

Вінницький національний технічний університет  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет машинобудування та транспорту  
(повне найменування інституту, назва факультету(відділення))

Кафедра галузевого машинобудування  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

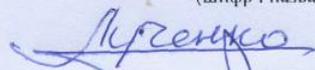
## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

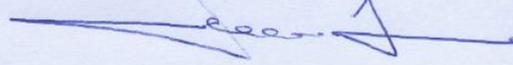
«Дослідження міцності композитів при локальних ударних впливах»

08-62.МКР.02.000.000 ПЗ

Виконав: студент 2-го курсу, групи 1ГМ-23мз  
спеціальності 133 – Галузеве машинобудування  
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 ЛУЧЕНКО Дмитро  
(прізвище та ініціали)

Керівник: д. т. н., професор кафедри ГМ

 СИВАК Роман  
(прізвище та ініціали)

«    » \_\_\_\_\_ 2025 р.

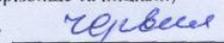
Опонент: к. т. н., завідувач кафедри АТМ

 ЦИМБАЛ Сергій  
(прізвище та ініціали)

«    » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Допущено до захисту  
завідувач кафедри ГМ

д. т. н., проф. ПОЛІЩУК Леонід  
(прізвище та ініціали)

« 10 »  \_\_\_\_\_ 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 р.

## ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет машинобудування та транспорту  
Кафедра галузевого машинобудування  
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
Галузь знань – 13 Механічна інженерія  
Спеціальність – 133 – Галузеве машинобудування  
Освітньо-професійна програма – Галузеве машинобудування

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ГМ

Леонід ПОЛІЩУК

«04» 03 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**  
**Дмитру ЛУЧЕНКУ**

1. Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Дослідження міцності композитів при локальних ударних впливах».

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи: д. т. н., проф. Роман СИВАК, затверджені наказом №96 від «20» березня 2025 р.

2. Строк подання студентом магістерської кваліфікаційної роботи: 9.06.2025 р.

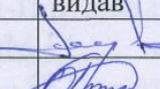
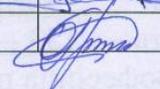
3. Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: 1) модуль пружності – 28 ГПа, 2) модуль зсуву – 6,2 ГПа; 3) коефіцієнт Пуассона – 0,18; 4) границя міцності – 380 МПа; 5) температура – 23<sup>0</sup>С; 6) швидкість падіння – 2; 5 м/с; 7) висота падіння – 0,2; 1,27 м; 8) загальна маса бойка – 67; 11 кг.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):  
1) вступ; 2) огляд літератури по проблемам міцності високонавантажених композиційних матеріалів при локальній ударній дії; 3) дослідження механічних і балістичних властивостей композитів; 4) розрахункові дослідження міцності композитів при статичних і локальних ударних впливах; 5) ремонт композиційних панелей з балістичними пошкодженнями; 6) економічна частина.

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

1) Проблеми міцності високонавантажених композиційних матеріалів при локальній ударній дії (2 пл. ф.А1); 2) Дослідження механічних і балістичних властивостей композитів (5 пл. ф. А1); 3) Розрахункові дослідження міцності композитів при статичних і локальних ударних впливах (пл. ф.А1); 4) Ремонт композиційних панелей з балістичними пошкодженнями (пл. ф.А1); 5) Висновки (пл. ф.А1).

## 6. Консультанти розділів магістерської кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основний	д. т. н., проф. Роман СИВАК		
Економічний	к. т. н., доц. Ольга РАТУШНЯК		

7. Дата видачі завдання 25.03.2025 року.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів МКР	Примітка
1	Вступ	1.04.2025 р.	Виконано
2	Загальні характеристики конструкційних композиційних матеріалів. Існуючі підходи до аналізу процесів деформування і руйнування композиційних пластин при низько і високошвидкісному ударі	8.04.2025 р.	Виконано
3	Підходи, що застосовуються при чисельному моделюванні композиційних матеріалів, які зазнали високошвидкісної ударної дії. Сучасні методики ремонту склопластикових конструкцій після ударного навантаження	15.04.2025 р.	Виконано
4	Визначення механічних властивостей склопластику. Визначення балістичних характеристик склопластику при ударному навантаженні	22.04.2025 р.	Виконано
5	Оцінка міцності композитних панелей з балістичними пошкодженнями. Оцінка впливу попереднього навантаження на балістичні властивості композитних панелей. Дослідження впливу низько і високошвидкісних похилих ударів на балістичні характеристики склопластику	29.04.2025 р.	Виконано
6	Оцінка міцності композиту після ударної дії	6.05.2025 р.	Виконано
7	Розробка розрахункової мезоструктурної моделі композиту для розрахунків ударної дії	13.05.2025 р.	Виконано
8	Розробка методики наповнення матричним компаундом пошкоджених шаруватих пластин	20.05.2025 р.	Виконано
9	Дослідження реологічних властивостей матричних компаундів	27.05.2025 р.	Виконано
10	Економічна частина	3.06.2025 р.	Виконано
11	Підготовка ілюстративної частини МКР	6.06.2025 р.	Виконано
12	Попередній захист на кафедрі	10.06.2025 р.	Виконано

Студент Луценко Дмитро ЛУЧЕНКО  
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи Роман СИВАК  
(підпис) (ім'я та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

УДК: 621.763:621.893

Лученко Д. В. Дослідження міцності композитів при локальних ударних впливах. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 133 – галузеве машинобудування, освітня програма - галузеве машинобудування. Вінниця: ВНТУ, 2025. 121 с.

Укр. мовою. бібліогр.: 41 назв; рис.: 42; табл.: 24.

У магістерській кваліфікаційній роботі здійснено огляд стану питання по проблемам міцності високонавантажених композиційних матеріалів при локальній ударній дії, який включає їх загальні характеристики, існуючі підходи до аналізу процесів деформування і руйнування при низько і високошвидкісному ударі. Виконано дослідження механічних і балістичних властивостей композитів, в яке входить визначення механічних властивостей та балістичних характеристик склопластику при ударному навантаженні, оцінка міцності композитних панелей з балістичними пошкодженнями та оцінка впливу попереднього навантаження на їх балістичні властивості. Представлені розрахункові дослідження міцності композитів при статичних і локальних ударних впливах, які включають оцінку міцності після ударної дії, розробку розрахункової мезоструктурної моделі для розрахунків ударної дії, у яку входить розробка геометричної мезорівневої моделі на основі склопластику. Розглянуто особливості ремонту композиційних панелей з балістичними пошкодженнями, які включають розробку методики наповнення матричним компаундом пошкоджених шаруватих пластин та дослідження реологічних властивостей матричних компаундів.

Графічна частина складається з 10 плакатів за результатами дослідження.

Ключові слова: композит, локальна ударна дія, чисельне моделювання, балістичні властивості, пошкодження.

## ABSTRACT

Luchenko D. V. Research on the strength of composites under local impact. Master's qualification work in specialty 133 - branch mechanical engineering, educational program - branch mechanical engineering. Vinnytsia: VNTU, 2025. 121 p.

In Ukrainian. Bibliography: 41 titles; Fig.: 42; Table: 24.

The master's qualification work reviews the state of the art on the problems of the strength of highly loaded composite materials under local impact, which includes their general characteristics, existing approaches to the analysis of deformation and fracture processes under low and high-speed impact. A study of the mechanical and ballistic properties of composites was carried out, which included determining the mechanical properties and ballistic characteristics of fiberglass under impact loading, assessing the strength of composite panels with ballistic damage, and assessing the effect of preload on their ballistic properties. Computational studies of the strength of composites under static and local impact loads were presented, which included assessing the strength after impact, developing a computational mesostructural model for calculating impact, which included developing a geometric mesolevel model based on fiberglass. The features of repairing composite panels with ballistic damage were considered, which included developing a method for filling damaged layered plates with matrix compound and studying the rheological properties of matrix compounds.

The graphic part consists of 10 posters based on the results of the study.

Keywords: composite, local impact, numerical modeling, ballistic properties, damage.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	9
<b>1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ПО ПРОБЛЕМАМ МІЦНОСТІ ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ЛОКАЛЬНІЙ УДАРНІЙ ДІЇ</b> .....	
1.1 Загальні характеристики конструкційних композиційних матеріалів .....	12
1.2 Існуючі підходи до аналізу процесів деформування і руйнування композиційних пластин при низько і високошвидкісному ударі .....	19
1.3 Підходи, що застосовуються при чисельному моделюванні композиційних матеріалів, які зазнали високошвидкісної ударної дії.....	23
1.4 Сучасні методики ремонту склопластикових конструкцій після ударного навантаження.....	30
<b>2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ І БАЛІСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТИВ</b> .....	
2.1 Визначення механічних властивостей склопластику.....	33
2.2 Визначення балістичних характеристик склопластику при ударному навантаженні.....	41
2.3 Оцінка міцності композитних панелей з балістичними пошкодженнями.....	45
2.4 Оцінка впливу попереднього навантаження на балістичні властивості композитних панелей	48
2.5 Дослідження впливу низько і високошвидкісних похилих ударів на балістичні характеристики склопластику.....	56
<b>3 РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ КОМПОЗИТИВ ПРИ СТАТИЧНИХ І ЛОКАЛЬНИХ УДАРНИХ ВПЛИВАХ</b> .....	
	59

3.1	Оцінка міцності композиту після ударної дії .....	59
3.2	Розробка розрахункової мезоструктурної моделі композиту для розрахунків ударної дії .....	60
3.2.1	Розробка геометричної мезорівневої моделі композиту на основі склопластику .....	62
3.2.2	Визначення параметрів моделей матеріалів та завдання контактних алгоритмів.....	66
3.2.3	Результати моделювання ударного навантаження склопластикових пластин .....	68
<b>4</b>	<b>РЕМОНТ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПАНЕЛЕЙ З БАЛІСТИЧНИМИ ПОШКОДЖЕННЯМИ.....</b>	<b>71</b>
4.1	Розробка методики наповнення матричним компаундом пошкоджених шаруватих пластин .....	71
4.2	Дослідження реологічних властивостей матричних компаундів .....	72
4.2.1	Змочуваність.....	72
4.2.2	Поверхневий натяг.....	73
4.2.3	Критична висота піднімання рідини.....	74
4.2.4	В'язкість компаунда.....	74
4.2.5	Вибір оптимальної температури компаунда.....	76
<b>5</b>	<b>ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....</b>	<b>78</b>
5.1	Оцінювання комерційного потенціалу розробки.....	78
5.2	Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи.....	84
5.3	Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки.....	91
5.4	Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності.....	93
	<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>96</b>
	<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>97</b>

ДОДАТОК А – ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	102
ДОДАТОК Б – ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА.....	107
ДОДАТОК В – ПРОТОКОЛ ПЕРЕРЕВІРКИ НА ПЛАГІАТ.....	118

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Сучасні високоефективні конструкції авіаційної техніки виконані частково або повністю з волокнистих композитних матеріалів. Такі конструкції, як правило, є тонкостінними і навантаженими у своїй площині у зв'язку з тим, що поряд з високою міцністю і жорсткістю вздовж напрямку укладання волокон вони мають набагато менші значення зсувної міцності.

При експлуатації композитні конструкції піддаються випадковим локальним ударним навантаженням по нормалі до поверхні, внаслідок чого утворюються дефекти: розшарування, розриви волокон, наскрізні пошкодження. Пошкодження в місці удару можуть бути майже непомітними під шаром фарби або лаку і призводити до різкого (до двох разів) зниження міцності при стисканні. Наскрізні (балістичні) ушкодження можуть зруйнувати високонавантажену великогабаритну конструкцію, якщо вона має недостатню конструкційну міцність і тріщиностійкість.

Для того, щоб такі композитні конструкції в експлуатації були довговічними та надійними, необхідно вміти прогнозувати наслідки випадкових ударних впливів з урахуванням попереднього навантаження, а також мати можливість ремонту (відновлення міцності).

Якщо для металевих конструкцій дефекти від локальних ударів та їх наслідки вже досить глибоко вивчені та закладаються у вигляді додаткових коефіцієнтів запасу при проектуванні, то для конструкцій із композитних матеріалів це питання є актуальним.

Складність та різноманіття механізмів руйнування композитів, великі деформації, короткочасність перебігу процесу удару – все це ускладнює аналіз результатів експериментів, не дозволяє виділити окремі фази ударної взаємодії. До цього слід додати високу вартість та трудомісткість балістичних експериментів.

Тому очевидна тенденція до розширення застосування розрахункових методів і зокрема методу кінцевих елементів. Тут важливо відзначити, що

центрального питання у процесі практичного використання методу кінцевих елементів є питання коректного вибору моделей деформування та руйнування матеріалів, а також призначення / визначення відповідних параметрів вибраних моделей, кількість яких може вимірюватись десятками.

Таким чином, розробка чисельних моделей композитних матеріалів (з мінімальним числом експериментально визначених параметрів), що мають необхідні прогностичні властивості оцінки балістичної стійкості матеріалу та розмірів зон руйнування за різних умов ударної взаємодії, а також розробка методики ремонту конструкцій з пошкодженнями – проблеми високої важливості.

Слід зауважити, що в роботі розглянуто високоміцний композит (склотканина полотняного переплетення, що сполучна, епоксидно-фенольною смолою гарячого затвердіння), що виступає в ролі модельного матеріалу, що має ті ж механізми деформування та руйнування, що і конструкційні тканинні вугле- або органічні пластики.

*Мета і завдання роботи.* Чисельне дослідження процесів деформування, пошкодження та руйнування пластин з тканинного композиту при ударному та статичному навантаженні.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Оцінити вплив попереднього навантаження на балістичну стійкість композитних пластин із тканинного склопластику.
2. Дослідити вплив низько- та високошвидкісних прямих та похилих ударів на несучу здатність композитних пластин із тканинного склопластику.
3. Розробити розрахункову (чисельну) мезоструктурну модель тканинного склопластику, що адекватно описує його деформування та руйнування при ударному навантаженні та дозволяє передбачити площу зони розшарування.
4. Розробити метод оцінки залишкової міцності композитних пластин із тканинного склопластику з балістичними ушкодженнями.

5. Розробити методику оперативного ремонту матричним компаундом композитних пластин із тканинного склопластику з пошкодженнями після низькошвидкісного удару.

*Об'єкт дослідження.* Процеси деформування, пошкодження та руйнування пластин з тканинного композиту при ударному та квазістатичному навантаженні.

*Предмет дослідження.* Розрахункова мезоструктурна модель тканинного склопластику, що адекватно описує його деформування та руйнування при ударному навантаженні та дозволяє передбачити площу зони розшарування.

*Новизна одержаних результатів*

1. Отримано нові дані щодо впливу швидкості деформування в діапазоні  $0,001 \dots 200 \text{ c}^{-1}$  на характеристики міцності тканинного склопластику.

2. Отримано нові дані про вплив попереднього навантаження (одновісне розтягування) на балістичні характеристики тканинного склопластику.

3. Розроблено нову чисельну мезоструктурну модель тканинного склопластику, що відрізняється від існуючих моделей введенням спеціального полімерного шару, що визначає зону розшарування матеріалу.

4. Розроблено нову методику оперативного ремонту пошкоджень типу розшарування, що відрізняється використанням ультразвукового збудника для інтенсивного розігріву матричного компаунду та заповнення порожнин, що утворилися.

# 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ПО ПРОБЛЕМАМ МІЦНОСТІ ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ЛОКАЛЬНІЙ УДАРНІЙ ДІЇ

## 1.1 Загальні характеристики конструкційних композиційних матеріалів

До композитів прийнято відносити матеріали штучного походження складної структури, що мають не менше двох безперервних фаз із загальною границею розділу [1]. Одна з фаз називається матрицею, вона відповідає за форму виробу, стійкість композиту до впливу різних агресивних середовищ, тепло- та морозостійкість, ударну міцність та інші властивості (в даній роботі розглянуті лише полімерні матриці). Другою обов'язковою фазою конструкційного композитного матеріалу є високоміцні та високомодульні волокна скла, вуглецю, арамідів, металів, керамік [2]. Найбільш поширеними конструкційними композитами в даний час є склопластики [3] завдяки, в основному, їх невисокій вартості, хорошій хімічній стійкості, технологічності та низькій щільності.

Зв'язка - це полімерна основа, з якої після відповідної термічної обробки (полімеризації) утворюється матриця композиту. Важливі технологічні характеристики сполучення: в'язкість і змочувальна здатність. Найбільше застосування в якості сполучення знаходять ненасичені поліефірні смоли завдяки низькій вартості та високій технологічності. Властивості склопластиків на основі поліефірних матриць наведені в табл. 1.1. Роль матриці дуже велика. Завдяки її безперервності і міцному адгезійному зв'язку з наповнювачем напруження, що виникають в композиті, розподіляються по всьому об'єму матеріалу і сприймаються високоміцними волокнами.

Склопластики на основі поліефірних матриць можна експлуатувати до 60-150<sup>0</sup>С, епоксидних - до 80-200<sup>0</sup>С, феноло-формальдегідних - до 150-250<sup>0</sup>С, поліімідних - до 200-400<sup>0</sup>С.

Таблиця 1.1 – Властивості поліефірних склопластиків

Показник	Одиниці виміру	Поліефірні смоли
Густина	г/см <sup>3</sup>	1,4-1,75
Міцність при розтягу	МПа	140-450
Міцність при статичному згині	МПа	150-500
Міцність при стиску	МПа	150-300
Модуль пружності при розтягу	ГПа	11-25

Механічні властивості склопластиків визначаються переважно характеристиками волокон та міцністю їх зв'язку з матрицею. Найбільшу міцність і жорсткість мають склопластики, що містять орієнтовані безперервні волокна при навантаженні вздовж напрямку укладання волокон. У поперечному напрямку та при зсуві міцність і жорсткість склопластику істотно нижча і визначається матрицею. Це називається анізотропією. Щоб сприймати складний напружений стан конструкції склопластику роблять шаруватими, зі змінною орієнтацією волокон у шарах, за рахунок чого можна в широких межах регулювати механічні властивості та анізотропію склопластиків.

Широкого поширення набули також тканинні склопластики. Вони використовуються в авіаційній промисловості та на транспорті [4]. На сьогоднішній день до 75-80% всіх композитних матеріалів, що застосовуються в суднобудуванні, припадає на склопластик. Саме висока міцність, корозійна стійкість поряд з їх акустичними та немагнітними властивостями зумовлює їх широке поширення у кораблебудуванні [5]. Кількість елементів та частин суден, виготовлених із композитних матеріалів, постійно зростає. Вже зараз із композитних матеріалів виготовляються сучасні гребні гвинти, надбудови, огороження висувних пристроїв і надалі очікується ще глибше впровадження композитних матеріалів у кораблебудування.

В авіації, також, як і в кораблебудуванні, склопластики спочатку використовувалися для виготовлення малонавантажених елементів конструкції, обшивок сендвіч-панелей для ракетно-космічної техніки. Надалі з нього почали виготовляти високонавантажені елементи, такі як ємності високого тиску, корпуси двигунів, лонжерони лопатей гвинтів вертольотів та літаків, повітропроводи та повітрозабірники, обтічники [6]. Крім того, склопластик використовується у вигляді обшивок сендвіч-панелей для ракетно-космічної техніки. Широке поширення склопластик набув і в сучасних вітроенергетичних установках. Сучасні лопаті довжиною до 40-50 метрів практично повністю виготовлені зі склопластику. Висока міцність, дешевизна та невисока щільність склопластику дозволяють окупити такі конструкції протягом 15-20 років.

Однак склопластик має і ряд недоліків, основним з яких є висока сприйнятливість до удару, що викликає різноманітні дефекти в матеріалі [7]. Якщо великі пошкодження при наземній експлуатації виявляються в процесі оглядів і далі проводиться ремонт, то наслідки падіння інструменту або граду на тонкостінні конструкції можуть бути практично непомітними, тоді як зниження міцності конструкції може виявитися значним [8]. Низька поперечна зсувна жорсткість і міцність композитних матеріалів призводить до розшарування обшивки [9], що знижує навантаження втрати стійкості при стисканні. Розриви шарів у місці удару можуть бути майже непомітними під шаром фарби та лаку [10], проте при невдале укладання шарів призведе до різкого (до двох разів) зниження міцності [11].

При експлуатації склопластикових конструкцій, наприклад, в авіації, можна виділити два випадки, при яких утворюються дефекти несучих поверхонь: наземна експлуатація (удари падаючим інструментом при обслуговуванні, удари граду тощо - низькошвидкісний удар) і польотні випадкові пошкодження (шматочками бетонної крихти з-під переднього колеса при злеті, снарядів та куль у бойових ситуаціях – високошвидкісний удар). Під час роботи вітроенергетичних установок актуальними є питання ушкоджень, пов'язані з потраплянням у лопаті птахів.

Використання композитних матеріалів в якості основних несівних конструкцій є відносно новим завданням для залізничної промисловості [12]. Однією з вимог для пасажирського рейкового транспортного засобу є опір удару від об'єкта, що летить. З введенням високошвидкісних залізничних ліній аналіз ударів по корпусу залізничних складів із композитних матеріалів дрібними об'єктами, так званими *flying ballast phenomenon*, стає все більш необхідним та затребуваним. *Flying ballast phenomenon* – це переміщення частинок у повітрі під впливом різних сил, таких як аеродинамічні сили поїзда, сили вітру, вібрація. Це явище може завдати значної шкоди рейковому транспортному засобу та вважається актуальною темою у світі [13].

Ушкодження в композитних матеріалах, отримані під час ударного навантаження, поділяють на: розтріскування матриці, внутрішньосарове розшарування, міжсарове розшарування, поверхневу втрату стійкості і руйнування волокон [14].

Якщо для металевих конструкцій дефекти від ударного впливу давно вивчені і несуттєво впливають на міцність (невеликі дефекти) і закладаються у вигляді додаткових коефіцієнтів запасу, то для композитних конструкцій складність проблеми оцінки небезпеки ударного впливу посилюється багатofакторністю. Тут суттєві: форма і матеріал ударника [15], вміст волокон і матриці [16], розташування шарів [17], геометричне розташування місця удару [18], швидкість та енергія удару [19]. Саме через різноманіття факторів, що впливають на пошкодження в композитних матеріалах, питання оцінки працездатності конструкцій за наявності довільного ударного пошкодження є досі актуальним і інтенсивно аналізується вченими та практиками. І, якщо вплив пошкоджень у вигляді наскрізних пробоїв, тобто з руйнуванням волокон, зрозумілі та очевидні – такі пошкодження замінюються отвором і розглядається міцність пластин з отвором [20], то вплив пошкоджень після низькошвидкісних ударів (розшарування) досі активно обговорюється. Деякі вчені використовували випробування на стиск після ударного навантаження (*Compression After Impact*) та інші статичні випробування для отримання даних

про вплив пошкоджень на залишкову міцність після низькошвидкісних ударів [21]. Як показали результати випробувань, ушкодження, спричинені низькошвидкісним ударом, практично не впливають на залишкову міцність при розтягуванні [22]. При стисненні пошкодженого елемента будь-яке розшарування поширюватиметься під навантаженням і призведе до локальної втрати стійкості. Залишкова міцність таких елементів може становити менше 40% від неушкодженої структури [23].

*Вплив попереднього навантаження на балістичні характеристики.* Крім ударного впливу конструкції з композитних матеріалів перебувають під впливом штатних експлуатаційних квазістатичних навантажень. Наприклад, це може бути: розтягування або стискування, двовісне розтягування / стиснення, зсув, а також комбінація цих навантажень. Як приклад можна навести нижні панелі фюзеляжу літака, які зазвичай перебувають під стискальним навантаженням під час зльоту і піддаються ударному впливу уламків гравію із злітно-посадкової смуги. Такі уламки можуть досягати швидкостей до 300 м/с [24]. Тому дослідження та розгляд таких навантажень та їх наслідків є важливою частиною вивчення ефективності конструкції.

Незважаючи на велику кількість робіт в області ударного навантаження композитних конструкцій, вплив попереднього навантаження на балістичні характеристики композитів було досліджено лише не багатьма авторами. Так автори [25] повідомляють про суттєвий вплив стискаючого попереднього зусилля на залишкову міцність композитної панелі з тканинного склопластику при балістичному ударі. Whittingham і співавтори [26] досліджували вплив попереднього навантаження на ударні характеристики вуглепластикових шаруватих пластин. Зразки були попередньо навантажені одновісними зусиллями, що розтягують і стискають, і після цього по них було виконано низькошвидкісний удар. Ударні випробування проводилися з двома енергіями зіткнення. Результати показали, що більш високий рівень енергії удару робить більший вплив на глибину вм'ятини, пікове навантаження та поглинену енергію. У роботі [27] були отримані результати про зниження області

розшарування при застосуванні попереднього розтягуючого зусилля в порівнянні з ненавантаженим випадком.

Більшість опублікованих досліджень з цієї теми засновані на ударних навантаженнях із відносно високими масами та низькими швидкостями удару, які імітують, наприклад, падіння інструменту під час обслуговування. Такі навантаження можуть бути експериментально отримані на випробувальній установці типу баштового копра, що впливає на попередньо навантажений зразок [28], або за допомогою маятникового копра [29]. Під час таких випробувань дослідження впливу попередніх розтягувальних навантажень, порівняно легко виконується і проведено в роботах [30]. Аналітичні дослідження низькошвидкісного ударного відгуку композитних пластин при стисканні та розтягуючому навантаженні представлені в [31].

Більш критичними для більшості композитних структур є високошвидкісні ударні навантаження, викликані ударами граду або шматочками бетонної крихти з-під колеса, з порівняно малими масами і високими швидкостями удару. Важливість цих досліджень наголошено в роботах [32]. Вплив високошвидкісного удару на балістичні властивості попередньо навантажених шаруватих композитних конструкцій досліджувався лише у поодиноких статтях [33]. Для цього зазвичай використовується газовий стенд, який прискорює снаряди до швидкостей 50-300 м/с. Garcia-Castillo у роботі [34] вивчав вплив високошвидкісного удару на попередньо навантажені склопластикові пластини. Виявлено, що при двовісному попередньому розтягуванні даний матеріал показав більш високу балістичну границю порівняно з ненавантаженим станом, а пошкоджена область була трохи більшою, ніж у ненавантажених зразків. На жаль, не було пояснено причину збільшення балістичної границі, оскільки цей результат виглядає досить суперечливо.

Незважаючи на наявні варіанти врахування попереднього навантаження (одновісне стиснення, двовісне розтягування, стиснення, комбінація розтягування та стиснення), у більшості робіт з високошвидкісних ударів

розглядається досить вузький діапазон швидкостей ударника та рівнів навантажень. Так у роботі [35] розглянуто всього 3 швидкості навантаження (185, 220 та 235 м/с) та одна величина попереднього навантаження. Автори порівнюють балістичну ефективність матеріалу при конкретних швидкостях, не враховуючи при цьому основну характеристику матеріалу – балістичну границю. У роботі [36] було розглянуто діапазон швидкостей від 50 до 90 м/с. При цьому оцінювалася тільки зона пошкодження матеріалу, тоді як вплив попереднього навантаження на балістичні характеристики матеріалу не було враховано.

Тому необхідні додаткові дослідження впливу попереднього навантаження в широкому діапазоні швидкостей і рівнів попереднього навантаження, оскільки це є важливою частиною забезпечення ефективної експлуатації високонавантажених відповідальних транспортних конструкцій.

*Вплив похилих ударів на балістичні властивості.* Традиційно найбільш небезпечними вважаються удари по нормалі до поверхні незалежно від природи досліджуваного матеріалу. І якщо для металів, виходячи з механізму вибивання «пробки», це відповідає дійсності, то для композитних матеріалів, де превалює розшарування та руйнування волокон від розтягування, це не очевидно. Більше того, кут 30 градусів до нормалі вважається небезпечнішим кутом, ніж удар по нормалі. Це пояснюється тим, що в похилих ударах спостерігається інший механізм руйнації. Для тканинних матеріалів похилі постріли призводять до зсуву в контакт з кулею, відриву шарів один від одного, спучування матеріалу і при подальшому нормальному пострілі в цю область відбувається пробиття бронезилета.

Для жорстких композитних матеріалів, незважаючи на те, що при похилих ударах часто виникає рикошет, і наслідки удару можуть бути зовні практично непомітними [37], область пошкодження виявляється помітно більше (витягнутої по напрямку удару), ніж при ударі по нормалі. Більше того, велика зона пошкодження впливає на здатність конструкції ефективно

протистояти наступним ударам, коли відстань між точками навантаження невелика.

Одна з перших спроб вивчити похилий балістичний вплив на композитні структури була зроблена в роботі [38]. Було отримано, що балістична границя зростає при косих ударах проти нормальних ударів. Це пов'язано переважно за рахунок збільшення довжини шляху снаряда у перешкоді. У роботі [39] було експериментально вивчено вплив кута удару на поглинену енергію та площу розшарування склопластику. Проведено кореляцію між поглиненою енергією та областю пошкодження. Було також відзначено факт, що енергія, поглинена мішенню, зменшується, а потім збільшується зі зростанням кута удару. У роботі [40] було вивчено вплив високошвидкісних ударів на вуглепластикові квазіізотропні композити. Результати показали, що пошкодження, отримані при похилих ударах, виявляються меншими, ніж при нормальних ударах при швидкостях нижче балістичної границі. Однак при швидкостях вище балістичної границі ситуація протилежна і зона пошкодження виявляється більшою. У статті [5] були вивчені низькошвидкісні похилі удари по сендвіч-панелям зі склопластиковими обшивками при трьох кутах удару ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$  та  $20^\circ$ ). Були отримані значення максимального контактного зусилля всім трьох кутів зіткнення із збільшенням енергії удару. Зона пошкодження була приблизно однакова для низьких енергій удару (до 10 Дж), проте, при енергіях удару більше 10 Дж, зона пошкоджень була більшою при менших кутах удару.

## **1.2 Існуючі підходи до аналізу процесів деформування і руйнування композиційних пластин при низько і високошвидкісному ударі**

Задачу локальної контактної взаємодії малопластичних ударників і шаруватих композитних перешкод традиційно відносять до найскладніших задач механіки деформівного тіла, в яких мають місце хвильові процеси, великі непружні деформації, локальне руйнування, розшарування [7].

*Аналітичний підхід до моделювання ударного навантаження.* Спочатку для аналізу процесів деформування і руйнування композитних пластин при ударному навантаженні застосовували аналітичні моделі. Це було пов'язано з неможливістю реалізувати весь потенціал чисельних методів через малу обчислювальну потужність перших комп'ютерів. Однак, не дивлячись на величезний стрибок у розвитку чисельних методів, зокрема методу кінцевих елементів, аналітичні моделі розробляються і застосовуються досі. В основному аналітичний підхід представляє інтерес для попереднього дослідження, що дозволяє швидко оцінити працездатність конструкцій у різних конфігураціях [1]. Аналітичні моделі в літературі по-різному описують процес руйнування композиту, але вони припускають, що ударник є абсолютно жорстким тілом, що він виготовлений з твердого матеріалу (наприклад, сталі, вольфраму); ця гіпотеза підтверджується кількома експериментальними спостереженнями [7]. Крім того, в аналітичних моделях, представлених у літературі, використовуються різні методи та формулювання для прогнозування балістичних параметрів, у тому числі найважливішої – балістичної границі. Балістична границя може бути визначена як мінімальна швидкість, при якій ударник наскрізь проникає через перешкоду.

Однією з перших є робота Vinson і Zukas [8], в якій аналітична модель заснована на поширенні поздовжніх і поперечних хвиль після удару, які утворюють так звану V-подібну деформацію мішені, і після досягнення порогового значення деформації композит вважається пробитим (рис. 1.1).

Аналітичні моделі, засновані на енергетичному балансі, дають уявлення про те, як кінетична енергія ударника розсіюється та який механізм розсіювання енергії переважає над іншими, тим самим зосереджуючи особливу увагу на відповідних параметрах. У роботі [9] було визначено три основні компоненти розсіювання енергії ударником під час балістичного навантаження: руйнування при розтягуванні ниток композиту, що перебувають безпосередньо під ударником, пружна деформація та кінетична енергія, передана композитній панелі. У роботах [6] показано, що такі механізми руйнування, як розшарування

композиту та руйнування матриці, розсіюють незначну кількість енергії високошвидкісного ударника. Їх врахування при подальшому чисельному моделюванні конструкційних композитів впливає насамперед на одержувану картину руйнування. Вплив на кількість енергії ударника, що поглинається матеріалом, значно менше.

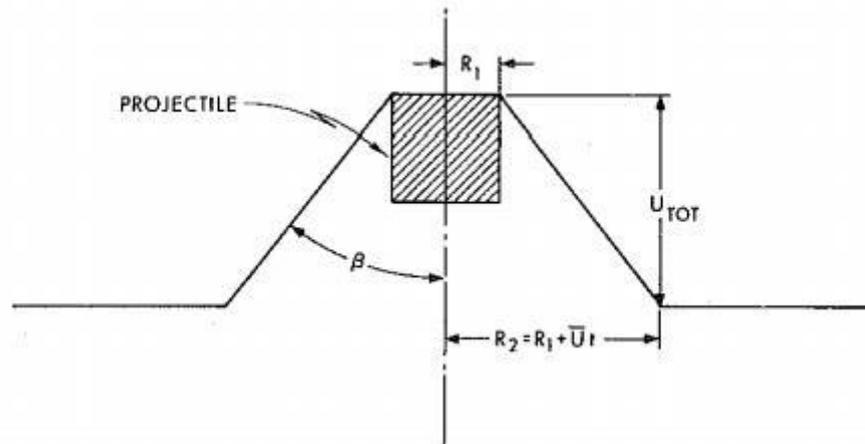


Рисунок 1.1 - «V-подібна» деформація у моделі Vinson та Zukas [168]

Головним недоліком аналітичних моделей є можливість розгляду ударного впливу тільки для конструкцій простої форми, а саме плоских пластин. Іншим недоліком є обмеження простими випадками навантаження (удари по нормалі).

