

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ІНЖЕНЕРНО-ХІМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено
Завідувач кафедри
_____ **О.Л.Сокольський**
«_____» _____ 2025 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 131 Прикладна механіка _____
(код і назва спеціальності)

на тему: Вплив наномодифікації полімеру на міцність багатопшарових плівок _____

Виконав: студент 2 курсу, групи ЛУ- 31мн
(шифр групи)

Безверхий Ігор Олександрович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник к.т.н., доцент. Чемерис А. О. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант розділу «Розробка стартап-проєкту»

к.е.н., доцент, доцент кафедри промислового маркетингу, Юдіна Н. В. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент Безверхий І.О.

Київ – 2025 рік

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – *131 Прикладна механіка*

Освітньо-наукова програма «Прикладна механіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **О.Л.Сокольський**

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Безверхому Ігорю Олександровичу

1. Тема дисертації «Вплив наномодифікації полімеру на міцність багатошарових плівок», науковий керівник дисертації Чемерис Андрій Олегович, к.т.н, доцент, затверджені наказом по університету від «21.03» 2025 р. №1216-с
2. Термін подання студентом дисертації 22.05.2025р.
3. Об'єкт дослідження: Багатошарова полімерна плівка з наномодифікованими вуглецевими нанотрубками шарами.
4. Предмет дослідження: Процеси руйнування адгезійного шару між вуглецевою нанотрубкою та полімерною матрицею в залежності від коефіцієнту наноармування полімеру.
5. Зміст пояснювальної записки: Вступ; Призначення та галузь застосування виробу, що проєктується; Сучасні методи дослідження та вдосконалення багатошарових полімерних матеріалів; Числове моделювання витягування вуглецевої нанотрубки з полімерного масиву; Охорона праці; Розробка стартап-проєкту; Висновки; Список використаних джерел.
6. Перелік графічного матеріалу: Лист 1 – Технологічна лінія для виробництва багатошарових плівок – формат A1; Лист 2 – Екструдер ЧП 45x25 загальний вигляд – формат A1; Лист 3 – Тришарова плоскощілинна головка – формат A1; Лист 4 і 5 – Плакати з математичними моделями – формат A1; Лист 6 – Постановка задачі в APROKS – Формат A1; Листи 7 і 8 – Плакати розрахунків у середовищі APROKS – формат A1.
7. Орієнтовний перелік публікацій: опубліковано дві тези конференції стосовно теми дисертації

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Стартап-проект	Юдіна Н.В., доц.		

Дата видачі завдання 03.02.2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів дисертації	Примітка
1.	Підбір літератури та патентів за темою	3.02.2025-16.02.2025	
2.	Виконання креслень технологічної лінії, базової машини та екструзійної головки	17.02.2025-2.03.2025	
3.	Виконання розділу 1 «Призначення та застосування виробу, що проєктується»	3.03.2025-9.03.2025	
4.	Виконання розділу 2 «Сучасні методи дослідження та вдосконалення багат шарових полімерних матеріалів»	10.03.2025-16.03.2025	
5.	Проведення експериментів	17.03.2025-30.03.2025	
6.	Виконання розділу 3 «Числове моделювання витягування вуглецевої нанотрубки з полімерного масиву»	31.03.2025-6.04.2025	
7.	Виконання плакатів математичних моделей, постановки задачі та результатів розрахунку	7.04.2025-20.04.2025	
8.	Виконання розділу 4 «Охорона праці»	21.04.2025-27.04.2025	
9.	Виконання розділу 5 «Розробка стартап-проекту»	28.04.2025-04.05.2025	
10.	Оформлення пояснювальної записки та формулювання висновків	05.05.2025-18.05.2025	

Студент

Безверхий І.О.

Науковий керівник

Чемерис А.О

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація «Вплив наномодифікації полімеру на міцність багатошарових плівок» / І.О. Безверхий. КПІ ім. Ігоря Сікорського; науковий керівник А.О. Чемерис. Робота містить: с.140, 34 рис., 27 табл., 2 дод., 62 посилань.

Об'єкт дослідження: багатошарова полімерна плівка з наномодифікованими вуглецевими нанотрубками шарами.

Предмет дослідження: процеси руйнування адгезійного шару між вуглецевою нанотрубкою та полімерною матрицею в залежності від коефіцієнту наноармування полімеру.

Мета – визначити вплив рівня наноармування на процеси руйнування в композитній системі «нанотрубка–полімерна матриця» при локальному навантаженні, з урахуванням адгезійної взаємодії між складовими.

Наукова новизна та практичне значення отриманих результатів: 1. Визначено фізико-механічні характеристики адгезійного шару в структурі «вуглецева нанотрубка - полімер»; 2. Проведено числові дослідження поведінки вуглецевої нанотрубки в полімерній матриці при зміні геометричних параметрів трубки та коефіцієнту армування.

Практичне значення полягає в тому, що отримані результати можна використовувати в подальших дослідженнях та на виробництвах з наномодифікацією плівок.

Опубліковано: за темою дисертації представлено 2 тези доповідей на конференції.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ВУГЛЕЦЕВІ НАНОТРУБКИ, КОЕКСТРУЗІЯ , ПОЛІЕТИЛЕН, ПЕВГ, ЕКСТРУДЕР, БАГАТОШАРОВІ ПЛІВКИ, НАНОМОДИФІКАЦІЯ, ВІДШАРУВАННЯ, РУЙНУВАННЯ.

ABSTRACT

Master's thesis "Influence of polymer nanomodification on the strength of multilayer films" / I.O. Bezverkhyi. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute; supervisor A.O. Chemeris. The work contains: pp. ___, 34 figures, 27 tables, 2 appendix, 60 references.

Object of research: multilayer polymer film with nanomodified carbon nanotube layers.

Subject of research: processes of destruction of the adhesive layer between the carbon nanotube and the polymer matrix depending on the coefficient of polymer nanoreinforcement.

Objective: to determine the effect of the level of nanoreinforcement on the fracture processes in the composite system "nanotube-polymer matrix" under local loading, taking into account the adhesive interaction between the components.

Scientific novelty and practical significance of the results: 1. The physical and mechanical characteristics of the adhesive layer in the carbon nanotube-polymer structure were determined; 2. Numerical studies of the behaviour of a carbon nanotube in a polymer matrix were carried out when the geometric parameters of the tube and the reinforcement coefficient were changed.

The practical significance is that the results obtained can be used in further research and in production with nanomodification of films.

Publications: 2 conference abstracts were presented on the topic of the dissertation.

KEYWORDS: CARBON NANOTUBES, COEXTRUSION, POLYETHYLENE, HDPE, EXTRUDER, MULTILAYER FILMS, NANOMODIFICATION, DETACHMENT, DESTRUCTION

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	3
ВСТУП	4
1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ ВИРОБУ, ЯКИЙ ПРОЄКТУЄТЬСЯ.....	7
1.1 Багатошарова полімерна плівка	7
1.2 Базова машина та технологічна лінія для виготовлення багатошарової полімерної плівки.....	9
1.3 Актуальність досліджень впливу наномодифікації на міцність багатошарової полімерної плівки.....	14
2 СУЧАСНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ БАГАТОШАРОВИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ	17
2.1 Коекструзія як метод створення багатошарових полімерних матеріалів	17
2.2 Дослідження механічних властивостей та їх оптимізація	26
2.3 Роль нанонаповнювачів у зміцненні полімерних матеріалів	29
2.4 Методи контролю якості та структурного аналізу	32
2.5 Бар'єрні та оптичні властивості полімерних плівок	35
2.6 Інноваційні наноматеріали та їх застосування.....	37
2.7 Сучасний стан розробок у виробництві багатошарових плівок та наномодифікацій	39
Висновки до розділу 2	45
3 ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИТЯГУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВОЇ НАНОТРУБКИ З ПОЛІМЕРНОГО МАСИВУ	47
3.1 Математичне моделювання	47
3.2 Опис обраних методу та програмного комплексу для дослідження	51
3.3 Моделювання витягування нанотрубки в залежності від її характеристик з полімерного масиву.....	52

3.4 Визначення параметрів руйнування адгезійного шару між вуглецевою нанотрубкою та полімерною матрицею в залежності від коефіцієнту наноармування полімеру	54
Висновки до розділу 3	60
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	62
4.1 Повітря робочої зони	62
4.2 Промислове освітлення	64
4.3 Електробезпека.....	66
4.4 Пожежна безпека.....	67
4.5 Небезпека від впливу частин, що рухаються або обертаються.....	69
4.6 Виробничий шум.....	71
Висновки до розділу 4	73
5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	74
5.1 Опис ідеї продукту.....	74
5.2 Технологічний аудит проекту.....	79
5.3 Аналіз ринкових можливостей реалізації стартап-проекту	81
5.4 Розроблення ринкової стратегії стартап-проекту	99
5.5 Розроблення маркетингової стратегії стартап-проекту	104
Висновки до розділу 5	112
ВИСНОВКИ.....	114
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	116
ДОДАТКИ.....	127

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

Умовні позначення:

D – діаметр нанотрубки, нм;
 L – довжина нанотрубки, нм;
 F – сила (активне навантаження), нН;
 k – коефіцієнт наноармування, % за об'ємом (масою);
 U – переміщення, нм;
 E – модуль пружності, Па
 ν – коефіцієнт Пуассона
 r_0 – рівноважна міжатомна відстань для зв'язку C–C, нм;
 β – параметр потенціалу (показник експоненти), m^{-1} ;
 D_e – глибина потенціальної ями (енергія дисоціації), нм;
 r – міжатомна відстань (зазвичай $< R$), нм;
 R – радіус впливу між нанотрубною та полімером, нм.
 $F(\epsilon_r)$ – сила взаємодії між атомами, нН.
 U_{max} – максимальне переміщення при витягуванні, нм.

Скорочення:

ВНТ – вуглецева нанотрубка;
ПЕВГ – поліетилен високої густини;
ПМ – полімерна матриця;
МСЕ – метод скінченних елементів;
СВНТ – спіральні вуглецеві нанотрубки;
RVE – Representative Volume Element — репрезентативний об'ємний елемент;
ДСТУ – Державний Стандарт України.

ВСТУП

Актуальність теми. Створення полімерних композитів, модифікованих вуглецевими нанотрубками, є одним із ключових напрямів розвитку сучасного матеріалознавства. Завдяки унікальному поєднанню високої міцності, модулю пружності, термостійкості та електропровідності, нанотрубки здатні істотно підвищувати експлуатаційні характеристики полімерних матеріалів при мінімальному вмісті наповнювача.

Проте, однією з найважливіших проблем таких систем є руйнування на міжфазній межі — між нанотрубкою та полімерною матрицею. Саме механізм відшарування нанотрубки від полімеру часто визначає граничні навантаження та довговічність нанокомпозиту. У зв'язку з цим, математичне та чисельне моделювання процесів руйнування в зоні адгезійного контакту набуває особливої актуальності, оскільки дозволяє на етапі проектування передбачити критичні навантаження, зони концентрації напружень та оптимізувати геометричні параметри структури.

Враховуючи зростаюче застосування нанокомпозитів у авіаційній, космічній, автомобільній, біомедичній та електронній промисловості, розробка достовірних моделей поведінки таких матеріалів має не лише наукове, а й практичне значення.

Актуальність дослідження також зумовлена широким потенціалом застосування отриманих результатів — зокрема, для оптимізації складу полімерних нанокомпозитів у високотехнологічних галузях, де критичним є поєднання міцності, гнучкості та малої маси конструкційних матеріалів.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є визначення впливу рівня наноармування на процеси руйнування в композитній системі «нанотрубка–полімерна матриця» при локальному навантаженні, з урахуванням адгезійної взаємодії між складовими.

