, від загальних характеристик до детального вивчення окремих мікрозон [50, 51].

Скануюча електронна мікроскопія вимагає додаткових налаштувань. Після напилення провідного покриття зразок розміщують у вакуумній камері мікроскопа, де проводиться аналіз. Використовуючи низьковольтне електронне випромінювання, можна досягти високої роздільної здатності та отримати зображення мікроструктури з точністю до кількох нанометрів. Особливо важливим є дослідження зон міжфазної взаємодії волокон і матриці, оскільки саме тут часто виникають локальні концентрації напружень, які можуть призводити до утворення тріщин або розшарувань [51].

Рентгеноструктурний аналіз, як правило, виконується після отримання базових даних мікроскопічних досліджень. Спеціальне обладнання генерує рентгенівське випромінювання, яке взаємодіє зі зразком і дає змогу визначити кристалічну структуру наповнювачів та інших компонентів композиту. Отримані результати аналізуються для виявлення стабільності фазового

складу матеріалу та його змін під впливом механічного або температурного впливу [51].

Кожен з етапів аналізу є важливим для отримання повної картини властивостей зразка. Підхід, що передбачає послідовне застосування різних методів – від оптичної мікроскопії до рентгеноструктурного аналізу – забезпечує багатогранне розуміння матеріалу. Це не лише дозволяє виявити потенційні недоліки структури, але й сприяє вдосконаленню технології виробництва, а також розширенню можливостей застосування у складних умовах експлуатації.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі детально описано методику проведення випробувань заготовок з ПКМ, які використовувалися в рамках експериментальних досліджень. Окремо розглянуті випробування на механічну міцність зразків вуглепластика при поперечному згині, випробування на стиск при різних температурах, випробування на розтяг, визначення щільності отриманих зразків, а також аналіз макро- та мікроструктури матеріалу. Наведено дані щодо складу матеріалів, їх фізико-механічних властивостей і технологічних процесів, що використовуються для їх виготовлення. Також приведено зображення приладів, які будуть використовуватись в рамках даної роботи.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Вибір технології

У якості основних технологій виготовлення склопластику та кевлар-карбонового пластику було обрано ручне та вакуумне формування (див. пункт 1.5.1 і 1.5.2).

3.2 Виготовлення зразків

Тканий матеріал, такий як склотканина або кевлар-карбон, заздалегідь було розкрито у необхідний розмір. Детальний склад зразків наведено у таблиці 3.1. Для просочення матеріалу епоксидною смолою з затверджувачем, використовувався поролоновий валик. Після просочення шари матеріалу викладали на скляну основу, оброблену розділювальним шаром воску, що запобігало їхньому склеюванню зі склом.

Таблиця 3.1

Склад досліджуваних зразків

№ зразка	Наповнювач	Матриця	Технологія виготовлення
1	Скловолокно щільністю 200 г/м ² (десять шарів)	Епоксидна смола Larit L-285 – 70%; затверджувач H-285 – 30%.	Ручне формування
2	Арамідно-вуглецеве волокно щільністю 200 г/м ² (десять шарів)	Епоксидна смола Larit L-285 – 70%; затверджувач H-285 – 30%.	Ручне формування

Продовження таблиці 3.1

3	Скловолокно щільністю 200 г/м ² (десять шарів)	Епоксидна смола Larit L-285 – 70%; затверджувач H-285 – 30%.	Вакуумне формування
4	Арамідно-вуглецеве волокно щільністю 200 г/м ² (десять шарів)	Епоксидна смола Larit L-285 – 70%; затверджувач H-285 – 30%.	Вакуумне формування

Процес виготовлення буде показано на прикладі зразків № 2 та № 4.

Першим кроком являється укладання розкрової тканини матеріалу (рис. 3.1).

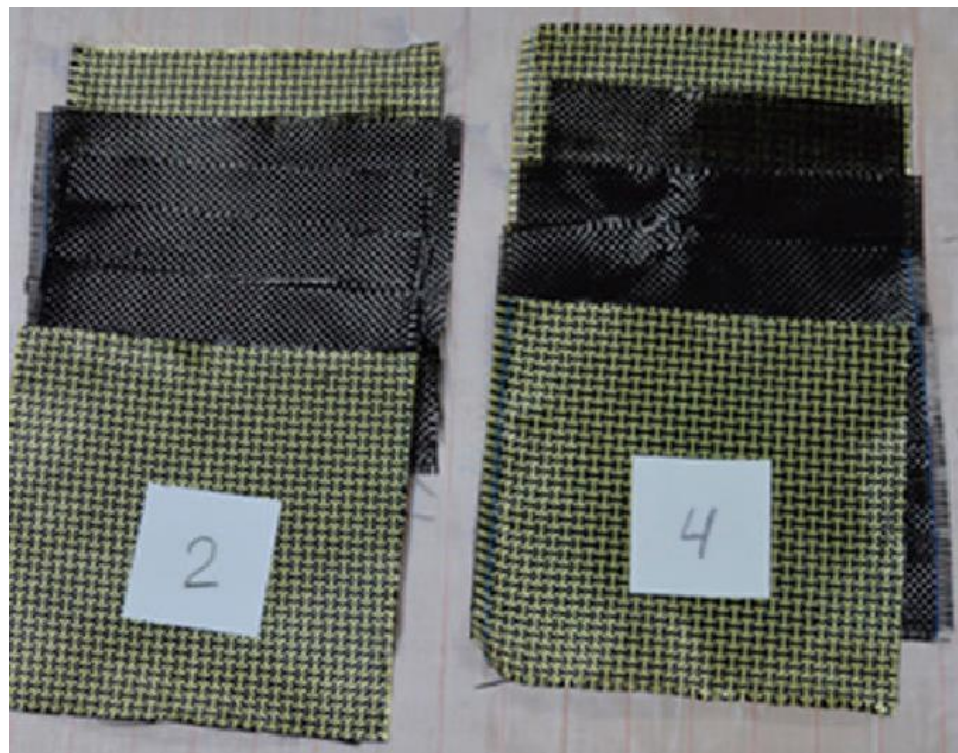


Рисунок 3.1 – Укладання розкрової тканини матеріалу для зразків №2 та №4

Після укладання шарів тканини поролоновий валик просочує їх епоксидною смолою Larit L-285 (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Тканина, просочена епоксидною смолою Larit L-285 для зразків №2 та №4

Наступник крок: залишки епоксидної смоли видаляються за допомогою жертвовної тканини (рис. 3.3).