*Численні підходи до моделювання ударного навантаження.* У зв'язку з перерахованими вище недоліками практично важливі задачі в даний час вирішуються переважно експериментально або чисельно, з використанням пакетів прикладних програм на основі методу кінцевих елементів [2].

Очевидно, що зважаючи на дорожнечу і тривалість прямих експериментів, а також кількість факторів, що варіюються, розробка коректних розрахункових моделей є, по суті, єдиним засобом для отримання деталізованої інформації про балістичні характеристики і механізми руйнування, що залежать від механічних параметрів досліджуваних матеріалів [8].

Важливо, що центральним питанням у практичного використання методу кінцевих елементів є питання коректного вибору моделі матеріалу, тобто

моделі деформування та руйнування [7], а також призначення / визначення відповідних параметрів вибраних моделей. Коректність зазвичай оцінюється величиною похибки визначення залишкової швидкості ударника після пробою перешкоди.

У сучасних дослідженнях вважається, що ударне навантаження може розглядатися з використанням моделей деформівного твердого тіла з урахуванням пружності, пластичності та руйнування кінцевих елементів у лагранжевій постановці [2] з деформівною сіткою кінцевих елементів.

У лагранжових постановках для розрахунку динаміки деформування та руйнування крихких та зернистих матеріалів (кераміки та скла) у програмному пакеті вкладено сім моделей (Drucker-Prager, Johnson-Holmquist, RHT Concrete та MO Granular у різних варіантах). На прикладі популярної моделі Джонсона-Холмквіста (варіанти JH1 та JH2) досліднику необхідно знати / визначати до 20 параметрів, методики визначення яких не стандартизовані і часом не можуть бути в повному обсязі реалізовані через неможливість виготовлення зразків заданої форми із заданим напруженим станом. Це характерно для матеріалів, що серійно випускаються промисловістю, наприклад, силікатного скла або композитних пластин фіксованої товщини. Більше того, експерименти при різних швидкостях деформування повинні проводитися спочатку на статичних випробувальних машинах, далі на копрах з вантажем, що вертикально падає, і, нарешті, на установках, що реалізують метод розрізних стрижнів Гопкінсона-Кольського [1], які, до речі, серійно не виробляються.

Існують спеціалізовані програми для детального опису композитних структур та завдання властивостей компонентів, у яких можливе створення композитних конструкцій з урахуванням різного укладання шарів для аналізу міцності динамічного навантаження. У цих пакетах є можливість завдання анізотропії матеріалів та широкий вибір критеріїв оцінки міцності. Однак у даних пакетах також для побудови моделі необхідно задавати велику кількість параметрів, що є суттєвим недоліком через відсутність стандартизованих методик визначення цих параметрів.

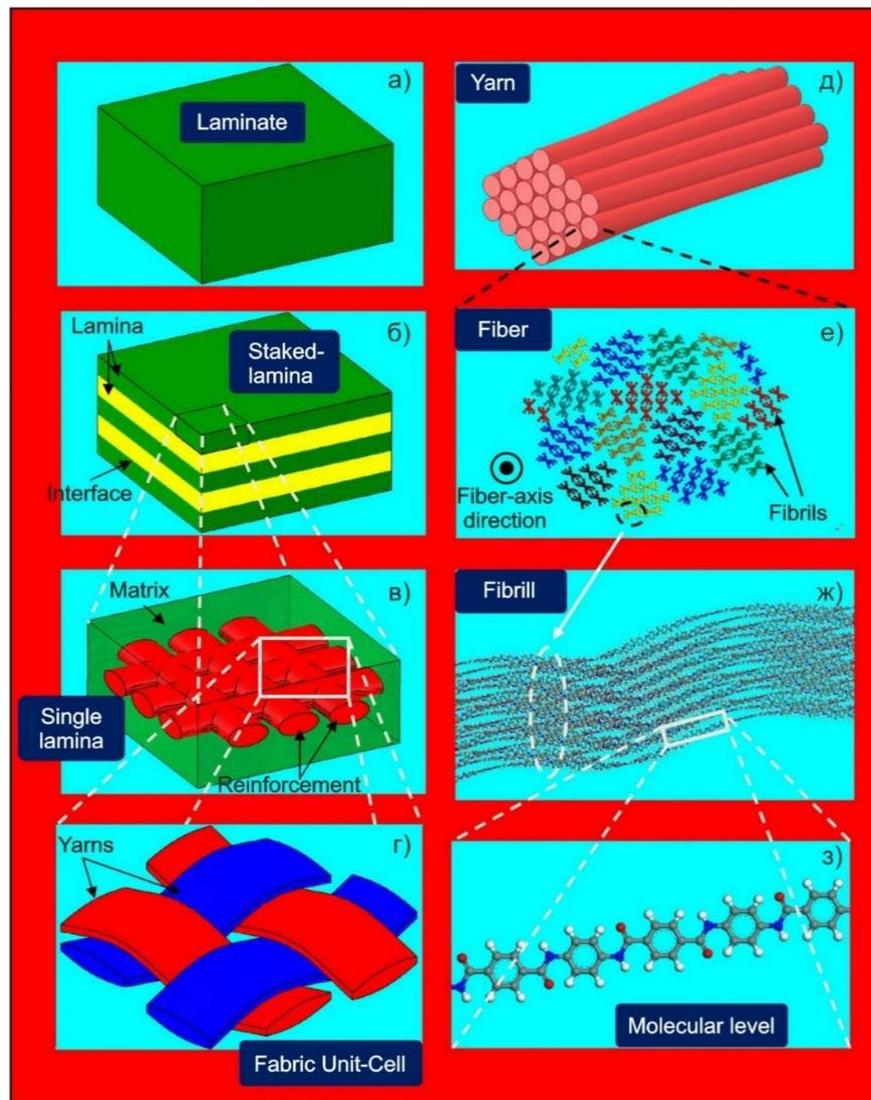
В даний час не існує таких моделей, які можна застосувати одночасно для опису високошвидкісного (HVI) та низькошвидкісного удару (LVI). В основному займаються розробкою моделей, в яких описують або пробій пластини [9], або моделюють квазістатичні процеси при низькошвидкісному ударі. При цьому коли пошкодження несуть граничний характер (пробою або непробою), а швидкість ударника близька до балістичної границі, дані моделі виявляються малоефективними [2]. Спостерігаємі механізми руйнації реальних матеріалів такі моделі враховують недостатньо коректно.

### **1.3 Підходи, що застосовуються при чисельному моделюванні композиційних матеріалів, які зазнали високошвидкісної ударної дії**

У роботі [9] М. Grujićic наводить досить повний перелік існуючих підходів (рис. 1.2), які застосовуються при чисельному моделюванні композитних матеріалів. Для практичних розрахунків поширення набули макрорівневе моделювання, засноване на гомогенному підході (рис. 1.2, а), мезорівневе моделювання на рівні шарів та на рівні ниток (рис. 1.2, б-в), мікрорівневе моделювання на рівні представницьких осередків тканини (рис. 1.2, г). Моделювання на рівні волокон у пучку, яке також можна віднести до мікрорівневого, використовується набагато рідше і переважно для опису вузького класу специфічних явищ, характерних для балістичних тканин [7] або композитів [3]. Інші три підходи застосовуються лише у фундаментальних дослідженнях.

*Макрорівневий підхід до моделювання механічної поведінки композитних матеріалів при ударному навантаженні.* Найбільш широке застосування макрорівневий підхід знайшов при аналізі статичної міцності конструкцій з композитних матеріалів. Однак для моделювання деформування та руйнування композитних елементів та конструкцій при високошвидкісному ударі він у чистому вигляді не зовсім підходить, оскільки не дозволяє адекватно враховувати виникнення розшарування у матеріалі. Можна відзначити кілька

робіт [4], у яких автори використовували макrorівневий підхід під час моделювання ударного навантаження композитних панелей. Представлені авторами розрахункові моделі дозволяли з достатньою точністю прогнозувати кількість енергії, що поглинається, проте не забезпечували належної відповідності розрахункової та експериментальної картини руйнування (рис. 1.3).



а) – гомогенний підхід; б) - моделювання на рівні шарів; в) та г) - моделювання на рівні шару з різною деталізацією армуючого каркасу; д) - моделювання на рівні нитки; е) – моделювання лише на рівні волокон (філаментів); ж) – моделювання лише на рівні ланцюжків молекул; з) – моделювання на молекулярному рівні

Рисунок 1.2 - Ілюстрація класифікації підходів до моделювання композитних матеріалів залежно від рівня деталізації геометричної моделі [9]

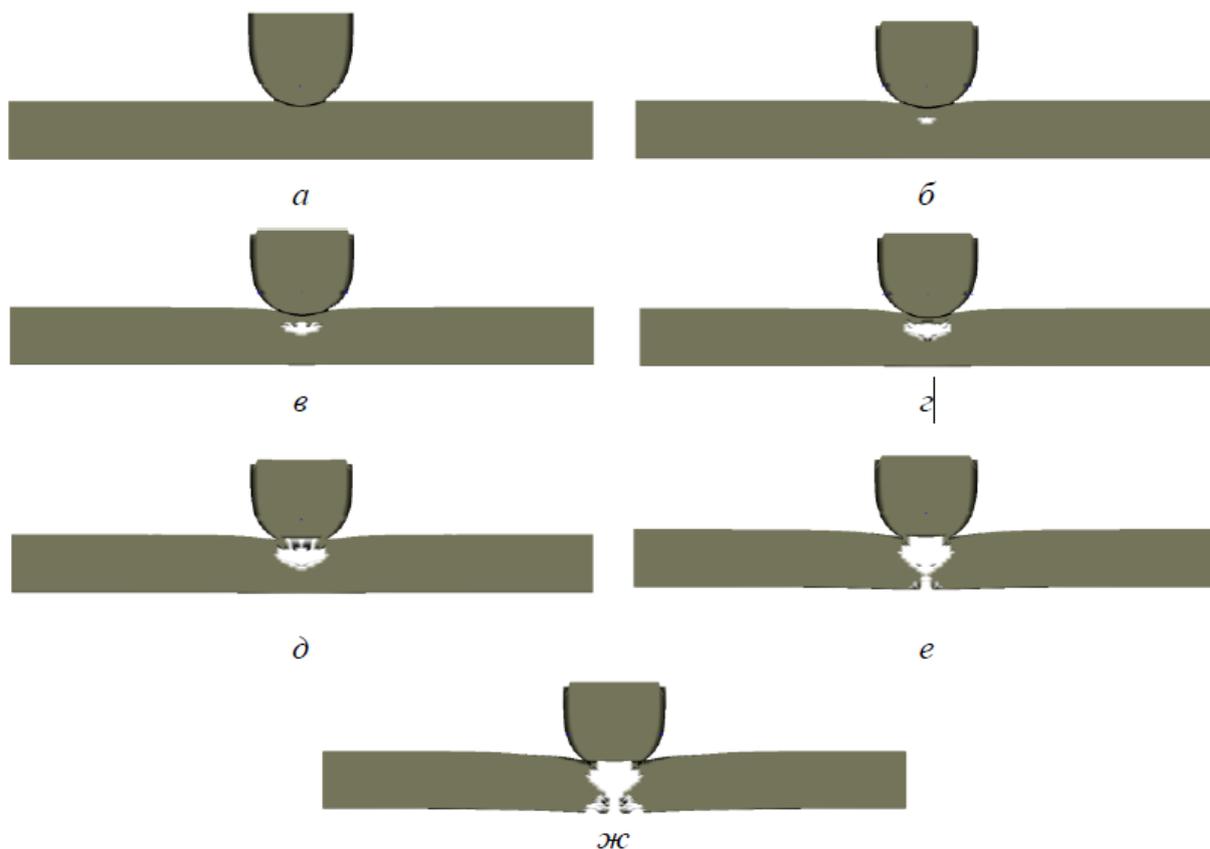


Рисунок 1.3 - Картина руйнування композитної панелі у різні моменти часу при дії ударника зі швидкістю 700 м/с, отримана у роботі [9]

*Мезорівневий підхід до моделювання механічної поведінки композитних матеріалів при ударному навантаженні. У когезійному елементі відносне взаємне зміщення верхньої та нижньої поверхонь пов'язане за допомогою віртуальних нелінійних пружин (рис. 1.4) з величиною сили, що діє на одиницю площі (в англійській літературі – traction-separation law).*

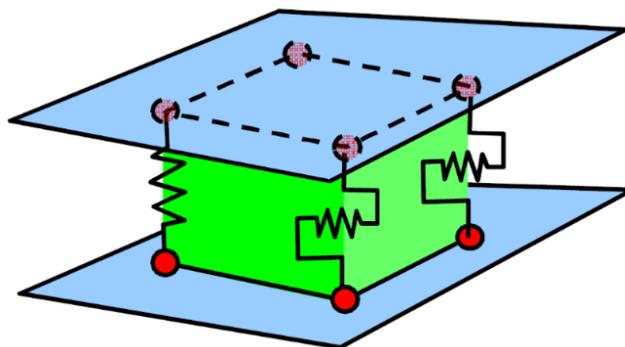


Рисунок 1.4 - До опису когезійного елемента

Підхід ґрунтується на використанні стандартних тривимірних елементів, якими моделюють інтерфейсні шари. Найчастіше такий підхід застосовують при моделюванні на рівні ниток (рис. 1.5), проте можливі інші варіанти [8].

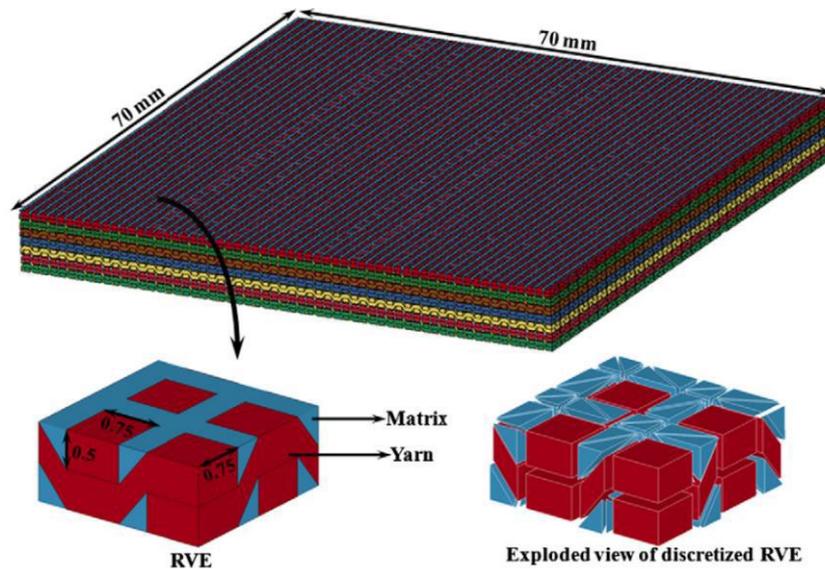


Рисунок 1.5 - Геометрична модель з дискретизацією лише на рівні ниток для розрахунків ударного навантаження зразка з композитних матеріалів, представлена у роботі [8]

*Мікрорівневий підхід до моделювання механічної поведінки композитних матеріалів при ударному навантаженні.*

При використанні мікрорівневого підходу значна увага приділяється точності врахування мікроструктури композиту (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 - Фрагмент сіткової моделі, використаної для мікрорівневого моделювання балістичного композиту, представлений у роботі [7]

*Комбінований підхід до моделювання механічної поведінки композитних матеріалів при ударному навантаженні.*

Найбільш поширеним є спільне використання макро- та мезорівневого підходів (рис. 1.7) [2], мезо- та мікрорівневого підходу (рис. 1.8) [6].

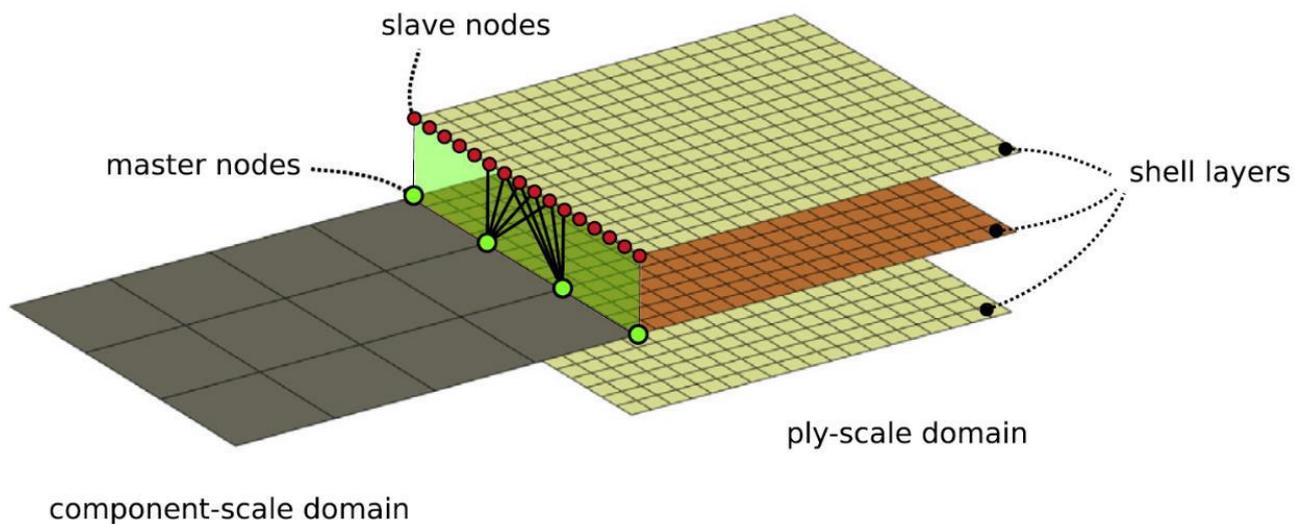


Рисунок 1.7 - Комбінована підхід, використаний у роботі [1]

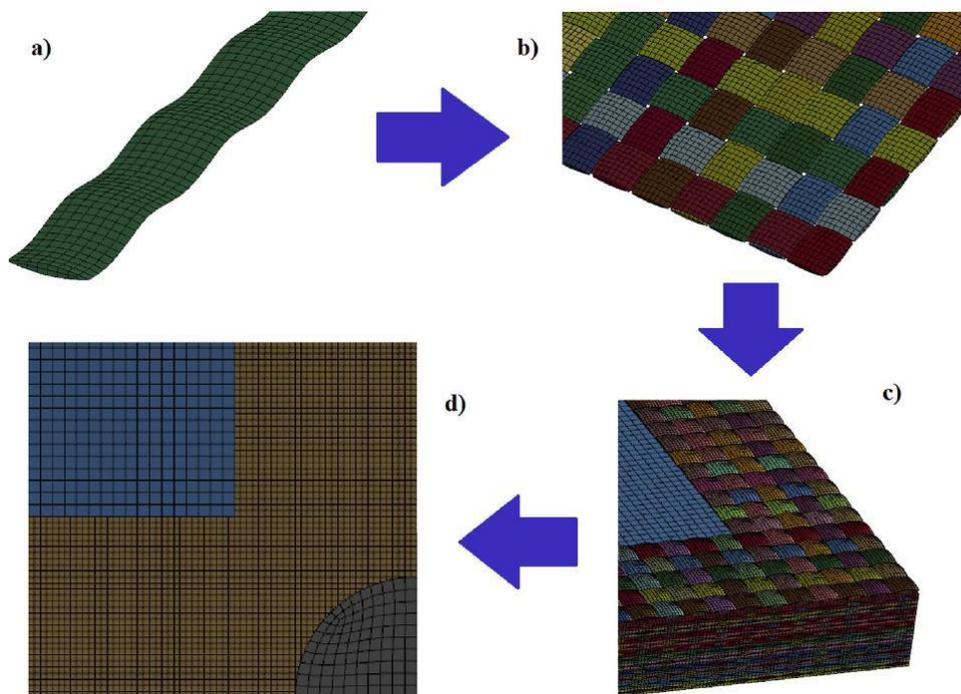


Рисунок 1.8 - Комбінований підхід, використаний у роботі [6]

Багато сучасних досліджень з моделювання руйнування при ударному впливі композитної конструкції вважають, що динамічні механічні властивості композиту рівні статичним. У разі низькошвидкісного та низькоенергетичного впливу Maison та Guedra-Degeorges [7] показали, що воно може бути змодельоване за допомогою статичної моделі індентування з використанням статичних властивостей.

*Вплив швидкості деформування на характеристики склопластиків.*

Ці підходи дають прийнятні результати для низькошвидкісних ударів. Але швидкість зіткнення при експлуатації композитних конструкцій часто досить значна, і виникає потреба враховувати вплив швидкості деформування на ці матеріали. За останні два десятиліття за цим напрямком опубліковано велику кількість робіт, проведено сотні випробувань, проте досі чіткого уявлення про те, що відбувається із властивостями матеріалу при підвищенні швидкості деформування немає. У деяких дослідженнях повідомляється, що швидкість деформування не істотно впливає на поведінку при розтягуванні [3], у той час як інші стверджують, що швидкість деформування впливає на механічні характеристики композитних матеріалів.

У роботі [7] були проведені динамічні випробування на розтяг склопластиків на основі фенольних і поліефірних смол для визначення впливу швидкості деформування на механічні властивості. Результати показали, що модуль пружності та границя міцності збільшуються зі зростанням швидкості деформування. В роботі [6] були досліджені механічні властивості односпрямованих склопластиків при квазістатичних та динамічних навантаженнях зі швидкостями деформування від 0,001 до 100 с<sup>-1</sup> за допомогою сервогідравлічного випробувального пристрою, оснащеного механізмом збільшення швидкості деформування. Було відзначено значне збільшення міцності при розтягуванні (до 50%) зі збільшенням швидкості деформування. Модуль пружності при розтягуванні та деформація до руйнування збільшуються на 10% та 9% відповідно. Дуже спірні результати було отримано у роботі [2], де було проведено дослідження впливу швидкості деформування

на механічні властивості при розтягуванні однонаправлених скло-епоксидних композитів. Було виявлено, що динамічна міцність утричі вища, ніж статичне значення, а динамічний модуль на 50% вищий, ніж статичне значення. Однак у роботі [5] було виявлено, що модуль пружності косих шарів скло-епоксидних композитів залежить від швидкості деформування, а динамічне напруження руйнування лише трохи перевищує статичне значення (на 20–30% вище). У роботах [7] було отримано, що склопластики з поліефірною матрицею досить чутливі до швидкості деформування, і їхня границя міцності при розтягуванні збільшилася на 55% в діапазоні швидкостей деформування від  $10^{-3}$  до  $10^3 \text{ c}^{-1}$ . В іншій роботі [5] було відзначено збільшення модуля пружності та границі міцності при розтягуванні на 50-70% зі збільшенням швидкості деформування від  $10^{-3}$  до  $10 \text{ c}^{-1}$  для композиту з рубаних склошліт. У статті [5] було досліджено поведінку шаруватих композитів, виготовлених з односпрямованих вуглецевих шарів і композитів зі склотканини, при динамічних випробуваннях на розрізних стрижнях Гопкінсона і виявлено, що міцність на розрив і деформація композитів зі скловолокна збільшуються при збільшенні швидкості деформування композицій.

Як видно з наведених робіт, в даний час немає чіткого трактування, як швидкість деформування впливає на механічні властивості склопластиків. Окремо варто сказати про збільшення міцності односпрямованих склопластиків, що є досить спірним. Грунтуючись на даних робіт [9], можна вважати, що для композитів на основі тканин (полотно, саржа, сатин) зміни інтегральних властивостей при підвищених швидкостях будуть тим більше, чим вищий ступінь викривленості волокон. Тому логічно припустити, що міцність тканинного композиту зі зростанням швидкості деформування буде прагнути до міцності односпрямованого композиту з тією ж часткою волокон у напрямі навантаження. Але ця гіпотеза потребує додаткового підтвердження.

## 1.4 Сучасні методики ремонту склопластикових конструкцій після ударного навантаження

Високошвидкісний удар композитних пластин супроводжується наскрізним проникненням ударника з утворенням отвору округлої форми, тоді як при низькошвидкісному ударі основним результатом є розшарування [8]. Однак, як зазначалося раніше, обидва ці типи пошкоджень знижують міцність конструкції, тому необхідно вміти ремонтувати пошкоджені елементи.

Коли пошкодження супроводжуються розривом волокон, одним із найпоширеніших способів ремонту є заміна пошкодженої ділянки з монтажем латок [8]. Поряд із цим методом існує болтовий ремонт [5] (латка кріпиться до конструкції за допомогою болтів), який, як правило, робиться для товстих, високонавантажених шаруватих композитів у внутрішніх конструкціях аерокосмічних апаратів. Простий поверхневий ремонт проводять для ремонтування неструктурних ушкоджень (подряпин, невеликих вибоїн, вм'ятин) шляхом заробляння шпаклівкою з наступним ошкурюванням та фарбуванням.

У більшості випадків ударного навантаження пошкодження малопомітні і супроводжуються лише розшаруванням. Такі пошкодження можуть бути викликані через виробничі дефекти або при експлуатації при високих статичних навантаженнях. Перераховані вище методи ремонту у таких випадках є нераціональними, оскільки супроводжуються збільшенням товщини та маси виробу, мають високу трудомісткість і не підходять для ділянок конструкції зі складною формою (кути, краї тощо) [7]. Тому для слабких ушкоджень, спричинених лише розшаруванням, використовують ін'єкційний ремонт [7]. В ін'єкційному ремонті використовують компаунд з низькою в'язкістю для кращого проникнення зони розшарування [5]. Такий вид ремонту відрізняється своєю оперативністю і не порушує цілісності виробу, що застосовується для конструкцій будь-якої форми та розмірів.

В основі цього методу лежить заповнення порожнеч і мікротріщин усередині матеріалу, що виникають в результаті розшарування після низькошвидкісного удару, сполученням (компаунд). Іноді в компаунд додають наночастинки для збільшення характеристик міцності. Також слід зазначити, що для покращення проникнення компаунду свердлять невеликі отвори на певному віддаленні один від одного [4]. Робиться це для того, щоб при закачуванні компаунда в один з отворів, через інший виходило повітря із зони розшарування [5]. Також компаунд подається до зони розшарування під невеликим тиском.

Існують застереження, що свердління отворів може завдати додаткових збитків і необхідно мати певний досвід щодо таких операцій. Також складно оцінити, наскільки успішними є такі операції без застосування методів неруйнівного контролю та післяремонтних випробувань.

Успішність ін'єкційного ремонту залежить від вибору смоли, вимоги до якої були вказані Расселом і Бауерсом [3]. Смола повинна мати хорошу змочуваність на поверхні композиту і низьку в'язкість [7], щоб забезпечити ефективне заповнення компаундом мікротріщин шириною в десятки мікрометрів. Очевидно, що невеликі тріщини можна розглядати як капіляри, а явища, що виникають у тріщинах під час заповнення їх компаундом, розглядати як капілярні. Смола повинна мати високу міцність адгезій між шарами для відновлення механічної міцності композиту після ремонту. Затверділа смола повинна мати температуру склування і температуру термічного розкладання, що відповідає температурі смоли панелі, що ремонтується. Нарешті, оскільки ін'єкційний ремонт зазвичай виконується вручну, смола не повинна виділяти значну кількість летючих органічних сполук для відповідності вимогам безпеки на робочому місці під час ремонтних робіт [7].

Незважаючи на велику кількість публікацій, присвячених ремонту, відсутні конкретні рекомендації щодо призначення характеристик компаунду (в'язкість компаунду та поверхневий натяг в аспекті капілярних ефектів) для заповнення розшарування тієї чи іншої товщини.

Таким чином проведений аналіз джерел з питань, присвячених аналізу пошкоджень композитних матеріалів при ударному навантаженні свідчить про відсутність досліджень впливу швидкості деформування на характеристики міцності тканинного склопластику, впливу попереднього навантаження на балістичну стійкість композитних пластин із тканинного склопластику, впливу низько- та високошвидкісних прямих та похилих ударів на несучу здатність композитних пластин із тканинного склопластику. Необхідне розроблення розрахункової (чисельної) мезоструктурної моделі тканинного склопластику, що адекватно описує його деформування та руйнування при ударному навантаженні та дозволяє передбачити площу зони розшарування, методу оцінки міцності композитних пластин із тканинного склопластику з балістичними ушкодженнями, методики оперативного ремонту матричним компаундом композитних пластин із тканинного склопластику з пошкодженнями після низькошвидкісного удару.

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ І БАЛІСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТІВ

### 2.1 Визначення механічних властивостей склопластику

*Квазістатичні випробування до руйнування зразків зі склопластику.*

Для дослідження були виготовлені прямокутні зразки зі склопластику розмірами  $100 \times 10 \times 1,95$  мм, вирізані у напрямку основи ( $0^\circ$ ) та по діагоналі ( $45^\circ$ ). Зазначені зразки були випробувані на розтяг при нормальній температурі ( $+23^\circ\text{C}$ ) для визначення механічних характеристик та отримання діаграми деформування на універсальній випробувальній машині. Швидкість руху траверси 5 мм/хв. Деформація зразка вимірювалася за допомогою однокомпонентного навісного екстензометра.

Характерний вид діаграм деформування представлений рис. 2.1 для зразків, вирізаних у бік основи і рис. 2.2 для зразків, вирізаних по діагоналі.

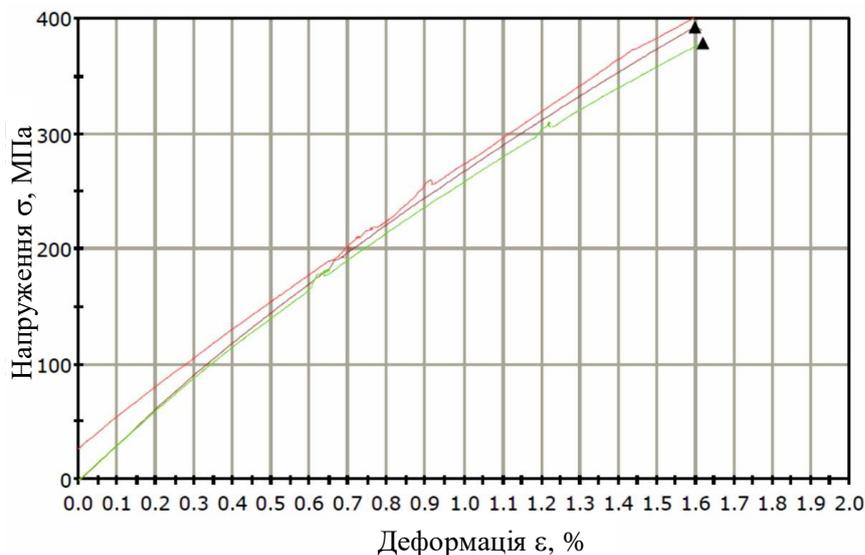


Рисунок 2.1 - Діаграми деформування при розтягуванні вздовж основи

В результаті випробувань середнє значення границі міцності матеріалу, вирізаного напрямку основи становило 380 МПа, а вирізаного по діагоналі – 200 МПа. Також було отримано механічні характеристики склопластику (табл. 2.1).

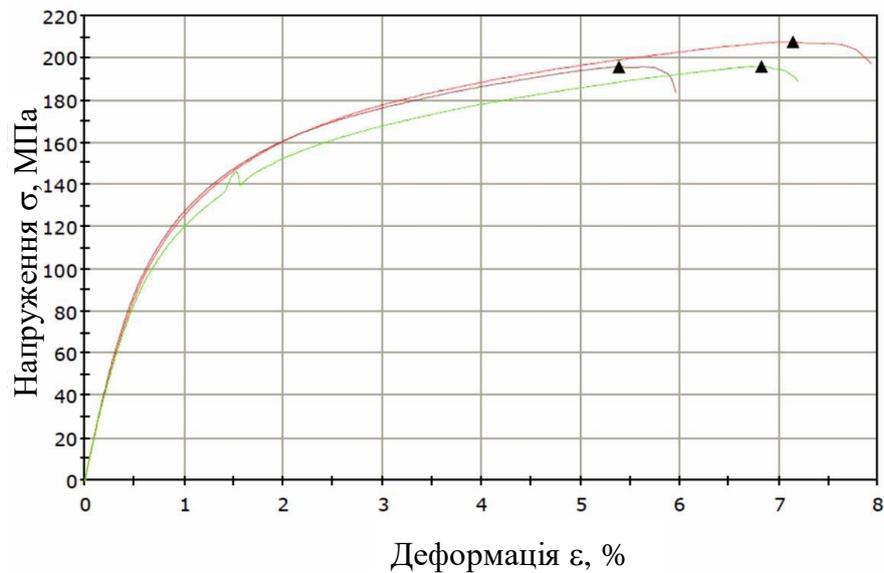


Рисунок 2.2 - Діаграми деформування при розтягуванні зразків, вирізаних по діагоналі

Таблиця 2.1 – Механічні характеристики склопластику

Модуль пружності в напрямку основи, $E_x$ , ГПа	Модуль пружності в напрямку діагоналі, $E_y$ , ГПа	Модуль зсуву, $G_{xy}$ , ГПа	Коефіцієнт Пуассона, $\nu_{xy}$	Границя міцності в напрямку основи, $X_t$	Границя міцності в напрямку діагоналі, $Y_t$
28	28	6,2	0,18	380	380

#### *Динамічні випробування до руйнування зразків зі склопластику.*

З огляду на особливості оснащення для динамічних випробувань зразки для випробувань з визначення механічних властивостей мали форму, представлену на рис. 2.3. Вибір такої форми зразка виправданий тим, що цей матеріал має структуру  $[0,90]$ , що визначає невеликий коефіцієнт Пуассона (0,18), а отже, зона крайового ефекту має невелику довжину. У робочій частині відбувається рівномірний розподіл напруження. Тому для подальшого порівняння результатів динамічних випробувань було визначено механічні властивості при квазістатичному навантаженні для зразків цієї форми. Оскільки дана форма зразка не є стандартною / сертифікованою, було проведено порівняння отриманих результатів з результатами для зразків-смужок.