Для того, щоби досягнути цієї мети, сформовані такі завдання:

1. Розробити або адаптувати математичну модель, що описує механічну поведінку системи «вуглецева нанотрубка – полімерна матриця» з урахуванням адгезійної взаємодії.

2. Реалізувати чисельне моделювання в середовищі APROKS із використанням ітераційно-крокового методу прикладення навантаження для вивчення етапів зародження та поширення руйнувань.

3. Провести апробацію математичної моделі шляхом порівняння отриманих чисельних результатів із експериментальними даними, наведеними в літературі.

4. Дослідити вплив об'єму полімерного масиву на момент початку руйнування композиту при фіксованих параметрах нанотрубки.

5. Оцінити вплив діаметра нанотрубки на силу руйнування та характер поширення тріщин при сталих характеристиках полімеру.

6. Проаналізувати зміну довжини нанотрубки як чинника, що впливає на механічну поведінку композиту.

7. Побудувати узагальнені графіки залежності сили руйнування від параметрів системи та сформулювати практичні висновки щодо оптимального рівня наноармування.

Об'єкт дослідження – багатошарова полімерна плівка з наномодифікованими вуглецевими нанотрубками шарами.

Предмет дослідження – процеси руйнування адгезійного шару між вуглецевою нанотрубкою та полімерною матрицею в залежності від коефіцієнту наноармування полімеру.

Наукова новизна та практичне значення отриманих значень. Визначено фізико-механічні характеристики адгезійного шару в тришаровій структурі типу «вуглецева нанотрубка – адгезійний шар – полімерна матриця». Було враховано напружено-деформований стан у зоні контакту та використано фізично обґрунтовану модель міжфазної взаємодії, що включає силу зчеплення та зсувне напруження. Це дозволило змодельовати реалістичну поведінку адгезійного зв'язку на міжфазній межі.

Проведено серію чисельних досліджень з використанням ітераційно-крокового методу Ньютона–Канторовича у програмному середовищі APROKS, які дали змогу проаналізувати механічну поведінку вуглецевої нанотрубки в полімерній матриці. Досліджено вплив зміни геометричних параметрів нанотрубки (зокрема, її довжини та

діаметра), а також об'єму навколишнього полімерного середовища на силу, при якій настає руйнування зони адгезії. Окрему увагу приділено кількісному оцінюванню коефіцієнта армування, який характеризує ефективність зміцнення полімерної матриці за рахунок введення нанотрубки.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості їх використання для подальшої оптимізації наноструктурованих композитних матеріалів, зокрема плівок і тонких армованих покриттів. Побудовані чисельні залежності та встановлені закономірності можуть бути застосовані в технологіях наномодифікації полімерних матеріалів, з метою покращення їхньої механічної міцності, довговічності та надійності, а також як база для майбутніх експериментальних досліджень або інженерного проектування.

Особистий внесок магістранта. Магістрантом проаналізовано сучасний стан досліджень з механіки наномодифікованих полімерних композитів, зокрема взаємодії вуглецевих нанотрубок із полімерною матрицею. Побудовано та реалізовано числову модель системи «нанотрубка – адгезійний шар – полімер» у програмному середовищі APROKS разом із науковим керівником. Проведено серію розрахункових експериментів щодо впливу геометричних параметрів нанотрубки (довжини, діаметра) та об'єму полімерного масиву на силу руйнування та характер поширення тріщин у зоні адгезії з аналізом отриманих даних науковим керівником. На основі результатів моделювання визначено ключові закономірності, що дозволяють прогнозувати поведінку нанотрубки в матриці при зовнішньому навантаженні, а також проведено апробацію моделі шляхом порівняння з літературними даними.

Розробку математичних моделей, аналіз результатів отриманих числовим моделюванням виконано разом з к.т.н., доц., Чемерисом А.О. Розробка стартап-проєкту виконана під консультацією к.е.н., доц., доц. КПМ., Юдіной Н.В.

Публікації. Опубліковано дві тези з теми дослідження.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація містить у собі вступ, п'ять розділів, висновки, перелік посилань, додатки. Основна частина дисертації складає 126 сторінок, 34 рисунки. Загальний обсяг – ____ с.;

1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ ВИРОБУ, ЯКИЙ ПРОЄКТУЄТЬСЯ

1.1 Багатошарова полімерна плівка

Багатошарові полімерні плівки (рисунок 1.1) — це сучасний тип полімерних матеріалів, що складаються з кількох функціональних шарів, кожен з яких виконує певну роль. Використання багатошарових структур дозволяє отримати матеріал із покращеними фізико-механічними, хімічними та бар'єрними властивостями, що робить їх затребуваними у різних галузях промисловості.

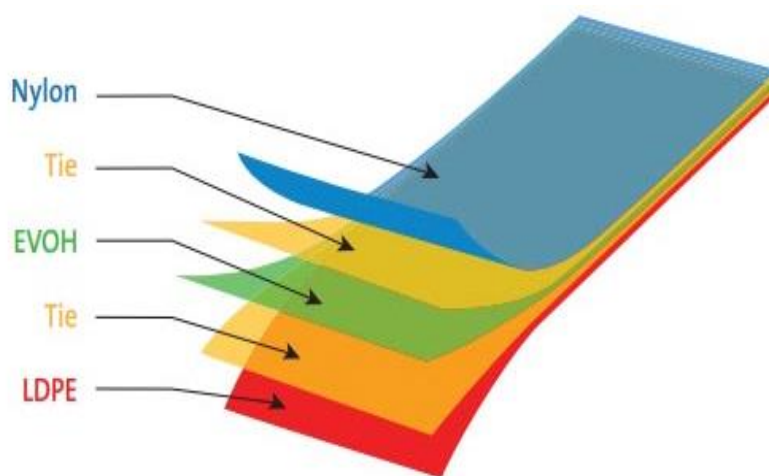


Рисунок 1.1 – Приклад багатошарової плівки з нейлону, етилвінілового спирту (EVOH) та поліетилену низької щільності (LDPE)

Основне призначення багатошарових полімерних плівок полягає у створенні покриттів та упаковки, що забезпечує оптимальний захист від впливу зовнішніх факторів, таких як волога, кисень, ультрафіолетове випромінювання та механічні пошкодження. Такі плівки дозволяють значно продовжити термін зберігання продукції, підвищити її безпеку та зменшити втрати під час транспортування.

Застосування багатошарових полімерних плівок досить поширене в різних галузях. Наприклад, у виробництві харчової упаковки. Вони забезпечують високу бар'єрність щодо кисню, вологи та запахів, що дозволяє зберігати свіжість продуктів. Наприклад, тришарові та п'ятишарові плівки

застосовуються у вакуумній упаковці м'ясної продукції, молочних виробів, снєків та заморожених продуктів.

У фармацевтичній упаковці такі плівки використовуються для зберігання лікарських засобів, запобігаючи їхньому контакту з повітрям, вологою та світлом. Полімери, з яких складаються ці плівки, підбираються таким чином, щоб забезпечити необхідний рівень механічної міцності, гнучкості та герметичності.

У будівництві багатошарові полімерні плівки застосовуються для створення гідроізоляційних покриттів, пароізоляційних мембран та енергозберігаючих матеріалів. Завдяки високій хімічній та механічній стійкості, вони використовуються у дахових конструкціях, теплоізоляційних системах та фасадних покриттях. Спеціальні варіанти таких плівок можуть мати відбивні шари, що дозволяє зменшити тепловтрати будівель.

У медицині багатошарові полімерні плівки використовуються для виробництва стерильних упаковок, перев'язувальних матеріалів та медичних бар'єрних покриттів. Вони дозволяють запобігати проникненню бактерій та вірусів, що робить їх незамінними в умовах стерильного середовища.

У виробництві електронних компонентів багатошарові полімерні плівки використовуються як ізоляційні покриття та захисні бар'єрні матеріали. Вони забезпечують захист від електростатичного заряду, вологи та механічних пошкоджень, що особливо важливо при виробництві сенсорних екранів, гнучких дисплеїв та акумуляторних батарей.

Наномодифікація багатошарових полімерних плівок дозволяє значно покращити їхні характеристики, додаючи нові функціональні можливості. Завдяки включенню наночастинок оксидів металів, графену, вуглецевих нанотрубок або срібла можна досягти таких покращень:

- Підвищена механічна міцність — завдяки модифікації наночастинами плівки стають більш стійкими до механічних пошкоджень, розривів та стирання.

- Покращені бар'єрні властивості – наномодифіковані плівки можуть значно зменшувати проникність для кисню та вологи, що особливо важливо для зберігання харчових продуктів та медикаментів.

- Антибактеріальні властивості – додавання наночастинок срібла або міді забезпечує стійкість до бактерій та мікроорганізмів, що є важливим у медичних та пакувальних застосуваннях.

- Оптимізована термостійкість – наночастинки можуть підвищувати термічну стабільність матеріалів, що дозволяє використовувати їх в умовах підвищених температур.

Наномодифіковані багат шарові полімерні плівки знаходять застосування у високотехнологічних галузях, таких як аерокосмічна промисловість, де вони використовуються для створення покриттів з високими бар'єрними характеристиками та термостійкістю. Крім того, у виробництві гнучкої електроніки вони сприяють покращенню провідності та довговічності матеріалів.

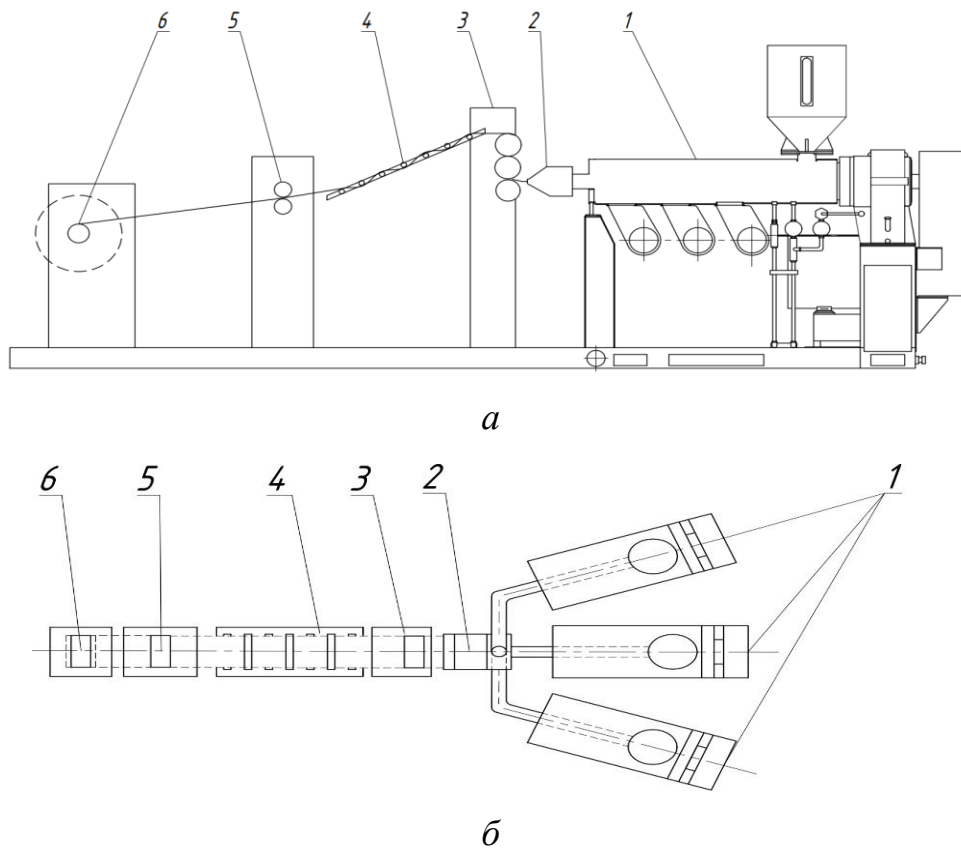
Як висновок, можна повторно зазначити, що багат шарові полімерні плівки є важливими матеріалами, що знаходять застосування у різних галузях промисловості завдяки їхнім унікальним властивостям. Вони забезпечують захист продукції, підвищують її термін придатності, покращують теплоізоляційні характеристики та створюють додаткові функціональні можливості. Завдяки наномодифікації такі плівки можуть мати ще кращі механічні, антимікробні та термостійкі властивості, що розширює їхню сферу застосування у високотехнологічних галузях.