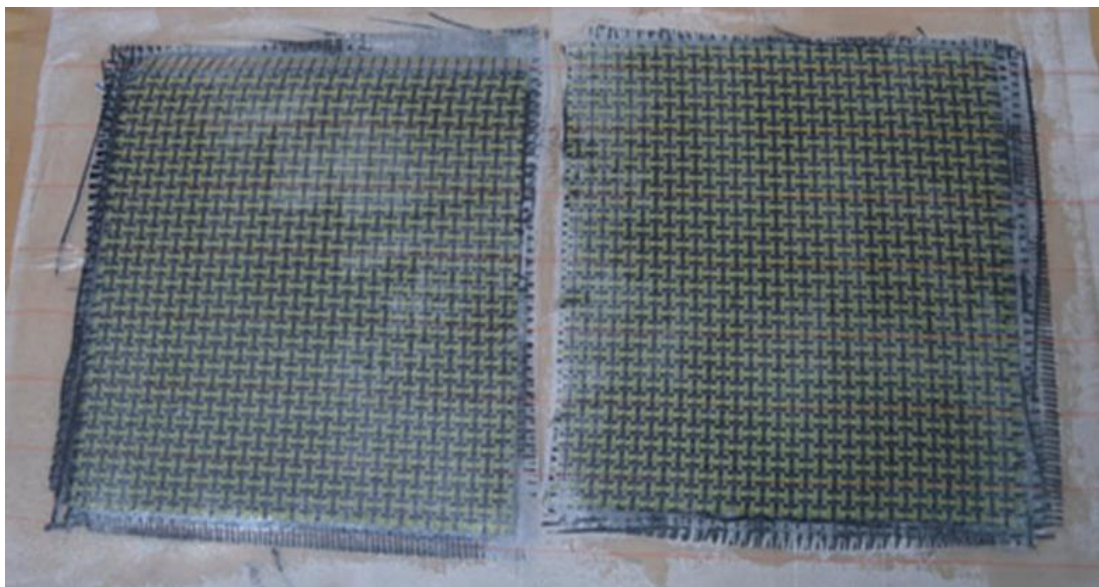


Рисунок 3.3 – Видалення залишків Larit L-285 зі зразків № 2 та № 4 за допомогою жертвовної тканини

Переходячи до зразків № 3 та № 4, для видалення повітря з них застосовується перфорована поліетиленова плівка. Рівномірний тиск для кращого вакуумування зразків № 3 та № 4 забезпечується за допомогою агро-волокна (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Укладання агро-волокна

Далі виконується герметизація вакуумного пакета. Це робиться за рахунок приклеювання поліетиленової плівки по краях скла ізобутиловою клейкою стрічкою (рис. 3.5).



Рисунок 3.5 – Вакуумування зразків № 3 та № 4

Вакуумування матеріалів №3 і №4 здійснювали за допомогою вакуумного насоса протягом 5 годин при температурі 24 °С. Розпакування проводилось після 20 годин витримування.

3.3 Випробування на згин

Випробування на згин проводились згідно ДСТУ EN ISO 14125:2019 Поліетиленові пластикові композити. Визначення властивостей згинання (EN ISO 14125:1998, IDT; ISO 14125:1998, IDT), який регламентує методику проведення тестів на вигин за нормальних, підвищених і знижених температур. Тестування здійснювали на випробувальній машині МПП-100 (рис. 2.1) у сертифікованій лабораторії кафедри опору матеріалів СумДУ.

З результатами випробування на згин можна ознайомитись в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Результати випробування на згин

№ зразка	Габарити зразка, мм	Модуль пружності при згині E_f , ГПа	Максимальна сила F_{max} , Н	Межа міцності на згин $\sigma_{згин}$, МПа
1	100x20x2	25	3500	320
2	100x20x2	30	4500	420
3	100x20x2	27	3800	350
4	100x20x2	32	4800	450

3.4 Випробування на стиск

Випробування на стиск проводились згідно ДСТУ EN ISO 604:2019 Пластмаси. Визначення властивостей під час стискання (EN ISO 604:2003, IDT; ISO 604:2002, IDT), який регламентує методику проведення тестів на вигин за нормальних, підвищених і знижених температур. Тестування

здійснювали на випробувальній машині МПП-100 (рис. 2.1) у сертифікованій лабораторії кафедри опору матеріалів СумДУ

З результатами випробування на згин можна ознайомитись в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Результати випробування на стиск

№ зразка	Поперечний переріз мм ²	Модуль пружності при стиску E_f , ГПа	Максимальна сила стиску F_{max} , Н	Межа міцності на стиск $\sigma_{стиск}$, МПа	Деформація при максимальному зусиллі, %
1	40	8,5	2500	62,5	2,2
2	40	9	2700	67,5	2,3
3	40	8,7	2600	65	2,25
4	40	9,2	2800	70	2,35

3.5 Випробування на розтяг

Випробування на розтяг проводились згідно ДСТУ EN ISO 527-1:2017 Пластмаси. Визначення властивостей під час розтягування. Частина 1. Загальні принципи (EN ISO 527-1:2012, IDT; ISO 527-1:2012, IDT). Тестування здійснювали на випробувальній машині МПП-100 (рис. 2.1) у лабораторії СумДУ. З результатами випробування на згин можна ознайомитись в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Результати випробування на розтяг

№ зразка	Поперечний переріз мм ²	Модуль пружності при розтязі E_f , ГПа	Максимальна сила розтягування F_{max} , Н	Межа міцності на розтяг $\sigma_{розтяг}$, МПа	Відносне видовження при максимальному зусиллі, %
1	40	18,5	4000	100	2,8
2	40	19	4200	105	3
3	40	18,7	4100	102,5	2,9
4	40	19,5	4400	110	3,1

3.6 Визначення щільності

Визначення щільності зразків проводилось згідно ДСТУ EN ISO 1183-1:2022 Пластмаси. Методи визначення щільності непористих пластмас. Частина 1. Методи занурення, рідинного пікнометра та титрування (EN ISO 1183-1:2019, IDT; ISO 1183-1:2019, IDT). Тестування здійснювали на аналітичних вагах Shimadzu AUW-D (рис. 2.3) у лабораторії СумДУ.

З результатами визначення щільності можна ознайомитись в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Результати визначення щільності

№ зразка	Вага зразка в повітрі m_1 , г	Вага зразка у воді m_2 , г	Щільність зразка ρ , г/см ³
1	4,8	3,2	3,01
2	4,6	3,1	3,06
3	4,7	3,15	3,03
4	4,9	3,25	3,11

3.7 Аналіз мікроструктур

З використанням металографічного мікроскопу МИМ-7 (рис. 2.4) при прямому освітленні було досліджено поверхню випробуваних зразків зі збільшенням в 100 разів.

Мікрофотографію поверхні зразка № 2 зображено на рисунку 3.8.

Мікрофотографію поверхні зразка № 4 зображено на рисунку 3.9.

Результати мікроаналізу демонструють наявність повітряних включень на поверхні зразка № 2 та їх відсутність на поверхні зразка № 4. Це свідчить про те, що відсутність вакуумування призводить до зниження фізико-механічних властивостей ПКМ.



Рисунок 3.8 – Мікрофотографія поверхні зразка № 2

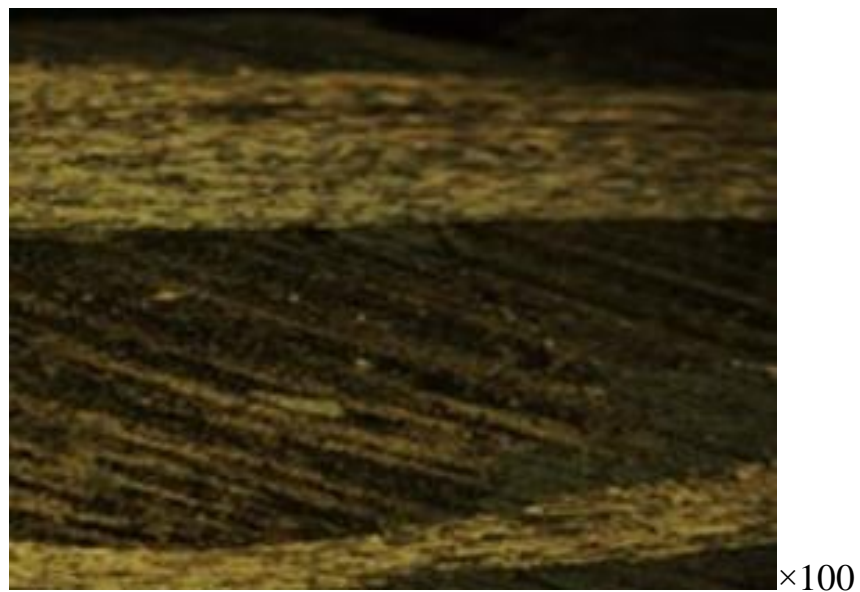


Рисунок 3.9 – Мікрофотографія поверхні зразка № 4

Висновки до розділу 3

У ході емпіричних досліджень було виготовлено чотири зразки ПКМ розміром $100 \times 20 \times 2$ мм для оцінки їх фізико-механічних характеристик. Усі випробування проводили відповідно до чинних стандартів, а саме:

1. Випробування на згин згідно з ДСТУ EN ISO 14125:2019 Поліетиленові пластикові композити. Визначення властивостей згинання (EN ISO 14125:1998, IDT; ISO 14125:1998, IDT).

Визначено: максимальна межа міцності на згин була виявлена у зразка № 4: десятишаровий арамідно-вуглецевий пластик, виготовлений за технологією вакуумного формування ($\sigma_{\text{згин}} = 450$ МПа, $E_f = 32$ ГПа). Найменшу ж межу міцності на згин показав зразок № 1: склопластик, створений ручною формовкою ($\sigma_{\text{згин}} = 320$ МПа, $E_f = 27$ ГПа).

2. Випробування на стиск згідно з ДСТУ EN ISO 604:2019 Пластмаси. Визначення властивостей під час стискання (EN ISO 604:2003, IDT; ISO 604:2002, IDT).

Результат: максимальна межа міцності на стиск була виявлена у зразка № 4: десятишаровий арамідно-вуглецевий пластик, виготовлений за технологією вакуумного формування ($\sigma_{\text{стиск}} = 70$ МПа, деформація при максимальному зусиллі = 2,35 %). Найменшу ж межу міцності на стиск показав зразок № 1: склопластик, створений ручною формовкою ($\sigma_{\text{стиск}} = 62,5$ МПа, деформація при максимальному зусиллі = 2,2 %).

3. Випробування на розтяг згідно з ДСТУ EN ISO 527-1:2017 Пластмаси. Визначення властивостей під час розтягування. Частина 1. Загальні принципи (EN ISO 527-1:2012, IDT; ISO 527-1:2012, IDT).

Результат: максимальна межа міцності на розтяг була виявлена у зразка № 4: десятишаровий арамідно-вуглецевий пластик, виготовлений за технологією вакуумного формування ($\sigma_{\text{розтяг}} = 110$ МПа, відносне видовження при максимальному зусиллі = 3,1 %). Найменшу ж межу міцності на розтяг показав зразок № 1: склопластик, створений ручною формовкою ($\sigma_{\text{розтяг}} = 100$ МПа, відносне видовження при максимальному зусиллі = 2,8 %).

4. Визначення щільності згідно з ДСТУ EN ISO 1183-1:2022 Пластмаси. Методи визначення щільності непористих пластмас. Частина 1. Методи

занурення, рідинного пікнометра та титрування (EN ISO 1183-1:2019, IDT; ISO 1183-1:2019, IDT).

Визначено: максимальна щільність була виявлена у зразка № 4: десятишаровий арамідно-вуглецевий пластик, виготовлений за технологією вакуумного формування ($\rho = 3,11 \text{ г/см}^3$). Найменшу ж межу міцності на згин показав зразок № 1: склопластик, створений ручною формовкою ($\rho = 3,01 \text{ г/см}^3$).

Аналіз поверхонь зразків після випробувань проводився за допомогою металографічного мікроскопа МИМ-7 із 100-кратним збільшенням у режимі прямого освітлення. У результаті мікроаналізу було виявлено, що на поверхні зразка №2, виготовленого методом ручного формування, присутні повітряні включення, що свідчить про певні недоліки цієї технології. У той же час, на зразку №4, виготовленому методом вакуумного формування, подібних дефектів не зафіксовано, що вказує на перевагу вакуумної технології у забезпеченні високої якості матеріалу.

Результати досліджень показали, що фізико-механічні властивості зразків значною мірою залежать від методу виготовлення, складу матеріалу та характеру прикладених навантажень. Зразки, отримані за допомогою вакуумного формування, демонстрували вищі значення межі міцності при стиску, розтягуванні та згині завдяки більш однорідній структурі матеріалу. Щільність зразків залишалася в межах, задовільних для ПКМ, однак варіювалася залежно від складу і технологічних параметрів виробництва.

Порівняльний аналіз мікроструктур підтвердив, що використання вакуумного формування сприяє покращенню якості композитного матеріалу завдяки зменшенню кількості повітряних включень і забезпеченню рівномірного розподілу полімерної матриці.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Загальні відомості

Застосування кевлар-карбону і склопластиків у виробничих процесах вимагає глибокого економічного аналізу через їхній значний вплив на загальну собівартість продукції. Ефективність використання цих матеріалів визначається співставленням початкових витрат на сировину та технології з потенційними вигодами від зниження ваги, підвищення надійності та продовження строку служби готових виробів. Поряд із цим, враховуються не лише витрати на придбання матеріалів, але й на їхню обробку, виготовлення готових елементів та можливі економічні переваги під час експлуатації.

Кевлар-карбон виділяється високою вартістю початкових інвестицій через технологічну складність його обробки. Його висока ціна обумовлена специфікою сировини – дорожчею кевларових і вуглецевих волокон, а також необхідністю застосування спеціалізованого обладнання для виготовлення виробів. Проте перспективи зниження ваги конструкцій, економії палива в авіаційній та автомобільній сферах і продовження експлуатаційного ресурсу часто переважають початкові витрати. Наприклад, впровадження цього матеріалу у виробництві автомобільних компонентів дозволяє скоротити експлуатаційні витрати до 15%, що є важливим для техніки з високими вимогами до продуктивності та ефективності [52, 53].

Склопластики, навпаки, являють собою доступнішу альтернативу, що робить їх привабливими для масового виробництва. Водночас їх економічна доцільність оцінюється через співвідношення вартості та тривалості експлуатації. Зазвичай виготовлення деталей із цих матеріалів обходиться дешевше, оскільки процес їхньої обробки менш вимогливий до обладнання. Проте вироби з них поступаються кевлар-карбону за довговічністю, що зумовлює необхідність аналізу життєвого циклу кожного виробу. Наприклад,

у будівельній галузі, де склопластики широко застосовуються, важливо враховувати витрати на монтаж та ймовірну заміну через знос матеріалу [54].

Економічний аналіз їх використання залежить також від масштабів виробництва. Найкращі результати від застосування кевлар-карбону спостерігаються у високотехнологічних галузях, таких як авіація та транспорт, де кожне зменшення ваги конструкцій приносить суттєву вигоду. Склопластики ж виявляються рентабельними у великих серіях виробництва завдяки доступності сировини та низьким витратам на обробку, що підвищує загальну рентабельність.

4.2 Розрахунок економічних витрат

Вартість витрачених в процесі експериментів матеріалів розраховується за формулою (4.1):

$$V_m = V \cdot C, \text{ грн} \quad (4.1)$$

де, V – витрата даного виду матеріальних ресурсів, одиниць вимірювання;

C – ціна за одиницю вимірювання даного виду матеріальних ресурсів, грн.