Результати квазістатичних випробувань для зразків з потоншенням показали близькі значення границі міцності та модулю пружності зі значеннями для зразків-смужок (відмінність в межах 5%), тому дана форма зразків була визнана задовільною і застосовувалася при динамічних випробуваннях.

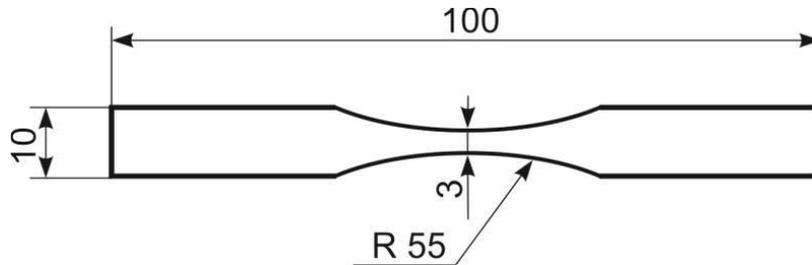


Рисунок 2.3 – Зразок для розтягу

Динамічні випробування щодо визначення механічних властивостей були проведені на зразках зі склопластику з потоншенням у середній частині (рис. 2.3), вирізаних у напрямку основи ( $0^{\circ}$ ) та по діагоналі ( $45^{\circ}$ ). Визначення модуля пружності, границі міцності полімерного волокнистого композиту проводили за динамічного розтягування. Динамічні випробування проводили на вертикальному копії.

Для проведення динамічного розтягування на вертикальному копії було використане оснащення (рис. 2.4). Воно складається з рухомого бойка та нерухокої основи, в якій між двома захватами закріплюється зразок. По нижньому захвату ударяє бійок із заданою швидкістю. Верхній нерухомий захват з'єднаний з високочутливим тензодинамометром. На динамометрі були наклеєні тензодатчики за схемою повного мосту. Тарування датчиків проводили на випробувальній машині до максимального навантаження 10 кН. Запис даних (зусилля – час) з динамометра проводили за допомогою комплексу, які потім зіставляли зі показниками машини.

На рис. 2.5 представлена отримана у процесі випробувань діаграма "зусилля - час". Невеликі сплески на даній діаграмі обумовлені тим, що з'єднання верхнього захвата і силосимірювача є коливальною системою, яка має власну частоту коливань близько 7 кГц. За такої частоти досить надійно фіксується діаграма деформування при помірній швидкості удару (до 5 м/с).

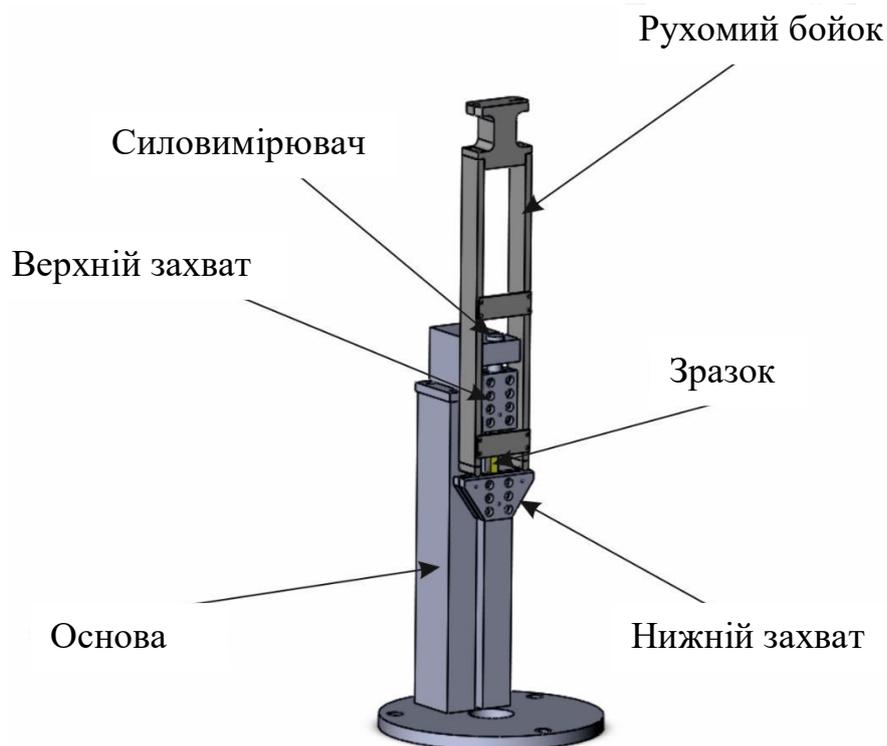


Рисунок 2.4 - Оснащення для динамічного розтягування, що використовується на баштовому копрі

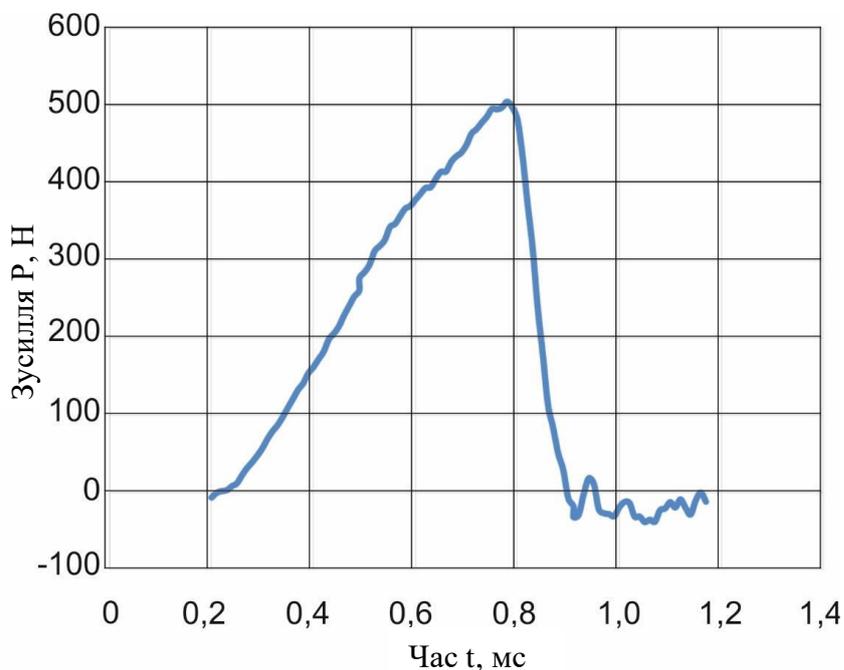


Рисунок 2.5 - Діаграма "зусилля - час" для зразка, вирізаного в напрямку основи

При динамічному розтягу зразків загальну масу вантажу підбирали з умови, щоб енергія вантажу після руйнування зразка залишалася майже

незмінною. Якщо на руйнування зразка витрачається близько 2 Дж, то 180 Дж, запасених вантажем, будуть цілком достатніми, щоб швидкість вантажу змінювалася менш ніж на 10%. Початкові дані, що задаються під час випробувань, представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 - Початкові дані при динамічному розтягуванні

Швидкість деформування зразка, с <sup>-1</sup>	Швидкість падіння, м/с	Висота падіння, м	Загальна маса бойка, кг	Енергія, Дж
80	2	0,2	66,934	133,8
200	5	1,27	10,934	136,7

Отримані залежності "зусилля - час" були перераховані в залежності "напруження - деформації" за умови, що швидкість деформування залишається постійною  $\dot{\epsilon} = \text{const}$ .

Середні значення границі міцності кожної швидкості представлені у табл. 2.3. Згладжені діаграми деформування матеріалу при динамічному розтягуванні швидкості деформування 200 сек<sup>-1</sup> представлені на рис. 2.6 і 2.7.

Таблиця 2.3 - Значення границі міцності

Кут укладання волокон	Швидкість деформування, с <sup>-1</sup>	Границя міцності $\sigma_b$ , МПа
0	80	715
	200	750
45	80	245
	200	270

Оскільки у захватах може відбуватися незначне прослизання, а також хвильові процеси, визначити значення модуля пружності та відносної деформації з високою точністю неможливо.

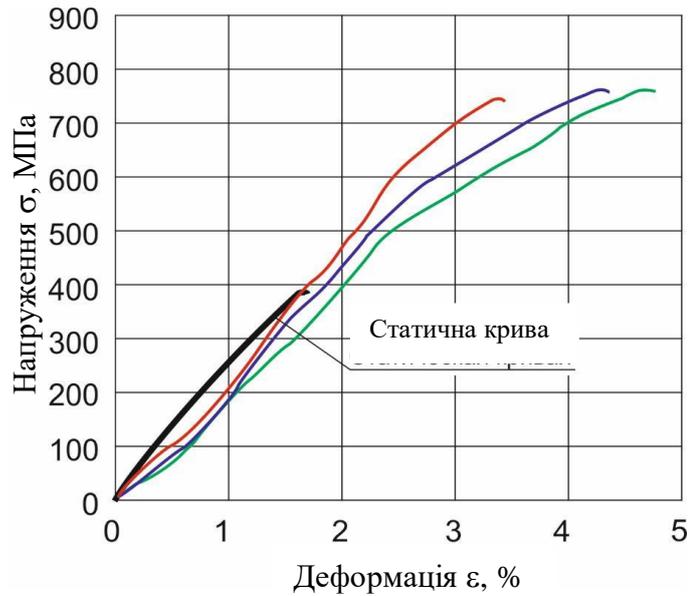


Рисунок 2.6 - Діаграми «напруження – деформація» для зразків, вирізаних у напрямку основи при швидкості деформування  $200 \text{ сек}^{-1}$

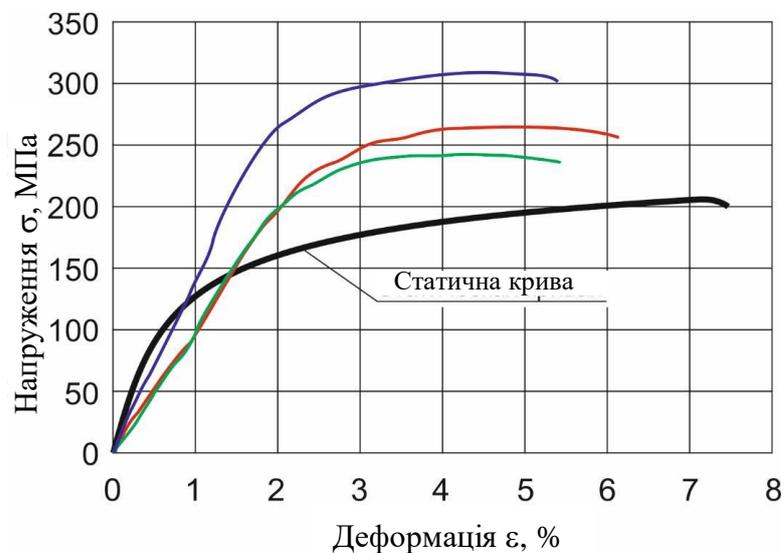
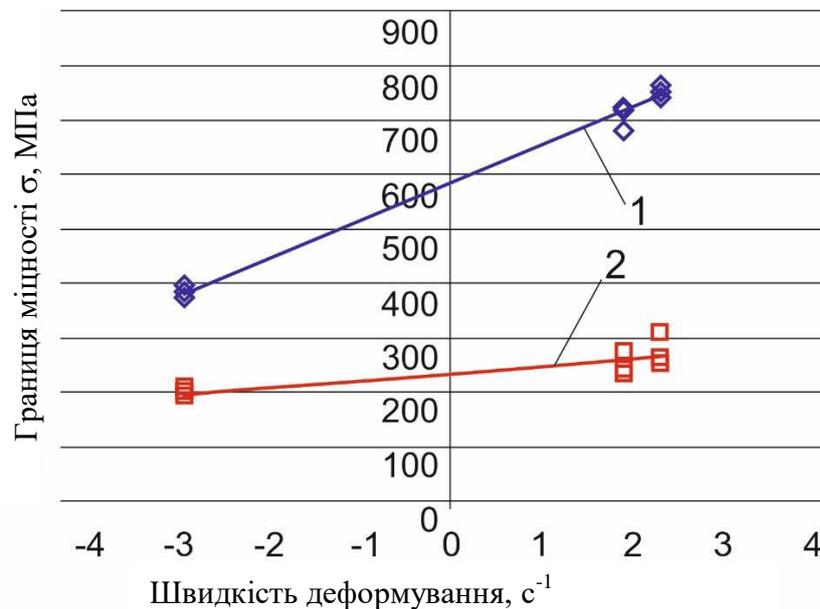


Рисунок 2.7 - Діаграма "напруження - деформація" для зразків, вирізаних по діагоналі, при швидкості деформування  $200 \text{ сек}^{-1}$

Отримані результати показали суттєву залежність границі міцності матеріалу від швидкості деформування (рис. 2.8), що було враховано при призначенні властивостей матеріалу при чисельному моделюванні. Таке підвищення властивостей міцності пояснюється тим, що в динамічних випробуваннях волокна не встигають випрямлятися і працюють як

односпрямовані в пакеті. Міцність волокон прагне до міцності односпрямованих. Якщо враховувати укладання волокон і ~50% вміст волокон, то отримані 750 МПа у напрямку основи динамічних випробуваннях відповідають міцності скловолокон в 3-3,5 ГПа, що цілком відповідає відомим значенням міцності для S-скла [11].



крива 1 – для зразків, вирізаних у бік основи ( $0^\circ$ ), крива 2 – для зразків, вирізаних по діагоналі ( $45^\circ$ )

Рисунок 2.8 - Залежність границі міцності від швидкості деформування

*Вплив температури на механічні характеристики при квазістатичних випробуваннях до руйнування зразків зі склопластику.*

Для дослідження впливу температури на механічні властивості волокнистого полімерного композиту були виготовлені зразки, вирізані в напрямку основи, зі склопластику з потоншенням в середній частині (рис. 2.3). Зразки були випробувані на розтяг при нормальній ( $+23^\circ\text{C}$ ), підвищеній ( $+60^\circ\text{C}$ ) та зниженій ( $-60^\circ\text{C}$ ) температурах на універсальній випробувальній машині. Швидкість руху траверси 5 мм/хв. Для охолодження зразків використовували сухий лід (тверда вуглекислота), нагрівання зразків до  $+60^\circ\text{C}$  здійснювали у печі. Зразки витримували при температурі  $-60^\circ\text{C}$  та  $+60^\circ\text{C}$  протягом 30 хвилин і далі випробували.

На кожну температуру на розтяг було випробувано по 3 зразки. Механічні характеристики матеріалу за різних температур представлені у табл. 2.4.

За результатами випробувань було побудовано залежності модуля пружності та границі міцності від температури (рис. 2.9).

Таблиця 2.4 – Механічні характеристики склопластику за різних температур

Температура	№ зразка	Маркування зразка	Ширина, мм	Товщина, мм	Початкова довжина, мм	Максимальне зусилля, кН	Границя міцності, МПа	Модуль пружності, ГПа
-60 °C	1	17	2,96	1,95	55	2,40	430,80	28,90
	2	18	2,93			2,70	490,95	27,30
	3	19	2,93			2,35	416,10	30,30
+23 °C	1	20	2,63			2,40	479,20	29,10
	2	21	2,95			2,10	370,25	25,55
	3	22	2,91			2,10	380,40	26,60
+60 °C	1	23	2,91			2,60	466,10	25,80
	2	24	2,69			2,05	397,10	27,35
	3	25	2,84			2,05	377,20	25,05

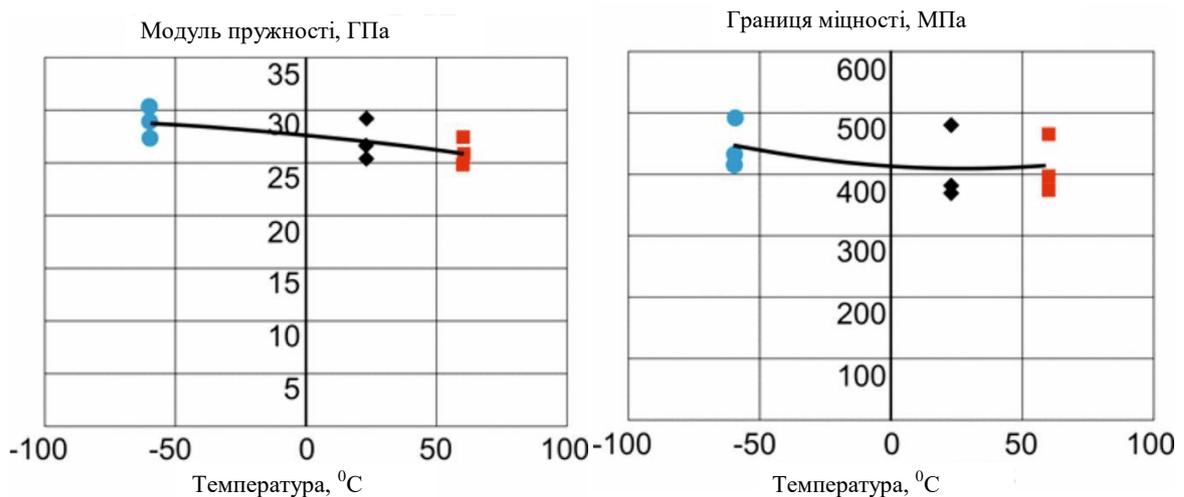


Рисунок 2.9 - Залежність механічних характеристик від температури

Отримано, що зміна температури впливає на механічні властивості склопластику. При температурі -60°C відзначається зростання властивостей

композиту на 6-8% нормальної кімнатної температури, а при підвищеній (+60°C) зниження на 4% значення модуля пружності. Границя міцності за підвищеної температури не змінюється. Це пояснюється тим, що при зменшенні температури зростає міцність полімеру, і навпаки, що ближче температура до температури полімеризації, то менш міцною і жорсткою стає матриця.

## 2.2 Визначення балістичних характеристик склопластику при ударному навантаженні

*Балістичні випробування зразків зі склопластику за нормаллю.*

Для оцінки балістичних властивостей матеріалу були проведені випробування на балістичному стенді [12], що дозволяє фіксувати початкову та залишкову (після пробою) швидкості індентора. Балістичні випробування проводилися відповідно до стандарту [13] сталеву кулькою діаметром 6,35 мм та масою 1,05 грама.

Початкова швидкість снаряда визначалася компактним оптичним хронографом. Оптичний хронограф був попередньо відкалібрований. Фрикційна пастка із загальною масою 665 г та коефіцієнтом тертя ковзання вздовж напрямної 0,27 використовувалася для вимірювання залишкового імпульсу снаряду. Залишкова швидкість розраховується за формулою, що ґрунтується на законах збереження енергії та імпульсу

$$V(S) = \left( 1 + \frac{M}{m_p} \right) \sqrt{2g \cdot f \cdot S}. \quad (2.1)$$

де  $S$  – переміщення пастки по напрямній,

$m_p$  – маса снаряда,

$M$  – маса пастки,

$f$  – коефіцієнт тертя ковзання,

$g$  - прискорення вільного падіння.

При взаємодії індентора та пастки вважається, що виконується гіпотеза абсолютно непружного удару і що снаряди після пробою мають швидкість  $V$ .

Швидкість пастки

$$V_{\text{trap}} = \frac{m_p \cdot V}{M + m_p}$$

визначалася відповідно до закону збереження імпульсу. Початкова кінетична енергія пастки трансформувалася на роботу сили тертя

$$\frac{(m_p + M) \cdot V_{\text{trap}}^2}{2} = (m_p + M) \cdot g \cdot f \cdot S.$$

Для підтвердження запропонованих міркувань та перевірки формули (2.1) було проведено тарювання пастки, що полягає у проведенні серії пострілів за відсутності мішені та порівняння отриманих результатів з залежністю  $v(s)$  (рис. 2.10). Дані випробування показали, що помилка вимірювання залишкової швидкості не перевищує  $\pm 10$  м/с.

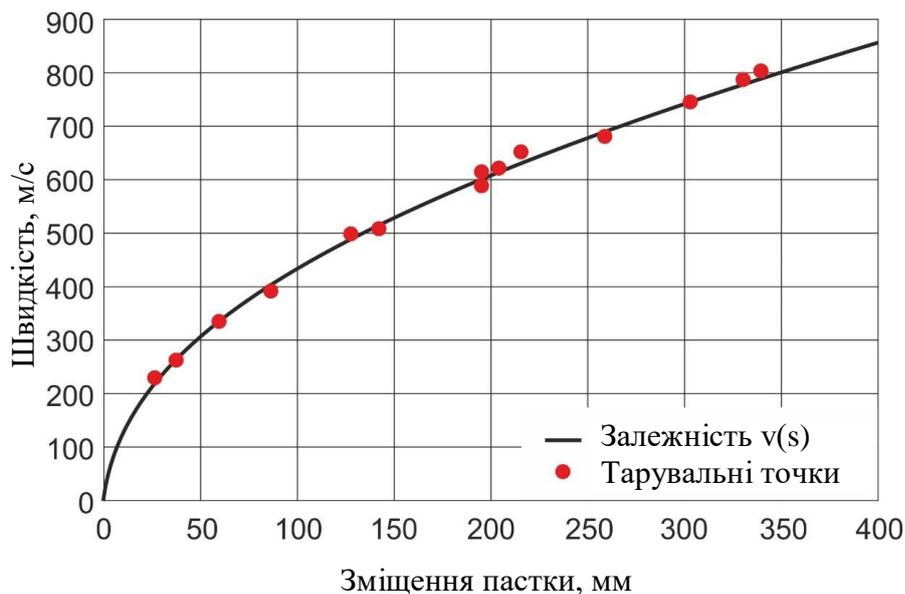


Рисунок 2.10 - Тарувальний графік пастки для визначення залишкової швидкості ударника

Для балістичних випробувань було підготовлено композитні пластини розмірами  $100 \times 100$  мм із склопластику з товщинами 1,95 та 3,90 мм.

Балістична границя не визначалася безпосередньо з результатів випробувань. Проводилася серія пострілів з різними швидкостями та надалі була побудована апроксимуюча дані результати функція на основі залежності Ламберта-Джонаса [14]:

$$V_r = \begin{cases} 0 & \text{если } V_i < V_L \\ A \cdot (V_i^m - V_L^m)^{1/m} & \text{если } V_i \geq V_L \end{cases}, \quad (2.2)$$

де  $A$ ,  $V_L$  та  $m$  – три параметри регресії,

$V_r$  та  $V_i$  – залишкова та початкова швидкості снаряда, відповідно,

$V_L$  - балістична границя (швидкість, при перевищенні якої спостерігається пробій).

Цю залежність слід використовувати з обережністю, оскільки параметри, визначені з неї, залежатимуть від матеріалу та геометрії. Тим не менш, вона дозволяє згладжувати похибки експериментальних даних та допомагає аналізувати поведінку різних матеріалів при балістичному навантаженні з погляду енергетичного балансу.

Після обробки даних були отримані балістичні криві (залежність залишкової швидкості ударника від початкової) для кожної товщини склопластику (рис. 2.11) і оціночні балістичні границі 185 і 302 м/с для товщин 1,95 і 3,90 мм відповідно. Пунктирна лінія відповідає відсутності мішені (початкова та кінцева швидкість ударника збігаються).

*Дослідження механізмів руйнування тканинного склопластику під час удару.*

Дослідження механізмів руйнування тканинного склопластику при ударі проводилося на зразках зі склопластику завтовшки 1,95 мм.

При низьких швидкостях зіткнення ( $V_0 = 50 \dots 100$  м / с) спостерігалось руйнування у вигляді локального розшарування. При помірних швидкостях зіткнення ( $V_0 = 100 \dots 150$  м / с) спостерігалось руйнування у вигляді значного розшарування з розривом волокон тильних шарів. При середніх швидкостях зіткнення ( $V_0 = 150 \dots 350$  м / с) спостерігалось руйнування у вигляді пробою всіх шарів з великою зоною розшарування. При високих швидкостях зіткнення

( $V_0 = 350 \dots 700$  м / с) спостерігалось руйнування у вигляді пробою всіх шарів з помірною зоною розшарування. Ударна сторона наведена ліворуч, тильна сторона – посередині, а праворуч – на просвіт. Відмінності у характері руйнації пояснюються різною величиною енергії, витраченою на пошкодження.

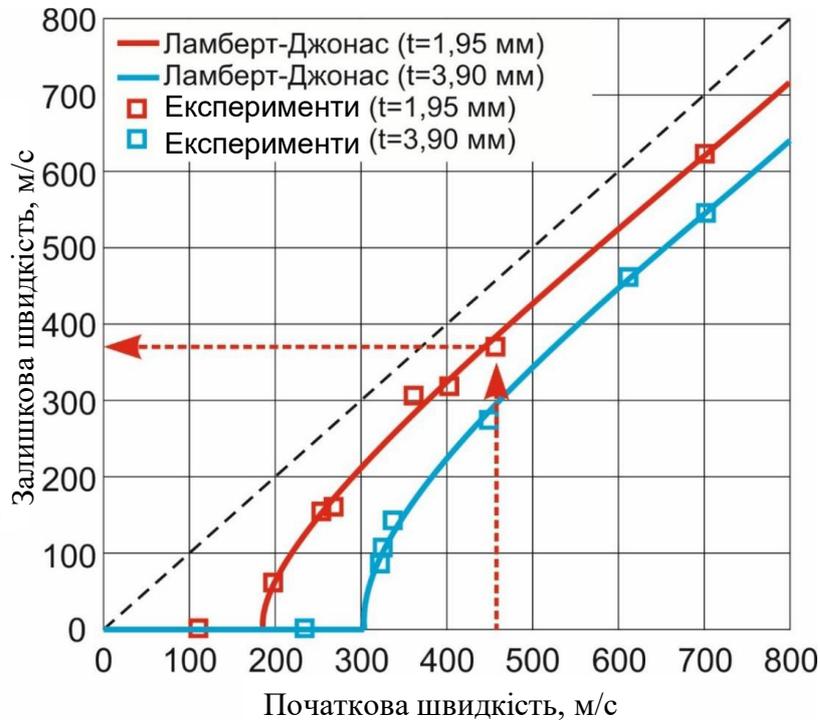


Рисунок 2.11 - Балістичні криві

При руйнуванні в композитних панелях відбувався розрив волокон з утворенням розшарування. У цьому розмір області розшарування залежить від початкової швидкості ударника. Для визначення зони розшарування матеріалу було вивчено пошкоджені пластини зі склопластику після балістичних випробувань. Зразки із склопластику є напівпрозорими та зони розшарування візуалізуються без використання спеціальних засобів рентгенівського або ультразвукового контролю.

Зображення зразка напросвіт була імпортована в пакет векторного графічного редактору, де знайдено кордон темної області після контрастування загальної картини. Далі за допомогою вбудованих функцій векторного графічного редактору було обведено область розшарування та знайдено її площу. В результаті обробки експериментальних даних була отримана

залежність площі зони розшарування у зразку від початкової швидкості ударника  $V_0$  (рис. 2.12, експериментальні точки). Найбільша зона ушкоджень утворюється при швидкості, близькій до балістичної границі (рис. 2.12). Це пов'язано з тим, що в цьому випадку зразок поглинає всю кінетичну енергію від ударного впливу за рахунок утворення нових поверхонь (розшарування) та тріщин усередині шарів.

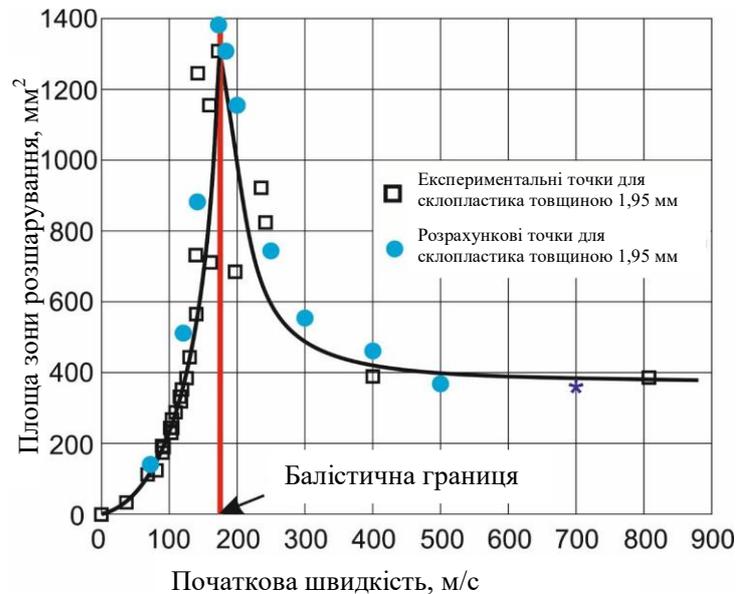


Рисунок 2.12 - Залежність площі зони розшарування від початкової швидкості ударника  $V_0$  для склопластику завтовшки 1,95 мм

Далі для отримання більш докладної інформації про розмір тріщин зразки були розрізані на низькошвидкісній алмазній дисковій пилці і поміщені в цифровий мікроскоп, що просвічує. При 20-кратному збільшенні поперечного розрізу зразка отримано, що максимальна ширина тріщини в зоні розшарування досягає 40 мкм (важливо для ремонту).

### 2.3 Оцінка міцності композитних панелей з балістичними пошкодженнями

Для оцінки впливу отриманих пошкоджень на характеристики міцності склопластику були проведені експерименти з визначення залишкової міцності

зразків-смужок (200x40x1,95мм) на квазістатичне розтягування. Випробування проводилися на випробувальній машині за нормальних умов. Деформацію зразка вимірювали за допомогою навісного екстензометра однокомпонентного.

Характерний вид діаграми деформування представлений на рис. 2.13. Зазначимо, що помітне зниження жорсткості (накопичення мікроушкоджень) відбувається при навантаженнях, що становлять  $\sim 80\%$  від руйнівних. Руйнівне навантаження та границя міцності матеріалу представлені в табл. 2.5. Границю міцності пошкоджених зразків розраховували як відношення максимального навантаження до площі поперечного перерізу зразка у вигляді прямокутника з відомими розмірами.

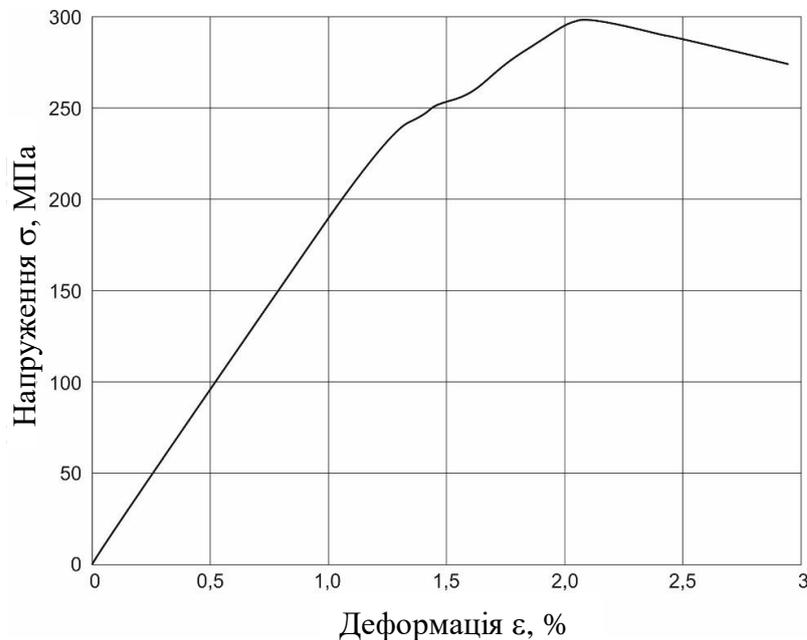


Рисунок 2.13 - Характерна діаграма деформування при розтягуванні

На підставі отриманих результатів було побудовано залежність залишкової міцності у зразках від початкової швидкості ударника (рис. 2.14). Варто зазначити, що у зразках під номерами 13 та 15 руйнація зразка відбувалася не у місці пошкодження, а за захватом. Це означає, що реальна міцність цих зразків виявляється вищою, ніж зазначена в табл. 2.5.

Форма залежності на рис. 2.14 пояснюється тим, що при швидкостях близьких до балістичної границі, крім збільшення зони розшарування, спостерігається зростання числа зруйнованих волокон, що призводить до

падіння властивостей міцності. При швидкостях вище балістичної границі (вище 185 м/с) відбувається наскрізний пробій зразка з руйнуванням всіх волокон, що контактували з індентором при мінімальних значеннях площі зони розшарування (аналог - отвір пластини).