1.2 Базова машина та технологічна лінія для виготовлення багат шарової полімерної плівки

Отримати готову багат шарову полімерну плівку без або з наномодифікованими частинками можна різними методами. У цьому дослідженні використовується екструзійно-каландровий метод, який

передбачає формування розплавленого полімерного матеріалу через багатошарову плоскощілинну екструзійну головку. Після цього матеріал проходить через валки каландра та охолоджувальний пристрій, завдяки чому виходить плівка з оптимальною структурою, механічною міцністю та рівномірним розподілом наномодифікованих частинок.

Технологічна лінія (рисунок 1.2) може застосовуватися як для виробництва одношарових, так і багатошарових плівок. Основна відмінність полягає у кількості екструдерів та їх підключенні: багатошарові плівки можуть формуватися за допомогою кількох екструдерів, кожен із яких подає матеріал у власну екструзійну головку, або через одну багатошарову екструзійну голівку, куди надходять матеріали з різних екструдерів.



1 – екструдер, 2 – плоскощілинна головка екструдера, 3 – каландр із валками, 4 – охолоджувальний пристрій, 5 – валки, що тягнуть, 6 – намотувальний пристрій

Рисунок 1.2 – Технологічна лінія виробництва плоскої полімерної плівки: *а* – одношарової, *б* – багатошарової

В основі технологічного процесу лежить екструзія на базі обладнання ЧП 45х25, яке дозволяє рівномірно розподіляти полімерний матеріал, додаючи в нього наномодифіковані частинки. Це значно покращує фізико-механічні характеристики плівки, зокрема її міцність, термостійкість та бар'єрні властивості.

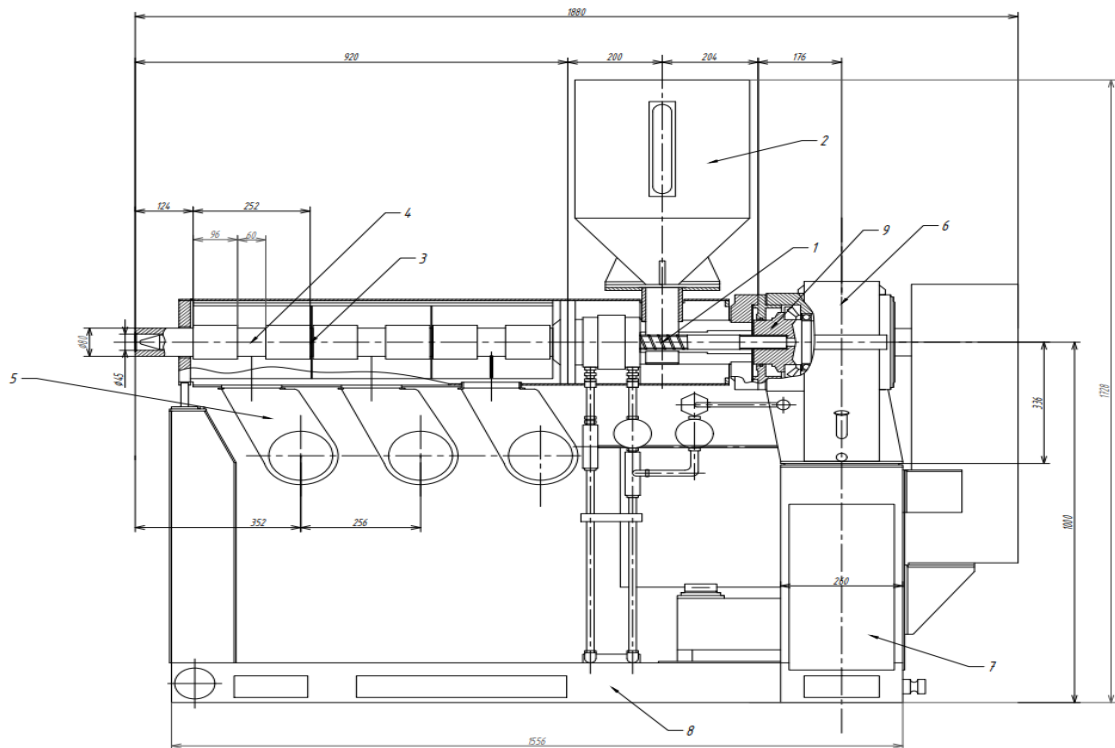
Виготовлення багатошарових плівок необхідне для підвищення механічної міцності та додання нових функціональних властивостей. У технологічному процесі можуть застосовуватися різні варіанти шарування: всі шари з одного матеріалу, різні матеріали для зовнішніх та внутрішніх шарів, використання наномодифікованого полімеру в одному або кількох шарах. Такий підхід дозволяє створювати високоякісні матеріали з оптимізованими експлуатаційними характеристиками.

Екструдер (у нашому випадку екструдер ЧП45х25 (рисунок 1.3)) є невід'ємним та ключовим елементом технологічного процесу виготовлення полімерної плівки, оскільки саме він забезпечує перетворення твердих полімерних гранул або порошкоподібної сировини у високоякісний однорідний розплав. Завдяки цьому розплаву формується кінцевий виріб із заданими характеристиками.

Основна функція екструдера полягає у термічній і механічній обробці полімерного матеріалу, в результаті чого він змінює свій агрегатний стан і стає придатним для подальшого формування. Цей процес відбувається під впливом температури, тиску та зусиль зсуву, які створюються під час проходження матеріалу через черв'як екструдера.

У випадку нашого виробництва застосовується процес коекструзії, що означає використання кількох полімерних матеріалів одночасно. Такий підхід дозволяє отримати багатошарову структуру, в якій кожен шар наділяє плівку певними властивостями: механічною міцністю, бар'єрними характеристиками, термостійкістю тощо. Для цього підбираються відповідні

полімери, здатні стабільно взаємодіяти між собою без втрати фізико-хімічних характеристик.



- 1 – черв'як, 2 – завантажувальний бункер, 3 – нагрівачі, 4 – корпус,
5 – охолоджувачі (вентилятори), 6 – редуктор, 7 – кришка, 8 – станина,
9 – підшипник.

Рисунок 1.3 – Схема екструдера на базі ЧП 45х25.

Екструдер ЧП 45х25 складається із завантажувального бункера 2 (забезпечує подачу полімерної сировини в робочу зону екструдера), черв'яка 1 (обертовий гвинт, що відповідає за транспортування, змішування, нагрівання та компресію матеріалу), нагрівальних елементів 3 (електричні нагрівачі, що забезпечують необхідний температурний режим у різних зонах екструдера), вентиляторів 5 для підтримання оптимальної температури, корпусу, де відбувається процес пластифікації, та редуктора 6, що забезпечує рух механізму. Черв'як виконує функцію рівномірного перемішування та дозування полімерної маси, а його параметри залежать від реологічних та теплофізичних характеристик використовуваного матеріалу

Вихідна сировина, яка може бути у вигляді гранул або дрібнодисперсного порошку, засипається у завантажувальний бункер (2), після чого поступово надходить у зону завантаження. Завдяки обертанню черв'яка (1) і діючим силам тертя матеріал починає рухатися вздовж циліндра екструдера.

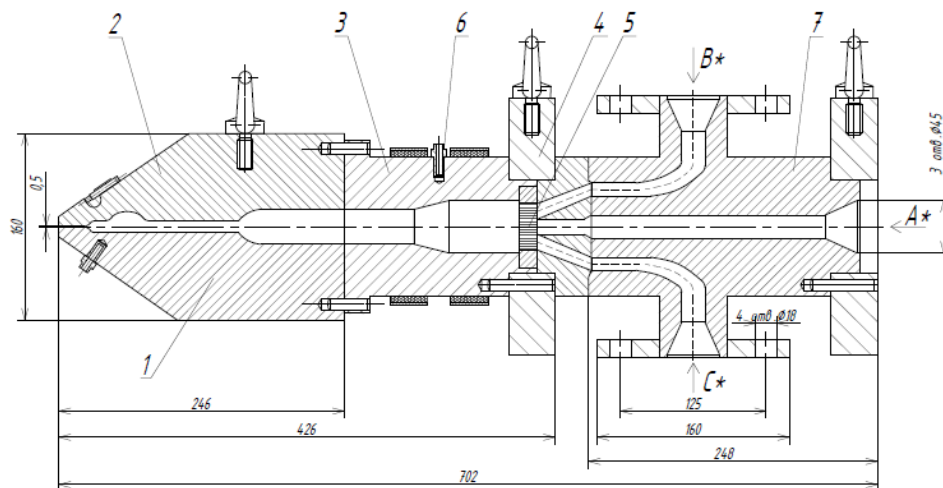
Далі він потрапляє у зону стиснення, де відбувається його прогрівання та часткове плавлення. На цьому етапі здійснюється активне перемішування та дегазація – видалення небажаних летких сполук та бульбашок повітря, що могли б негативно вплинути на однорідність розплаву.

Після цього матеріал надходить у зону дозування, де створюється необхідний рівень тиску, що забезпечує рівномірне та стабільне проштовхування полімерного розплаву через екструзійну головку. Температура в екструдері регулюється за допомогою спеціальних нагрівальних елементів (3), а для запобігання перегріву критичних вузлів використовуються вентилятори (5), які охолоджують редуктор (6), завантажувальну горловину та сам черв'як (1).

Таким чином, екструдер ЧП 45х25 забезпечує стабільний, контрольований і ефективний процес переробки полімерної сировини у високоякісний розплав, який згодом набуває необхідної форми для створення багатошарової плівки.

Щоби отримати плівку, все одно потрібна багатошарова екструзійна головка, наприклад, що показана на рисунку 1.4. Вона розроблена для одночасного підключення трьох екструдерів до однієї полімерної лінії. У головку входять три окремі потоки матеріалу (позначені як А, В і С), де канал А приймає наномодифікований полімер, а В і С – стандартний ПЕВГ. Подача матеріалу здійснюється через спеціальний блок живлення. Головка складається з двох основних частин – корпусу 1 та кришки 2, що надійно з'єднані між собою гвинтами та відцентровані штифтами для точної збірки. Блок живлення 7 кріпиться до головки за допомогою фланця 4, який також

містить сітчастий фільтр для очищення розплаву. Очищений розплав надходить далі в канали, що поступово звужуються. Додатковий адаптер 3 кріпиться до головки гвинтами та центрується штифтами. Вихідний зазор регулюється за допомогою гвинтів та гнучкої губки. Система контролю температури реалізована за допомогою гільз, що містять термопари. Для нагрівання адаптера використовуються два хомутові нагрівачі. Транспортування пристрою полегшується рим-болтами.