Розрахунок представлено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Вартість матеріалів для НДР

Назва матеріалу	Одиниця вимірювання	Ціна за одиницю виміру, грн	Фактична кількість	Сума, грн
Карбон-кевлар	м ²	3180,00	1	3180,00
Скловолокно	м ²	1560,00	1	1560,00
Larit L-285	кг	950,00	0,5	475,00
Разом				5215,00

Вартість витраченої електроенергії розраховується аналогічно витратам на матеріали. Витрати на електроенергію розраховуються на основі вартості потужності обладнання, часу роботи і ціни 1 кВт·год, за формулою (4.2):

$$V_e = M \cdot n \cdot T \cdot Ц, \text{ грн} \quad (4.2)$$

де, M – потужність обладнання або електроприладу (за паспортом), кВт;
 n – кількість застосованого обладнання, шт.; T – час роботи обладнання, год.;

$Ц$ – ціна 1 кВт·год електроенергії, грн.

Розрахунок представлено в таблиці 4.2..

Таблиця 4.2

Вартість електроенергії

Найменування матеріалу	Потужність, кВт	Час роботи обладнання, год.	Ціна 1 кВт·год електроенергії, грн	Сума, грн.
Вакуумний насос	0,5	5	1,68	4,2
МПП-100	1,9	5	1,68	15,96
Разом				20,16

Розрахунок оплати праці робітникам представлено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Витрати на заробітну плату

Посада	Погодинна ставка робітника, грн	Час роботи, год	Сума, грн
Доцент	864,32	12	172,86
Разом			172,86

25% від суми прямих витрат має займати список інших витрат:

- опалення,

- освітлення,
- ремонт будівель та обладнання,
- амортизація
- канцелярія тощо.

Загальний кошторис витрат на НДР поданий у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Кошторис витрат на НДР у магістерській роботі

Найменування статті витрат	Сума, грн	Частка даної статті у загальній сумі витрат, %
Вартість матеріалів	5215,00	96
Вартість електроенергії	20,16	0,3
Витрати на заробітну плату	172,86	3,7
Разом	5405,02	

Висновки до розділу 4

Економічний аналіз використання ПКМ залежить також від масштабів виробництва. Найкращі результати від застосування кевлар-карбону спостерігаються у високотехнологічних галузях, таких як авіація та транспорт, де кожне зменшення ваги конструкцій приносить суттєву вигоду. Склопластики ж виявляються рентабельними у великих серіях виробництва завдяки доступності сировини та низьким витратам на обробку, що підвищує загальну рентабельність.

Підсумковий кошторис витрат на НДР для магістерської роботи, у який входять витрати на матеріали, витрати на електроенергію та витрати на заробітну плату, складає 5 405,02 грн.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ, ДОВКІЛЛЯ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

5.1 Загальні види небезпек при виробництві полімерних композитних матеріалів

Виробництво полімерних композитних матеріалів супроводжується низкою потенційних небезпек, які можуть негативно впливати на здоров'я працівників та безпеку виробничих процесів. Основними видами небезпек є хімічні, фізичні та ергономічні фактори.

Хімічні небезпеки пов'язані з використанням різноманітних смол, затверджувачів та розчинників, які можуть виділяти токсичні пари та аерозолі. Вдихання цих речовин може призвести до подразнення дихальних шляхів, алергічних реакцій та інших захворювань. Роботодавець зобов'язаний забезпечити контроль за концентрацією шкідливих речовин у повітрі робочої зони та вживати заходів для їх зниження до допустимих рівнів [55].

Фізичні небезпеки включають вплив пилу, що утворюється під час механічної обробки композитних матеріалів. Тонкодисперсний пил може проникати в легені, спричиняючи респіраторні захворювання. Крім того, можливі механічні травми від обладнання та інструментів. Необхідно впроваджувати заходи щодо зниження запиленості та забезпечення безпечної експлуатації обладнання [56].

Ергономічні небезпеки виникають через незручні робочі пози, підйом важких вантажів та повторювані рухи, що можуть призвести до м'язово-скелетних розладів. Служба охорони праці на підприємстві повинна розробляти та впроваджувати заходи для покращення ергономіки робочих місць [57].

5.2 Заходи з техніки безпеки

Захист органів дихання працівників, які працюють з ПКМ забезпечується використанням респіраторів, що запобігають вдиханню шкідливих парів і пилу. Роботодавець зобов'язаний забезпечити працівників засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) відповідно до встановлених норм. [57]

Для захисту шкіри від контакту з агресивними хімічними речовинами застосовуються спеціальні рукавички, комбінезони та інші захисні покриття. Це знижує ризик дерматологічних захворювань та інших ушкоджень шкіри [55].

Захист очей забезпечується використанням захисних окулярів або щитків, які запобігають потраплянню хімічних речовин та механічних частинок. Це особливо важливо при роботі з леткими сполуками та під час механічної обробки матеріалів [55].

Для запобігання впливу шуму на слух працівників використовуються протишумові навушники або вкладиші. Це зменшує ризик розвитку професійних захворювань слуху [55].

Роботодавець повинен забезпечити працівників спеціальним одягом, взуттям та іншими ЗІЗ відповідно до Положення про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту [57].

Контроль за використанням ЗІЗ здійснює служба охорони праці підприємства, яка відповідає за організацію та координацію заходів з охорони праці [56].

Навчання працівників правильному використанню ЗІЗ є обов'язковим і проводиться відповідно до затверджених програм. Це підвищує ефективність захисту та знижує ризик нещасних випадків [57].

Регулярна перевірка стану та придатності ЗІЗ забезпечує їх ефективність і своєчасну заміну у разі зносу або пошкодження.

5.3 Протипожежна безпека у виробництві полімерних композитних матеріалів

Виробництво полімерних композитних матеріалів супроводжується використанням легкозаймистих речовин: смол, затверджувачів, розчинників. Для попередження загорянь у таких умовах необхідно встановлювати системи пожежної сигналізації з чутливими датчиками, що реагують на дим, температуру або концентрацію горючих парів. Системи пожежогасіння мають бути автоматизованими, з використанням інертних газів або порошкових засобів, щоб запобігти поширенню вогню без ризику додаткових пошкоджень обладнання чи матеріалів. Обладнання та установки, які працюють із легкозаймистими матеріалами, потрібно розташовувати у вибухонебезпечних зонах, оснащених вентиляційними системами, які забезпечують безперервну екстракцію парів розчинників [55].

Планування виробничих приміщень має передбачати створення пожежних зон та протипожежних перегородок із негорючих матеріалів, які витримують температурний вплив щонайменше 90 хвилин. Розміщення обладнання повинно забезпечувати швидкий доступ до евакуаційних виходів і пожежного інвентарю. На кожній ділянці необхідно встановити аварійні вимикачі живлення для негайного відключення електромереж у разі загрози пожежі [58].

Технологічні процеси, пов'язані з нагріванням матеріалів (наприклад, у печах або автоклавах), мають супроводжуватися постійним моніторингом температури та використанням термозахисних датчиків, що унеможливають перегрів обладнання. Використання обладнання повинно відповідати класу захисту від вибухів та коротких замикань. Для зменшення ризику іскроутворення слід заземлювати всі установки, особливо ті, які використовуються для обробки вуглепластиків, що можуть накопичувати статичний заряд [57].