Таблиця 2.5 – Залишкова міцність зразків із пошкодженнями

№ зразка	Маркування зразка	Ширина, мм	Товщина, мм	Початкова довжина, мм	Площа зони розшарування, мм <sup>2</sup>	Максимальне зусилля, кН	Границя міцності, МПа
1	10	40	1,9	55	0	30,7	404
2	11				0	23,7	382
3	16				0	25,3	395
4	17				0	27,2	413
5	1				463	17,7	232
6	2				388	17,3	227
7	3				828	18,0	237
8	4				686	18,3	241
9	5				1158	20,6	271
10	6				712	18,3	241
11	7				1248	20,0	264
12	8				730	22,6	297
13	9				244	28,2	372
14	12				921	16,5	217
15	13				569	22,3	293
16	14				1308	18,2	240
17	15				390	17,2	226

В результаті для зразків зі склопластику з пошкодженнями залишкова міцність при розтягуванні знижується в залежності від початкової швидкості та розміру зони розшарування з 380 МПа до 210 МПа. Це означає, що закладаючи коефіцієнт запасу близько 2,0, можна не побоюватися руйнування конструкції при одноразовому навантаженні. Це співвідноситься з даними зниження міцності композитних панелей з отворами, отриманих Daniels [15].

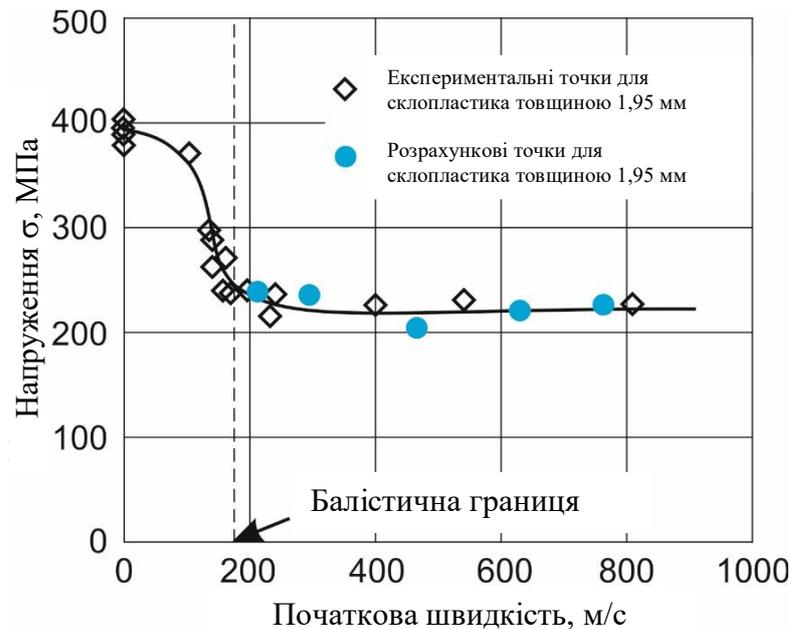


Рисунок 2.14 - Залежність залишкової міцності від початкової швидкості ударника

Отримані експериментальні дані значень границі міцності нижче порівнюються із розрахунковими значеннями, отриманими з використанням наближеного експрес-методу, що базується на енергетичному підході [16].

#### 2.4 Оцінка впливу попереднього навантаження на балістичні властивості композитних панелей

Оскільки конструкції з композитних матеріалів максимально ефективно працюють при розтягуванні, були проведені випробування щодо оцінки впливу попереднього одновісного зусилля, що розтягує, на балістичні властивості

склопластику. Для експериментів балістичний стенд, був поміщений у випробувальну машину. Зразок зі склопластику розміром 1,95x50x150 мм закріплювали в захвати і задавали необхідне розтягувальне навантаження після чого по зразку здійснювався постріл. Схема випробувальної установки представлена рис. 2.15.

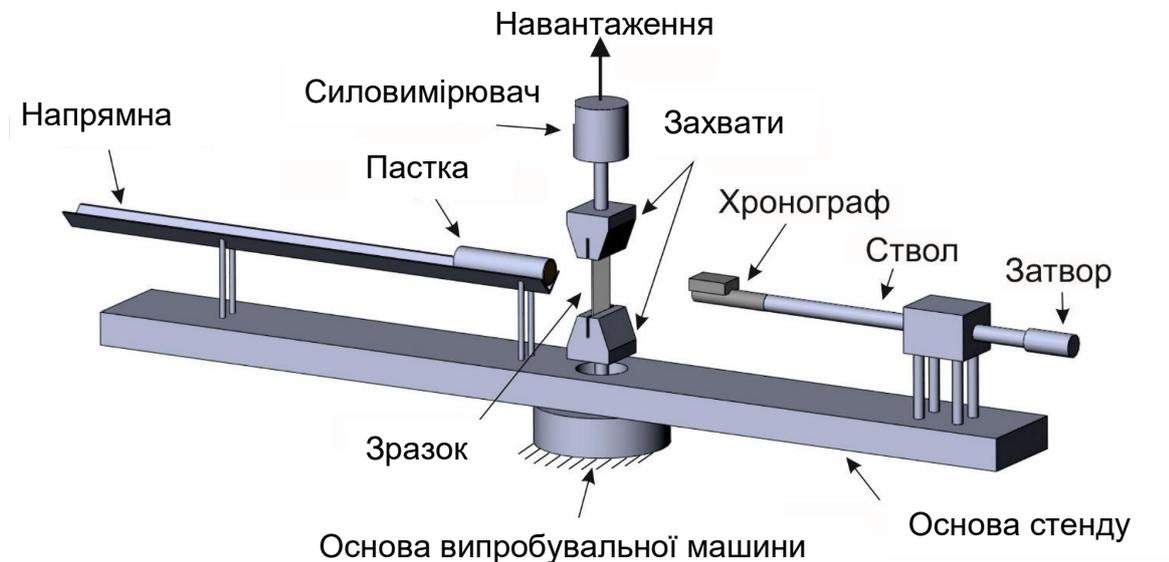


Рисунок 2.15 - Випробувальна установка для балістичних випробувань

Випробування були проведені для п'яти різних рівнів попереднього навантаження:

- Попереднє навантаження при розтягуванні  $\sigma_1 = 80$  МПа ( $\phi_1 = \sigma_1/X_t = 80/380 = 0,21$ ; матеріал працює в пружній області).
- Попереднє навантаження при розтягуванні  $\sigma_2 = 120$  МПа ( $\phi_2 = \sigma_2/X_t = 120/380 = 0,32$ ),
- Попереднє навантаження при розтягуванні  $\sigma_3 = 160$  МПа ( $\phi_3 = \sigma_3/X_t = 160/380 = 0,42$ ),
- Попереднє навантаження при розтягуванні  $\sigma_4 = 200$  МПа ( $\phi_4 = \sigma_4/X_t = 200/380 = 0,53$ ),
- Попереднє навантаження при розтягуванні  $\sigma_5 = 240$  МПа ( $\phi_5 = \sigma_5/X_t = 240/380 = 0,63$ ).

Обробку експериментальних даних щодо удару імітатором осколка проведено з використанням емпіричної залежності Ламберта-Джонаса (2.2).

*Балістичні криві та балістичні границі.*

За результатами балістичних випробувань було побудовано балістичні криві кожного рівня попереднього навантаження (рис. 2.16).

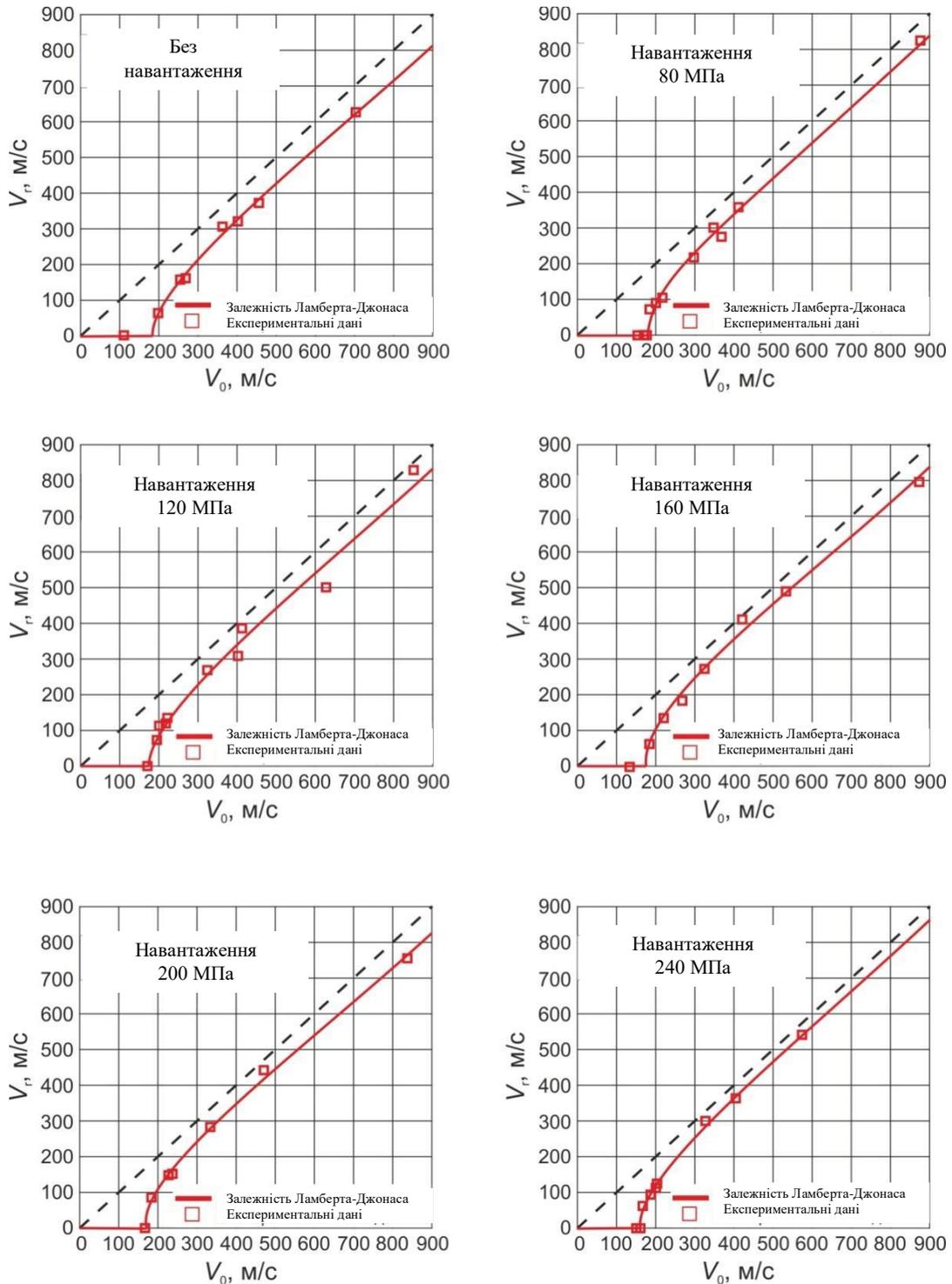


Рисунок 2.16 - Балістичні криві

Суттєвіша різниця між різними рівнями переднавантаження помітна при порівнянні поглиненої енергії (рис. 2.17). Кількість поглиненої енергії зменшується зі збільшенням рівня попереднього навантаження. Таким чином, при максимальному рівні попереднього навантаження панель поглинає в 2,5 рази менше енергії удару, ніж у ненавантаженому стані, коли швидкість ударника перевищує балістичну границю. Цей результат можна пояснити зростанням пошкоджень усередині зразка із зростанням навантаження. Під час розтягування нитки у зразку розтягуються та розпрямляються, відриваючись при цьому від матриці. Таким чином, енергія від удару не витрачається на ці механізми руйнації. Крім того, при високому рівні попереднього навантаження волокна починають розриватися під час згинання нитки, що призводить до різкого зниження балістичної границі.

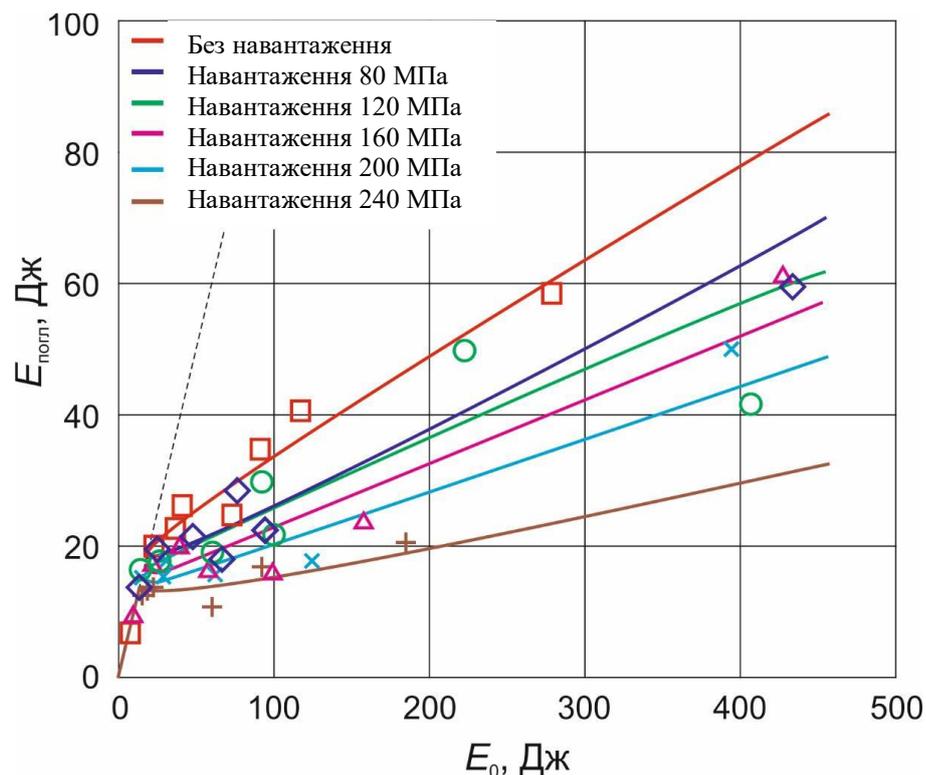


Рисунок 2.17 - Кількість поглиненої енергії

Крім того, знайдено балістичні границі для кожного рівня попереднього навантаження (табл. 2.6). Як показали результати балістичних випробувань, балістична границя матеріалу монотонно знижується зі зростанням величини попереднього навантаження (рис. 2.18).

Запропоновано однопараметричну апроксимуючу функцію, що задовільно описує експериментальні дані:

$$V_L(\sigma) = V_{L0} \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_b}\right)^n, \quad (2.3)$$

де  $n = 0,15$  (варійований параметр),

$V_{L0} = 185$  м/с - балістична границя матеріалу без попереднього навантаження.

Таблиця 2.6 - Балістичні границі для різних рівнів попереднього навантаження

Рівень попереднього навантаження, МПа	0	80	120	160	200	240
Балістична границя, м/с	185	80	176	174	166	158

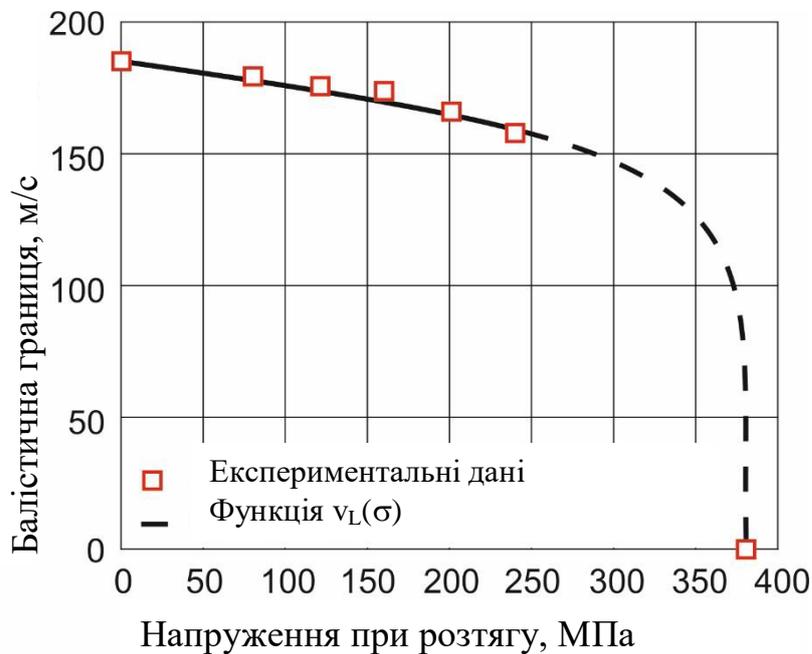


Рисунок 2.18 - Залежність балістичної границі від величини попереднього навантаження для склопластику товщиною 1,95 мм

Вигляд функції заснований на припущенні, що при напруженні, близькому до границі міцності, достатньо незначної енергії індентора, щоб пробити зразок.

Важливо, що у транспортному машинобудуванні до роботи конструкцій у квазістатичних умовах закладається коефіцієнт запасу міцності близько 2. За цих умов зниження балістичної границі відбудеться не більше ніж на 15% порівняно з ненавантаженими елементами. В авіаційній техніці запаси міцності нижчі (експлуатаційні напруження вищі), тому зниження балістичної границі в цих умовах може виявитися суттєво більшим.

#### *Зона розшарування.*

Площа розшарування пошкодженого зразка визначалася оптичним методом через часткову напівпрозорість.

Аналіз результатів випробувань показав, що попередні розтягуючі навантаження знижують розшарування. Цей ефект видно на діаграмі «зона розшарування-початкова швидкість», представлений рис. 2.19. Діаграма показує, що вищим рівням попереднього навантаження відповідає менша площа розшарування. Це особливо помітно для швидкостей, близьких до балістичних границь. При високих швидкостях відмінності майже непомітні.

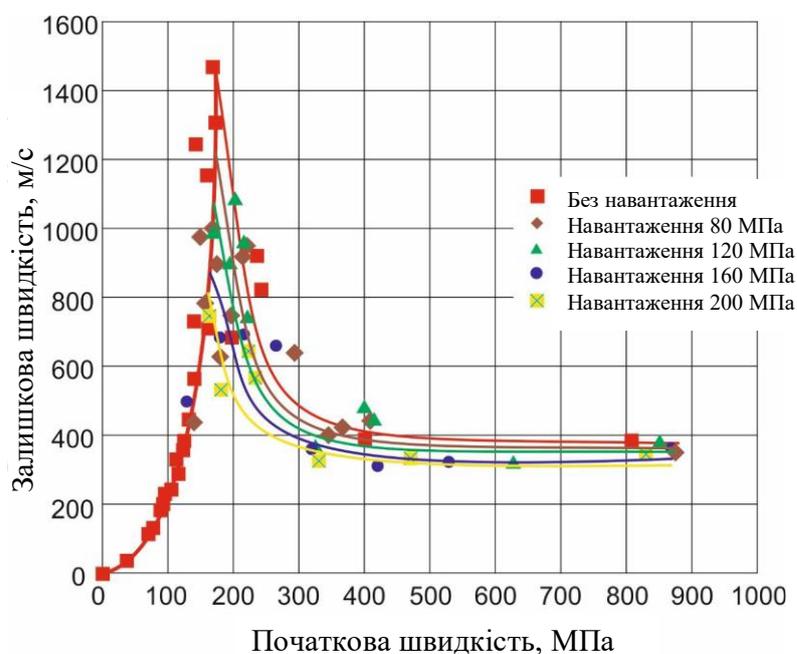


Рисунок 2.19 - Залежність балістичної границі від величини попереднього навантаження

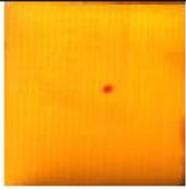
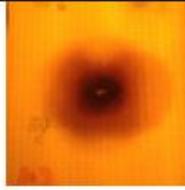
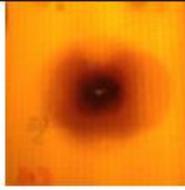
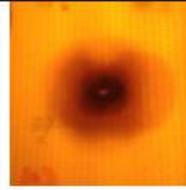
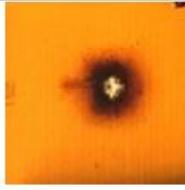
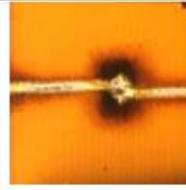
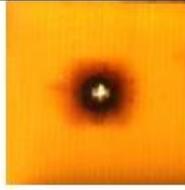
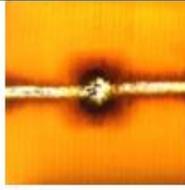
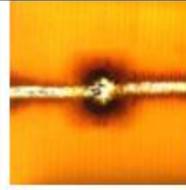
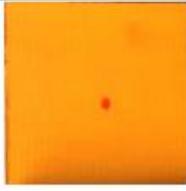
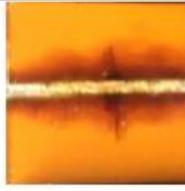
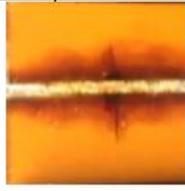
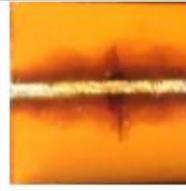
Виконано порівняння розмірів тріщини у поперечному перерізі зразка у місці удару щодо різних рівнів попереднього навантаження. Зразки для порівняння були вибрані з максимальними зонами пошкодження для кожного рівня попереднього навантаження, отриманими при швидкостях удару, максимально наближених до балістичних границь. Видно, що розмір тріщини у зразку зменшується зі збільшенням попереднього навантаження. Як зазначають автори в [17], цей результат можна пояснити жорстким ефектом (stiffening effect) попереднього розтягування, який запобігає прогинам зразка при згинанні, які зазвичай полегшують поширення тріщини (розшарування). Зокрема це пов'язано з дисипацією енергії удару в похилих (і пошкоджених під час натягу) сегментах ниток, які розтягуються та ковзають в умовах сухого тертя між волокнами та матрицею. Таким чином, частина енергії удару поглинається тертям, а не розшаруванням. Площа тертя збільшується зі зростанням розтягувального напруження  $i$ , у свою чергу, розшарування стає менше. Попереднє навантаження збільшує частоту коливань пластини  $i$ , як наслідок, енергія швидше відводиться від точки удару порівняно з ненавантаженим станом.

#### *Механізми руйнування.*

Аналіз результатів балістичних випробувань показав наявність різних механізмів руйнування матеріалу. Наприклад, при рівні попереднього навантаження, що дорівнює 160 МПа, відбувається пробиття зразка без подальшого розриву. Але при вищих рівнях попереднього навантаження у всіх випадках відбувається пробиття з подальшим розривом зразка при розтягуванні. Було зазначено, що час відгуку розрив зразка після пробиття залежить від рівня попереднього навантаження (табл. 2.7). Так, якщо попереднє навантаження було максимальним (240 МПа), розрив зразка відбувався відразу після удару та пробиття або навіть без пробиття зразка. При зменшенні попереднього навантаження відбувається тимчасова затримка у розриві зразка. Максимальна тимчасова затримка між пробиттям та розривом близько 8 секунд

спостерігалася при попередньому навантаженні 180 МПа. Додаткові експерименти при рівні попереднього навантаження 180 МПа були спеціально проведені для вивчення тимчасової затримки. На цьому рівні попереднього навантаження було виконано кілька пострілів, тому балістична крива не була побудована, і вона також не відображається у табл. 2.6. Акустична емісія та розповсюдження тріщини впливають на цю затримку (табл. 2.7, серія кадрів цифрової відеокамери). Відомо, що, якщо навантаження прикладається до зразка протягом тривалого часу, характеристики знижуються, спостерігається повзучість. У літературі це явище позначають терміном «довготривала міцність» і її значення супроводжується вказівкою часу перебування зразка під навантаженням до розриву. Очевидно, що зазначені тимчасові затримки пов'язані з цим явищем - повзучістю матеріалу.

Таблиця 2.7 – Час відгуку на розрив зразка після пробиття

160 МПа			...		
	0 ms	5 ms		8s 35 ms	8s 40 ms
180 МПа			...		
	0 ms	5 ms		8s 35 ms	8s 40 ms
200 МПа			...		
	0 ms	5 ms		25 ms	30 ms
240 МПа				...	
	0 ms	5 ms	10 ms		3s 00 ms

Значення 180 МПа близьке до напруження руйнування зразка композитного матеріалу з невеликим центральним отвором при одновісному розтягуванні. У разі укладання шарів ефективний коефіцієнт концентрації напружень  $K_{\sigma} \approx 2.0$  [7]. У нашому дослідженні  $X_t/K_{\sigma} = 380/2 = 190$  МПа.

## **2.5 Дослідження впливу низько і високошвидкісних похилих ударів на балістичні характеристики склопластику**

На додаток до нормальних ударів вивчено опір склопластику похилим ударам. Для цього було проведено ударні випробування сталевим сферичним ударником при кутах нахилу до нормалі 15, 30, 45 і 60 градусів. Для кожного кута нахилу були зроблені серії пострілів за зразками зі склопластику розмірами 100x100 мм. Товщина зразків із склопластику була 3,90 мм.

*Балістичні криві та балістичні границі.*

В результаті проведених випробувань для кожного кута нахилу було знайдено балістичну границю матеріалу, а також побудовано балістичні криві. Порівняння отриманих балістичних кривих представлено рис. 2.20.

Нижче отримано залежність балістичної границі від кута нахилу (рис. 2.21).

Ця залежність показує, що відхилення до  $30^0$  від нормалі практично не впливають на балістичну границю ( $\sim 300$  м/с). Тільки при великих кутах балістична границя починає суттєво зростати, досягаючи величини 378 м/с для кута  $60^0$  (товщина матеріалу у всіх дослідах була 3,90 мм). Таким чином, найнебезпечнішим випадком удару по склопластику з точки зору мінімуму балістичної границі можна вважати удар по нормалі.

*Зона розшарування.*

За результатами випробувань було проведено аналіз зони пошкодження склопластику. Характерним видом пошкодження при непробиванні матеріалу для великих кутів нахилу (45 і 60 градусів) була витягнута вздовж напрямку пострілу зона розшарування. Для зразків, за якими робився постріл під кутом

30 градусів, витягування зони пошкодження практично не було, а для зразків, за якими робився постріл під 15 градусів, було повністю непомітно.

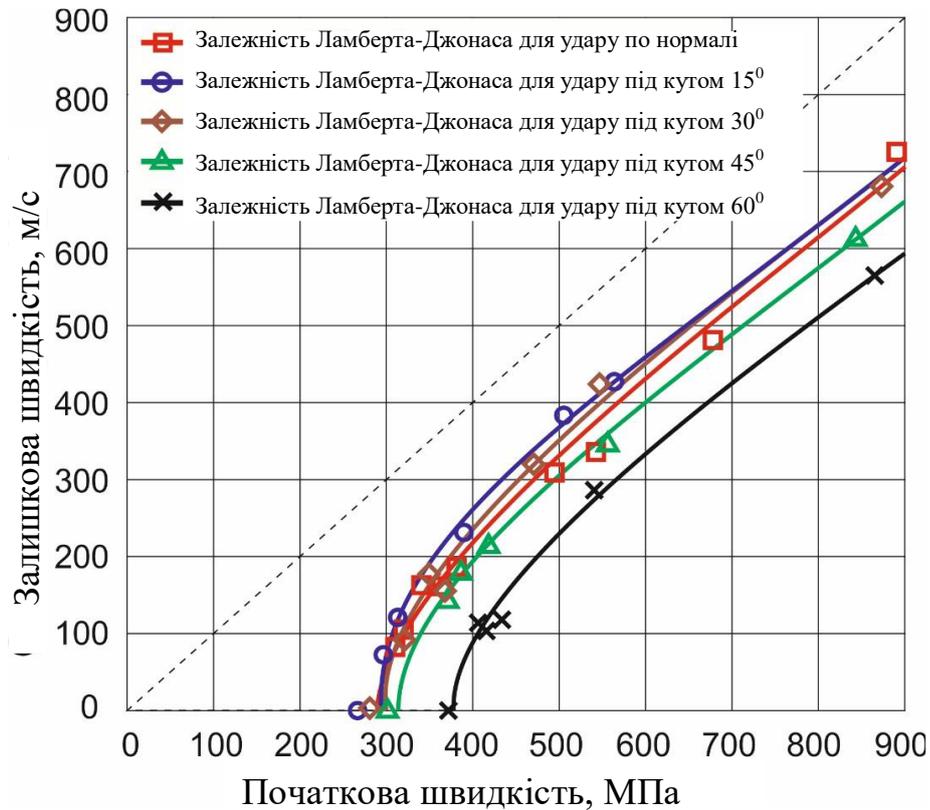


Рисунок 2.20 - Балістичні криві

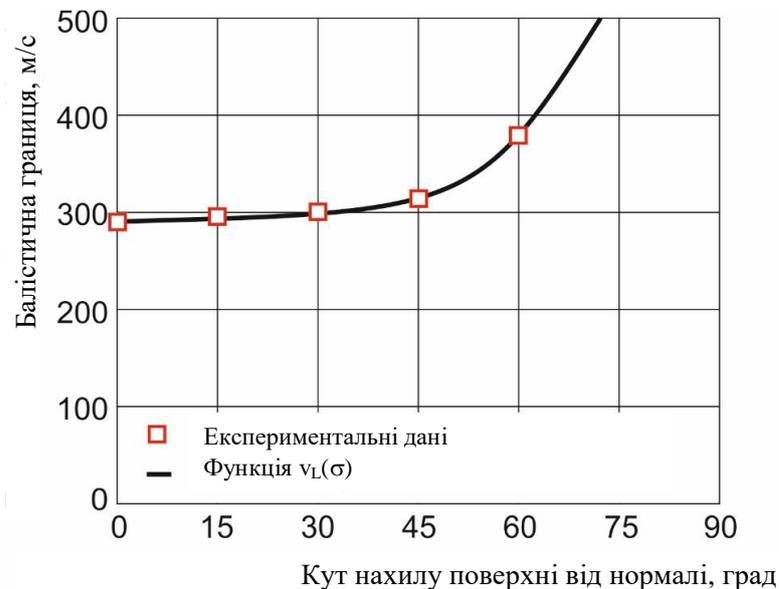


Рисунок 2.21 - Залежність балістичної границі від кута нахилу

Зазвичай, при швидкостях близьких до балістичної границі з'являється максимальна площа розшарування матеріалу. Це пов'язано з тим, що у цьому

разі зразок поглинає всю кінетичну енергію від ударного впливу за допомогою розшарування. Тому, було проведено порівняння розміру зони розшарування склопластику при різних кутах ударного впливу та при швидкостях зіткнення, близьких до балістичної границі в кожному випадку. Отримані середні результати представлені у табл. 2.8.

Таблиця 2.8 - Порівняння експериментальних значень зон розшарування матеріалу для різних кутів удару

Кут нахилу	0	15	30	45	60
Балістична границя, м/с	290	295	300	314	378
Початкова швидкість, м/с	290	300	288	314	372
Площа розшарування, мм <sup>2</sup>	1409	1414	1653	1144	1060

Як видно з наведених даних не можна стверджувати, що відбувається збільшення площі зони розшарування матеріалу (що призводить до зниження залишкової міцності) зі збільшенням кута нахилу. Деяке збільшення площі розшарування було помічено лише за пострілів під кутом 30 градусів проти пострілів по нормалі.

Таким чином, найнебезпечнішим випадком удару по склопластику можна вважати удар по нормалі.

### 3 РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ КОМПОЗИТІВ ПРИ СТАТИЧНИХ І ЛОКАЛЬНИХ УДАРНИХ ВПЛИВАХ

#### 3.1 Оцінка міцності композиту після ударної дії

Як було зазначено раніше, пошкодження, що виникають в результаті ударного навантаження, суттєво знижують границю міцності склопластику. Для оцінки залишкової міцності після ударного навантаження було запропоновано замінювати зону пошкодження еквівалентним отвором, що знижує локальну жорсткість матеріалу так само, як реальне пошкодження. Далі слід проводити оцінку міцності композиту з отвором за критерієм, в якому враховано нелінійність діаграм деформування композиту з використанням енергетичних міркувань Г. Нейбера [18] (пошук напружень і деформацій на нелінійній ділянці діаграми « $\sigma - \epsilon$ » за відомим пружним розв'язком з використанням гіперболи  $\sigma\epsilon = \text{const}$ , рис. 3.1). На гіперболі всі точки мають однакову питому енергію деформування  $\sigma\epsilon$ .

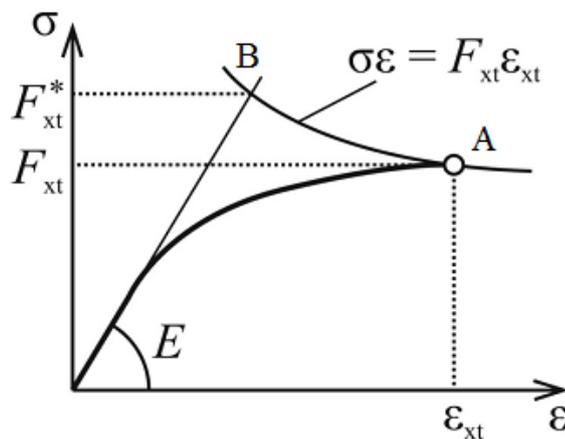


Рисунок 3.1 - Гіпербола Г. Нейбера при непружному аналізі напружень біля концентраторів

Напруження руйнування  $\sigma_{cr}$  можна визначити за формулою:

$$\sigma_{Cr} = F_{xt}^* / \alpha_S \quad (3.1)$$

де  $F_{xt}^*$  – ефективна границя міцності,

$\alpha_s$  – коефіцієнт концентрації середніх на заданій базі ( $\sim 1$  мм) напружень, що визначаються розрахунковим шляхом у універсальній програмній системі для зразка з анізотропного пружного матеріалу з еквівалентним отвором.