1 – корпус, 2 – кришка, 3 – адаптер, 4 – фланець кріплення, 5 – решітка, 6 – гільза, 7 – живильний блок для співекструзії

Рисунок 1.4 - Тришарова плоскоциліндра головка

1.3 Актуальність досліджень впливу наномодифікації на міцність багатошарової полімерної плівки

У контексті зростаючих вимог до матеріалів у різних галузях — зокрема в легкій промисловості, оборонному секторі, спорті, медицині та пакуванні — багатошарові полімерні плівки залишаються одними з найперспективніших рішень завдяки своїй легкості, гнучкості, технологічності та можливості адаптації властивостей до специфічних умов експлуатації. Водночас одним із найбільших викликів для таких матеріалів є забезпечення високих механічних характеристик без втрати інших функціональних властивостей, таких як газо- та вологонепроникність, еластичність або стійкість до зовнішніх впливів.

Саме тому увага дослідників зосереджується на модифікації полімерних плівок за допомогою наноматеріалів.

Наномодифікація дозволяє цілеспрямовано змінювати мікро- і наноструктуру матеріалу, покращуючи розподіл навантажень, формування міжфазних зв'язків, а також посилюючи бар'єрні й зносостійкі властивості. Дослідження свідчать, що введення нанонаповнювачів — таких як наноглини, графенові структури, наночастинки оксидів металів (TiO_2 , ZnO , Al_2O_3), вуглецеві нанотрубки — у середній або зовнішні шари плівки може суттєво підвищити модуль пружності, межу міцності при розтягуванні, ударну в'язкість та інші показники механічної надійності. При цьому особливу увагу приділяють взаємодії нанонаповнювачів з полімерною матрицею, ступеню їх агрегації, розміру частинок, концентрації та способу введення (екструзія, інтеркаляція, інактивація поверхні тощо).

Сучасні дослідження також демонструють, що ефект наномодифікації найбільш виражений у багатошарових системах, де можна диференційовано розподіляти функції між шарами. Наприклад, зовнішній шар може відповідати за механічну жорсткість та захист, середній — за гнучкість і проникність, а внутрішній — за комфорт чи адгезію до інших поверхонь. При цьому саме наномодифікований середній шар стає критичним для забезпечення балансу між жорсткістю і гнучкістю, особливо в умовах циклічного навантаження або багаторазового згинання.

Попри значний прогрес, залишаються нерозв'язаними питання стабільності нанонаповнювачів у полімерній матриці протягом тривалого часу, технологічної сумісності з масштабними методами виробництва, а також екологічної безпеки таких матеріалів. Тому актуальним напрямом є дослідження оптимальних типів нанонаповнювачів, методів їх диспергування та функціоналізації, а також визначення впливу наноструктури на макроскопічні механічні характеристики багатошарових систем.

Таким чином, впровадження наномодифікації у багатошарові полімерні плівки відкриває нові можливості для створення високоефективних матеріалів із заданими експлуатаційними характеристиками. Це зумовлює актуальність дослідження як наукового, так і прикладного характеру, особливо в умовах потреби в легких, міцних, універсальних матеріалах для спеціалізованого використання.

2 СУЧАСНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ БАГАТОШАРОВИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Коекструзія як метод створення багатошарових полімерних матеріалів

Багатошарові плівки виготовляються завдяки використанню декількох екструдів, однієї спільної багатошарової екструзійної головки або кількох одношарових головок, кількість яких залежить від загальної конфігурації обладнання та кількості використовуваних екструдерів.

Такий підхід дозволяє комбінувати різні матеріали в єдину структуру, поєднуючи їхні фізико-механічні властивості для досягнення необхідних характеристик кінцевого продукту. Наприклад, один шар може забезпечувати високу механічну міцність, інший – бар'єрні властивості проти вологи, газів або ультрафіолетового випромінювання, а ще один – забезпечувати необхідну адгезію між шарами або надавати поверхневим частинам певні функціональні особливості.

Коли відбувається екструзія кількома шарами різних матеріалів одночасно з метою створення єдиного цілісного виробу, цей процес називається процесом коекструзії або співекструзії. Завдяки цій технології вдається отримати високоякісні матеріали, що поєднують переваги різних полімерів, зменшити витрати на сировину, а також підвищити експлуатаційні характеристики виробу.

Автори книги [1] наводять таке визначення процесу коекструзії – це технологічний процес, розроблений, щоби поєднати два або більше полімерів у єдину структуру з метою досягнення синергічного ефекту в композиційних продуктах. Коекструзія дозволяє створювати матеріали з покращеними характеристиками, які неможливо отримати тільки за допомогою одного полімеру.

У цьому дослідженні [1] також розглядаються нові застосування та інноваційні підходи до виготовлення багатошарових плівок, включаючи

використання дисперсії шарів у вигляді пластинок для покращення механічних та бар'єрних властивостей формованих виробів із багатошаровою структурою. Такий підхід сприяє покращенню жорсткості, міцності та газонепроникності матеріалів, що особливо важливо для пакувальної промисловості, автомобільного сектору та електроніки.

Окрім загальних принципів коекструзії, у книзі [1] розглядається конкретний приклад застосування багатошарової системи на основі поліпропілену (ПП) та поліаміду 66 (ПА66). Ця система базується на утворенні мікропластинок ПА66 у ПП-матриці шляхом селективного розплавлення поліпропіленових шарів. У процесі термічної обробки поліпропілен плавиться при температурі 163 °С, тоді як поліамід 66, що має значно вищу температуру плавлення – 262 °С, залишається у твердому стані, зберігаючи свою дисперсну структуру у матриці. Це дозволяє формувати стабільні багатошарові матеріали при температурах, що перевищують температуру плавлення ПП, але залишаються нижчими за температуру плавлення ПА66.

Автори статті [2] розглядають застосування коекструзії для створення плівки, яка складається з сотень шарів лінійного поліетиленатерифталату (ПЕНГ) та ізотактичного поліпропілену (ІПП), що чергуються, утворюючи також 100 інтерфейсів. Ця комбінація дозволяє зменшити модуль пружної стійкості та розширює гумове плато. Розширення гумового плато пов'язане з покращенням здатності багатошарової плівки до термоформування в порівнянні з гомополімерними плівками.

Стаття [3] досліджує тришарову коекструзійну плівку, що показано на рисунку 2.1, з роздуванням, яка містить у собі різноманітні характеристики під час екструзії та значно можливу знижену вартість. За допомогою використання спеціалізованих програм була проведена розрахункова робота з визначення геометрії плівки (тип АВА з використанням двох або трьох екструдерів, комбінована структура матеріалів – LDPE/HDPE/LDPE, що характеризується чіткою періодичною симетрією). Також було проведено

чисельне моделювання поля потоку для аналізу форми та положення розділу цієї багатошарової плівки. Встановлено, що різниця в тиску між сусідніми шарами викликає міжфазну деформацію, перебудову каналу потоку та зміну положення межі через перебудову каналу потоку, коли шари зустрічаються в каналі спільної екструзії.

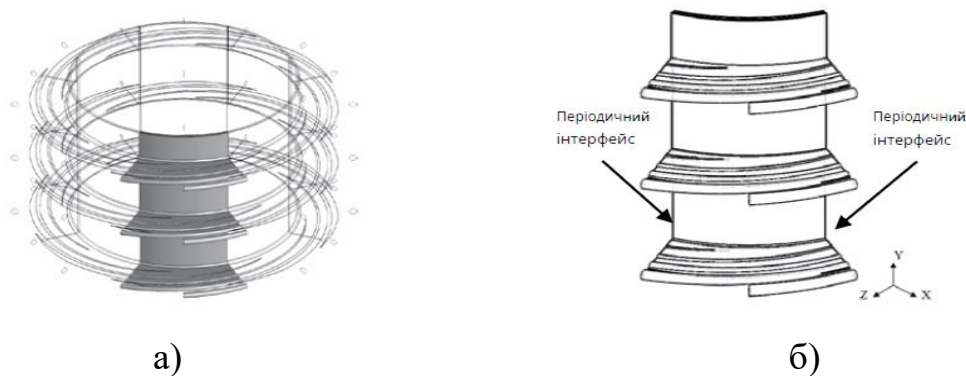


Рисунок 2.1 – Візуалізація тришарової коекструзійно-видувної плівки:
а) об'ємне зображення структури плівки; б) схема з позначенням періодичної межі

У статті [4] досліджено процеси коекструзії та їхні проблеми в переробці. Для цього була розроблена одновимірна модель течії Пуазейля для двошарової коекструзії. Проведений розрахунок показав стаціонарне положення границі розділу фаз і профілю швидкості на невеликій відстані порядку зазору між шарами, що підтверджує справедливність 1D стаціонарної моделі. Ця модель успішно застосовувалася до багатошарових температурно-залежних коекструзійних потоків, дозволяючи прогнозувати поведінку матеріалів у процесі переробки. У разі різної реології полімерів та відмінності у швидкості потоку можуть виникати нестабільності поверхні розділу, що впливають на якість кінцевого продукту. Експериментальні дослідження показали, що ці нестабільності можуть зростати вздовж поверхні матриці, змінюючи характеристики багатошарової структури. Аналіз стабільності течії та чисельні розрахунки допомагають виявити критичні ситуації, які посилюють або послаблюють нестійкості, що є важливим для оптимізації технологічних параметрів процесу коекструзії [4].

У дослідженні [5] запропоновано підхід до виробництва багатошарових плівок, заснований на новому методі розподілу гомогенізації обертання (РГО). Цей метод передбачає вплив поля потоку, що поєднує зсувну циркуляцію та потік тиску. У результаті застосування РГО формується ламінарний потік із окружним зсувом, що забезпечує стабільність меж між шарами та рівномірний розподіл розплаву по всьому окружному напрямку. Для перевірки ефективності цього підходу було проведено експерименти з поліетиленом низької щільності, які продемонстрували значне покращення термічної усадки та механічних властивостей багатошарової плівки, особливо в поперечному напрямку.

Стаття [6] розглядає питання покращення якості багатошарових плівок, що виготовлені за допомогою коекструзії полімерів з різними реологічними властивостями, шляхом придушення міжфазної нестабільності. Дослідники виготовили прес-форму з наборами шарів, щоби збільшити кількість шарів у майбутніх створених багатошарових плівках. Для вимірювання перепадів тиску потоку використовувалися два датчики тиску, які були встановлені послідовно на стінці форми вздовж напрямку потоку. Це дозволило розрахувати напругу зсуву потоку, яка використовувалася для аналізу ковзання межі розділу. Результати досліджу показали, що при досягненні певного порогу напруги зсуву велика кількість шарів спричиняє міжфазне ковзання, що зменшує напругу зсуву на стінці форми (рисунк 2.2).

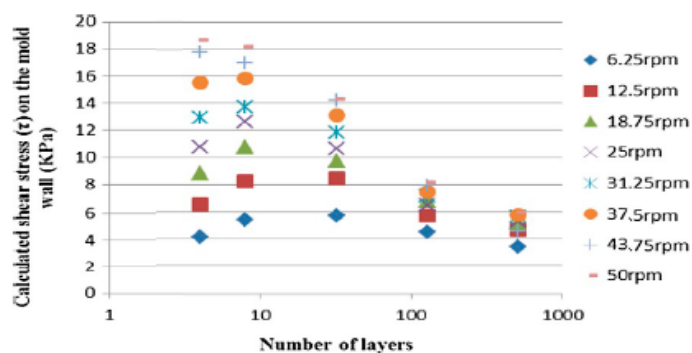


Рисунок 2.2 – Залежність розрахованого зсувного напруження на стінці екструзійної форми від кількості шарів плівки за умов різних швидкостей потоку матеріалу

Автори книги [7] зазначають у ній, що, щоби виготовити полімерну плівку з однаковими розмірами товщини на всій її ширині, застосовують листову (плоскощільну) чи плівкову головку. Цей метод забезпечує рівномірний розподіл матеріалу під час екструзії, що є важливим для отримання якісного кінцевого продукту. Кількість полімерів, які можна комбінувати, насамперед залежить від допустимої кількості та розташування екструдерів, що подають розплавлені полімери в єдину коекструзійну систему, наприклад, через адаптер (рисунок 2.3). Цей процес дозволяє створювати плівки з різними фізичними та хімічними властивостями в одному матеріалі, що відкриває широкі можливості для їхнього використання в різних галузях. Наприклад, можна комбінувати полімери з різною твердістю, стабільністю до температури, прозорістю та іншими характеристиками для отримання плівки з властивостями, що задовольняють певні потреби застосування. Це особливо актуально у виробництві харчової упаковки, медичних матеріалів, електроніки та інших високотехнологічних галузей, де необхідні спеціальні бар'єрні властивості, механічна міцність або термостійкість.