Персонал має проходити регулярне навчання з правил поводження з горючими матеріалами та користування засобами пожежогасіння. У навчальній програмі передбачаються тренування з евакуації, що мають проводитися щонайменше раз на рік. Для нових працівників впроваджують інструктаж перед початком роботи. Для цього на кожній ділянці організуються навчальні стенди із засобами пожежогасіння, включно з вогнегасниками, азбестовими ковдрами, піском та іншим протипожежним інвентарем [57].

5.4 Засоби індивідуального захисту

Робота з полімерними композитними матеріалами, такими як вуглепластики та склопластики, вимагає використання ефективних засобів індивідуального захисту для мінімізації впливу шкідливих факторів на працівників. ЗІЗ підбираються залежно від технологічних процесів, що виконуються, та специфіки небезпечних речовин, які використовуються у виробництві. Для захисту органів дихання від парів розчинників, пилу та інших шкідливих речовин необхідно застосовувати фільтрувальні респіратори з активованим вугіллям або протигази з відповідними фільтрами, що відповідають класу безпеки хімічних сполук. У разі роботи з токсичними смолами чи затверджувачами можуть застосовуватися комбіновані засоби для захисту дихання та очей [55].

Для запобігання контакту шкіри з шкідливими хімічними речовинами використовуються рукавички з хімічно стійких матеріалів, таких як неопрен або нітрил. Важливою вимогою є регулярна перевірка рукавичок на цілісність, оскільки навіть мікротріщини можуть спричинити проникнення небезпечних речовин. Захисний одяг має бути виготовлений із матеріалів, що не сприяють накопиченню статичного заряду, зокрема при роботі з вуглепластиками, які є провідниками електрики. Для уникнення пошкоджень шкіри при роботі з

волокнами склопластику рекомендується використовувати костюми зі спеціальним пиловідштовхувальним покриттям [56].

Захист очей забезпечується герметичними окулярами або щитками, які попереджають потрапляння пилу, дрібних часток або бризок хімічних речовин. Під час операцій, пов'язаних із різанням, шліфуванням або свердлінням матеріалів, також необхідно використовувати щитки для обличчя, які захищають від механічних травм. У роботах із високою інтенсивністю світлового випромінювання (наприклад, лазерне різання) працівники повинні носити окуляри з ультрафіолетовими фільтрами [55].

Шумозахисні навушники або беруші використовуються у разі роботи з обладнанням, рівень шуму якого перевищує встановлені норми. Додатково слід забезпечити захист від вібрацій у разі тривалої роботи з верстатами чи інструментами, що створюють сильне вібраційне навантаження. Для цього застосовуються антивібраційні рукавички та спеціальні устілки [56].

Захисне взуття повинно мати антиковзку підошву та бути стійким до хімічних речовин. Для роботи у вибухонебезпечних зонах взуття повинно бути електростатичним і забезпечувати заземлення, що мінімізує ризик іскроутворення. У приміщеннях, де використовуються горючі матеріали, додатково застосовують чоботи з негорючих матеріалів [57].

5.5 Заходи з охорони навколишнього середовища

Виробництво полімерних композитних матеріалів, таких як вуглепластики та склопластики, супроводжується утворенням значних обсягів відходів, зокрема шкідливих газів, дрібнодисперсного пилу та залишків смол. Для мінімізації впливу на навколишнє середовище впроваджуються багаторівневі системи очищення повітря. На стадії виробництва застосовуються локальні витяжні системи з високоефективними фільтрами або активованим вугіллям, що забезпечують очищення від дрібнодисперсних частинок та летких органічних сполук. Пил, утворений у процесах різання чи

шліфування, збирається у герметичні контейнери, які виключають розповсюдження у повітря [55].

Рідкі відходи, такі як залишки смол, затверджувачів чи розчинників, повинні збиратися в окремі ємності з корозійностійких матеріалів. Вони зберігаються на спеціальних майданчиках, обладнаних системами запобігання витокам, включно з вторинними бар'єрами та дренажними системами. Усі хімічні відходи передаються на утилізацію до ліцензованих підприємств, які мають необхідне обладнання для їхньої нейтралізації або переробки. Заборонено зливати небезпечні відходи у загальну каналізаційну систему, що регламентується чинними екологічними нормами [58].

Значну увагу приділяють повторному використанню матеріалів. Наприклад, відходи вуглепластиків можуть бути подрібнені та використані як наповнювач у виробництві нових композитних матеріалів. Склопластикові відходи після дроблення можуть застосовуватися у будівництві як армувальні елементи. Для реалізації програм з повторного використання матеріалів впроваджуються технології фрагментації та подальшої обробки відходів [57].

Стічні води, що утворюються у виробничих процесах, проходять попереднє очищення перед скиданням у систему каналізації. Для цього використовуються хімічні та механічні методи очищення, включно з коагуляцією, фільтрацією та адсорбцією шкідливих речовин. Особливо небезпечні компоненти, наприклад залишки смол чи затверджувачів, вилучаються на етапі попередньої обробки, а потім передаються на утилізацію. Регулярний моніторинг стічних вод здійснюється відповідно до екологічних стандартів [59].

5.6 Організація громадської безпеки та навчання персоналу

На кожному підприємстві створюється служба охорони праці, яка не лише контролює дотримання правил, а й відповідає за організацію навчання працівників. У навчальні програми включають ознайомлення зі специфікою

роботи з небезпечними речовинами, правилами експлуатації обладнання, евакуаційними процедурами та використанням ЗІЗ. Працівники мають проходити первинний інструктаж при прийомі на роботу, повторні інструктажі кожні пів року, а також цільові тренування у разі впровадження нових технологій чи обладнання [55].

Ефективна організація громадської безпеки передбачає проведення регулярних тренувань із реагування на надзвичайні ситуації, включаючи пожежі, хімічні викиди або вибухи. Такі навчання повинні включати практичні заняття з використання протигазів, евакуації працівників через аварійні виходи та ліквідації локальних осередків небезпеки за допомогою пожежогасіння або нейтралізації розливів хімічних речовин. Результати навчань документуються, і на їх основі проводиться аналіз ефективності готовності персоналу до екстрених ситуацій [56].

На підприємствах створюються куточки безпеки, обладнані наочними матеріалами, такими як плакати, стенди, інструкції та відеоуроки. Вони спрямовані на підвищення обізнаності працівників щодо безпечної поведінки на робочому місці. Особливу увагу приділяють забезпеченню доступності цих матеріалів для всіх працівників, включаючи осіб з обмеженими можливостями [59].

Контроль за виконанням вимог громадської безпеки здійснюється через систему регулярного аудиту. Під час перевірок оцінюється технічний стан обладнання, дотримання працівниками інструкцій з безпеки, своєчасне проходження інструктажів та наявність ЗІЗ. Результати аудитів враховуються при коригуванні заходів з охорони праці та впровадженні додаткових програм навчання [58].

Окрему увагу приділяють психологічній підготовці персоналу. Організуються тренінги, які сприяють зниженню рівня стресу та навчають швидко приймати рішення в кризових ситуаціях. Досвідчені працівники

залучаються до менторських програм, де передають знання і навички новачкам, створюючи колективну культуру безпеки [57].