Результати розрахунку нормальних напружень у пакеті універсальній програмній системі зразка з отвором діаметром  $D=17$  мм із розміром кінцевого елемента  $A=1$  мм представлені на рис. 3.2.

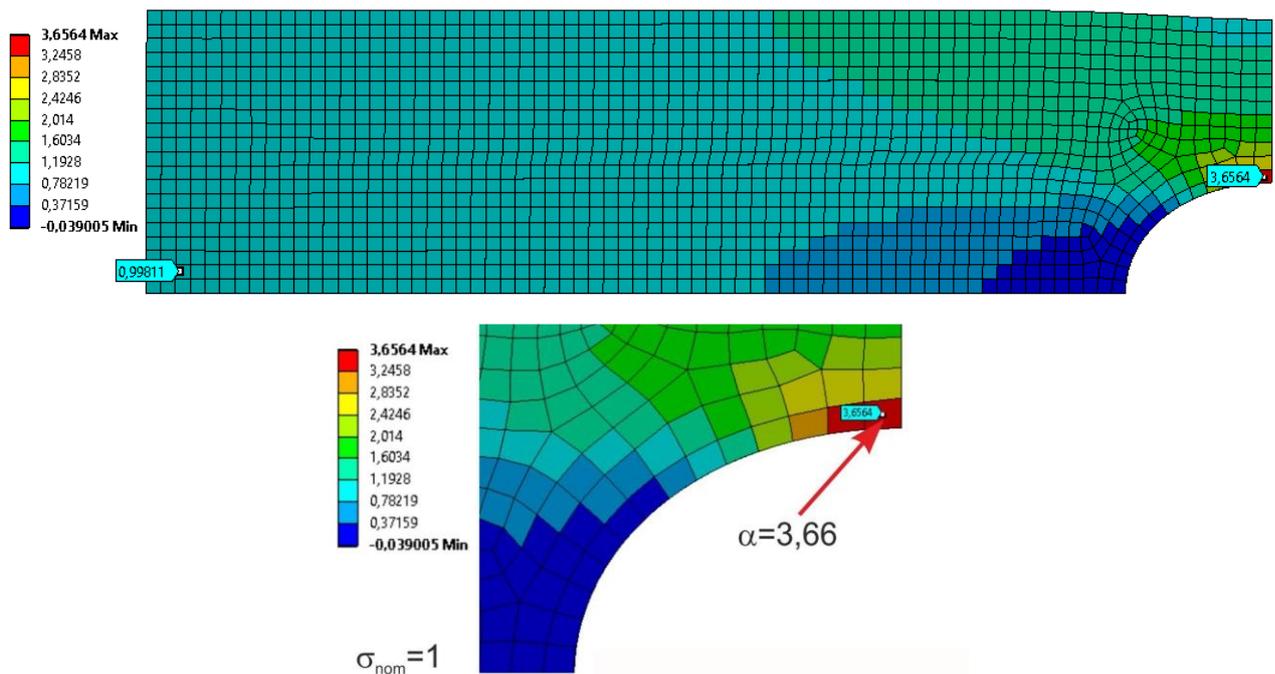


Рисунок 3.2 - Розрахунок напружень за допомогою пакету універсальної програмної системи зразка з отвором

Порівняння експериментальних і розрахункових руйнівних напружень (рис. 2.19) показало, що похибка розрахункової оцінки руйнівних навантажень вбирається у 10%.

### 3.2 Розробка розрахункової мезоструктурної моделі композиту для розрахунків ударної дії

На підставі аналізу літератури було встановлено, що найбільш раціональним підходом до моделювання процесів деформування, пошкодження та руйнування пластин з тканинного композиту при ударному навантаженні є

використання мезоструктурних розрахункових моделей. Було розроблено чисельну мезоструктурну модель склопластику при локальному ударі сферичним індентором у кінцево-елементному пакеті універсальної програмної системи. У геометричному аспекті модель є склонітами, внутрішніми і міжшаровими полімерами - трьома різними компонентами з суттєво відмінними властивостями. Нитки були представлені у вигляді SHELL-елементів (оболонки), а матриця – у вигляді Solid-елементів (твердотільні). Таке уявлення дозволило адекватно моделювати розшарування композиту та внутрішньшарове руйнування склоніток та матриці. Оболонкові і твердотільні елементи мали загальні вузли, що дозволило відмовитися від використання налаштованих контактів і знизити розмірність задачі.

У тривимірній мезомоделі нитки були вигнутими, з можливістю розпрямлятися, розтягуватися та відриватися від матриці при деформуванні. Матеріал стає менш жорстким, а волокна випрямляються швидше. Усі ці ефекти призводять до локалізації ушкоджень у зоні удару. У літературі [19] тканинні композити найчастіше моделюються лише анізотропними Solid-елементами, пружна ударна хвиля проходить через матеріал до вільних меж пластини, не руйнуючи матрицю. Це порушує фізичну суть процесів, що відбуваються у тканинних композитах під час ударного навантаження. Таким чином, у роботі пропонується дещо ускладнити геометричний бік завдання, докладно змодельовавши мезоструктуру матеріалу, при цьому кардинально спростивши модель деформування та руйнування компонентів – волокон та матриці.

Розрахунки були проведені з використанням суперкомп'ютера, що має такі технічні характеристики:

- число обчислювальних вузлів: 480.
- тип процесора: Intel Xeon X5680 (6 ядер по 3.33 ГГц) - 960 шт.
- тип сопроцесора: Intel Xeon Phi SE10X (61 ядро по 1.1 ГГц) - 384 шт.
- оперативна пам'ять: 16,9 Тб.
- дискова пам'ять: 300 Тб.

- пікова продуктивність комплексу: 473,6 Тфлопс.
- продуктивність комплексу на тесті LINPACK: 288,2 Тфлопс.
- операційна система: Linux CentOS 6.2.

### **3.2.1 Розробка геометричної мезорівневої моделі композиту на основі склопластику**

Першим кроком до створення геометричних моделей було визначення об'ємних часток волокон та матриці в композиті, а також кількості шарів та геометричних характеристик волокон. Згідно з проведеними експериментами, щільність склопластику товщиною 2 мм становить  $1890 \text{ кг/м}^3$ , що узгоджується з літературними джерелами [20]. Знаючи щільність скляних ниток та щільність епоксифенольної смоли, з яких виготовлений склопластик, простий розрахунок показав, що масова частка волокон у композиті становила 54%. Щільність епоксифенольної смоли вважали рівною  $1200 \text{ кг/м}^3$  [21], а щільність скляних ниток –  $2500 \text{ кг/м}^3$  [22].

Для отримання інформації про структуру зразки були розпиляні на низькошвидкісній алмазній пилці та поміщені у цифровий мікроскоп. По поперечному розрізу зразка з тридцятикратним збільшенням видно, що матеріал складається із 6 шарів.

Під час створення розрахункової моделі еліптична форма поперечного перерізу нитки замінили прямокутником з розмірами ниток. При цьому площа поперечного перерізу нитки залишалася постійною. Криволінійна вісь нитки була замінена ламаною, з прямолінійними горизонтальними ділянками та похилими ( $30^\circ$  до горизонтальної ділянки нитки).

У цій моделі весь простір між волокнами було заповнено матрицею, що складається з Solid-елементів у вигляді паралелепіпедів та тригранних призм. Між шарами були введені прошарки полімерної матриці (рис. 3.4). Внаслідок симетрії, для економії обчислювальних ресурсів та прискорення часу розрахунку було створено  $\frac{1}{4}$  частини пластини.

Для врахування анізотропії тканинного композиту (з низькими внутрішньо- і міжшаровими зсувними характеристиками), кожна основна та уточна нитки була представлена у вигляді двох паралельних зігнутих смужок (ізотропні Shell-елементи) (рис. 3.3). Щоб масова частка волокон залишилася колишньою, була пропорційно збільшена їх товщина. Для того щоб масова частка матриці залишилася колишньою, щільність матриці і модуль пружності (для не зміни швидкості звуку) були знижені в два рази. З урахуванням цієї властивості ниток та смоли в моделі прийняли відповідні ізотропні матеріали з скоригованими характеристиками, зазначеними в табл. 3.1. Товщина волокон була задана 0,2 мм.

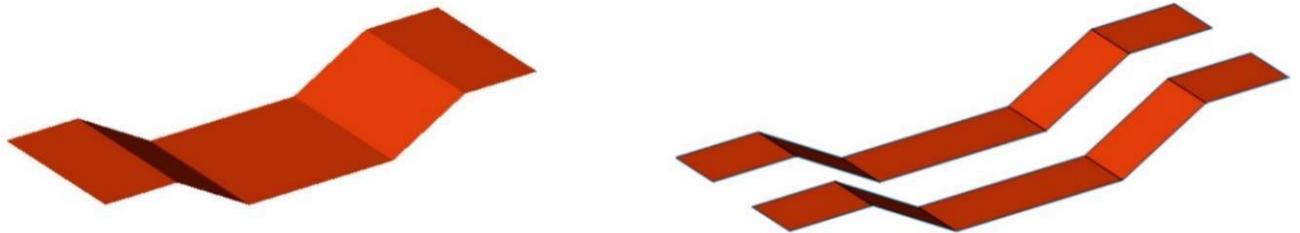


Рисунок 3.3 - Подання ниток у моделі

Таблиця 3.1 - Характеристика матеріалів

Елемент	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Модуль пружності, ГПа	Коефіцієнт Пуасона	$\sigma_b$ , МПа
Нитка	2500	70	0,26	3500
Міжшарова матриця	600	2	0,4	100
Внутрішньошарова матриця	600	2	0,4	300
Ударник	7800	200	0,3	-

На першому етапі було створено представницьку комірку моделі (рис. 3.4) і в пакеті універсальної програмної системи проведено розрахунок при розтягуванні для підтвердження закладених у модель характеристик матеріалу.

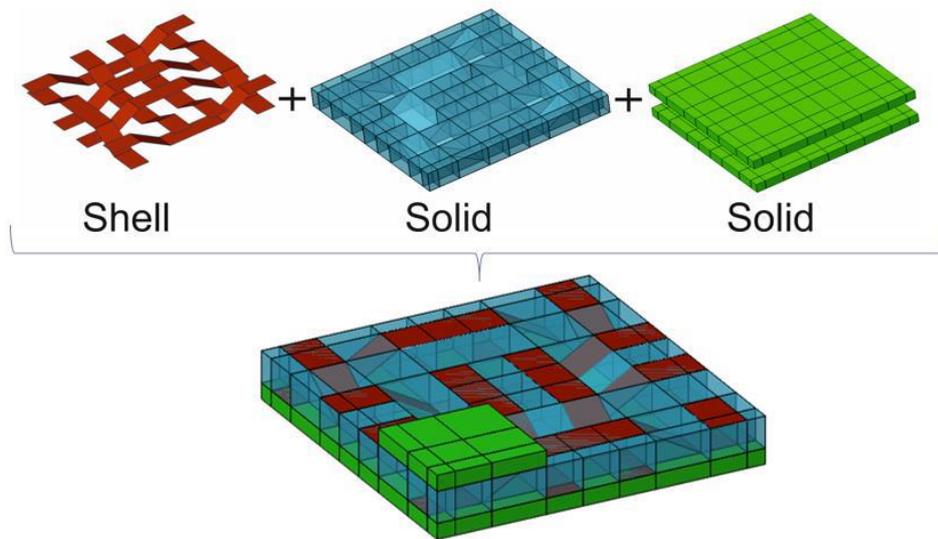


Рисунок 3.4 - Комірка склопластику: нитки, внутрішньшарова матриця, міжшарова матриця

У пакеті універсальної програмної системи використали статичний розрахунок Static Structural. В якості граничних умов використовували закріплення пластини по одній торцевій стороні, а з протилежної сторони було задано переміщення (рис. 3.5). В результаті розрахунку було знайдено реакцію в защемленні, яку перерахували в напруження, і, таким чином, було знайдено модуль пружності всієї пластини.

Результати розрахунку зіставили з результатами статичного експерименту на розтягування (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 - Зіставлення результатів експерименту та розрахунку

Кут вирізання, град	Модуль пружності із статичного експерименту, ГПа	Модуль пружності із розрахунку, ГПа
0	28,0	27,1
45	17,9	18,22

Розбіжність результатів між розрахунковим та експериментальним значеннями модулів пружності вздовж основи та по діагоналі виявилася мінімальним. Таким чином, було підтверджено коректність моделі.

**B: Static Structural**

Static Structural

Time: 1, s

16.01.2014 16:44

**A** Displacement

**B** Displacement 2

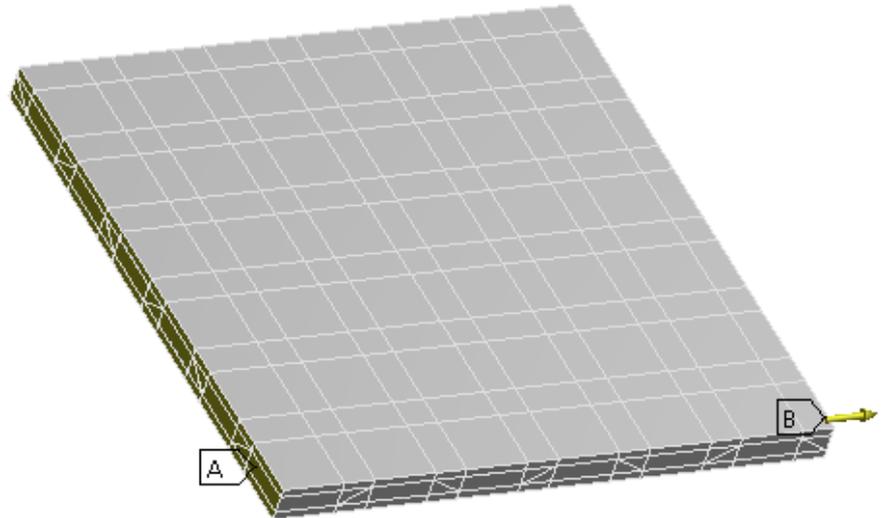


Рисунок 3.5 - Статичний розрахунок на розтяг у пакеті універсальної програмної системи

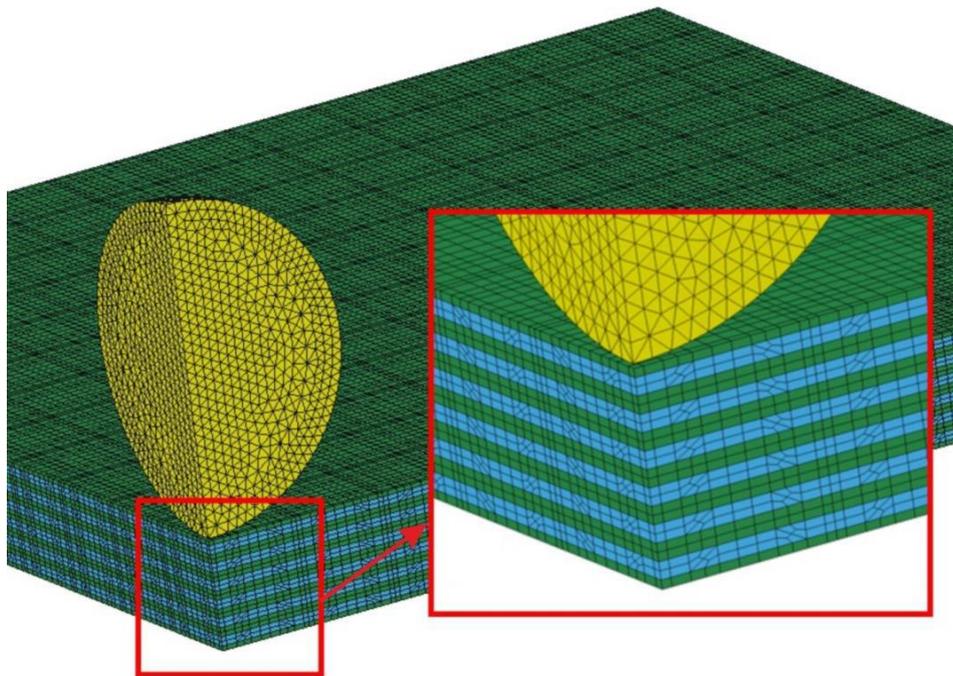


Рисунок 3.6 - Мезоструктурна модель склопластику

Отримавши задовільні результати на малому елементі моделі, представницька комірка моделі була розмножена до повнорозмірної моделі пакету універсальної програмної системи. Таким чином, кінцево-елементна модель складається з 575 000 елементів та 511 000 вузлів і має розміри 21,6 x 21,6 x 2,0 мм (рис. 3.6). Розміри пластин у розрахунках були зменшені в порівнянні з розмірами пластин в експериментах з метою зменшення розмірності задачі та скорочення часу розрахунку. Причина, через яку це було можливим зробити, полягала в локальності зон ушкодження (розшарування) у попередніх експериментах на менших зразках (40x40x1,95 мм). Також необхідно зазначити, що введення додаткового шару між шаром матриці з відмінними параметрами дозволило визначити зону розшарування матеріалу після ударного навантаження.

### **3.2.2 Визначення параметрів моделей матеріалів та завдання контактних алгоритмів**

Для ниток використовували 4-вузлові SHELL-елементи Belytschko-Wong-Chiang з однією точкою інтегрування за товщиною. Матеріал вважали ідеально пружним до руйнування (\*MAT\_LINEAR\_ELASTIC). Для SOLID-елементів матриці (міжшарова і внутрішньшарова) використовували об'ємний S/R елемент, що повно інтегрується (з вибірковою зниженням порядку інтегрування), призначений для елементів з поганим співвідношенням сторін. Матрицю, як і волокна, вважали ідеально пружними до руйнації (\*MAT\_LINEAR\_ELASTIC). Характеристики матеріалів ниток та матриць представлені в табл. 3.1. Розмір кінцевих елементів дорівнював ширині однієї смужки нитки (0,2 мм) при побудові сітки. Як і у експерименті, ударник був сферою діаметром 6,35 мм. Ударник моделювався як жорстке тіло, що не деформується, з характеристиками, показаними в табл. 3.1.

Як зазначалося раніше, елементи ниток і матриці було створено в загальних вузлах, тому контактів між цими частинами не було. Між волокнами

в моделі було встановлено контактний алгоритм \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE. А контактний алгоритм \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE був заданий для процесів взаємодії «ударник-нитки», «ударник-внутрішньосшарова матриця» та «ударник-міжшарова матриця».

У даній моделі було використано команду \*MAT\_ADD\_EROSION, яка дозволяє видаляти елементи з розрахунку, якщо відбувається перевищення величини обраного критерію руйнування. У моделі критерієм руйнування було перевищення першим головним напруженням  $\sigma_{1max}$  граничного значення  $b$ . Значення  $\sigma_b$  були параметрами, що варіюються, для різних частин моделі і показані в табл. 3.1.

Маючи максимальну границю міцності при динамічних випробуваннях в напрямку основи, рівній 750 МПа, двовісне укладання волокон в тканині, а також об'ємну частку волокон (~50%) в нитці основи або односпрямованому мікропластику, значення  $\sigma_b$  для ниток прийнято рівним 3500 МПа, [23]. Ці прості обчислення виправдані тим, що при динамічному навантаженні повзучість матриці мала і волокна в склопластику не встигають розпрямитись, працюють як у композиті з прямими волокнами. У квазістатичних умовах нитки намагаються розпрямитися, розгинаються, і за рахунок цього міцність ниток та склопластику загалом знижується. Механічні властивості міжшарової матриці, закладені в модель, прийняті відповідними об'ємними характеристиками епоксидних смол із літературних джерел (границя міцності 100 МПа). Внутрішньосшарова матриця була штучно виділена з ниток в Solid-елементи моделі і з цієї причини їй призначено більш високу границю міцності (300 МПа), оскільки у склопластику вона існує у вигляді тонких плівок між волокнами і не має розвиненої тривимірної молекулярної структури. Цей параметр був знайдений у процесі зіставлення розрахункових та експериментальних площ розшарування (мікроушкодження) при ударі індентором з високою швидкістю (показаний на рис. 2.12 зірочками).

Розрахунки з меншими швидкостями удару дали площі розшарування, зазначені на рис. 2.12 кружками.

За допомогою команди \*HOURGLASS задавались параметри придушення спотворень форми елементів та об'ємної в'язкості. У цій команді було обрано тип придушення спотворень форми елементів: форма жорсткості за Фланаганом-Беличком з точним інтегруванням за обсягом для об'ємних елементів. Коефіцієнт придушення спотворень форми елементів задавали рівним 0,1 відповідно до рекомендацій [24].

### 3.2.3 Результати моделювання ударного навантаження склопластикових пластин

Моделювання ударного навантаження сферичним індентором по композиту було проведено при різних швидкостях ударника. На рис. 3.7 представлено порівняння експериментальної та розрахункової балістичних кривих для матеріалу товщиною 1,95 мм. Також на графік нанесені точки, отримані в результаті розрахунків та експериментів.

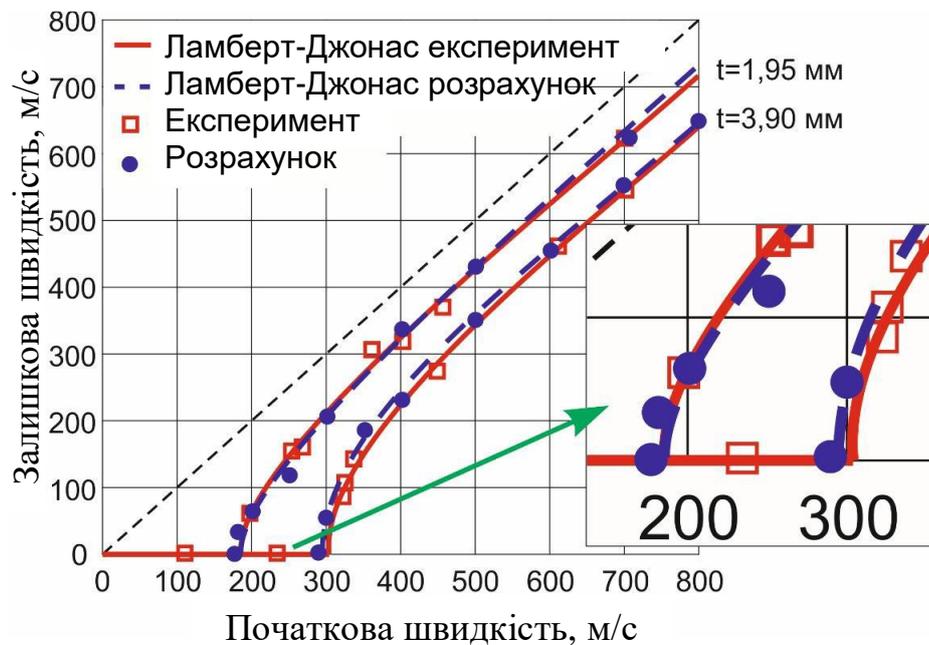


Рисунок 3.7 - Порівняння експериментальних та розрахункових балістичних кривих для склопластику

Як видно з рис. 3.7 розрахункова модель склопластику задовільно узгоджується з експериментальними даними, отриманими раніше. Похибка у визначенні балістичної границі, отриманої в розрахунку, не перевищує 5% порівняно з отриманим експериментально.

Для верифікації отриманої моделі було проведено розрахункові дослідження ударного навантаження склопластикових пластин завтовшки 3,90 мм. Ця модель відрізнялася від описаної вище моделі лише кількістю шарів, яких було 12. Моделі матеріалів та їх властивості були ідентичні до описаної моделі. Порівняння експериментальних та розрахункових даних для ударного навантаження склопластику товщиною 3,90 мм наведено на рис. 3.7. Дані результати підтверджують адекватність запропонованої моделі, показують, що розроблена чисельна модель дозволяє передбачати залишкову швидкість ударника (описувати всю балістичну криву) та величину балістичної границі з похибками, що не перевищують 15 м/с.

Таблиця 3.3 - Зіставлення результатів області розшарування

Номер зразка	1	2	3	4	5	6
Початкова швидкість, м/с	702	403	253	241	178	142
Зона розшарування в експерименті, мм <sup>2</sup>	392	396	820	918	1313	579
Зона розшарування в розрахунках, мм <sup>2</sup>	427	437	792	893	1376	603

Крім того, завдяки поглинанню міжшарової матриці в моделі вдалося отримати розрахункові картини руйнування, близькі до реальних. Як приклад на рис. 3.8 представлені розрахункова та експериментальна картини руйнування склопластикової пластини при швидкості ударника 504 м/с. Модель передбачає утворення на ударній поверхні зразки зони, в якій верхні шари втрачають стійкість, а також великі розшарування на тильній стороні, що добре узгоджується з експериментальними даними.

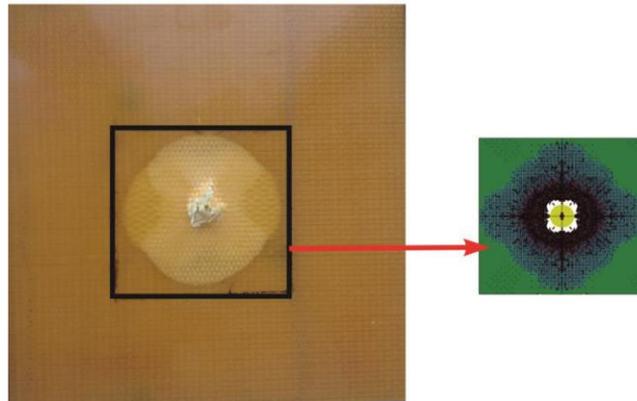


Рисунок 3.8 - Експериментальна (ліворуч) та розрахункова (праворуч) картини руйнування склопластику при швидкості ударника 504 м/с

Розмір і форму руйнування в моделі поблизу точки удару можна порівняти з розміром і формою руйнування в експерименті: відбувається розрив первинного односпрямованого мікропластику та основних ниток, найбільша зона пошкодження утворюється з тильної поверхні. У табл. 3.3 наводиться порівняння експериментальних та чисельних значень області розшарування склопластику товщиною 1,95 мм для різних швидкостей зіткнення.

## **4 РЕМОНТ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПАНЕЛЕЙ З БАЛІСТИЧНИМИ ПОШКОДЖЕННЯМИ**

### **4.1 Розробка методики наповнення матричним компаундом пошкоджених шаруватих пластин**

При експлуатації тонкостінних конструкцій з композитів наслідки падіння інструменту або удару граду можуть бути зовні практично непомітними, тоді як зниження міцності конструкції через внутрішні розшарування може виявитися значним. Для того щоб такі конструкції були довговічними та надійними необхідно вміти оперативно виявляти дефекти та забезпечувати ремонт.

Дефекти типу розшарування є недоступними із зовнішньої поверхні, тому необхідні спеціальні заходи щодо їх виявлення та забезпечення доступу до внутрішніх розшарувань. Для виявлення дефектів у композитних конструкціях із непрозорою структурою запропоновано використовувати інфрачервону камеру, попередньо розігріваючи передбачувану зону руйнування потужною фотолампою. Гаряча зона на тепловізорі показує зону розшарування зразка, оскільки в неї знижена теплопровідність. Нагрів зразка відбувався інфрачервоним джерелом потужністю 1 кВт протягом 10 секунд з відстані 0,2 метра.

Пропонований новий метод ремонту невеликих пошкоджень типу розшарування шаруватих композитів заснований на використанні матричного компаунду на основі епоксидної смоли ЕД-20 із затверджувачем і ультразвукового збудника, що допомагає в'язкій матриці розігрітися і проникнути у внутрішні розшарування через отвори невеликого діаметра. Епоксидна смола зв'язує шари між собою, затверджується (при кімнатній або при підвищеній температурі) та забезпечує їх подальшу спільну роботу як у неушкодженому стані. Пошкодження повинно бути тільки розшаруванням без руйнування волокон склопластику. Це пов'язано з тим, що ремонт відбувається

шляхом заповнення порожнин між шарами склотканини епоксидною смолою, яка не може забезпечити таку ж міцність, як і волокна тканини. Для кращого проникнення смоли та її розігріву застосовували ультразвуковий лабораторний збудник з потужністю близько 300 Вт, частотою коливань 18 кГц і водяним охолодженням.

У процесі роботи збудник нагріває смолу, підвищуючи її плинність і, тим самим, покращуючи проникнення смоли в зони розшарування. При цьому сили поверхневого натягу повинні втягувати полімерний компаунд у тріщину середовище композиту в зоні пошкодження.

Для поліпшення проникнення матричного компаунду та забезпечення доступу до внутрішніх розшарувань було запропоновано свердління в пластині системи отворів невеликого діаметру (0,3-0,5 мм) в зоні розшарування матеріалу, що не знижують міцності, такі отвори не завдають серйозних додаткових пошкоджень, що підтверджується матеріалами літературних джерел. Як показали попередні дослідження, отвори необхідно свердлити по краях зони розшарування, оскільки безпосередньо під місцем удару розшарування не спостерігається.

## **4.2 Дослідження реологічних властивостей матричних компаундів**

### **4.2.1 Змочуваність**

Змочування поверхні твердого тіла характеризується крайовим кутом. Тому були проведені експерименти з визначення зміни крайового кута [25] залежно від температури компаунду за методом лежачої краплі. У методі лежачої краплі вимірюється кут між твердою поверхнею і рідиною в точці контакту трьох фаз (рідина-тверде тіло-повітря). У дослідях в якості твердої поверхні була взята скляна пластина (у склопластику основний компонент – скляні волокна), а компаунд складався з епоксидної смоли та затверджувача

(10% за масою). В результаті було отримано залежність крайового кута від температури (рис. 4.1).

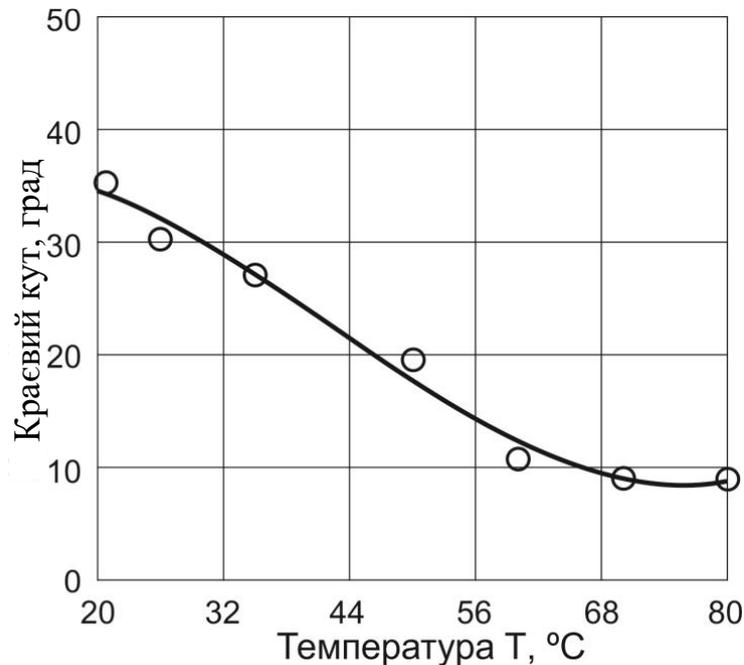


Рисунок 4.1 - Залежність крайового кута від температури

#### 4.2.2 Поверхневий натяг

Для визначення поверхневого натягу були проведені експерименти за методом "пластини Вільгельмі" [26]. Експерименти проводилися за різних температур компаунда. У методі Вільгельмі скляна пластина, торкаючись поверхні рідини, змочується нею вздовж периметра. При цьому необхідно вимірювати силу, що виникла в результаті змочування. Для цієї мети використовували високоточний силувимірювач випробувальної машини з максимальним зусиллям 10 Н.

Поверхневий натяг розраховується виходячи з вимірюваної сили  $F$ , змоченої поверхні  $L$  (периметр пластини) і крайового кута змочування  $\theta$ , отриманого вище:

$$\sigma = \frac{F}{L \cdot \cos \theta} \quad (4.1)$$

При досліджених температурах залежність поверхневого натягу матричного компаунду від температури виявляється нелінійною (рис. 4.2),

оскільки досліджувана рідина є в'язкою (для теоретично "ідеальних рідин" подібна залежність має бути лінійною [27]).