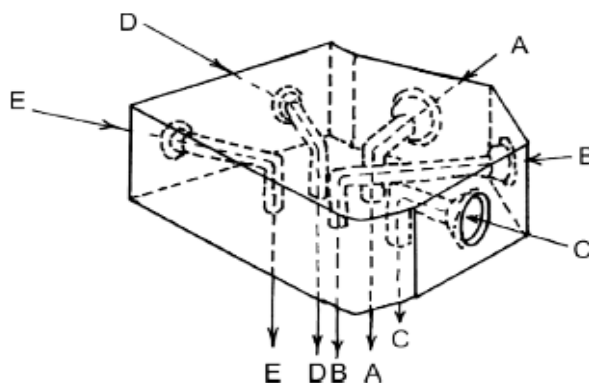


Рисунок 2.3 – Адаптер з фіксованою геометрією: вхідні канали від екструдерів A, B, C, D, E та відповідні виходи до блоку подачі

Автори книги [8] розглядають різні вигляди тришарової екструзійної головки, розроблені для виробництва різних труб і кабельних каналів діаметром від $\varnothing 20$ мм до $\varnothing 65$ мм. Вони зазначають, що за умови зміни концепції таку головку можна адаптувати для плівок чи мембран, що значно розширює її застосування у виробничих процесах. Конструкція тришарової

екструзійної головки передбачає диференційоване призначення кожного шару. Наприклад, зовнішній шар призначений для виробництва різних кольорів HDPE, що дозволяє отримувати продукцію з відповідними естетичними та функціональними характеристиками; середній шар може складатися з природного кольору HDPE або суміші первинного матеріалу з переробленим фабричним решліфованим брухтом, що робить виробництво більш економічно вигідним та екологічно відповідальним. Внутрішній шар – це HDPE, модифікований кремнеземом, що надає гладку поверхню для оптимального проходження волоконної оптики або кабелю. Для кращого розуміння будови екструзійної головки надано 3D-моделювання конструкції, яке демонструє подачу різних шарів матеріалу та їх розташування у системі (рисунок 2.4). Такий підхід дозволяє оптимізувати процес виробництва та контролювати властивості кінцевого продукту відповідно до вимог галузі.

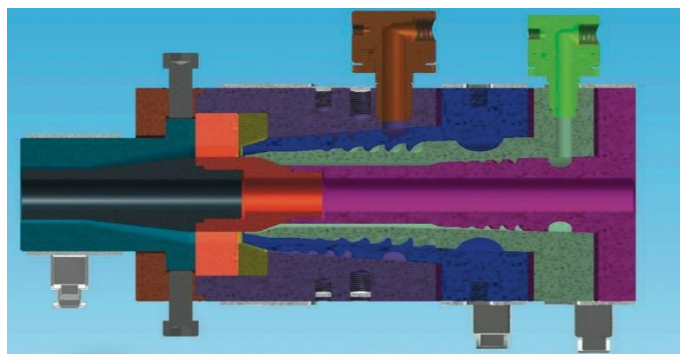


Рисунок 2.4 – Розріз 3D-моделі головки для екструдерів із візуалізацією подачі першого та третього шару виробу

У статті [9] представлено нову конструкцію матриці (рисунок 2.5), за допомогою якої можна виготовляти п'ять різних шарів за один технологічний крок, що значно підвищує ефективність виробничого процесу. Для оптимізації процесу розроблено інтегральну модель, яка дозволяє точно розраховувати перепад тиску в різних зонах потоку в головці екструдера. Це дає змогу досягти рівномірного розподілу полімерних матеріалів та зменшити можливі дефекти, пов'язані з нерівномірною подачею розплаву. Процес коекструзії є успішним і створює трубки з 5 різними шарами. У результаті процесу вдалося отримати трубки, що складаються з п'яти різних шарів, кожен із яких виконує

певну функцію, наприклад, забезпечує міцність, бар'єрні властивості або стійкість до зовнішніх впливів. Такий підхід відкриває нові можливості для виробництва багатошарових полімерних виробів із покращеними характеристиками.

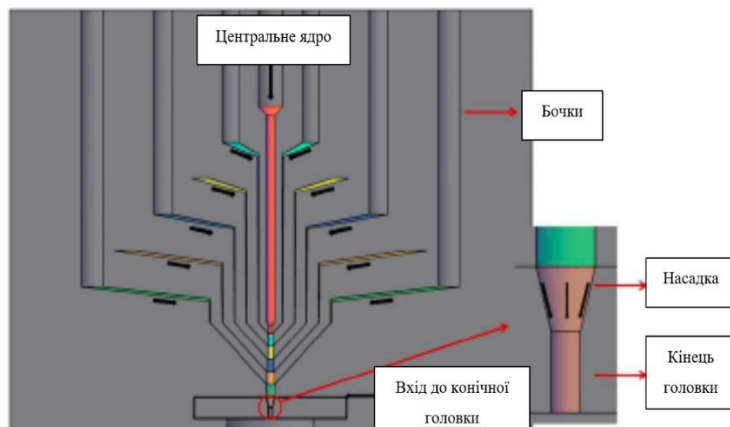


Рисунок 2.5 – Конструктивна схема екструзійної головки, призначеної для одночасного формування п'ятишарової коекструзійної плівки

У статті [10] описано досягнення, що сталися нещодавно в галузі полімерних ієрархічних систем, які виготовлені за допомогою технології багатошарової коекструзії з примусовим складанням. Ці системи відрізняються від звичайних полімерних композитів покращеними властивостями, які досягаються шляхом маніпулювання їх мікроструктурою. Для досягнення цих результатів автори вказують на важливість дотримання так званих "трьох правил". Перше правило – це масштаб, що стверджує, що структури композитів організовані на дискретних рівнях масштабу, починаючи від молекулярного та закінчуючи макроскопічним. Друге правило – це взаємодія, яке стверджує, що всі ці структурні рівні утримуються разом і функціонують через певні взаємодії, такі як адгезія. Третє правило – архітектура структурних рівнів, яке стверджує, що ці інтерактивні структурні рівні організовані в складні ієрархічні архітектури, що представляють спектр властивостей і багатofункціональних характеристик.

Дослідники [11] розробили різноманітні типи нанорозмірних матеріалів з різними властивостями. Наприклад, нановолокна, які володіють

функціональною універсальністю, стали об'єктом збільшеного інтересу та уваги в останні роки. Вони мають потенціал застосування в різних галузях промисловості, таких як стрічки, фільтрація, виробництво енергії та біомедичні технології. Наночарова коекструзія, яка є новою технологією обробки волокон з розплаву полімерів, поступово набуває популярності завдяки своїм екологічним, ефективним та простим методам, а також можливості масового виробництва. У порівнянні з традиційними методами, коекстудовані неткані нановолокна мають ряд переваг, таких як регульований діаметр волокна, висока пористість, високе співвідношення площі поверхні до об'єму та потенціал для виробництва композитних нановолокон з різними компонентами для досягнення бажаних структур і властивостей. Представлено огляд технології коекструзії наночарів та її переваг і потенційних застосувань.

У статті [12] представлено новий метод швидкого наноструктурування пластикової плівки за технологією «від рулону до рулону» (рисунк 2.6), що дозволяє створювати наноструктури розміром менше 100 нм зі швидкістю 60 м/хв. Ця технологія має широке застосування в оптичних, технічних та функціональних поверхнях. Її перевагами є використання стандартних екструзійних полімерів, функціональних добавок та матеріалів із хорошими бар'єрними властивостями. Процес передбачає екструзію розплавленої полімерної плівки через плоске сопло з подальшим розтягненням у повітрі та ламінуванням на несучу фольгу. Найкращі результати отримані при використанні напівкристалічних полімерів, таких як поліпропілен (PP), що дозволяє працювати на високих швидкостях (60 м/хв) і температурах охолоджувального ролика (70 °C). Водночас, інші поширені полімери, зокрема поліетилен (PE) і полістирол (PS), не забезпечують якісного відтворення наноструктур.

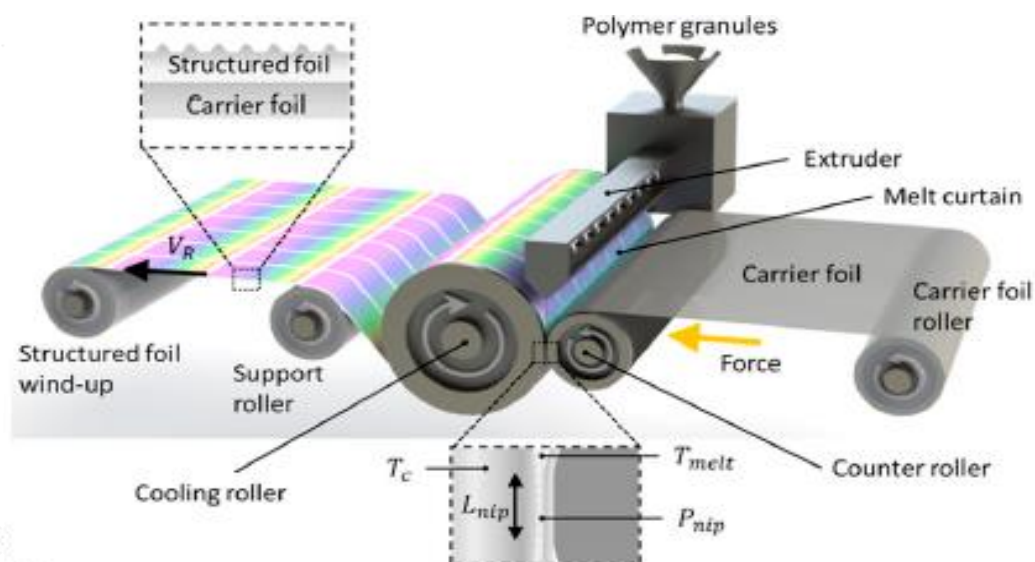


Рисунок 2.6 – Схематичне представлення безперервного технологічного процесу «від рулону до рулону» для виробництва багатошарових плівкових матеріалів

Досліджено вплив товщини шару на сумісність між полікарбонатом (PC) і полістиролом (PS) і фізичні властивості багатошарової плівки PC/PS за допомогою наношарової коекструзії [13]. Морфологію багатошарової структури спостерігають за допомогою скануючого електронного мікроскопа. Ця багатошарова структура може мати негативний вплив на прозорість, але вона може покращити водостійкість і термостійкість плівки. Щоб охарактеризувати сумісність між PC і PS, диференціальна скануюча калориметрія використовується для вимірювання температури склування. Встановлено, що сумісність покращується зі зменшенням товщини шару. Тому в'язкість багатошарової плівки також зменшується зі зменшенням товщини шару. Крім того, багатошарова структура може покращити міцність на розрив із збільшенням кількості шарів. Завдяки цілісній і безперервній шаровій структурі PC, багатошарова плівка PC/PS може зберігати свою механічну міцність при температурі вище PS.