5.6 Потенційні небезпеки карбонового пилу

Відносно правил безпеки, кевлар-карбоновий пластик відрізняється, щонайменше, своєю електропровідністю, через що він може становити серйозну загрозу для здоров'я працівника. Цей фактор створює критичні ризики в умовах, де працює електричне обладнання, оскільки пил може спричинити коротке замикання чи пошкодження систем. Одним із ключових принципів охорони праці є ідентифікація та попередження потенційних небезпек, серед яких електропровідний пил займає важливу роль [60].

На підприємствах служба охорони праці повинна розробити та впровадити заходи, які дозволять усунути ризики, пов'язані з карбоновим пилом. Зокрема, робочі зони мають бути оснащені вентиляційними системами, здатними ефективно видаляти пил із повітря, не допускаючи його осідання на поверхнях. Накопичення такого пилу в електричних розетках чи інших частинах систем може призводити до утворення іскор, коротких замикань та пошкоджень електрообладнання. Приміщення для обробки матеріалів повинні бути обладнані електроустановками із класом захисту не нижче IP54, що мінімізує контакт пилу з електричними компонентами [60].

При роботі з карбоном обов'язково використовують локальні витяжні пристрої, оснащені фільтрами для затримання дрібнодисперсного пилу. Регулярне очищення робочих поверхонь, інструментів і корпусів обладнання також є важливим елементом попередження ризиків, пов'язаних із накопиченням пилу [60].

Окрім шкоди, якої карбоновий пил може завдати електричним системам, його частинки становлять небезпеку для інших механізмів із контактними поверхнями. Завдяки малій фракції пил може проникати у важкодоступні зони, викликаючи абразивне зношування деталей і знижуючи їх функціональні

властивості. Роботодавець зобов'язаний забезпечити працівників засобами індивідуального захисту, такими як респіратори і спеціальний захисний одяг, а також регулярно проводити моніторинг стану повітря в робочих зонах, щоб запобігти впливу пилу на здоров'я персоналу [60].

Особливу увагу слід приділяти запобіганню накопиченню карбонового пилу у вентиляційних системах. Через його електропровідні властивості можливе виникнення коротких замикань у каналах із вбудованими електродвигунами чи освітлювальними елементами. Регулярне технічне обслуговування вентиляційних систем, включаючи очищення та перевірку ізоляції електричних компонентів, є обов'язковим заходом безпеки [60].

Окрім того, необхідно враховувати ризик накопичення електростатичного заряду на частинках карбонового пилу. Приміщення повинні бути обладнані антистатичними підлоговими покриттями та елементами обладнання. Це дозволяє уникнути неконтрольованого утворення електричних розрядів, які можуть спричинити займання чи вибух [60].

5.7 Заходи на випадок надзвичайних ситуацій

Виробництво ПКМ має високий ризик виникнення надзвичайних ситуацій через використання токсичних хімічних речовин, горючих матеріалів і обладнання, яке працює під високими температурами або тиском. Для мінімізації наслідків таких подій підприємства повинні мати детальний план дій на випадок надзвичайних ситуацій, який враховує специфіку виробничих процесів і потенційні загрози. План включає попереджувальні заходи, алгоритм дій під час надзвичайних ситуацій та дії з ліквідації наслідків [55, 60].

Попереджувальні заходи починаються із регулярної оцінки ризиків. Для цього проводиться аналіз стану обладнання, якості матеріалів і потенційних зон виникнення аварій. Підприємства мають забезпечити функціонування автоматизованих систем моніторингу критичних параметрів: температури,

тиску, концентрації парів розчинників у повітрі. Системи повинні бути обладнані сигналізацією, що автоматично спрацьовує при перевищенні допустимих значень. Крім того, проводяться регулярні технічні огляди вентиляційних систем, систем пожежогасіння та аварійних вимикачів [60].

Під час виникнення надзвичайної ситуації персонал повинен діяти відповідно до заздалегідь розробленого алгоритму. Усі працівники повинні знати порядок повідомлення відповідальних осіб, включаючи службу охорони праці, пожежну службу та місцеві органи влади. На підприємстві встановлюються засоби екстреного оповіщення, включаючи сирени, світлові індикатори та автоматичні повідомлення. Евакуація здійснюється через заздалегідь визначені маршрути, які повинні бути чітко позначені та вільними від перешкод [60].

Особливу увагу приділяють протидії розливам хімічних речовин. На кожній ділянці повинні бути доступні комплекти для локалізації та нейтралізації небезпечних речовин, які включають абсорбуючі матеріали, хімічно стійкі контейнери та засоби захисту. У разі витoku токсичних компонентів персонал використовує спеціальні респіратори, хімічно стійкий одяг і герметичні окуляри. Також передбачаються заходи для обмеження потрапляння шкідливих речовин у стічні води або ґрунт [58].

Регулярне навчання персоналу є ключовим елементом підготовки до надзвичайних ситуацій. Працівники проходять навчання з використання засобів захисту, пожежогасіння, евакуації та першої допомоги. Навчальні заходи включають як теоретичну підготовку, так і практичні тренування, що дозволяють відпрацювати реальні сценарії. Всі навчання фіксуються в документації, а їхня регулярність перевіряється службами охорони праці [57].

Висновки до розділу 5

Були розглянуті основні небезпеки, що виникають у процесі виробництва полімерних композитів, зокрема вплив токсичних хімічних речовин, утворення дрібнодисперсного пилу, ризику загоряння та вибухів. Аналіз нормативної бази показав, що ефективне управління безпекою потребує суворого дотримання правил, викладених у НПАОП, ДСТУ та інших документах.

Виробництво полімерних композитних матеріалів, таких як вуглепластики та склопластики, супроводжується утворенням значних обсягів відходів, зокрема шкідливих газів, дрібнодисперсного пилу та залишків смол. Для мінімізації впливу на навколишнє середовище впроваджуються багаторівневі системи очищення повітря. На стадії виробництва застосовуються локальні витяжні системи з високоефективними фільтрами або активованим вугіллям, що забезпечують очищення від дрібнодисперсних частинок та летких органічних сполук.

Реалізація заходів, таких як організація локальної вентиляції, використання систем автоматичного пожежогасіння, захист розеток від потрапляння в них пилу, застосування засобів індивідуального захисту та впровадження програм навчання працівників, дозволяє значно знизити ризику для здоров'я персоналу та навколишнього середовища.

Виробництво полімерних композитних матеріалів має високий ризик виникнення надзвичайних ситуацій через використання токсичних хімічних речовин, горючих матеріалів і обладнання, яке працює під високими температурами або тиском. Для мінімізації наслідків таких подій підприємства повинні мати детальний план дій на випадок надзвичайних ситуацій, який враховує специфіку виробничих процесів і потенційні загрози.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської кваліфікаційної роботи вивчено вплив складу і технологічних аспектів виробництва на фізико-механічні ПКМ, призначених для пластинчастих пружин.

Дослідження літератури показало, що полімерні композитні матеріали займають одне з провідних місць у сучасному матеріалознавстві завдяки своїм широким можливостям для розробки високонавантажених конструкцій. Їх потенціал зумовлює інтерес до застосування у виготовленні пластинчастих пружин, які успішно використовуються в різних технічних і медичних системах. Аналіз підтвердив, що ефективність цих матеріалів визначається не лише якістю матриці та армувальних компонентів, а й особливостями технологічного процесу.

Для проведення досліджень було розроблено експериментальну методику, що включала створення тестових зразків зі склопластику та кевлар-карбонового пластику розміром $100 \times 20 \times 2$ мм. Випробування виконувались із дотриманням чинних стандартів і стосувалися визначення основних фізико-механічних показників, таких як міцність на розтяг, стиск і згин, а також вимірювання густини.