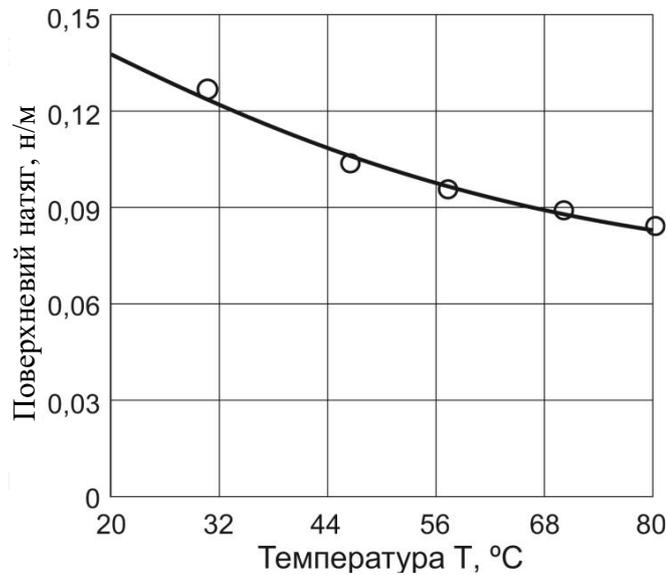


Рисунок 4.2 - Залежність поверхневого натягу від температури

#### 4.2.3 Критична висота піднімання рідини

Для знаходження максимальної висоти підйому рідини при різних температурах компаунду була використана формула:

$$l_{\max} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot d}, \quad (4.1)$$

де  $g$  - прискорення вільного падіння;

$\rho$  – густина рідини;

$l_{\max}$  – критична висота підйому стовпа рідини у капілярі;

$d$  – діаметр капіляра.

#### 4.2.4 В'язкість компаунда

Експериментальне дослідження в'язкості компаунду за різних температур було проведено на віскозиметрі. В результаті була отримана залежність в'язкості компаунд від температури (рис. 4.3).

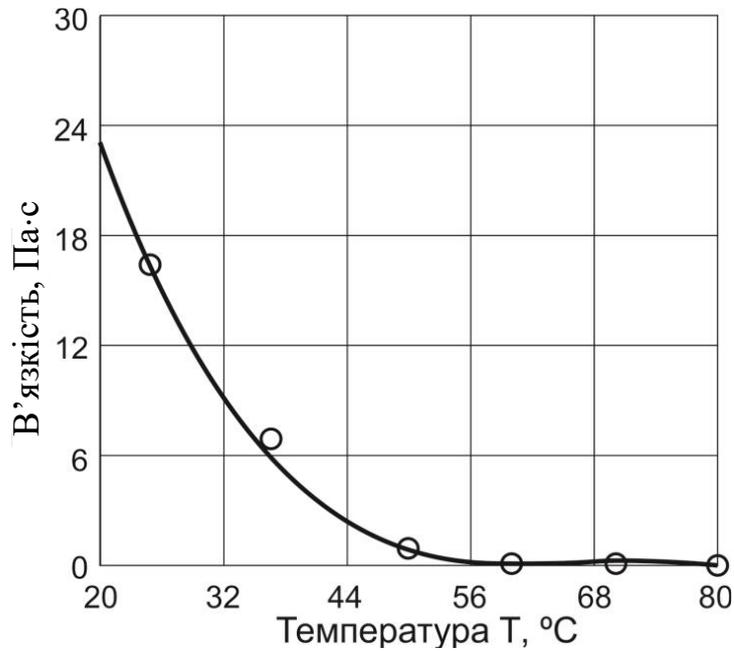


Рисунок 4.3 - Залежність в'язкості від температури

Як видно з графіка, з підвищенням температури в'язкість компаунду значно знижується, збільшується швидкість просочення компаундом мікротріщин. Однак при високих температурах час полімеризації компаунду значно скорочується, тому були проведені експерименти з визначення зміни в'язкості в часі (в процесі затвердіння) при різних температурах. Залежність в'язкості від часу представлена на рис. 4.4.

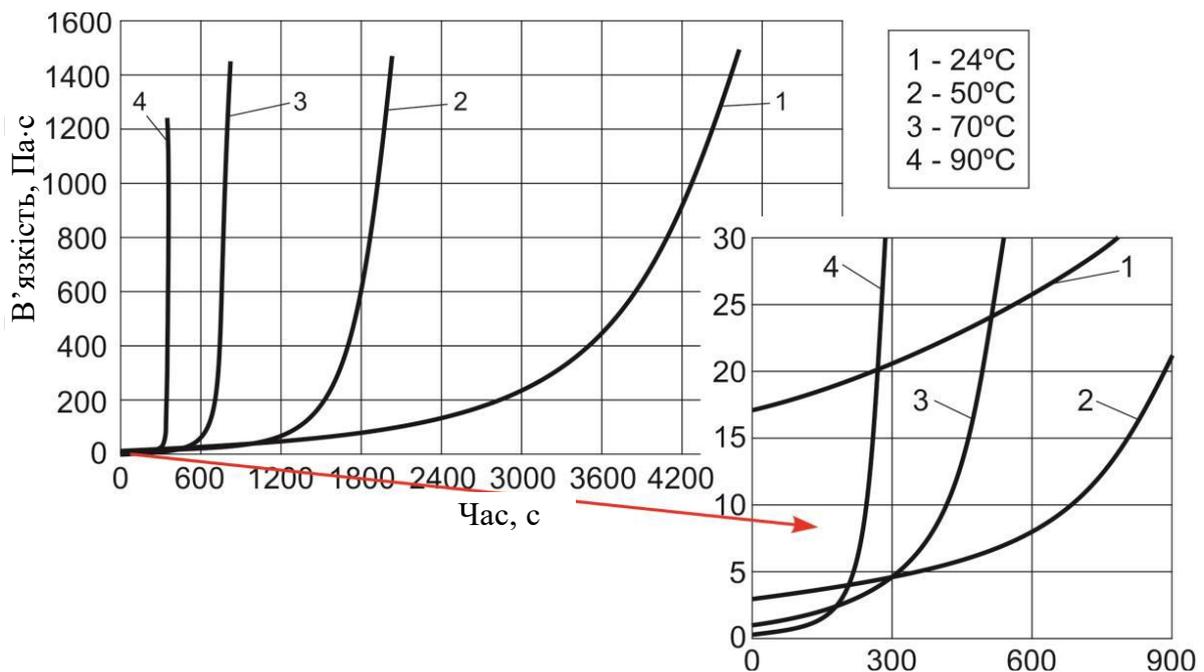


Рисунок 4.4 - Залежність в'язкості від часу

#### 4.2.5 Вибір оптимальної температури компаунда

На підставі проведених експериментів можна зробити висновки про істотну зміну поверхневого натягу, в'язкості та крайового кута від температури для компаунду на основі епоксидної смоли та затверджувача. Зі збільшенням температури знижується в'язкість, що значно збільшує швидкість просочення та заповнення компаундом мікротріщин. Однак за високих температур прискорюється процес полімеризації компаунду, тому розігрів компаунду до температур вище 70°C є недоцільним.

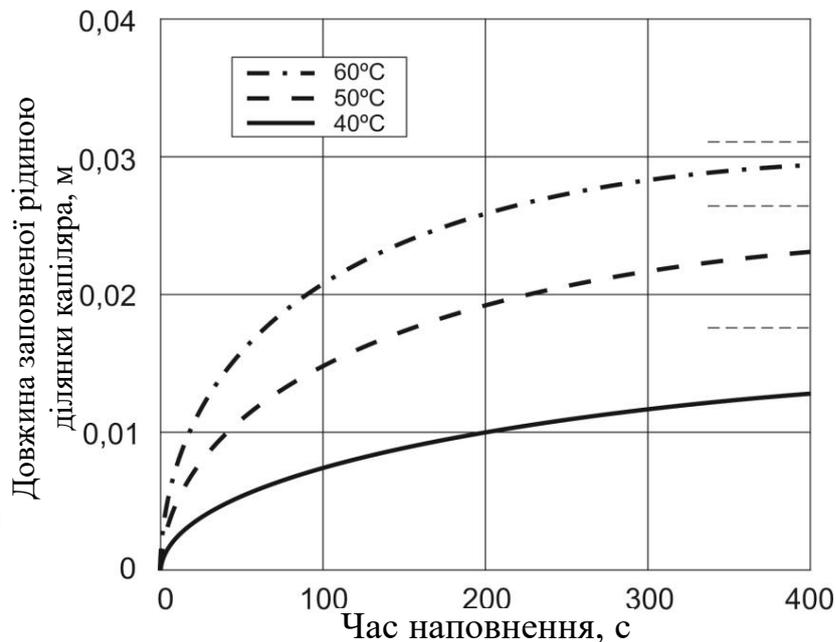


Рисунок 4.5 - Залежність висоти підйому стовпа рідини у капілярі від часу

Залежність в'язкості компаунд від часу  $\eta(t)$  була отримана шляхом апроксимації отриманих експериментальних даних. Далі було знайдено залежність висоти підйому стовпа рідини в капілярі від часу (рис. 4.5), використовуючи рівняння для швидкості просочення рідиною капіляра [28]:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r^2 \cdot \rho \cdot g}{8 \cdot \eta(t) \cdot l} \cdot (l_{max} - l) \quad (4.2)$$

де  $\eta(t)$  є залежністю в'язкості від часу;

$r$  - радіус капіляра, еквівалентний ширині тріщини;

$l_{\max}$  – критична висота підйому стовпа рідини у капілярі;

$l$  – довжина заповненої рідиною ділянки капіляра в момент часу  $t$ .

Експериментально було виявлено, що ультразвуковий збудник (потужністю 300 Вт), який використовується в даному методі ремонту, розігріває матричний компаунд у зоні контакту з поверхнею до температур близько 55-60 °С. При цих температурах в'язкість компаунду протягом ~5 хвилин залишається практично постійною (рис. 4.7). Тому було зроблено порівняння реологічних параметрів компаунду для трьох різних температур. Результати цього порівняння наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри епоксидного компаунду

T, °C	$\theta$ , град.	$\sigma$ , мН/м	$\eta$ , Па·с	$l_{\max}$ , мм	t, с.	l, мм
60	12,37	95	$0,386e^{0,0058t}$	325	400	29,75
50	17,70	102	$0,915e^{0,0036t}$	344	400	23,25
40	23,92	112	$4,20e^{0,0019t}$	362	400	12,95

Ці результати показують, що найкраще просочення (найбільша висота підйому рідини) досягається при температурі ~60°C. Ця температура епоксидного компаунду визнана оптимальною для ремонту мікротріщин і розшарування в склопластику даним методом.

Для повної полімеризації матриці пропонується використовувати місцевий інфрачервоний нагрівач. В результаті проведених експериментів було відзначено відновлення властивостей міцності склопластику після ремонту до 80-90% від непошкодженого.

## 5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 5.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Метою проведення комерційного та технологічного аудиту є оцінка дослідження деформації ізотропних матеріалів в процесах холодного листового штампування деталей спецтехніки, що призводить до підвищенні ефективності процесів холодної листового штампування шляхом збільшення точності оцінки граничного деформування матеріалу ізотропної заготовки.

Для проведення технологічного аудиту було залучено 3-х незалежних експертів Вінницького національного технічного університету кафедри галузевого машинобудування: д. т. н., проф. Савуляк В. І., к. т. н., доц. Шиліна О. П. та к. т. н., доц. Янченко О. Б.

Для проведення технологічного аудиту було використано таблицю 5.1 [41] в якій за п'ятибальною шкалою використовуючи 12 критеріїв здійснено оцінку комерційного потенціалу.

Таблиця 5.1 – Рекомендовані критерії оцінювання комерційного потенціалу розробки та їх можлива бальна оцінка

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри-терій	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі	Технічні та споживчі	Технічні та споживчі	Технічні та споживчі	Технічні та споживчі

	властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	властивості продукту на рівні аналогів	властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкуренція немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки пові-домлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Таблиця 5.2 – Рівні комерційного потенціалу розробки

Середньоарифметична сума балів СБ, розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу розробки
0-10	Низький
11-20	Нижче середнього
21-30	Середній
31-40	Вище середнього
41-48	Високий

В таблиці 5.3 наведено результати оцінювання експертами комерційного потенціалу розробки.

Таблиця 5.3 – Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

Критерії	Прізвище, ініціали, посада експерта		
	Савуляк В. І.	Шиліна О. П.	Янченко О. Б.
	Бали, виставлені експертами:		
1	3	3	3
2	4	4	4
3	3	3	3
4	4	4	4
5	2	3	2
6	3	3	3
7	2	2	2
8	4	4	4
9	3	3	3
10	4	4	4
11	4	4	4
12	3	3	2
Сума балів	СБ <sub>1</sub> =39	СБ <sub>2</sub> =40	СБ <sub>3</sub> =38
Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{\sum_{i=1}^3 СБ_i}{3} = \frac{39 + 40 + 38}{3} = 39$		

Середньоарифметична оцінка, отримана на основі експертних висновків, становить 39 балів, і згідно з таблицею 5.3, це вказує на вище середнього рівень комерційного потенціалу результатів проведених досліджень.

Результатом магістерської роботи є оцінка впливу траєкторії переміщення згинального ролика на етапі підгину на використання ресурсу пластичності матеріалу трубної заготовки у процесах згинання проштовхуванням на трубозгинальному верстаті та підтвердження ефективності цього процесу.

Результати досліджень магістерської роботи можуть бути реалізовані для техніки (машини, механізми та обладнання) для виконання спеціальних робочих функцій, використання у виробничому процесі (будівельна та будівельно-дорожня техніка, вантажна техніка, збиральна техніка, сільгосптехніка, техніка для лісопромислового комплексу, навісне та виробниче обладнання, устаткування тощо).

Проведемо оцінку якості і конкурентоспроможності нової розробки порівняно з аналогом.

В якості аналога для розробки було обрано елемент трубопроводу отриманий зварюванням. Основними недоліками аналога є непроварювання, що відбувається при недостатньому плавленні та склеюванні. Також до недоліків можна віднести пористість при зварюванні, що означає утворення невеликих повітряних кишень або пір, які послаблюють зварний шов. У розробці дана проблема вирішується безшовні труби будь-якої конфігурації отримані холодним пластичним деформуванням. Також система випереджає аналог за такими параметрами як жаростійкість, корозійностійкість, висока питома міцність, викликані особливостями умов експлуатації, що полягають у взаємодії з високошвидкісними потоками плазми та газу, з агресивними середовищами тощо.

В таблиці 5.4 наведені основні техніко-економічні показники аналога і нової розробки.

Проведемо оцінку якості продукції, яка є найефективнішим засобом забезпечення вимог споживачів та порівняємо її з аналогом.

Таблиця 5.4 – Основні параметри нової розробки та товару-конкурента

Показник	Варіанти		Відносний показник якості	Коефіцієнт вагомості параметра
	Базовий (товар-конкурент)	Новий (інноваційне рішення)		
1	2	3	4	5
Механічна стійкість, Н	4000	4300	1,08	10%
Функціонал, бар	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$	1,13	25%
Похибка, %	2	1	2	40%
Напрацювання на відмову, год	3000	5000	1,7	15%
Масо-габарити, кг	0,5	0,5	1	10%

Визначимо відносні одиничні показники якості по кожному параметру за формулами (5.1) та (5.2) і занесемо їх у відповідну колонку табл. 5.6.

$$q_i = \frac{P_{Hi}}{P_{Bi}} \quad (5.1)$$

або

$$q_i = \frac{P_{Bi}}{P_{Hi}} \quad (5.2)$$

де  $P_{Hi}$ ,  $P_{Bi}$  – числові значення  $i$ -го параметру відповідно нового і базового виробів.

$$q_1 = \frac{4300}{4000} = 1,08;$$

$$q_2 = \frac{1,8}{1,6} = 1,13;$$

$$q_3 = \frac{2}{1} = 2;$$

$$q_4 = \frac{5000}{3000} = 1,7;$$

$$q_5 = \frac{0,5}{0,5} = 1.$$

Відносний рівень якості нової розробки визначаємо за формулою:

$$K_{\text{я.в.}} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot \alpha_i, \quad (5.3)$$

$$K_{\text{я.в.}} = 1,08 \cdot 0,1 + 1,13 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,4 + 1,7 \cdot 0,15 + 1 \cdot 0,1 = 1,55$$

Відносний коефіцієнт показника якості нової розробки більший одиниці, отже нова розробка якісніший базового товару-конкурента.

Наступним кроком є визначення конкурентоспроможності товару. Конкурентоспроможність товару є головною умовою конкурентоспроможності підприємства на ринку і важливою основою прибутковості його діяльності.

Однією із умов вибору товару споживачем є збіг основних ринкових характеристик виробу з умовними характеристиками конкретної потреби покупця. Такими характеристиками найчастіше вважають нормативні та технічні параметри, а також ціну придбання та вартість споживання товару.

В табл. 5.5 наведено технічні та економічні показники для розрахунку конкурентоспроможності нової розробки відносно товару-аналога, технічні дані взяті з попередніх розрахунків.

Таблиця 5.5 – Нормативні, технічні та економічні параметри нової розробки і товару-виробника

Показники	Варіанти	
	Базовий (товар- конкурент)	Новий (інноваційне рішення)
1	2	3
1. Нормативно-технічні показники		
Механічна стійкість, Н	4000	4300
Функціонал, бар	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$
Похибка, %	2	1
Напрацювання на відмову, год	3000	5000
Масо-габарити, кг	0,5	0,5
2. Економічні показники		
Ціна придбання, грн.	250	200

Загальний показник конкурентоспроможності інноваційного рішення (К) з урахуванням вищезазначених груп показників можна визначити за формулою:

$$K = \frac{I_{m.n.}}{I_{e.n.}}, \quad (5.4)$$

де  $I_{m.n.}$  – індекс технічних параметрів;  $I_{e.n.}$  – індекс економічних параметрів.

Індекс технічних параметрів є відносним рівнем якості інноваційного рішення. Індекс економічних параметрів визначається за формулою (5.5)

$$I_{e.n.} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Hei}}{\sum_{i=1}^n P_{Bei}}, \quad (5.5)$$

де  $P_{Hei}$ ,  $P_{Bei}$  – економічні параметри (ціна придбання та споживання товару) відповідно нового та базового товарів.

$$I_{e.n.} = \frac{200}{250} = 0,8;$$

$$K = \frac{1,55}{0,8} = 1,94.$$

Зважаючи на розрахунки, можна зробити висновок, що нова розробка буде конкурентоспроможніше, ніж конкурентний товар.

## 5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи групуються за такими статтями: витрати на оплату праці, витрати на соціальні заходи, матеріали, паливо та енергія для науково-виробничих цілей, витрати на службові відрядження, програмне забезпечення для наукових робіт, інші витрати, накладні витрати.

1. Основна заробітна плата кожного із дослідників  $Z_0$ , якщо вони працюють в наукових установах бюджетної сфери визначається за формулою:

$$Z_0 = \frac{M}{T_p} * t \text{ (грн)} \quad (5.6)$$

де  $M$  – місячний посадовий оклад конкретного розробника (інженера, дослідника, науковця тощо), грн.;

$T_p$  – число робочих днів в місяці; приблизно  $T_p \approx 21...23$  дні;

$t$  – число робочих днів роботи дослідника.

Для розробки необхідно залучити інженера з посадовим окладом 12000 грн. Кількість робочих днів у місяці складає 21, а кількість робочих днів інженера складає 35. Зведемо сумарні розрахунки до таблиця 5.6.

Таблиця 5.6 – Заробітна плата дослідника в науковій установі бюджетної сфери

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату грн.
Керівник	20000	952,4	5	4762
Інженер	12000	571,4	35	20000
Всього				24762

2. Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт розраховують за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.7)$$

де  $C_i$  – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

$t_i$  – час роботи робітника на виконання певної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду  $C_i$  можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.8)$$

де  $M_M$  – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи або мінімальної місячної заробітної плати (залежно від діючого законодавства), грн;

$K_i$  – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду;

$K_c$  – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

$T_p$  – середня кількість робочих днів в місяці, приблизно  $T_p = 21 \dots 23$  дні;

$t_{зм}$  – тривалість зміни, год.

Таблиця 5.7 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника, грн
1. Підготовчі	3	1	47,6	142,9
2. Монтажні	3	3	64,3	192,9
3. Складальні	2	5	81,0	161,9
4. Налаштункові	4	2	52,4	209,5
5. Випробувальні	2	4	71,4	142,9
Всього				850,0

### 3. Розрахунок додаткової заробітної плати робітників

Додаткова заробітна плата  $Z_d$  всіх розробників та робітників, які приймали участь в розробці нового технічного рішення розраховується як 10 - 12 % від основної заробітної плати робітників.

На даному підприємстві додаткова заробітна плата начисляється в розмірі 11% від основної заробітної плати.

$$Z_d = (Z_o + Z_p) * \frac{N_{\text{доп}}}{100\%} \quad (5.9)$$

$$Z_d = 0,11 * (24762 + 850,0) = 2817,31 \text{ (грн)}$$

4. Нарахування на заробітну плату  $N_{зп}$  дослідників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховуються за формулою (5.10):

$$N_{зп} = (Z_o + Z_p + Z_d) * \frac{\beta}{100} \text{ (грн)} \quad (5.10)$$

де  $Z_o$  – основна заробітна плата розробників, грн.;

$Z_d$  – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.;

$Z_p$  – основну заробітну плату робітників, грн.;

$\beta$  – ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування, %.

Дана діяльність відноситься до бюджетної сфери, тому ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування буде складати 22%, тоді:

$$H_{зп} = (24762 + 850,0 + 2817,31) * \frac{22}{100} = 6254,43 \text{ (грн)}$$

#### 5. Сировина та матеріали.

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби й предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за прямим призначенням згідно з нормами їх витрачання, а також витрачені придбані напівфабрикати, що підлягають монтажу або виготовленню й додатковій обробці в цій організації, чи дослідні зразки, що виготовляються виробниками за документацією наукової організації.

Витрати на матеріали (М) у вартісному вираженні розраховуються окремо для кожного виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{вj}, \quad (5.11)$$

де  $H_j$  – норма витрат матеріалу  $j$ -го найменування, кг;

$n$  – кількість видів матеріалів;

$C_j$  – вартість матеріалу  $j$ -го найменування, грн/кг;

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ );

$B_j$  – маса відходів  $j$ -го найменування, кг;

$C_{вj}$  – вартість відходів  $j$ -го найменування, грн/кг.

Проведені розрахунки зведені в таблицю 5.8.

#### 6. Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

Балансову вартість спецустаткування розраховують за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{нр.і}} \cdot K_i, \quad (5.12)$$

де  $C_i$  – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{нр.і}}$  – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ( $K_i = 1, 10 \dots 1, 12$ );

$k$  – кількість найменувань устаткування.

Таблиця 5.8 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
12X18H10T	200	100	20000
Всього			20000
З врахуванням коефіцієнта транспортування			22000

Отримані результати необхідно звести до таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Трубозгинальний верстат	1	15000	15000
Ролики	3	200	600
Всього			17160

## 7. Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

Балансову вартість програмного забезпечення розраховують за формулою:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{прог.і}} \cdot K_i, \quad (5.13)$$

де  $C_{\text{инрг}}$  – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог.і}}$  – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ( $K_i = 1, 10 \dots 1, 12$ );

$k$  – кількість найменувань програмних засобів.

Отримані результати необхідно звести до таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
САЕ-система	1	1000	1000
Всього з врахування транспортних витрат			1100

#### 8. Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, можуть бути розраховані з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_{б}}{T_{г}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.14)$$

де  $Ц_{б}$  – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$  – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{г}$  – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

Проведені розрахунки необхідно звести до таблиці 5.11.

Таблиця 5.11 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
1. Гідравлічний прес	20000	2	1	833,33
2. Фрезерний верстат	15000	4	1	312,50
Всього				1145,83

9. До статті «Паливо та енергія для науково-виробничих цілей» відносяться витрати на всі види палива й енергії, що безпосередньо використовуються з технологічною метою на проведення досліджень.

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yt} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{впi}}{\eta_i} \quad (5.15)$$

де  $W_{yt}$  – встановлена потужність обладнання на певному етапі розробки, кВт;

$t_i$  – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

$C_e$  – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн;

$K_{впi}$  – коефіцієнт, що враховує використання потужності,  $K_{впi} < 1$ ;

$\eta_i$  – коефіцієнт корисної дії обладнання,  $\eta_i < 1$ .

Для написання магістерської роботи використовується персональний комп'ютер для якого розрахуємо витрати на електроенергію.

$$B_e = \frac{0,25 \cdot 270 \cdot 10,5 \cdot 0,5}{0,8} = 442,97$$

10. Службові відрядження.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуються як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{св} = (З_о + З_р) * \frac{H_{св}}{100\%}, \quad (5.16)$$

де  $H_{св}$  – норма нарахування за статтею «Службові відрядження».

$$B_{св} = 0,2 * (24762 + 850,0) = 5122,38$$

11. Накладні (загальновиробничі) витрати  $B_{нзв}$  охоплюють: витрати на управління організацією, оплата службових відряджень, витрати на утримання, ремонт та експлуатацію основних засобів, витрати на опалення, освітлення, водопостачання, охорону праці тощо. Накладні (загальновиробничі) витрати  $B_{нзв}$  можна прийняти як (100...150)% від суми основної заробітної плати розробників та робітників, які виконували дану МКНР, тобто:

$$B_{нзв} = (З_о + З_р) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.17)$$

де  $H_{нзв}$  – норма нарахування за статтею «Інші витрати».

$$B_{\text{нзв}} = (24762 + 850,0) \cdot \frac{100}{100\%} = 25611,9 \text{ грн}$$

Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати, які безпосередньо стосуються даного розділу МКНР

$$B = 24762 + 850 + 2817,31 + 6254,43 + 22000 + 17160 + 1100 + 1145,83 + 442,97 + 5122,38 + 25611,9 = 107926,73 \text{ грн}$$

Прогнозування загальних втрат ЗВ на виконання та впровадження результатів виконаної МКНР здійснюється за формулою:

$$ЗВ = \frac{B}{\eta}, \quad (5.18)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт, який характеризує стадію виконання даної НДР.

Оскільки, робота знаходиться на стадії науково-дослідних робіт, то коефіцієнт  $\beta = 0,7$ .

Звідси:

$$ЗВ = \frac{107926,73}{0,7} = 154181,04 \text{ грн.}$$

### 5.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки

У даному підрозділі кількісно спрогнозуємо, яку вигоду, зиск можна отримати у майбутньому від впровадження результатів виконаної наукової роботи. Розрахуємо збільшення чистого прибутку підприємства  $\Delta\Pi_i$ , для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки, за формулою

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\nu}{100}\right) \quad (5.19)$$

де  $\Delta C_o$  – покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році.

$N$  – основний кількісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році до впровадження результатів наукової розробки;

$\Delta N$  – покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки:

$C_0$  – основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки;

$n$  – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки:

$l$  – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість. Ставка податку на додану вартість дорівнює 20%, а коефіцієнт  $l = 0,8333$ .

$p$  – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту.  $p = 0,25$ ;

$x$  – ставка податку на прибуток. У 2024 році – 18%.

Припустимо, що при впровадженні результатів наукової розробки підвищиться ефективність процесів холодної листового штампування шляхом збільшення точності оцінки граничного деформування матеріалу ізотропної заготовки. Припустимо, що ціна зросте на 100 грн. Кількість одиниць реалізованої продукції також збільшиться: протягом першого року на 1500 шт., протягом другого року – на 3000 шт., протягом третього року на 5000 шт. Реалізація продукції до впровадження розробки складала 2500 шт., а її ціна до 200 грн. Розрахуємо прибуток, яке отримає підприємство протягом трьох років.

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_1 &= [100 \cdot 2500 + (200 + 100) \cdot 1500] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 119578,55 \text{ грн.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_2 &= [100 \cdot 2500 + (200 + 100) \cdot (1500 + 3000)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 480615,78 \text{ грн.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_3 &= [100 \cdot 2500 + (200 + 100) \cdot (1500 + 3000 + 5000)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \\ &\quad \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) = 736855,53 \text{ грн.} \end{aligned}$$

#### 5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності

Розрахуємо основні показники, які визначають доцільність фінансування наукової розробки певним інвестором, є абсолютна і відносна ефективність вкладених інвестицій та термін їх окупності.

Розрахуємо величину початкових інвестицій  $PV$ , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки.

$$PV = k_{\text{інв}} \cdot 3B, \quad (5.20)$$

де  $k_{\text{інв}}$  – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію. Це можуть бути витрати на підготовку приміщень, розробку технологій, навчання персоналу, маркетингові заходи тощо ( $k_{\text{інв}} = 2 \dots 5$ ).

$$PV = 2 \cdot 154181,04 = 308362,08$$

Розрахуємо абсолютну ефективність вкладених інвестицій  $E_{\text{абс}}$  згідно наступної формули:

$$E_{\text{абс}} = (ПП - PV) \quad (5.21)$$

де  $ПП$  – приведена вартість всіх чистих прибутків, що їх отримає підприємство від реалізації результатів наукової розробки, грн.;

$$ПП = \sum_1^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (5.22)$$

де  $\Delta\Pi_i$  - збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої НДЦКР, грн.;

$T$  – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої НДЦКР, роки;

$\tau$  – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні; для України цей показник знаходиться на рівні 0,2;

$t$  – період часу (в роках).

$$ПП = \frac{119578,55}{(1+0,2)^1} + \frac{480615,78}{(1+0,2)^2} + \frac{736855,53}{(1+0,2)^3} = 861814,12 \text{ грн.}$$

$$E_{abc} = (861814,12 - 308362,08) = 553452,04 \text{ грн.}$$

Оскільки  $E_{abc} > 0$  то вкладання коштів на виконання та впровадження результатів НДДКР може бути доцільним.

Розрахуємо відносну (щорічну) ефективність вкладених в наукову розробку інвестицій  $E_g$ . Для цього користуються формулою:

$$E_g = T_{ж} \sqrt[3]{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1, \quad (5.23)$$

де  $T_{ж}$  - життєвий цикл наукової розробки, роки.

$$E_g = \sqrt[3]{1 + \frac{553452,04}{308362,08}} - 1 = 0,66 = 66\%$$

Визначимо мінімальну ставку дисконтування, яка у загальному вигляді визначається за формулою:

$$\tau = d + f, \quad (5.24)$$

де  $d$  – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2022 році в Україні  $d = (0,14 \dots 0,2)$ ;

$f$  – показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина  $f = (0,05 \dots 0,1)$ .

$$\tau_{\min} = 0,18 + 0,05 = 0,23$$

Так як  $E_g > \tau_{\min}$  то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки.

Розрахуємо термін окупності вкладених у реалізацію наукового проекту інвестицій за формулою:

$$T_{ок} = \frac{1}{E_g} \quad (4.25)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{0,66} = 1,5 \text{ роки}$$

Оскільки  $T_{\text{ок}} \leq 3 \dots 5$  років, то фінансування даної наукової розробки в принципі є доцільним.

## ВИСНОВКИ

1. Проведено дослідження щодо оцінки впливу попереднього навантаження на балістичні характеристики склопластику. Балістична границя зменшується на 15% при величині попереднього навантаження, що дорівнює 50% від границі міцності матеріалу.

2. Проведено дослідження щодо оцінки впливу похилих ударів на балістичні характеристики склопластику. Виявлено, що найнебезпечнішим випадком удару по склопластику вважається удар по нормалі.

3. Розроблено нову розрахункову мезоструктурну модель склопластику, що відрізняється явним врахуванням геометричної структури матеріалу та чисельною ефективністю за рахунок комбінації твердотільних та оболонкових елементів, що мають загальні вузли, а також введенням спеціального полімерного шару, що визначає зону розшарування матеріалу. Ця модель дозволяє передбачати залишкову швидкість ударника (описувати всю балістичну криву) і величину балістичної границі з похибками, що не перевищують 10-15 м/с. Отримані розміри зони руйнування моделі задовільно узгоджуються з експериментальними даними.

4. Розроблено методику оцінки залишкової міцності склопластику після балістичних пошкоджень, засновану на заміні зони пошкодження еквівалентним отвором та застосуванням експрес-методу.

5. Розроблено методику ремонту невеликих пошкоджень типу розшарування шляхом заповнення тріщин компаундом за допомогою ультразвукового збудника, що розігріває компаунд до температур  $\sim 60$  °C і підвищує його текучість.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Lyu, Qihui; Wang, Ben; Guo, Zaoyang. Predicting post-impact compression strength of composite laminates under multiple low-velocity impacts. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 164: 107322.
2. Naya, F., et al. Experimental study of the importance of fiber breakage on the strength of thermoplastic matrix composites subjected to compression after impact. *Composite Structures*, 2024, 342: 118238.
3. Zhang, Peng, et al. Nylon/large-tow carbon fiber-wrapped yarn composites with improved interfacial shear and impact strength. *Polymer Composites*, 2025, 46.6: 5314-5324.
4. Zhang, Zhen-Bang, et al. Scalable manufacturing of mechanical robust bioinspired ceramic–resin composites with locally tunable heterogeneous structures. *Advanced Materials*, 2023, 35.14: 2209510.
5. Javanshour, F., et al. Modulating impact resistance of flax epoxy composites with thermoplastic interfacial toughening. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 150: 106628.
6. Prashanth, Maruthi, et al. Understanding the impact of fiber orientation on mechanical, interlaminar shear strength, and fracture properties of jute–banana hybrid composite laminates. *Polymer Composites*, 2021, 42.10: 5475-5489.
7. Li, Xin, et al. Deformation and failure of a novel fiber-metal hybrid lamina composite under quasi-static and impact loading. *Composites Science and Technology*, 2021, 216: 109067.
8. Murali, G., et al. Impact performance of novel multi-layered preppacked aggregate fibrous composites under compression and bending. In: *Structures*. Elsevier, 2020. p. 1502-1515.
9. Chen, Jiwei; YAO, Weixing; LIN, Hanyu. Compressive fatigue response and reliability analysis of thermoplastic composite with low-velocity impact damage. *Polymer Composites*, 2021, 42.11: 5678-5690.