2.2 Дослідження механічних властивостей та їх оптимізація

Стаття [14] презентує метод визначення пружних властивостей ламінатів (рисунок 2.7), що складаються з ізотропних шарів як у площині, так і по товщині. Одним із таких ламінатів є багатошаровий наномодифікований полімерний композит, що містить полімерні шари, один з яких містить нанонаповнювачі. У статті наводяться явні залежності для модулів зсуву, модулів Юнга, коефіцієнтів Пуассона та коефіцієнтів теплового розширення (КТР). Ці формули підходять як для симетричних, так і для несиметричних ламінатів. Порівняння теоретичних результатів з експериментальними показали задовільну відповідність для наномодифікованих поліетиленових композитів, які містять багатошарові вуглецеві нанотрубки та наноплівки з поліуретану та поліетилентерефталату з наночастками карбїду титану.

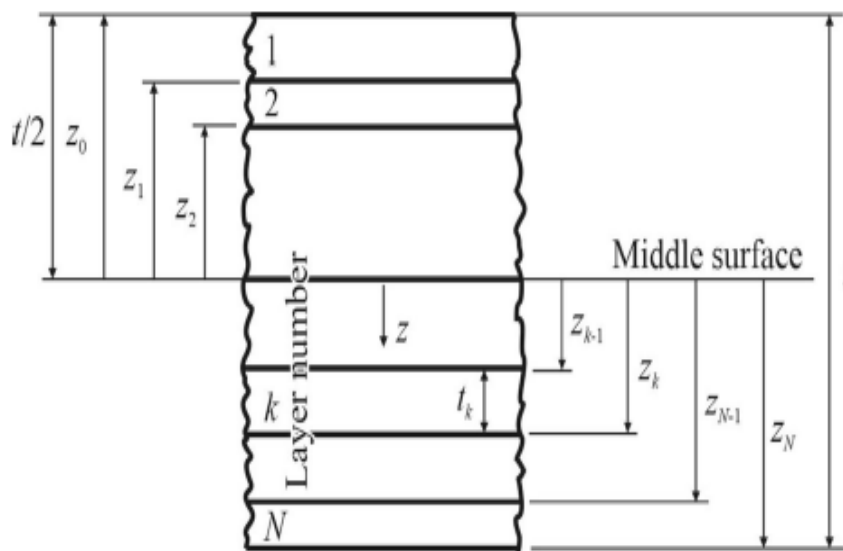


Рисунок 2.7 – Структура ламінату

Випробування на балістичний удар проводилися на ламінаті GFRP при двох швидкостях польоту 76 ± 1 м/с для вимірювання деформації в повному полі та $134,3 \pm 1,7$ м/с для випробувань на перфорацію [15]. Поведінка пластин під час удару була зареєстрована за допомогою цифрової кореляції зображень (DIC), щоб контролювати деформацію та деформацію поза площиною в панелях з наноармованими матрицями. Після випробувань на проникаючий удар використовувалася імпульсна термографія, щоб охарактеризувати

відшарування пластин, що зазнали удару. Результати вимірювань повної деформації, швидкості виходу та поглинання енергії під час балістичних випробувань показують значні покращення ударостійкості для панелей, виготовлених із наномодифікованих епоксидних смол, порівняно з ламінатами з немодифікованою епоксидною матрицею. Найвища абсолютна поглинена енергія спостерігалася для панелей GFRP, виготовлених з використанням епоксидної матриці, наповненої BNNT/GNP при 255,7 Дж, що на 16,8% вище, ніж у немодифікованої епоксидної матриці.

У статті [16] автори досліджують поведінку полімерних нанокомпозитів у зоні процесу руйнування (рисунк 2.8), використовуючи аналіз великого обсягу експериментальних даних із доступної літератури для оцінки впливу нелінійної зони процесу руйнування (ЗПР). З'ясовано, що в більшості випадків її вплив є значним, що спричиняє значні відхилення від прогнозів лінійної механіки пружного руйнування (ЛМПР), які можуть перевищувати 150% залежно від розміру зразка та концентрації нанонаповнювача. Для глибшого розуміння характеристик ЗПР проведено аналіз випробувань на руйнування геометрично масштабованих зразків із згинанням з однокрайнім надрізом (ЗОН) із застосуванням моделі когезійної зони. Результати показали, що вплив ЗПР не можна ігнорувати, а білінійний когезійний закон тріщин найкраще узгоджується з експериментальними даними.

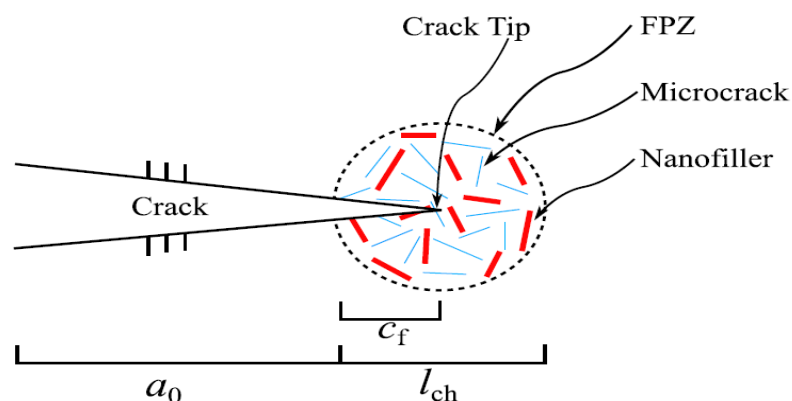


Рисунок 2.8 – Схематичне зображення зони процесу руйнування (ЗПР), характерної для термореактивних полімерних нанокомпозитів під дією згинання

Стаття [17] розповідає про чисельне моделювання поведінки наномодифікованих полімерних матеріалів під впливом статичного навантаження. Для розрахунків використано метод скінченних елементів, зокрема спеціально адаптований восьмивузловий елемент, який дозволяє точніше враховувати локальні напруження та деформації в наноструктурованій області. Розв'язання системи рівнянь здійснювалося за допомогою алгоритму Ньютона-Канторовича, у якому застосовано метод змінної жорсткості, що підвищує стабільність обчислень, та модифікований потенціал Морзе для точного опису міжатомної взаємодії в полімерно-нанотрубковій структурі. Отримані результати були порівняні з раніше опублікованими чисельними рішеннями з наукової літератури і продемонстрували високу точність та достовірність. У роботі наведено також приклад моделювання процесу руйнування нанотрубки, вмонтованої в термореактивну полімерну матрицю. Подібні чисельні методики дозволяють отримувати важливу інформацію про фізико-механічні властивості та межі міцності наномодифікованих полімерів, а також прогнозувати поведінку матеріалів у готових виробах або конструкціях на їх основі.

Автори [18] дослідили вплив транскристалічності (ТС) на властивості коекструзованої плівки у багатьох аспектах, та спробували його дослідження. Дослідження включає використання багатошарових шарів на основі полілактиду (PLA) – полі-L-лактиду (PLLA) та полі-D-лактиду (PDLA), які екструдуються разом для створення багатошарових структур, в яких вони дифундують один в одного і утворюють двовимірні стереокомплекси (2Д-СК) на інтерфейсі між шарами. Після цього 2Д-СК спричиняє ТС, яка поширюється, щоб заповнити весь простір шару. В результаті дослідження автори прийшли до висновку, що ця стратегія покращення властивостей багатошарових плівок підходить не лише для полілактиду, а й для інших комплементарних стереорегулярних полімерів, де стереоселективна взаємодія також спричиняє утворення полімерних СК.

У дослідженні [19] проаналізовано тришарову коекструзійну плівку на основі поліпропілену та етиленвінілового спирту, яка часто демонструє оптичні недоліки, що можуть знижувати її прозорість і обмежувати практичне застосування. Використовуючи вдосконалену методику регулювання поверхневої щільності міжфазних кополімерів, було виявлено чітку залежність між амплітудою варіації товщини внутрішнього шару ЕВС та концентрацією молекул кополімеру, що формуються на межі розділу ЕВС і зв'язувального шару під час коекструзії. Отримані результати відкривають можливості для оптимізації складу зв'язувальних шарів, що дозволяє мінімізувати виникнення подібних дефектів і покращити оптичні властивості плівок.

2.3 Роль нанонаповнювачів у зміцненні полімерних матеріалів

Для зменшення забруднення довкілля пластиком та похідних матеріалів, варто задуматися про нанотехнології. Особливі властивості полімерних наноматеріалів, такі як нанорозмір, велике співвідношення площі поверхні до маси та висока реакційна здатність, роблять їх привабливими для застосування у пакувальних матеріалах для харчових продуктів. Ці матеріали можуть бути перероблені в точно розроблені матеріали з багатофункціональною та біоактивною активністю.

Через це в роботі [20] надається загальний погляд на полімерні нанокомпозити та нанопокриття. Розглядається класифікація, методи отримання, властивості та коротка методологія характеристики цих матеріалів. Також описано застосування полімерних наноматеріалів у пакуванні харчових продуктів, зокрема їхні антимікробні, антиоксидантні, біологічні, біокаталізаторські та інші функції.

Використання нанотехнологій є одним з способів продовження життя переробленому пластику, надаючи йому властивості на рівні первинних. Це дуже важливо у випадку пакування харчових продуктів. Отже, використання

нанотехнологій допомагає зменшити негативний вплив переробки на фізико-механічні властивості матеріалів шляхом розробки нанокомпозитів та введення нанорозмірного армування в полімерні матриці [20].

Наприклад, вуглецеві нанотрубки зараз привертають велику увагу від науковців через їхні унікальні властивості, такі як висока механічна стійкість, гнучкість, електричні та теплові характеристики [21]. Дослідження показали, що використання вуглецевих нанотрубок у перероблених матеріалах, таких як поліетилентерефталат (ПЕТФ), полістирол (ПС) та поліпропілен (ПП), призводить до поліпшення міцності цих матеріалів [22-24].

У статті [25] досліджено вплив промислових графенових нанопластинок на властивості полімерних і деревоволокнистих композитів. Було проведено випробування зразків на розтяг, удар і згин, а також проаналізовано вплив співвідношення сторін графенових пластинок на механічні характеристики поліетилену високої щільності. Додавання нанопластинок сприяє покращенню міцності, термічної стабільності, теплопровідності та дифузійної здатності полімеру, незалежно від вмісту армуючих елементів (графен або деревне волокно). Важливим відкриттям є те, що поліпшення механічних властивостей нанокомпозиту було досягнуто навіть без використання компатибілізатора. Це свідчить про високу ефективність графенових нанопластинок у зміцненні матеріалу. Крім того, застосування маточної суміші дає змогу впроваджувати наномодифіковані полімерні композити у промислове виробництво без необхідності змінювати існуючі технології переробки.

У статті [26] розглянуто поведінку графенових нанопластинок (ГНП), функціоналізованих поліаніліном, у поверхневому шарі наномодифікованих плівок надвисокомолекулярного поліетилену (НВМПЕ) за допомогою комбінаційного відображення. Метод комбінаційного розсіювання виявив, що при концентрації 0,1 мас.% ГНП у НВМПЕ спостерігаються піки D, G і 2D, тоді як при збільшенні вмісту нанопластинок до 1,0 мас.% ці сигнали зникають, що вказує на переміщення наночастинок у глибину полімеру. При

концентрації 2,0 мас.% функціоналізовані ГНП рівномірно розподіляються на поверхні нанокompозитної плівки, що може впливати на її механічні та функціональні характеристики.