У ході емпіричних досліджень було встановлено, що технологія вакуумного формування суттєво перевищує за ефективністю метод ручного формування. Зразки, отримані цим методом, демонстрували кращі показники міцності: межа на згин досягла 450 МПа, на стиск – 70 МПа, а на розтяг – 110 МПа. Проведений мікроструктурний аналіз підтвердив, що вакуумне формування дає змогу уникнути дефектів, зокрема порожнин, сприяючи рівномірному розподілу компонентів матриці.

У межах магістерської кваліфікаційної роботи також було виконано розрахунок економічних витрат, які в сукупності склали 5 405,02 грн. Результати економічного аналізу довели доцільність використання

розглянутих полімерних композитів у промислових процесах, адже покращення властивостей матеріалів та зменшення експлуатаційних витрат у майбутньому перевищують стартові фінансові вкладення.

Окремо розглянуто аспекти безпеки праці під час виробництва. Виявлено ризики, пов'язані з токсичністю хімічних речовин, утворенням пилу і загрозою пожеж, які потребують ефективних заходів контролю. Для забезпечення безпеки запропоновано впровадити системи вентиляції, засоби пожежогасіння, індивідуальний захист персоналу та організацію навчання. Це дозволяє звести ризики для здоров'я працівників і довкілля до мінімуму.

Таким чином, результати досліджень у кваліфікаційної магістерської роботи підтверджують, що за допомогою відповідних технологій виготовлення можна створювати полімерні композитні матеріали із фізико-механічними характеристиками, придатними для використання у виробництві пластинчастих пружин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Живіцький М. В. Панель крила літака із композиційних матеріалів : магістерська дис. : 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка / Живіцький Максим Віталійович. – Київ, 2020. – 98 с.
2. Скороход О. В. Удосконалення технологічного процесу відновлення обшивки із композиційних матеріалів сучасних літальних апаратів : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.04 / Національний авіаційний університет. – Київ, 2021. – 184 с.
3. Пристинський С. В. Технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів методом лиття під тиском : дис. . д-ра філософії : 161 - Хімічні технології та інженерія : захист 28.08.24 / Пристинський Сергій Володимирович ; КНУТД. – Київ, 2024. – 160 с.
4. Солдатенков В., Мельник Л. Електропровідні епоксикомпозити з вуглецевими нанотрубками. – 2023. – 4 с.
5. Шапошнікова Є., Демчук Г. Застосування полімерних композиційних матеріалів у протезуванні. Основні небезпеки та способи їх усунення // Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки. – 2020. – С. 242-246.
6. Ossur flex-run with Nike sole. Museum of Design in Plastics: веб-сайт. URL: <https://www.modip.ac.uk/artefact/aibdc-008390> (дата звернення: 10.12.2024).
7. Чайковський С. А. Підвищення механічних властивостей конструкцій з полімерних композиційних матеріалів : магістерська робота / Національний університет «Запорізька політехніка». – Запоріжжя, 2022. – 120 с.
8. Верещага Б. А. Дослідження впливу технології виготовлення, складу ламінату, термічної обробки на фізико-механічні властивості

полімерної, композитної пластинчастої пружини : магістерська робота / Сумський державний університет. – Суми, 2021. – 87 с.

9. Будник О. А., Підвищення фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей триботехнічних політетрафторетиленових композитів методами механічної активації / О. А. Будник та ін. // Проблеми тертя та зношування. – 2014. – № 4. – С. 130–135.

10. Spring Clip. Made-in-China: веб-сайт. URL: https://huilidan.en.made-in-china.com/product/PvdQzokBZbYt/China-Metal-Clip-Metal-Clamp-Spring-Clip-Spring-Clamp.html?pv_id=1if8lg3cm61b&faw_id=1if8lg9m3f24 (дата звернення: 10.12.2024).

11. Semak Inna, Дослідження несучої спроможності авіаційних вуглепластиків із врахуванням експлуатаційних чинників / Inna Semak, Hryhorii Borozenets // Problems of Friction and Wear. – 2 (103). – Р. 56–63.

12. Шостенко С. С. Лінійні п'єзодвигуни в системах автоматики та машинобудівних конструкціях / С. С. Шостенко, Д. Є. Буць // Автоматизація та приладобудування = Automation and Development of Electronic Devices (ADED'2021) : зб. студент. наук. ст. / Харків. нац. ун-т радіоелектроніки ; [редкол. : І. Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2021. – Вип. 2. – С. 121–124.

13. Нещадим В. С. Сумісність біодеградабельних композиційних матеріалів на основі поліетилену [Електронний ресурс] / В. С. Нещадим, В. М. Руденко // К.: Національний авіаційний університет. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <http://er.nau.edu.ua/handle/NAU/42302>.

14. Яровий, О.О. Дослідження впливу складу ламінату на фізико-механічні властивості полімерного матеріалу з епоксидною матрицею [Текст]: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістр; спец.: 132 - матеріалознавство / О.О. Яровий; наук. керівник В.Б. Юскаєв. – Суми: СумДУ, 2020. – 107 с.

15. Мікульонок, І. О. Інноваційне обладнання для приготування та перероблення полімерних матеріалів і гумових сумішей : монографія / І. О. Мікульонок, О. М. Гавва, Л. О. Кривопляс-Володіна. – Київ: НУХТ, 2022. – 139 с.
16. Чобіт М. Р. Мінеральні наповнювачі, модифіковані погонами з дезодораційних колон олійно-жирових виробництв / М. Р. Чобіт, В. П. Васильєв, Ю. В. Панченко // Chemistry, Technology and Application of Substances. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2021. – Том 4. – № 1. — С. 206–212.
17. Старинський П. С. Дослідження застосування різних симуляційних моделей резонансного методу неруйнівного контролю пластин з полімерних композиційних матеріалів : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 131 - прикладна механіка / наук. кер. Д. О. Жигилій. Суми : Сумський державний університет, 2023. – 119 с.
18. Mitschang P., Polymer and composite moulding technologies for automotive applications / P. Mitschang, K. Hildebrandt // Advanced materials in automotive engineering. – Woodhead Publishing, 2012. – P. 210–229.
19. Матеріалознавство та технологія матеріалів (у схемах і завданнях) [Текст]: навч. посіб. / Т.П. Говорун, О.П. Гапонова, С.В. Марченко. — Суми: СумДУ. — 163 с.
20. Куліш Д. В. Дослідження впливу процесу вакуумування на міцність композитного полімерного матеріалу з епоксидною матрицею : магістерська робота / Сумський державний університет. – Суми, 2023. – 68 с.
21. Вивчення основних методів виготовлення конструкцій із полімеркомпозитних матеріалів. Луцький національний технічний університет: веб-сайт. URL: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/%D1%81%D0%B0%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%B0/page23.html (дата звернення: 10.12.2024).