10. Srivastava, Alok K.; Singh, Aparna. Effect of GNP coating on carbon fibers on the deformation modes of composites under flexural loading. *Polymer Composites*, 2024, 45.5: 4078-4092.
11. Hyde, Alden, et al. Effects of microvoids on strength of unidirectional fiber-reinforced composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 187: 107844.
12. He, Rui, et al. Unique silk-carbon fiber core-spun yarns for developing an advanced hybrid fiber composite with greatly enhanced impact properties. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 239: 109971.
13. Shin, Ju Hwan Jay; ZHOU, Min. Piezoelectric response of energetic composites under an electrostatic excitation. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129.24.
14. Zhao, Y., et al. Hybrid woven carbon-Dyneema composites under drop-weight and steel ball impact. *Composite Structures*, 2020, 236: 111811.
15. Várdai, Róbert, et al. Impact modification of fiber reinforced polypropylene composites with flexible poly (ethylene terephthalate) fibers. *Polymer International*, 2021, 70.9: 1367-1375.
16. Matykiewicz, Danuta, et al. Impact strength of hybrid epoxy–basalt composites modified with mineral and natural fillers. *ChemEngineering*, 2021, 5.3: 56.
17. Raut, Nikhil P.; Kolekar, A. B.; Gombi, S. L. Methods of damage detection on composites under low velocity impact. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 27: 2823-2827.
18. Wang, Bing, et al. Non-orthogonal FE model with stress smoothing for progressive damage analysis of shear pre-deformed 3D angle-interlock woven composites under compression. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 232: 107642.
19. Joshi, Ashish; Mishra, Ashish; Saxena, Vikas Kumar. Impact response and energy absorption mechanisms of UHMWPE fabric and composites in ballistic applications: A comprehensive review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 108314.

20. Zhou, Guowei, et al. Effects of fabric architectures on mechanical and damage behaviors in carbon/epoxy woven composites under multiaxial stress states. *Polymer testing*, 2020, 90: 106657.
21. Zeng, Chengjun, et al. 4D printed continuous fiber reinforced shape memory polymer composites with enhanced mechanical properties and shape memory effects. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 180: 108085.
22. Ying, Zhiping, et al. Experimental investigation on the damage accumulation mechanism of 3D orthogonal woven composites under repeated low-velocity impacts. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 192: 105035.
23. Firooz, Soheil; Steinmann, Paul; Javili, Ali. Homogenization of composites with extended general interfaces: comprehensive review and unified modeling. *Applied Mechanics Reviews*, 2021, 73.4: 040802.
24. Shah, SZ Hussain, et al. Performance comparison of resin-infused thermoplastic and thermoset 3D fabric composites under impact loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 189: 105984.
25. Lin, Jia-Xiang, et al. Static and dynamic mechanical behavior of engineered cementitious composites with PP and PVA fibers. *Journal of building engineering*, 2020, 29: 101097.
26. Talreja, Ramesh. Manufacturing defects in composites and their effects on performance. *Polymer composites in the aerospace industry*, 2020, 83-97.
27. Zeng, Wei, et al. Investigation on the dynamic behavior of composite gradient double-arrow auxetic structure under local impact load. *Polymer Composites*, 2022, 43.5: 3068-3084.
28. Yin, Han; LI, Qianqian; Iannucci, Lorenzo. Meso-scale Finite Element (FE) modelling of biaxial carbon fibre non-crimp-fabric (NCF) based composites under uniaxial tension and in-plane shear. *Composite Structures*, 2022, 290: 115538.

29. Elamin, Mohammed; Li, Bing; Tan, K. T. Compression after impact performance of carbon-fiber foam-core sandwich composites in low temperature arctic conditions. *Composite Structures*, 2021, 261: 113568.
30. Attias, Noam, et al. Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 246: 119037.
31. Bulut, Mehmet, et al. Mechanical and dynamic properties of basalt fiber-reinforced composites with nanoclay particles. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, 45: 1017-1033.
32. Arivendan, Ajithram, et al. Extraction and characterization of novel Prosopis Juliflora bark and Boehmeria nivea fibre for use as reinforcement in the hybrid composites with the effect of curing temperature, fibre length and weight percentages. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 279: 135093.
33. Wang, Shuai, et al. Strength-ductility synergy of in-situ TiB/Ti6Al4V composites with tailored hierarchical TiB distributions. *Ceramics International*, 2022, 48.23: 35069-35075.
34. Tan, Yan, et al. Effect of cementitious capillary crystalline waterproofing materials on the mechanical and impermeability properties of engineered cementitious composites with microscopic analysis. *Polymers*, 2023, 15.4: 1013.
35. Ye, Jia-Yu; Zhang, Lu-Wen. Damage evolution of polymer-matrix multiphase composites under coupled moisture effects. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2022, 388: 114213.
36. Fakhreddini-Najafabadi, Sajjad; Torabi, Mahdi; Taheri-Behrooz, Fathollah. Nanoclay role in improving compression after impact strength of the carbon/epoxy composites. *Journal of Composite Materials*, 2023, 57.17: 2717-2737.

37. Haridharan, M. K., et al. Impact response of two-layered grouted aggregate fibrous concrete composite under falling mass impact. *Construction and Building Materials*, 2020, 263: 120628.
38. Zhou, Zhipeng, et al. Experimental and numerical investigation of the energy absorption characteristics of carbon-basalt hybrid fiber reinforced polymer composites under ballistic impact. *Composite Structures*, 2024, 335: 118000.
39. Li, Shengpeng, et al. Effect of Composite-Region Fraction and TiCp Content on the Mechanical Properties of H13 Steel Matrix Composites with Honeycomb Architecture. *Materials*, 2025, 18.5: 1128.
40. He, Zhikang, et al. Frontal polymerization of high-performance glass fiber epoxy composites with high fiber volume fraction. *Composites Communications*, 2025, 56: 102381.
41. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад.: В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

## ДОДАТКИ

ДОДАТОК А  
(обов'язковий)

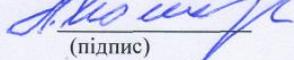
ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ КОМПОЗИТІВ ПРИ ЛОКАЛЬНИХ УДАРНИХ  
ВПЛИВАХ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ГМ

д. т. н., професор Леонід ПОЛЩУК,



(підпис)

«27» 03 2025

### ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

Дослідження міцності композитів при локальних ударних впливах

Розробив студент

Спеціальності 133 «Галузеве

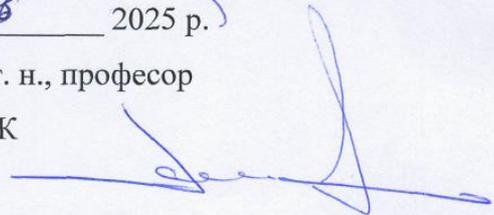
машинобудування»

Дмитро ЛУЧЕНКО

«28» 03 2025 р.

Керівник: д. т. н., професор

Роман СИВАК



## **1 Найменування і область застосування**

Найменування – склопластик на основі на основі поліефірних матриць, застосовується в авіаційній промисловості, наземному транспорті, суднобудуванні.

## **2 Підстава для виконання роботи**

Підставою для розробки даного дипломного проекту є індивідуальне завдання на магістерську кваліфікаційну роботу та наказ ректора по ВНТУ про закріплення тем.

## **3 Мета і призначення дослідження**

Мета: чисельне дослідження процесів деформування, пошкодження та руйнування пластин з тканинного композиту при ударному та квазістатичному навантаженні.

Призначення розробки – використання чисельних моделей руйнування та деформування при проектуванні захисних кожухів турбовентиляторних двигунів.

## **4 Джерела розробки**

Список використаних джерел розробки:

- 4.1Lyu, Qihui; Wang, Ben; Guo, Zaoyang. Predicting post-impact compression strength of composite laminates under multiple low-velocity impacts. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 164: 107322.
- 4.2Naya, F., et al. Experimental study of the importance of fiber breakage on the strength of thermoplastic matrix composites subjected to compression after impact. *Composite Structures*, 2024, 342: 118238.
- 4.3Zhang, Peng, et al. Nylon/large-tow carbon fiber-wrapped yarn composites with improved interfacial shear and impact strength. *Polymer Composites*, 2025, 46.6: 5314-5324.

4.4 Zhang, Zhen-Bang, et al. Scalable manufacturing of mechanical robust bioinspired ceramic–resin composites with locally tunable heterogeneous structures. *Advanced Materials*, 2023, 35.14: 2209510.

4.5 Javanshour, F., et al. Modulating impact resistance of flax epoxy composites with thermoplastic interfacial toughening. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 150: 106628.

### 5 Вихідні дані для розробки:

1	Модуль пружності, ГПа	28
2	Модуль зсуву, ГПа	6,2
3	Коефіцієнт Пуасона	0,18
4	Границя міцності, МПа	380
5	Температура, °С	23
6	Швидкість падіння, м/с	2; 5
7	Висота падіння, м	0,2; 1,27
8	Загальна маса бойка, кг	67; 11

#### 5.1 Технічні вимоги:

- число обчислювальних вузлів - 480;
- тип процесора – Intel Xeon X5680 (6 ядер по 3.33 ГГц);
- тип співпроцесора – Intel Xeon Phi SE10X (61 ядро по 1.1 ГГц);
- оперативна пам'ять – 16,9 Тб;
- дискова пам'ять – 300 Тб;

5.2 Вимоги до надійності: довговічність – не менше 10 тис. год; безвідмовність – напрацювання на відмову – 1 тис. год; збереженість – повинна забезпечуватися працездатність деталі в режимі очікування, роботи, консервації; ремонтпридатність – деталь повинна відповідати вимогам експлуатації.

5.3 Вимоги до технологічності розробки, виробництва і експлуатації – повинна гарантувати надійну і безпечну роботу обладнання, витримувати інтенсивні динамічні навантаження.

5.4 Вимоги до рівня уніфікації і стандартизації, вимоги до використання стандартних, уніфікованих і запозичених складальних одиниць і деталей при розробці, показники рівня уніфікації – по можливості під час проектування захисних кожухів турбовентиляторних двигунів використовувати уніфіковані деталі, стандартні вироби та загальнодоступні матеріали і речовини.

5.5 Вимоги безпеки життєдіяльності – забезпечується безпека під час монтажу і ремонту. Допустимі рівні вібраційних і шумових навантажень, допустимі випаровування робочої рідини у відповідності з санітарними нормами. Повинні бути розроблені заходи, що забезпечують технічну безпеку під час монтажу, експлуатації і ремонті пристрою.

5.6 Конструкція повинна відповідати естетичним і ергономічним вимогам, повинна бути зручною в обслуговуванні та управлінні.

5.7 Матеріали, що використовуються для деталей слід вибирати відповідно до рекомендацій.

5.8 Умови експлуатації, вимоги до технічного обслуговування і ремонту:

–умови експлуатації, при яких повинно забезпечуватися використання продукції з заданими технічними показниками – продукція призначена для використання у середньоширотних кліматичних умовах;

–час підготовки продукції до використання після транспортування і зберігання – 10 год;

–вид обслуговування - періодичний;

–періодичність і орієнтовна трудомісткість технічного обслуговування і ремонту – 2 дні (один раз в три місяці);

5.9 Вимоги по транспортуванню і збереженню

–можливість транспортування на будь-якому виді транспортних засобів;

–захист від ударів під час завантаження і розвантаження;

–зберігання на складі готової продукції;

–зберігання у законсервованому вигляді;

- складування на стелажах.

**6 Економічні показники:**

- орієнтований термін окупності витрат на розробку – 1,3 роки,
- освоєння виробництва продукції – 1 місяць,
- економічна перевага розробленої продукції у порівнянні з кращими зразками – прогнозований прибуток 736 855,53 грн. за три роки.

**7 Виконавці НДР:** студент спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» Дмитро ЛУЧЕНКО

**8 Етапи НДР і терміни їх виконання:**

- теоретичне дослідження проблематики теми МКР;
- патентно-інформаційний огляд по темі МКР
- чисельне дослідження процесів деформування, пошкодження та руйнування пластин з тканинного композиту при ударному та квазістатичному навантаженні;
- проектні та перевірочні розрахунки елементів обладнання;
- техніко-економічне обґрунтування МКР;
- висновки.
- оформлення текстових документацій та ілюстративних матеріалів для захисту МКР.

**9 Порядок контролю і прийомки**

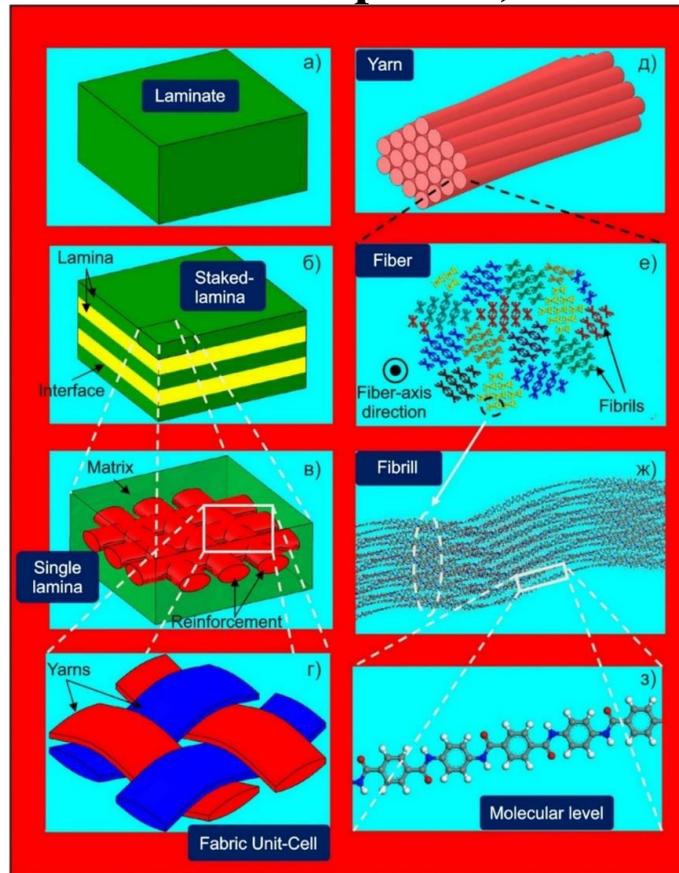
- попередній захист проекту
- захист проекту перед МКР

ДОДАТОК Б  
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ КОМПОЗИТІВ ПРИ ЛОКАЛЬНИХ УДАРНИХ  
ВПЛИВАХ

# Підходи, що застосовуються при чисельному моделюванні композиційних матеріалів, які зазнали високошвидкісної ударної дії



а) – гомогенний підхід; б) - моделювання на рівні шарів; в) та г) - моделювання на рівні шару з різною деталізацією армуючого каркасу; д) - моделювання на рівні нитки; е) – моделювання лише на рівні волокон (філаментів); ж) – моделювання лише на рівні ланцюжків молекул; з) – моделювання на молекулярному рівні

Рисунок 1 - Ілюстрація класифікації підходів до моделювання композиційних матеріалів залежно від рівня деталізації геометричної моделі

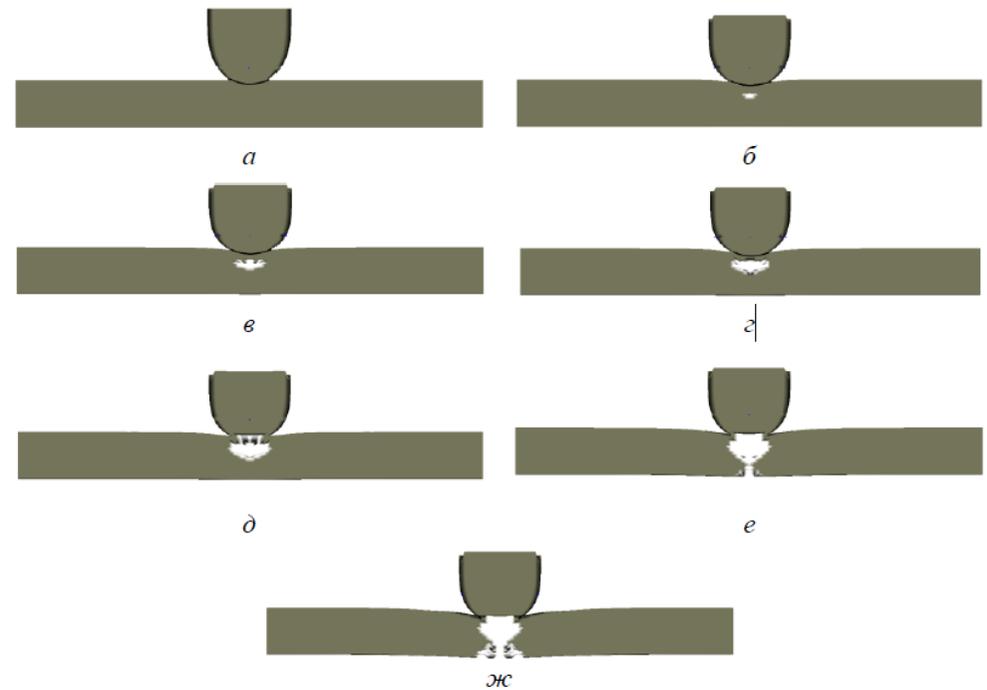


Рисунок 2 - Картина руйнування композитної панелі у різні моменти часу при дії ударника зі швидкістю 700 м/с

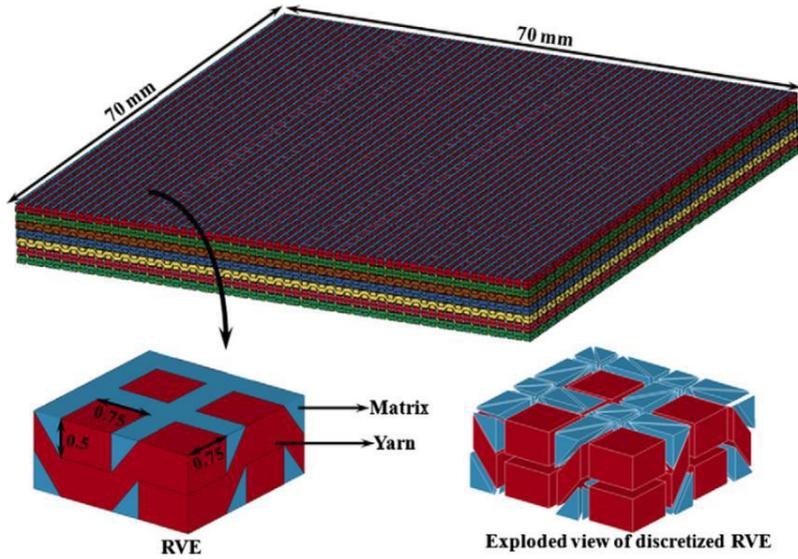


Рисунок 3 - Геометрична модель з дискретизацією лише на рівні ниток для розрахунків ударного навантаження зразка з композитних матеріалів



Рисунок 4 - Фрагмент сіткової моделі, використаної для мікрорівневого моделювання балістичного композиту

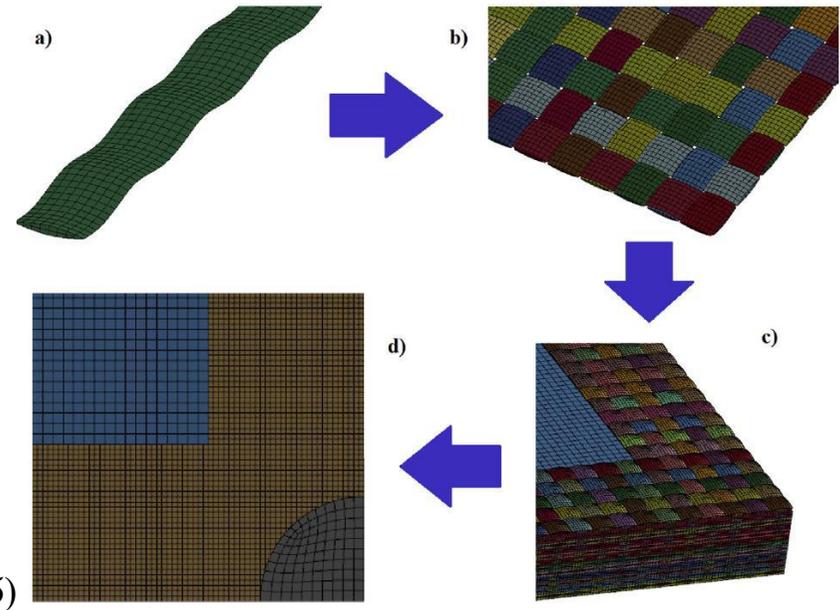
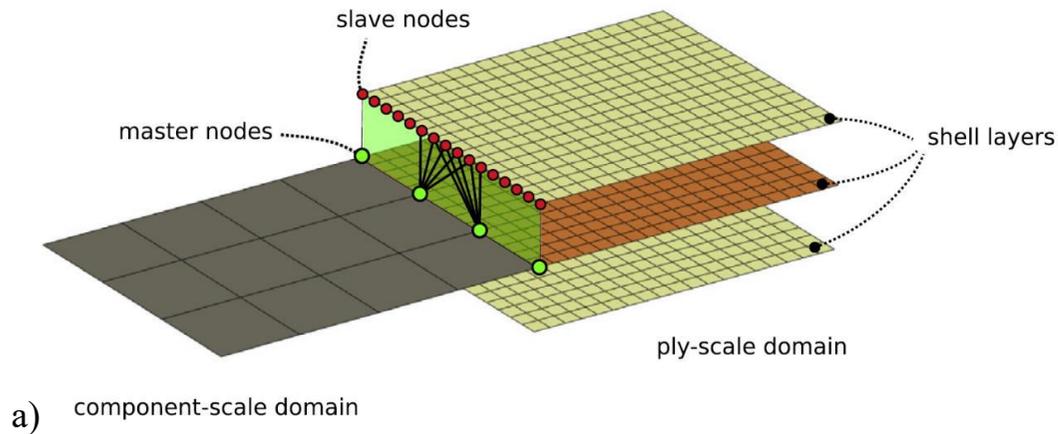


Рисунок 5 - Комбіновані підходи

## Визначення механічних властивостей склопластику

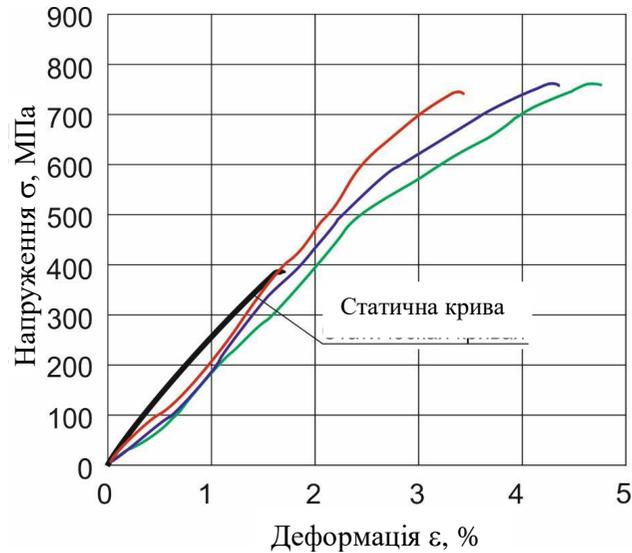


Рисунок 6 - Діаграми «напруження – деформація» для зразків, вирізаних у напрямку основи при швидкості деформування 200 сек<sup>-1</sup>

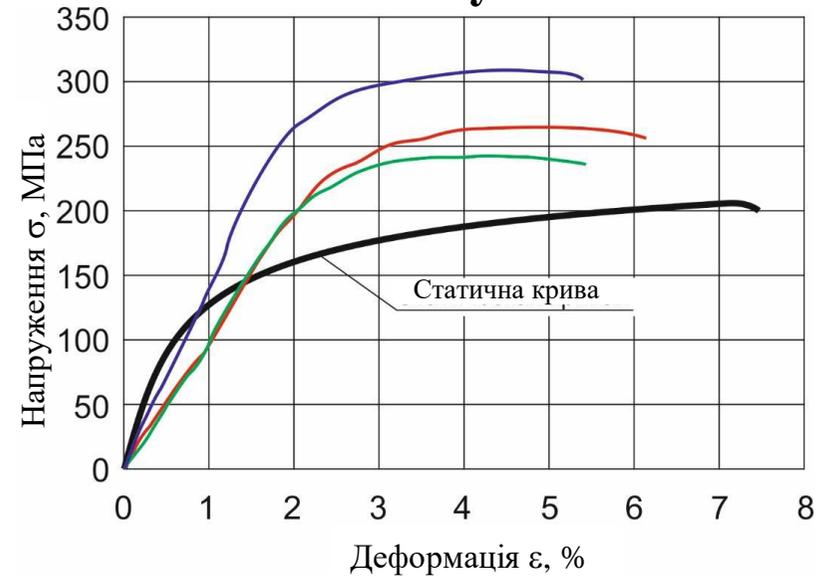
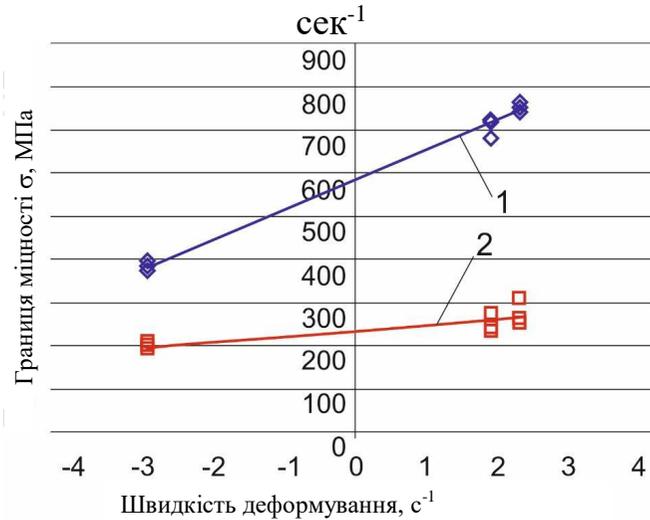


Рисунок 7 - Діаграма "напруження - деформація" для зразків, вирізаних по діагоналі, при швидкості деформування 200 сек<sup>-1</sup>



крива 1 – для зразків, вирізаних у бік основи (0<sup>0</sup>), крива 2 – для зразків, вирізаних по діагоналі (45<sup>0</sup>)  
Рисунок 8 - Залежність границі міцності від швидкості деформування

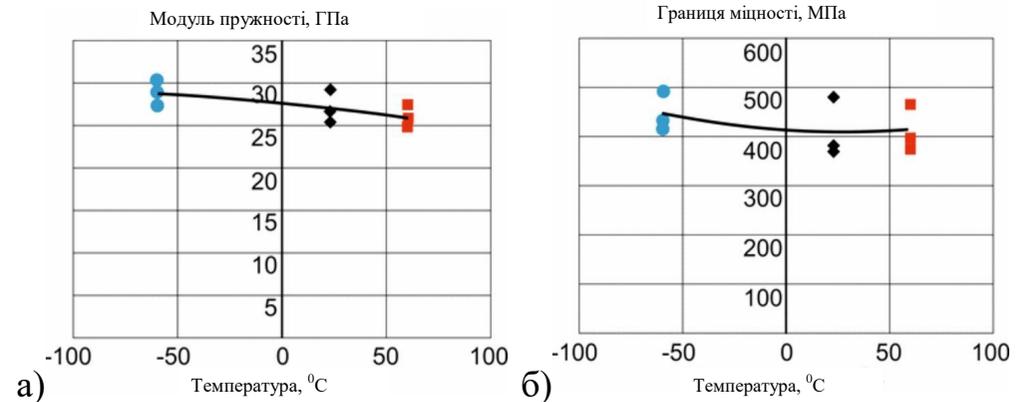


Рисунок 9 - Залежність механічних характеристик від температури

# Визначення балістичних характеристик склопластику при ударному навантаженні

Залишкова швидкість розраховується за формулою, що ґрунтується на законах збереження енергії та імпульсу

$$V(S) = \left( 1 + \frac{M}{m_p} \right) \sqrt{2g \cdot f \cdot S} \tag{1}$$

де  $S$  – переміщення пастки по напрямній,  $m_p$  – маса снаряда (включаючи масу сміття),  $M$  – маса пастки,  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання,  $g$  – прискорення вільного падіння.

Апроксимуюча дані результати функція на основі залежності Ламберта-Джонаса:

$$V_r = \begin{cases} 0 & \text{если } V_i < V_L \\ A \cdot (V_i^m - V_L^m)^{1/m} & \text{если } V_i \geq V_L \end{cases} \tag{2}$$

де  $A$ ,  $V_L$  та  $m$  – три параметри регресії,  $V_r$  та  $V_i$  – залишкова та початкова швидкості снаряда, відповідно,  $V_L$  – балістична межа (швидкість, при перевищенні якої спостерігається пробій).