У статті [27] автори розглядають модифікацію поверхні нанокремнезему емульсією етилен/вінілацетату (ЕВА) з подальшим змішуванням із поліпропіленом (ПП) для створення композитного матеріалу нанокремнезем/ПП. Ця модифікація спрямована на покращення механічних характеристик поліпропілену, підвищення його температури плавлення та ступеня кристалічності, а також на зменшення кисневої та водяної проникності. Крім того, було виявлено, що отримані плівки значно знижують адсорбцію органічних розчинників, що робить їх більш безпечними для використання в пакуванні харчових продуктів. Результати експериментів підтвердили, що підвищення кристалічності матеріалу сприяє покращенню його механічних і бар'єрних властивостей, а також підвищенню температури плавлення. Додатково встановлено, що залишковий вміст розчинника у модифікованих поліпропіленових плівках зменшився на 10–90%, що свідчить про їхню екологічну безпечність та покращені експлуатаційні характеристики.

У дослідженні [28] наводиться, що композитні матеріали, такі як полімери, армовані вуглецевим волокном, набувають все більшої популярності в чутливих до ваги конструкційних компонентах завдяки своїй високій міцності та жорсткості. Однак слабкі інтерламінарні області між шарами можуть спричинити інтерламінарне руйнування або розшарування, що є суттєвим недоліком. Для вирішення цих проблем використовуються різні методи, такі як додавання частинок або плівок, але вони мають такі недоліки, як погана адгезія. Електропрядені нановолоконні вуалі - це нова технологія, що є багатообіцяючою завдяки своїй пористості, тонкості та легкості [30]. Хоча було показано, що вони покращують поведінку при руйнуванні та ударі, необхідні додаткові дослідження щодо їх втомних характеристик. Це дослідження зосереджене на статичній та втомній реакції некрихких

тканинних ламінатів, модифікованих електропряденими нановолоконними вуалями, зокрема, в багатошарових ламінатах, виготовлених методом вакуумного лиття під тиском (ВЛПТ) в умовах втомлення під контролем навантаження. Результати [30] показують, що нановолоконна завіса значно покращила критичне напруження, міцність на вигин і втомну міцність композитного матеріалу, а також розширила діапазон втомних напружень. Крім того, в ламінатній системі на основі ПММА було покращено в'язкість при міжшаровому руйнуванні завдяки застосуванню полімерних нановолоконних покриттів з ПА за відповідних умов гарячого пресування. У дослідженні також проаналізовано вплив покращення міжфазної адгезії на в'язкість руйнування та механізм, що лежить в її основі.

Полімерні нановолокна мають великий потенціал у багатьох сферах, і дослідники [28] активно вивчають їхні застосування. Наприклад, вони можуть бути використані у сфері екології для очищення стічних вод від важких іонів або у виробництві паливних елементів. У біомедичних технологіях полімерні нановолокна можуть бути використані для доставки ліків або в тканинній інженерії. Вони також можуть бути використані як сенсори, наприклад, для вимірювання маси або інтенсивності світла.

Щодо виготовлення полімерних нановолокон, існує кілька методів, таких як електроспінінг, малювання, синтез шаблонів, фазове розділення і самозбірка [28]. Вони можуть бути виготовлені з різних полімерних матеріалів залежно від їхнього застосування. Наприклад, для сенсорів вони можуть бути виготовлені з композиту вуглецевих нанотрубок або пластику. У майбутньому роль полімерних нановолокон в суспільстві може зростати, оскільки вони мають багато переваг і широкий спектр застосувань.

2.4 Методи контролю якості та структурного аналізу

У статті [29] зазначається, що наномодифіковані полімерні композиційні матеріали (НМПКМ) є перспективним напрямом у матеріалознавстві, оскільки

їх активно застосовують у високонавантажених конструкціях авіаційної, космічної, військової та інших галузей промисловості. Для покращення властивостей цих матеріалів використовують вуглецеві нанотрубки (ВНТ), які мають виняткову міцність і високий модуль пружності, що робить їх ефективними в складі полімерних композитів. Окрім цього, НМПКМ можуть набути електропровідних властивостей, перетворюючи діелектричний полімер на провідний матеріал. Висока вартість виробництва таких композитів вимагає ретельного контролю якості на кожному етапі виготовлення, і найбільш ефективним методом для виявлення дефектів є електроємнісний неруйнівний контроль, оскільки він підходить для матеріалів із різними характеристиками. Використання цього методу сприяє впровадженню НМПКМ у виробництво критично важливих деталей і конструкцій. Залежно від концентрації ВНТ відносна електроємність поступово наближається до стаціонарного значення, що підтверджено результатами моделювання, представленими у вигляді графічної залежності між електродами та відстанню від сенсора до поверхні матеріалу при різних концентраціях ВНТ (рисунок 2.9).

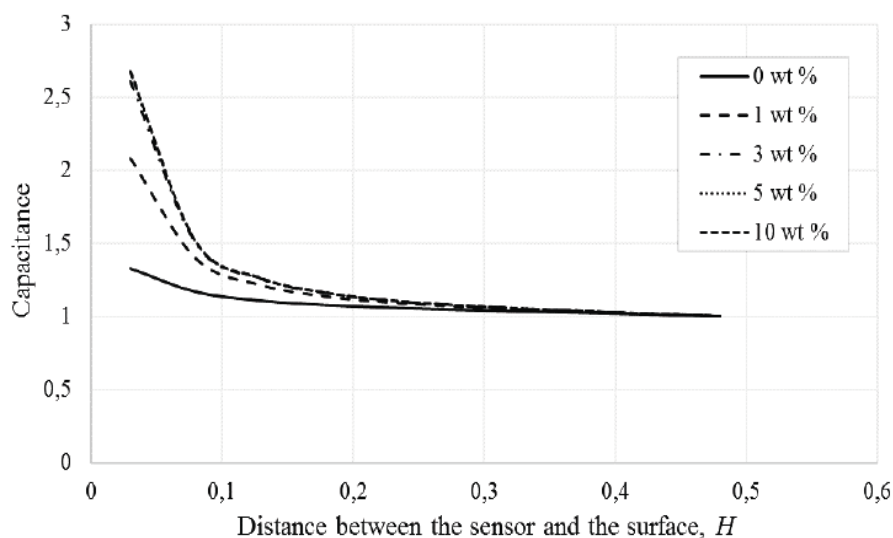


Рисунок 2.9 – Залежність відносної ємності від відстані між датчиком та поверхнею матеріалу за умов варіативних концентрацій вуглецевих нанотрубок (ВНТ)

У статті [30] розглядається моделювання та проєктування параметрів технології виготовлення полімерів, зокрема наномодифікованих матеріалів. Дослідження показує, що використання ультразвукової модифікації при виготовленні класичних і наномодифікованих полімерних композиційних матеріалів веде до значного покращення їх властивостей. Цей ефект досягається завдяки підвищенню структурної однорідності матеріалу, інтенсифікації процесу просочення ультразвуку, поліпшенню міцності та експлуатаційних характеристик, а також зменшенню кількості повітряних включень і поліпшенню розподілу наповнювача в матриці. Отримані результати свідчать про великий потенціал ультразвукової модифікації для покращення якості та ефективності полімерних матеріалів у різних галузях промисловості.

У статті [31] зазначається, що нанотехнологія є міждисциплінарною галуззю науки та інженерії, яка зосереджується на розробці, модифікації, аналізі та застосуванні нанорозмірних компонентів у різних сферах. Зокрема, розглянуто переваги нанопокриттів, серед яких висока адгезія, підвищена твердість, довготривала корозійна стійкість і покращена міжфазна взаємодія, що сприяє їх ефективному використанню для зменшення впливу агресивного середовища та зниження витрат на експлуатацію й обслуговування.

Автори статті [32] дослідили метод радіаційного синтезу мембран зворотного осмосу шляхом прищеплення N-ізопропілакрил-аміду та введення наночастинок ZnO на поліамідні мембрани. Вивчено вплив концентрації мономеру, часу опромінення та вмісту наночастинок на рівень прищеплення. Властивості отриманих мембран охарактеризовано за допомогою різних методів аналізу. Досліджено ефективність очищення води, зокрема швидкість потоку та відторгнення солей, а також оцінено хімічну стійкість мембран до хлору та біообростання. Результати свідчать, що наномодифіковані мембрани мають значно вищу ефективність порівняно з вихідними поліамідними мембранами.

2.5 Бар'єрні та оптичні властивості полімерних плівок

Автори статті [33] розробили багатошарову полімерну плівку, яка має високу стійкість до ультрафіолетового випромінювання та високий коефіцієнт пропускання. Ця плівка може ефективно зменшити вагу кришки фотоелектричного модуля на близько 85%, що робить її простим і водночас ефективним способом зменшення ваги. Її можна використовувати в якості заміни звичайного фотоелектричного скла, оскільки має майже ідентичні властивості. Однак, вона має перевагу в невеликій вазі та відмінній стійкості до ультрафіолетового випромінювання, що робить її ідеальним варіантом для тривалого використання на відкритому повітрі. Такі плівки можуть бути виготовлені на великомасштабному виробництві.

У статті [34] провели дослідження щодо придушення сегнетоелектричності полівініліденфториду у змішаних (полі(метилметакрилат)) та незмішуваних (полікарбонат) сумішах з полі(вініліденфторид-ко-гексафторпропіленом), а також у багатошарових плівках ПК/П(ВДФ-ГФП). У результаті дослідження виявлено, що у порівнянні зі звичайними сумішами, багатошарові плівки є перспективними для плівкових конденсаторів наступного покоління, оскільки вони мають високу стійкість до температури, високу щільність енергії та низькі втрати одночасно. Крім того, виявлено, що втрати знижуються із збільшенням співвідношення вмісту полікарбонату (рисунок 2.10). Наприклад, плівка ПК/П(ВДФ-ГФП) зі співвідношенням 10/90 відзначилася високими втратами через невеликий вміст полікарбонату, що демонструється на графіку нижче.

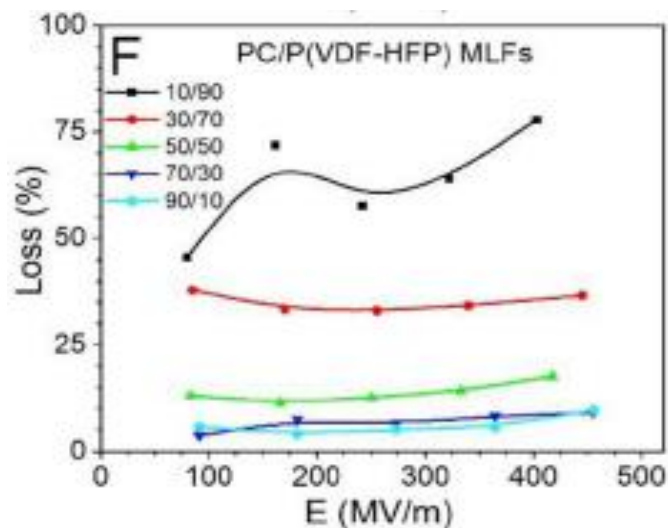


Рисунок 2.10 – Залежність відсоткових втрат енергії від величини електричного поля для різних типів багатошарових плівкових матеріалів.

У статті [35] автори зазначають, що виробництво біополімерів для пакування зростає через проблему забруднення довкілля нерозкладними пластиковими відходами. Вони описують новий метод створення багатошарових плівкових і пінопластових структур на основі PLA, які містять 16, 32 та 64 шари, розроблених завдяки технології багатошарової коекструзії. Запропонована плівка має унікальну горизонтальну архітектуру, що дозволяє ефективно контролювати ріст клітин та запобігати їх передчасному руйнуванню під час коекструзії. Дослідження показали, що здатність матеріалу до передачі кисню значною мірою залежить від його кристалічності. Зокрема, матеріал із 32 шарами у співвідношенні 50/50 (плівка/піна) після 30-хвилинного відпалу демонструє винятково високі бар'єрні властивості, які перевищують стандартні показники в 35 разів.