22. Школовий В. В. Розробка технології виготовлення деталей літальних апаратів з полімерних композиційних матеріалів: дипломна робота / В. В. Школовий. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018 – 112 с.
23. Лавров О.В. Застосування полімерних композиційних матеріалів при проектуванні деталей повітряних суден / О.В. Лавров – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. – 78 с.
24. Goren A., Manufacturing of polymer matrix composites using vacuum assisted resin infusion molding / A. Goren, C. Atas // Archives of Materials Science and Engineering. – 2008. – Vol. 34, № 2. – P. 117–120.
25. Hsiao K.-T., Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) in polymer matrix composites / K.-T. Hsiao, D. Heider // Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs). – Woodhead Publishing, 2012. – P. 310–347.
26. Трудове навчання (технічні види праці). 9 клас. Лебедев. History: веб-сайт. URL: <https://uahistory.co/pidruchniki/lebedev-labor-training-technical-types-of-work-9-class-2017/17.php> (дата звернення: 10.12.2024).
27. Budelmann D., Prepreg tack: A review of mechanisms, measurement, and manufacturing implication / Dennis Budelmann, Carsten Schmidt, Dieter Meiners // Polymer Composites. – 2020. – Vol. 41, № 9. – P. 3440–3458.
28. Ahmad J., Introduction to polymer composites / J. Ahmad // Machining of Polymer Composites. – Springer: New York, NY, USA, 2009. – P. 1–35.
29. Natural-fibre thermoset composite prepregs. JEC Composites: веб-сайт. URL: <https://www.jeccomposites.com/news/spotted-by-jec/natural-fibre-thermoset-composite-prepregs/> (дата звернення: 11.12.2024).
30. Кривуля О. М. Технологічне забезпечення раціонального автоматизованного проектування зубчатих коліс з композиційних матеріалів : пояснювальна записка до атестаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / О. М. Кривуля ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків, 2020. – 72 с.

31. Joshi S. C., The pultrusion process for polymer matrix composites / S. C. Joshi // *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)*. – Woodhead Publishing, 2012. – P. 381–413.
32. Yusoff R., Curing of polymeric composites using microwave resin transfer moulding (RTM) / R. Yusoff та ін. // *Journal of Engineering Science and Technology*. – 2007. – Vol. 2, № 2. – P. 151–163.
33. Sozer E. M., Resin transfer molding (RTM) in polymer matrix composites / E. M. Sozer, P. Simacek, S. G. Advani // *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)*. – Woodhead Publishing, 2012. – P. 245–309.
34. Naik N. K., Sirisha M., Inani A. Permeability characterization of polymer matrix composites by RTM/VARTM // *Progress in Aerospace Sciences*. – 2014. – Vol. 65. – P. 22–40.
35. Resin Transfer Molding (RTM). Masterbond: веб-сайт. URL: <https://www.masterbond.com/industries/resin-transfer-molding-rtm> (дата звернення: 11.12.2024).
36. Ding K. J. Основні напрямки вдосконалення розвитку технології виготовлення виробів із полімерних композиційних матеріалів способом намотування // *Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals*. – 2019. – № 4. – С. 42–46.
37. Манько Т. А., Експериментальне дослідження структури укладання армуючого матеріалу силових оболонок із вуглепластика / Т. А. Манько, О. В. Літот, Л. П. Потапович // *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*. – 2023. – № 1 (54). – С. 7–11.
38. Mlýnek J., Fabrication of high-quality polymer composite frame by a new method of fiber winding process / Jaroslav Mlýnek та ін. // *Polymers*. – 2020. – Vol. 12, № 5. – P. 1037.
39. Бурдун Є., Удосконалення методу розрахунку міцності корпусу підводного апарату тороїдальної форми, виготовленого намотуванням / Є.

Бурдун, С. Присташ // Вісник Одеського національного морського університету. – 2020. – № 62. – С. 99–105.

40. Gaagaia D. E., Comparative Study of the Mechanical Properties of a Novel Epoxy Composite Material Reinforced by Bidirectional Woven Carbon Fabric and Hybrid Kevlar/E-Glass / Djamel Edinne Gaagaia та ін. // International Journal of Engineering Research in Africa. – 2024. – Vol. 69. – P. 19–28.

41. Ribeiro M. P., Fabric impregnation with shear thickening fluid for ballistic armor polymer composites: an updated overview / Matheus Pereira Ribeiro та ін. // Polymers. – 2022. – Vol. 14, № 20. – P. 4357.

42. Scapellato M. L., Environmental and Biological Monitoring of Styrene Exposure: Urinary Excretion of D-Glucaric Acid Compared with Exposure Indices / Maria Luisa Scapellato та ін. // Journal of Occupational Health. – 1998. – Vol. 40, № 4. – P. 313–318.

43. Вплив арамідних волокон в системі армування на властивості "препрега" / І. Л. Солнцева [та ін.] // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Химия, химическая технология и экология. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2010. – № 52. – С. 177-181.

44. ДСТУ EN ISO 14125:2019 Поліетиленові пластикові композити. Визначення властивостей згинання (EN ISO 14125:1998, IDT; ISO 14125:1998, IDT).

45. ДСТУ EN ISO 604:2019 Пластмаси. Визначення властивостей під час стискання (EN ISO 604:2003, IDT; ISO 604:2002, IDT).

46. ДСТУ EN ISO 527-1:2017 Пластмаси. Визначення властивостей під час розтягування. Частина 1. Загальні принципи (EN ISO 527-1:2012, IDT; ISO 527-1:2012, IDT).

47. ДСТУ EN ISO 1183-1:2022 Пластмаси. Методи визначення щільності непористих пластмас. Частина 1. Методи занурення, рідинного пікнометра та титрування (EN ISO 1183-1:2019, IDT; ISO 1183-1:2019, IDT).

48. AUW-D Series. Shimadzu: веб-сайт. URL: <https://www.shimadzu.com/an/products/balances/analytical-balances/auw-d-series/index.html> (дата звернення: 12.12.2024).
49. Підковинська У. В., Вплив наповнювачів на структуру та властивості полімерної матриці / У. В. Підковинська, В. О. Савченко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2024. – № 1. – С. 24–30.
50. Kalova M., Microstructure of polymer composite materials / Martina Kalova, Sona Rusnakova // Polymer. – 2017. – Vol. 3, № 5. – P. 9.
51. Nowosielski R., Microstructure of polymer composite with barium ferrite powder / R. Nowosielski та ін. // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2008. – Vol. 31, № 2. – P. 269–274.
52. Гнатуш В. А., Сучасне застосування металевих сплавів для автомобілебудування / В. А. Гнатуш, В. С. Дорошенко // Метал та лиття України. – 2019. – № 27. – С. 10–12.
53. Рябінін С. О., Перспективність використання вітчизняної літійвмісної сировини для отримання сподуменових ситалів / С. О. Рябінін, А. В. Захаров, І. О. Бобошко // Хімічні проблеми сьогодення. – 2024. – С. 138.
54. Борисюк Я. С., Технології переробки полімерних відходів / Я. С. Борисюк // Вестник Томского государственного педагогического университета. – 2007. – № 9. – С. 31–32.
55. НПАОП 25.0-1.02-13 Правила охорони праці під час роботи з полімерними композитними матеріалами.
56. ДСТУ 2293-99 Охорона праці. Терміни та визначення основних понять.
57. НПАОП 0.00-4.21-04 Типове положення про службу охорони праці.
58. ДСТУ Б В.2.7-158:2008 Будівельні матеріали. Матеріали герметизуючі полімерні.

59. Наказ Державної служби України з питань праці № 74 Про затвердження Показчика нормативно-правових актів з питань охорони праці.

60. ДСТУ Б А.3.2-13:2011 Система стандартів безпеки праці. Будівництво. Електробезпе́чність. Загальні вимоги.