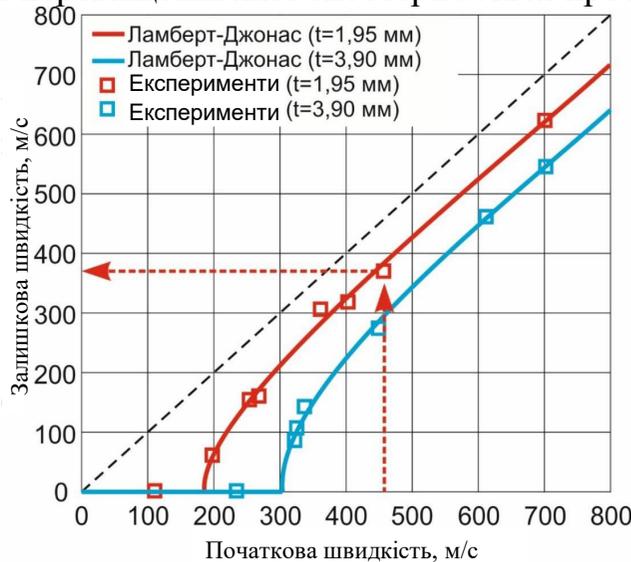


Рисунок 11 - Балістичні криві

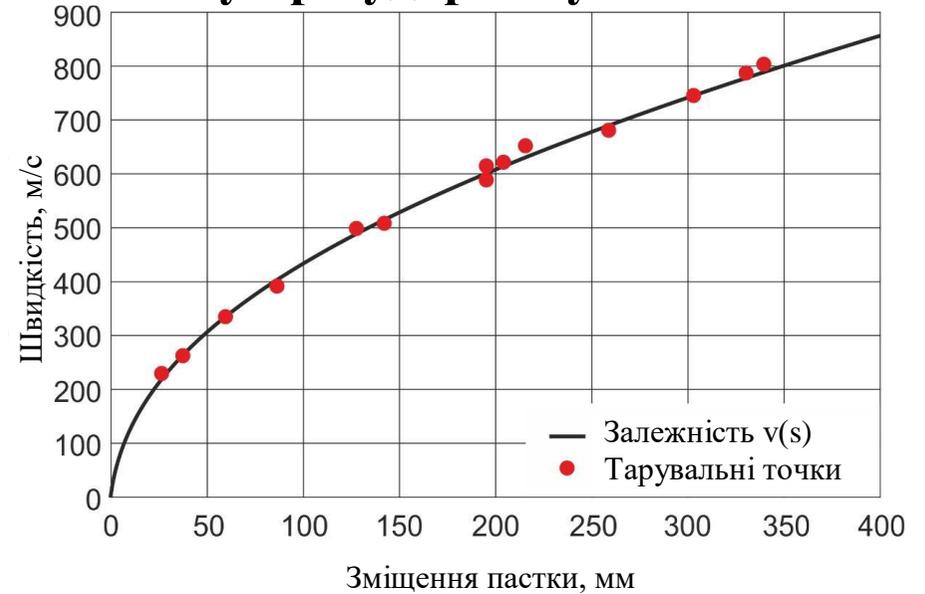


Рисунок 10 - Тарувальний графік пастки для визначення залишкової швидкості ударника

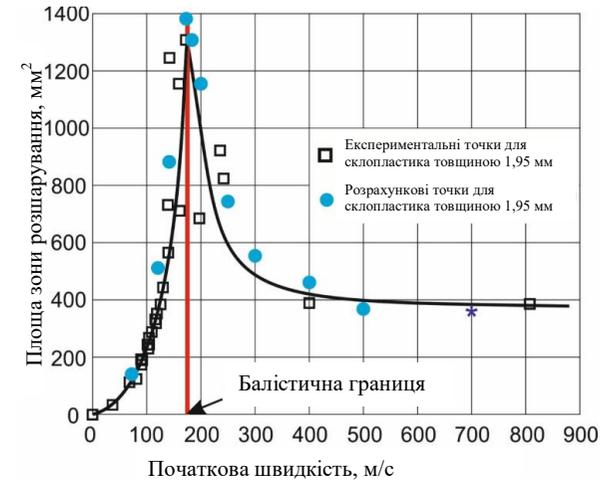


Рисунок 12 - Залежність площі зони розшарування від початкової швидкості ударника  $V_0$  для склопластику завтовшки 1,95 мм

## Оцінка міцності композитних панелей з балістичними пошкодженнями

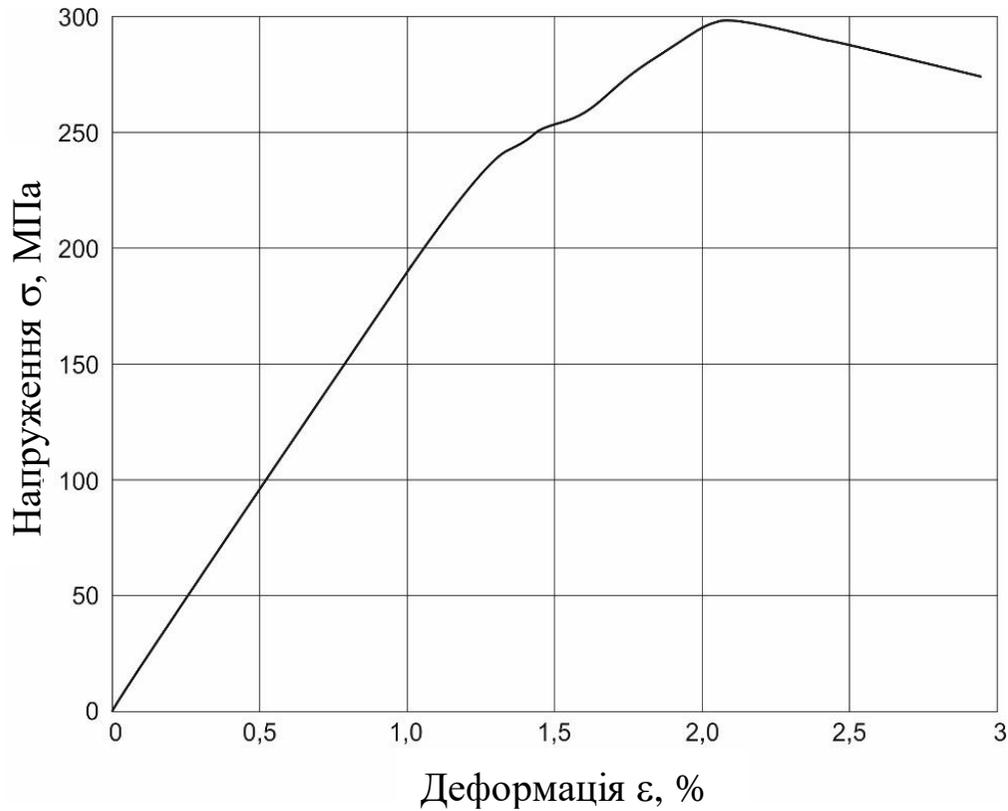


Рисунок 13 - Характерна діаграма деформування при розтягуванні

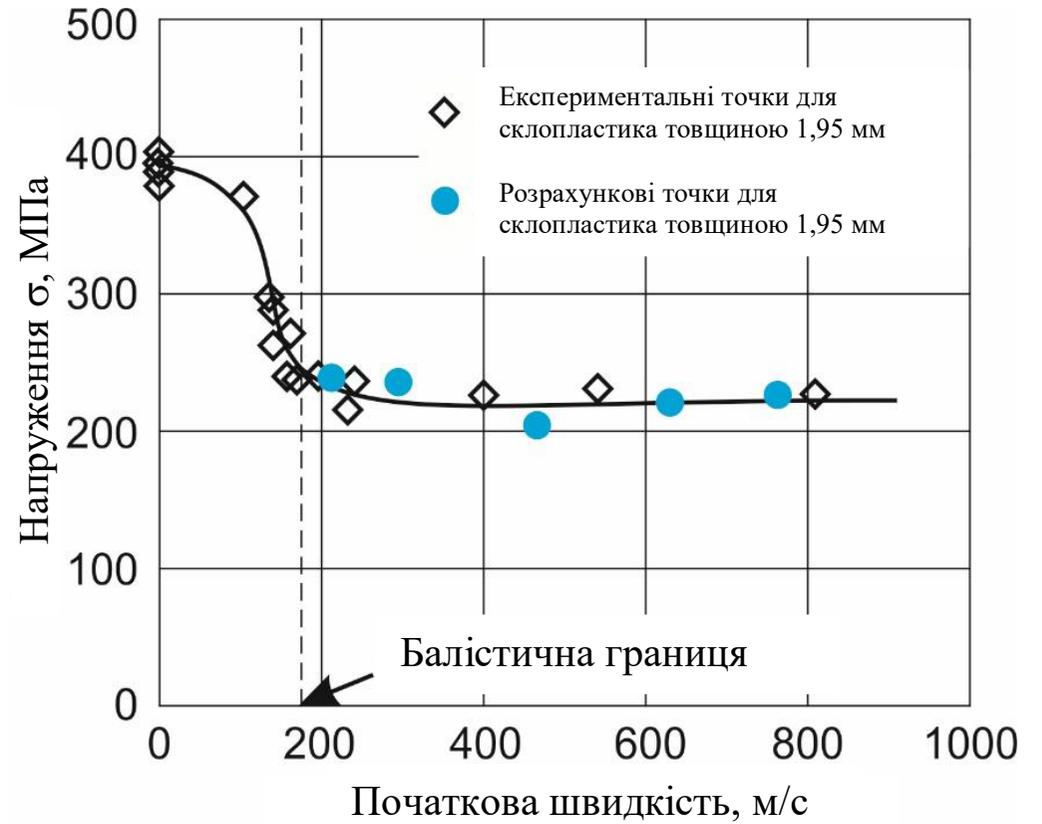


Рисунок 14 - Залежність залишкової міцності від початкової швидкості ударника

# Оцінка впливу попереднього навантаження на балістичні властивості композитних панелей

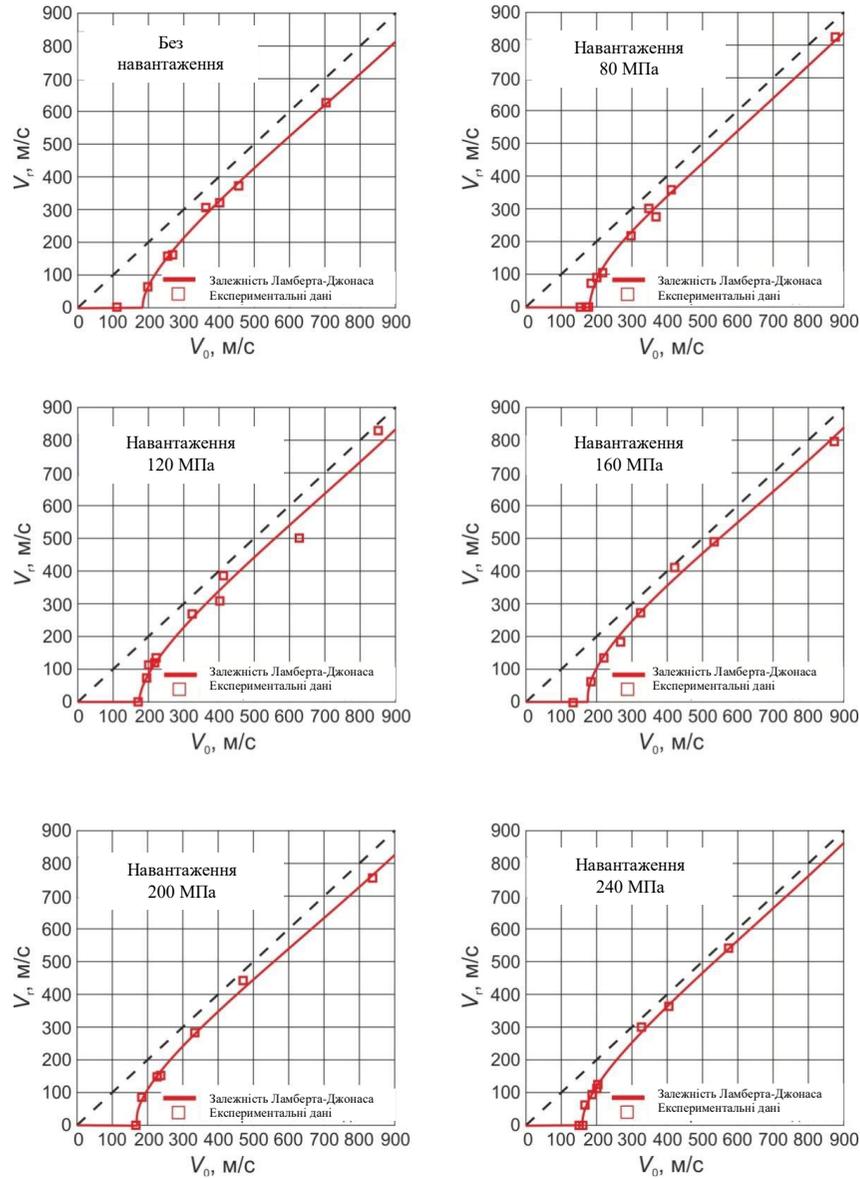


Рисунок 15 - Балістичні криві

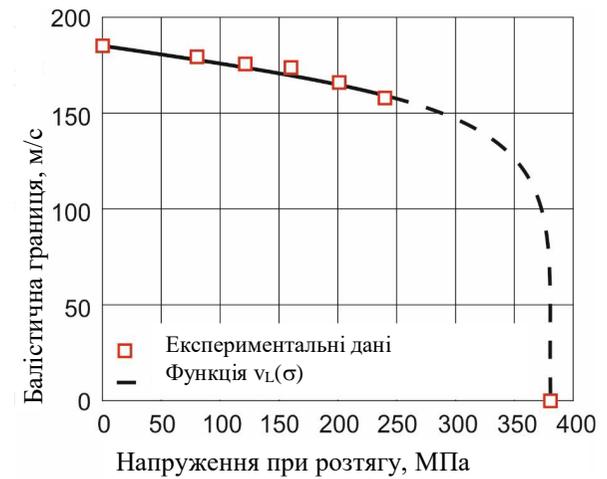


Рисунок 16 - Залежність балістичної межі від величини попереднього навантаження для склопластику товщиною 1,95

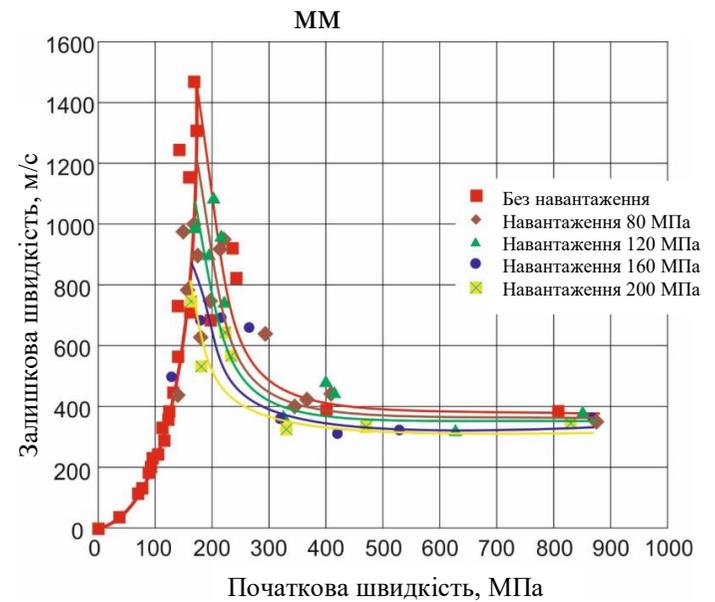
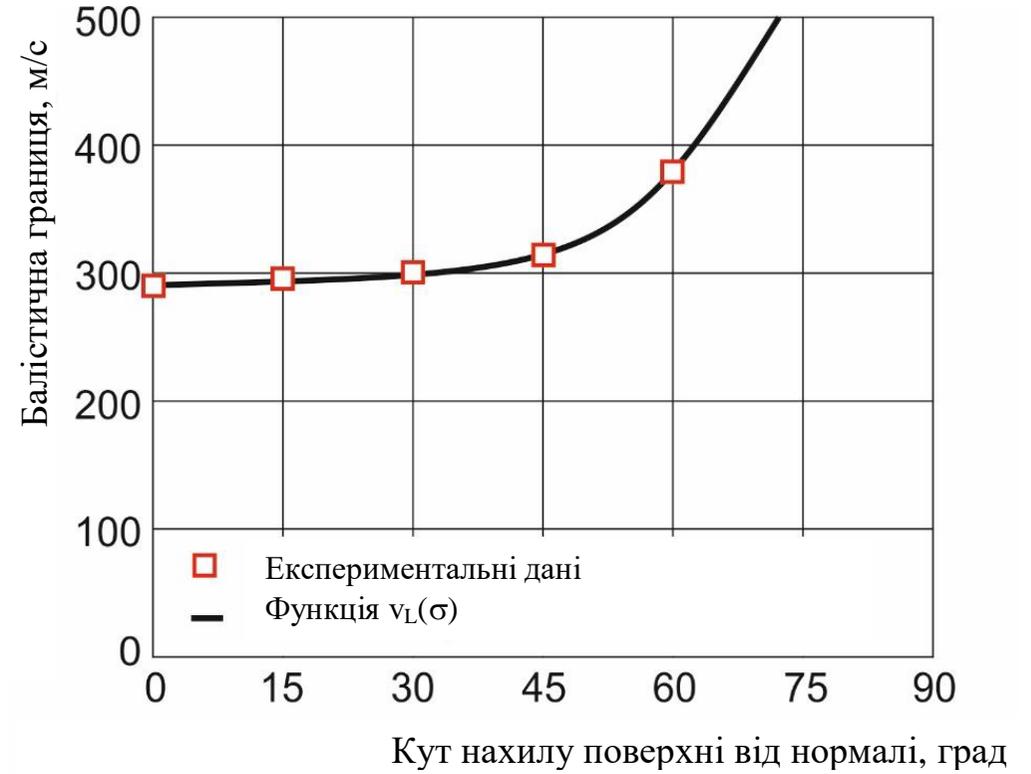
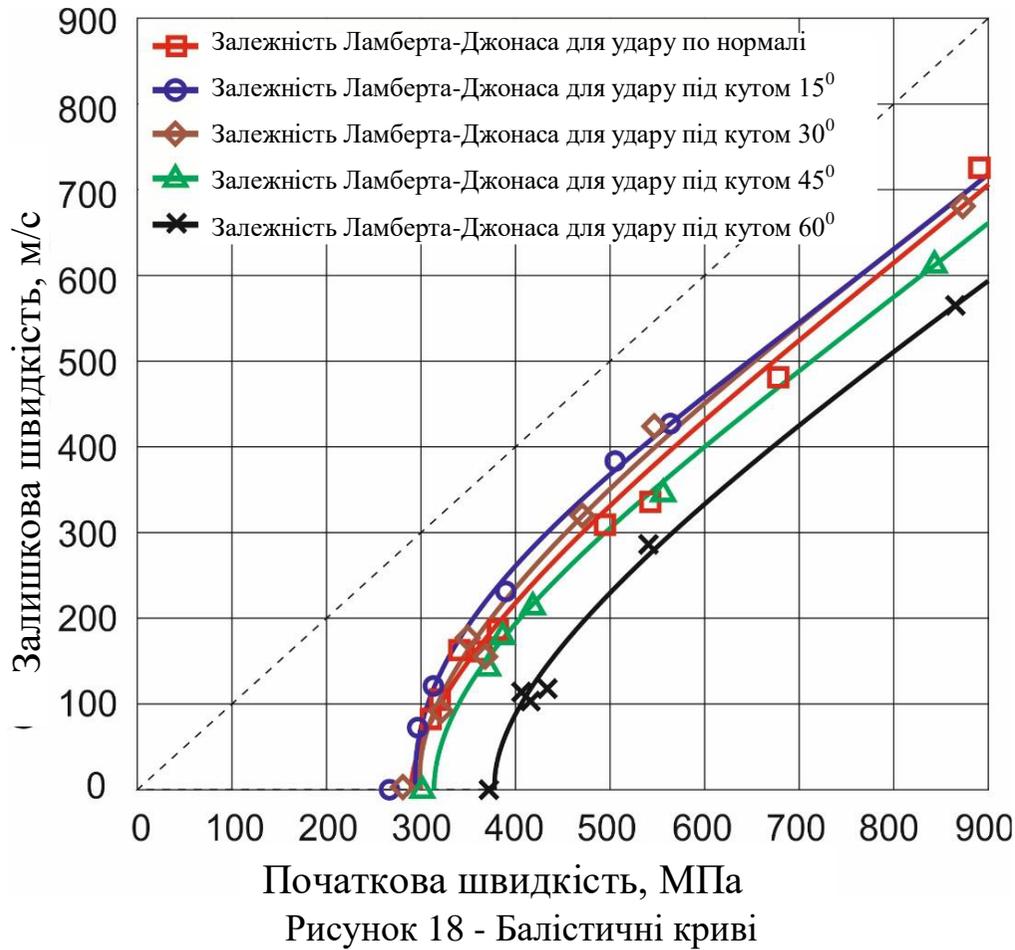


Рисунок 17 - Залежність балістичної межі від величини попереднього навантаження

## Дослідження впливу низько і високошвидкісних похилих ударів на балістичні характеристики склопластику



# Розрахункові дослідження міцності композитів при статичних і локальних ударних впливах

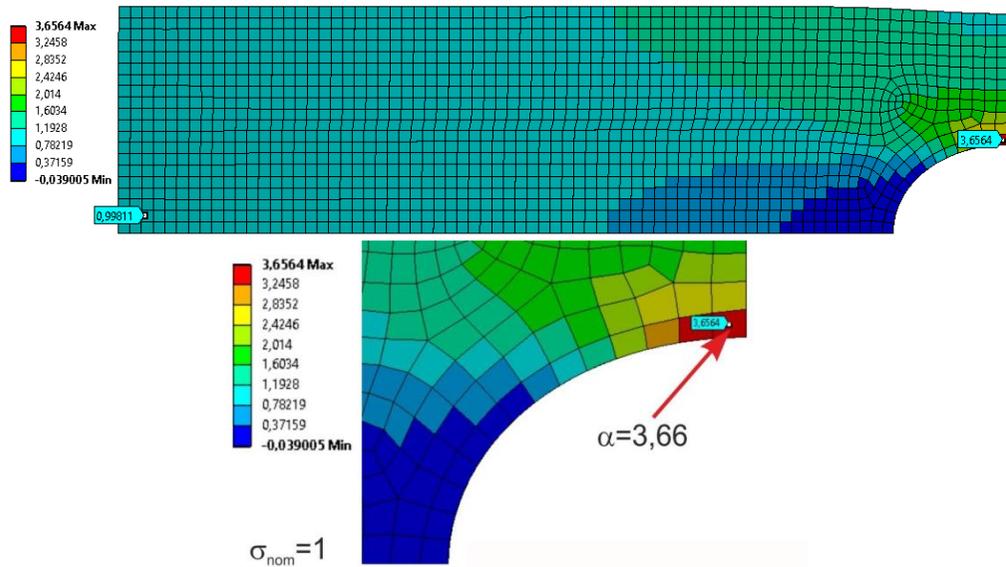


Рисунок 20 - Розрахунок напружень у пакеті ANSYS Workbench зразка з отвором

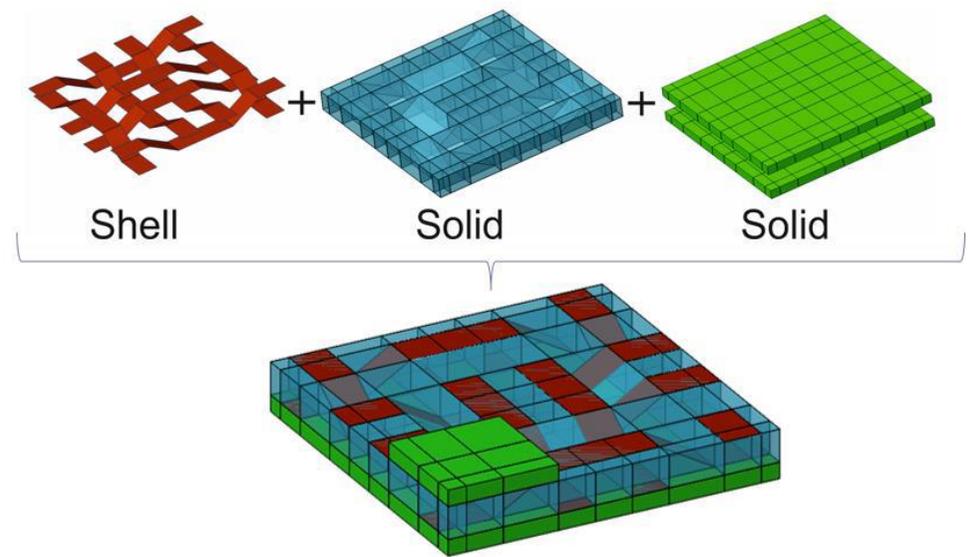


Рисунок 21 - Комірка склопластику: нитки, внутрішньошарова матриця, міжшарова матриця

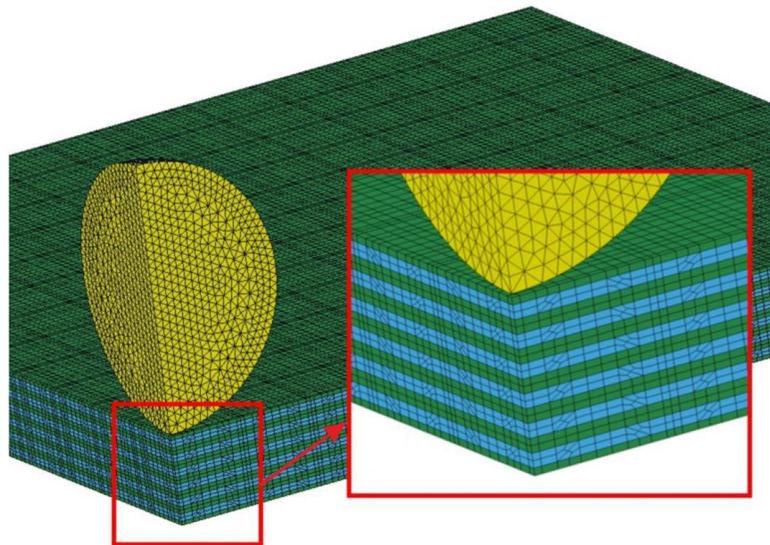


Рисунок 22 - Мезоструктурна модель склопластику

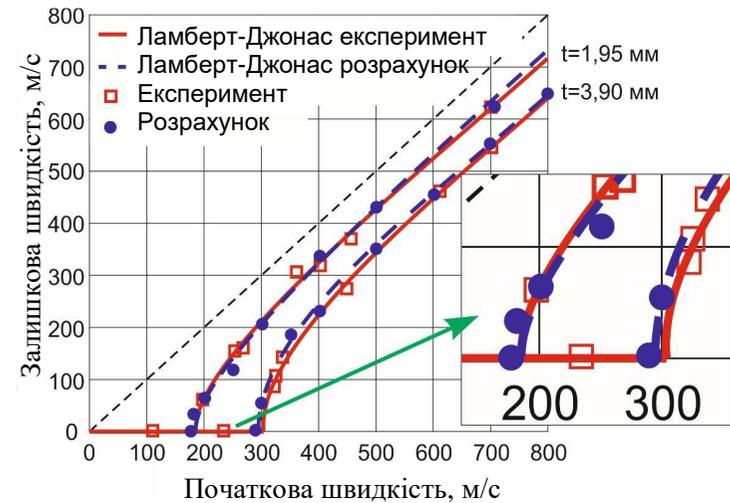


Рисунок 23 - Порівняння експериментальних та розрахункових балістичних кривих для склопластику

# Дослідження реологічних властивостей матричних компаундів

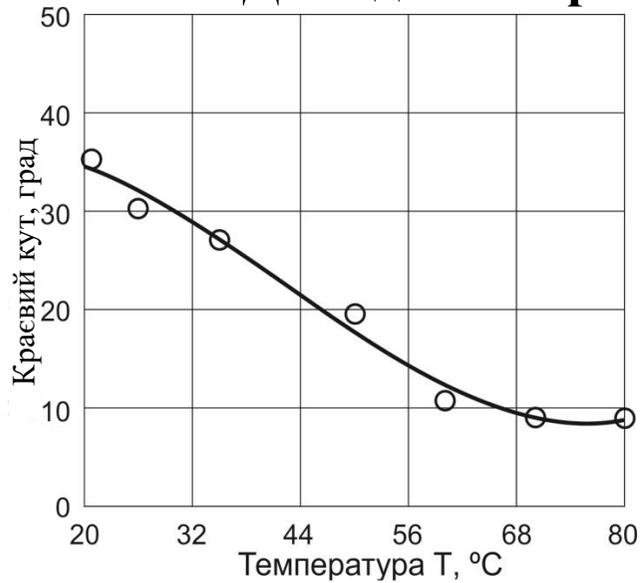


Рисунок 24 - Залежність крайового кута від температури

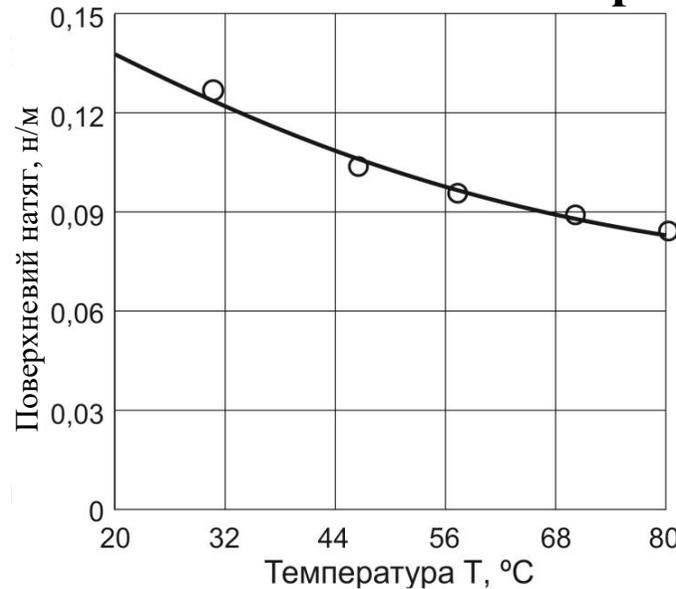


Рисунок 25 - Залежність поверхневого натягу від температури

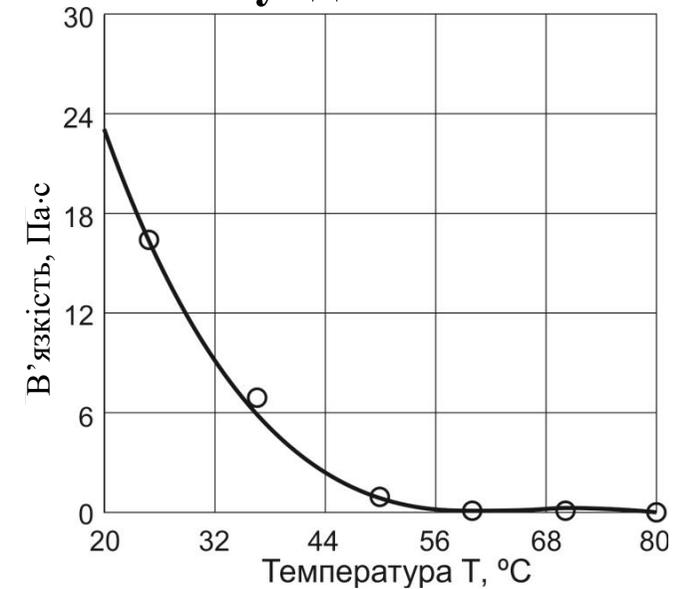


Рисунок 26 - Залежність в'язкості від температури

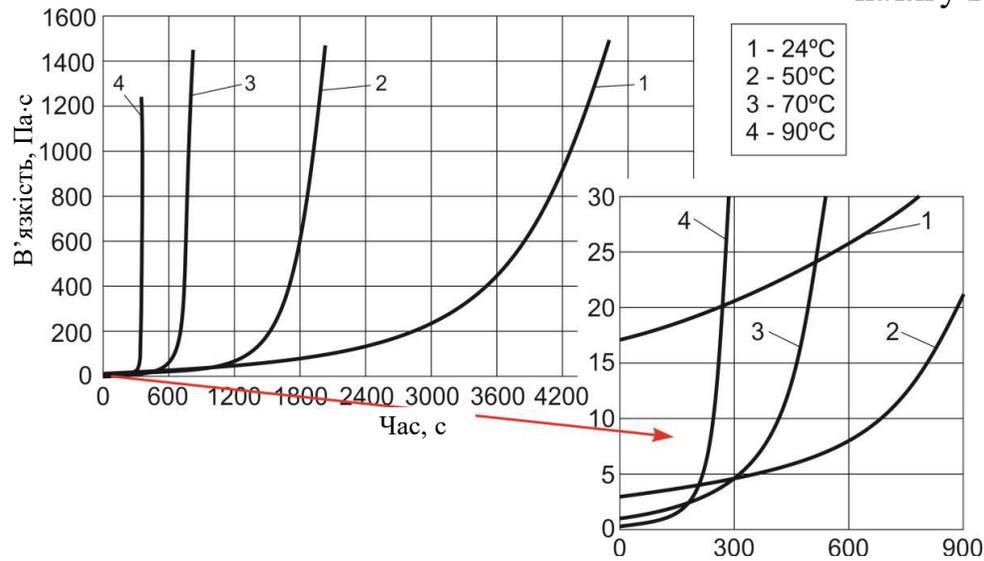


Рисунок 27 - Залежність в'язкості від часу

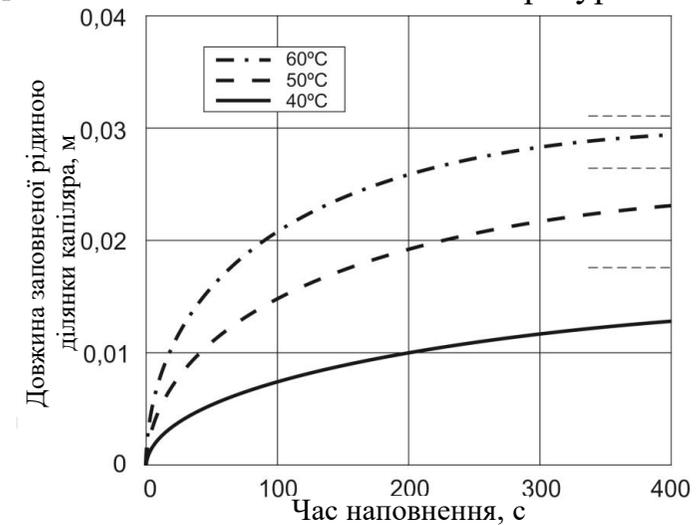


Рисунок 28 - Залежність висоти підйому стовпа рідини у капілярі від часу

## ВИСНОВКИ

1. Проведено дослідження щодо оцінки впливу попереднього навантаження на балістичні характеристики склопластику. Балістична границя зменшується на 15% при величині попереднього навантаження, що дорівнює 50% від границі міцності матеріалу.

2. Проведено дослідження щодо оцінки впливу похилих ударів на балістичні характеристики склопластику. Виявлено, що найнебезпечнішим випадком удару по склопластику вважається удар по нормалі.

3. Розроблено нову розрахункову мезоструктурну модель склопластику, що відрізняється явним врахуванням геометричної структури матеріалу та чисельною ефективністю за рахунок комбінації твердотільних та оболонкових елементів, що мають загальні вузли, а також введенням спеціального полімерного шару, що визначає зону розшарування матеріалу. Ця модель дозволяє передбачати залишкову швидкість ударника (описувати всю балістичну криву) і величину балістичної границі з похибками, що не перевищують 10-15 м/с. Отримані розміри зони руйнування моделі задовільно узгоджуються з експериментальними даними.

4. Розроблено методику оцінки залишкової міцності склопластику після балістичних пошкоджень, засновану на заміні зони пошкодження еквівалентним отвором та застосуванням експрес-методу.

5. Розроблено методику ремонту невеликих пошкоджень типу розшарування шляхом заповнення тріщин компаундом за допомогою ультразвукового збудника, що розігріває компаунд до температур  $\sim 60$  °C і підвищує його текучість.

## ДОДАТОК В

## ПРОТОКОЛ ПЕРЕРЕВІРКИ НА ПЛАГІАТ

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ КОМПОЗИТІВ ПРИ ЛОКАЛЬНИХ УДАРНИХ  
ВПЛИВАХ

## ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Дослідження міцності композитів при локальних ударних впливах

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра галузевого машинобудування, ФМТ, гр. 1ГМ-23мз  
(кафедра, факультет, навчальна група)

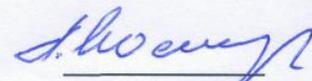
Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 18 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

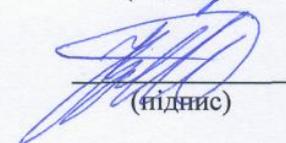
- Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Поліщук Л.К., зав. кафедри ГМ  
(прізвище, ініціали, посада)

  
(підпис)

Шенфельд В.Й., доцент кафедри ГМ  
(прізвище, ініціали, посада)

  
(підпис)

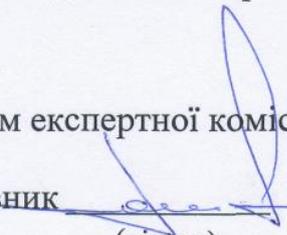
Особа, відповідальна за перевірку

  
(підпис)

Шенфельд В.Й.  
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

  
(підпис)

Сивак Р.І., д.т.н., професор

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

Лученко  
(підпис)

Лученко Д.В.

(прізвище, ініціали)