У статті [36] описано створення тришарової поліетиленової плівки з роздуванням, яка відзначається відмінною термоусадкою та механічними властивостями. Ця унікальна плівка виготовлена за допомогою голівки з роздуванням, яка використовує полімерні смоли та складний потік, поєднуючи зсувну циркуляцію та потік тиску. Дослідження показало, що швидкість обертання оправки має більший вплив на термоусадку та механічні

властивості, ніж коефіцієнт роздування. Зразки, що виготовлені зі швидкістю обертання оправки 4 об/хв, мають відмінні характеристики.

2.6 Інноваційні наноматеріали та їх застосування

У свою чергу, автори [37] наголошують, що нанопокриття можуть застосовуватися в менших концентраціях, що розширює їхні можливості у різних технологічних сферах. Дослідження спрямовані на розробку самовідновлювальних покриттів на основі природних компонентів, металевих іонів та вуглецевих алотропів, які забезпечують захист від корозії для різних металів і сплавів. Для аналізу та характеристики таких матеріалів використовуються методи, зокрема скануюча електронна мікроскопія, електрохімічна імпедансна спектроскопія, потенціодинамічна поляризація, атомно-силова мікроскопія, енергодисперсійна спектроскопія тощо.

У статті [38] досліджено використання полімерних покриттів для захисту від корозії, однак їхня пориста мікроструктура часто знижує ефективність через проникнення шкідливих мікроорганізмів, знос і подряпини. Для покращення бар'єрних властивостей таких покриттів можуть застосовуватися наноматеріали, проте знання про їхню роль у цьому процесі залишаються нерівномірними. У статті аналізується вплив нанотехнологій на структуру та функціональність полімерних покриттів, а також розглядається використання полімерних нанопокриттів як носіїв інгібіторів корозії. Окрім того, подано огляд технологічних досягнень у створенні високоефективних нанокомпозитних покриттів із покращеними корозійними та іншими важливими характеристиками.

У статті [39] досліджено наномодифікацію полівінілхлориду (ПВХ) з використанням інфрачервоної спектроскопії. Присутність хлору в структурі ПВХ як до, так і після модифікації підтверджується піком при 690 см^{-1} , що відповідає осьовій деформації зв'язку C–Cl. Наномодифікований ПВХ продемонстрував іонообмінну ємність $1,27\text{ ммоль/г}$ і високу ефективність у

видаленні важких металів із водних розчинів. Підвищення концентрації наночастинок TiO_2 сприяло покращенню цього процесу, що підтверджено розрахунками адсорбованої кількості (Q_e), яка значно зросла у наномодифікованій плівці порівняно зі звичайною ПВХ-плівкою. Окрім цього, наномодифікована ПВХ-плівка виявила високу стабільність, зберігаючи свої властивості протягом чотирьох циклів використання, що пояснюється значно більшою площею її поверхні (від 0,3 до 282 m^2/g). Хоча модифікація ПВХ наночастинами збільшує вартість плівки на 15%, її ефективність у три рази перевищує вихідний матеріал, що робить цей підхід економічно доцільним.

Автори статті [40] вивчали вплив поля напруги на корозійну стійкість композитної плівки та діелектричні властивості композиту з різними легуючими домішками. Вони розглянули метод прогнозування тривалості корозійностійкого життя при напрузі електричного поля та провели РЕМ-аналіз морфології та структури плівки поблизу точки пробою після утворення корони. Використовуючи ІЧ-спектроскопію та тест на струм провідності, вони визначили поріг електричного старіння плівки (таблиця 2.1). В результаті дослідження виявлено, що введення наночастинок nano-SiO_2 може значно підвищити корозійну стійкість матеріалу. Зокрема, при температурі 155 $^{\circ}\text{C}$ тришарова композитна плівка PI/ nano-SiO_2 з домішками наночастинок у кількості 10 мас.% витримала 7472,61 години при напрузі зовнішнього електричного поля 20 кВ/мм.

Таблиця 2.1 – Порогові значення електричного старіння для поліімідної (PI) плівки та тришарових композитів із варіативним ступенем легування

Зразок	Чистий PI	5 мас.%	10 мас.%	15 мас.%
Поріг електричного старіння, кВ/мм	30,79	32,78	46,04	53,02

2.7 Сучасний стан розробок у виробництві багатошарових плівок та наномодифікацій

Щоб краще зрозуміти коекструзію та використання в ній наномодифікації, варто розглянути патенти, які відображають сучасний стан розробок у виробництві багатошарових плівок.

Винахід [41] стосується конструкції багатошарової плівки, яка призначена для використання у виробництві високофункціональних матеріалів із покращеними бар'єрними властивостями, зокрема для захисту від проникнення кисню, вологи, а також для забезпечення міцності та зносостійкості виробів у різних сферах застосування, включаючи пакування, текстильну промисловість і спеціалізоване спорядження. Багатошарова плівка (рисунок 2.11) відповідно до винаходу включає щонайменше один перший шар, щонайменше один другий шар, принаймні один проміжний шар і щонайменше один зовнішній шар. Перший шар виконує функцію бар'єру щодо проникнення кисню, тим самим забезпечуючи захист внутрішнього простору або вмісту виробу від окиснення. Другий шар діє як бар'єр для водяної пари та/або загальної вологості, зменшуючи гігроскопічний вплив навколишнього середовища. Проміжний шар є композиційно та структурно сумісним з першим і другим шарами, що забезпечує їх ефективне з'єднання та формування стабільної багатошарової структури. Зовнішній шар розташовується із зовнішнього боку першого та/або другого шару, і виконує роль облицювального шару, захищаючи внутрішні шари від механічного зношування, ультрафіолетового випромінювання та інших зовнішніх впливів.

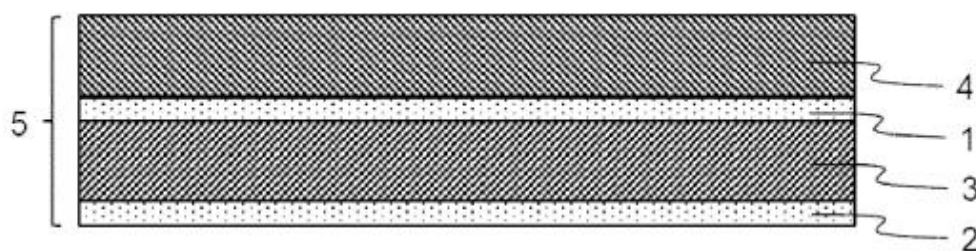


Рисунок 2.11 – Патент EP4549145A1 – Багатошарова плівка із покращеними бар'єрними властивостями

Винахід [42] описує конструкцію зрошувальної головки для коекструзійної машини з двома екструдерами (рисунок 2.12). Основні елементи головки включають дві роз'єднувальні пластини та систему з'єднувальних каналів матеріалу. Перша роз'єднувальна пластина має два канали, з яких матеріал надходить у перший з'єднувальний канал, що сполучений з екструдерами. Друга пластина містить додатковий канал для матеріалу та другий з'єднувальний канал. Головка машини складається з декількох вузлів, які рівномірно розташовані вздовж осі каналу матеріалу. Кожен вузол містить розподільчий човник, серцевину форми, дві зовнішні втулки та зрошувальний човник. Ця технологія забезпечує зрошування та спільну екструзію гумового матеріалу для формування внутрішнього та зовнішнього шару коекструзійної лінії.

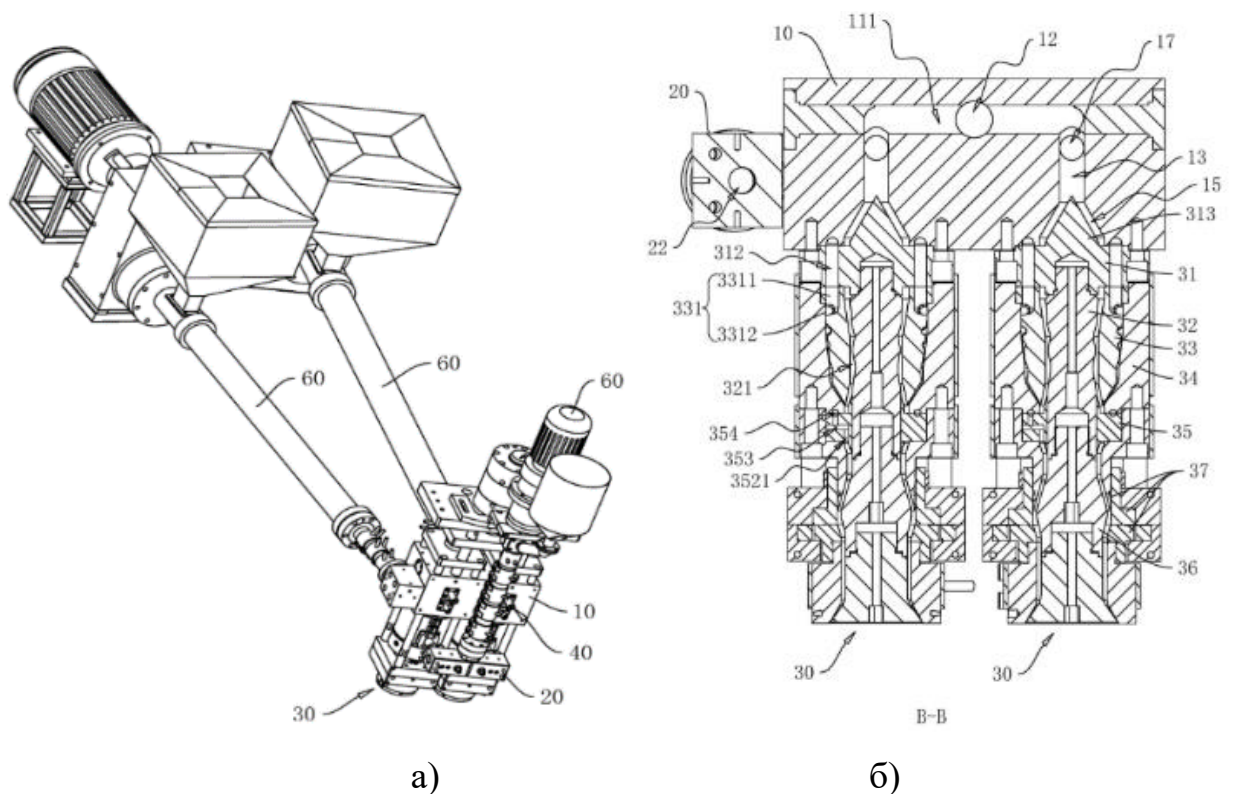


Рисунок 2.12 – Патент CN115008719A – а) Два екструдери та двошарова голівка; б) Поперечний розріз головки

Винахід [43] описує тришарову головку для коекструзії, що використовує три екструдери (рисунок 2.13). Головка містить роздільну пластину з трьома каналами для матеріалу — першим, другим та третім, а

також сполучний канал для з'єднання з екструдером. Кілька вузлів головки складаються з серцевини та зовнішніх гільз прес-форм для створення трьох бігунів. Роздільна пластина оснащена додатковим каналом для розподілу матеріалу, а композитний блок і сердечник застосовуються для формування композитного бігуна. Композитний бігун отримується шляхом злиття матеріалів, які виходять з перших трьох бігунів. Цей винахід забезпечує ефективне виробництво тришарових плівок за допомогою коекструзії.

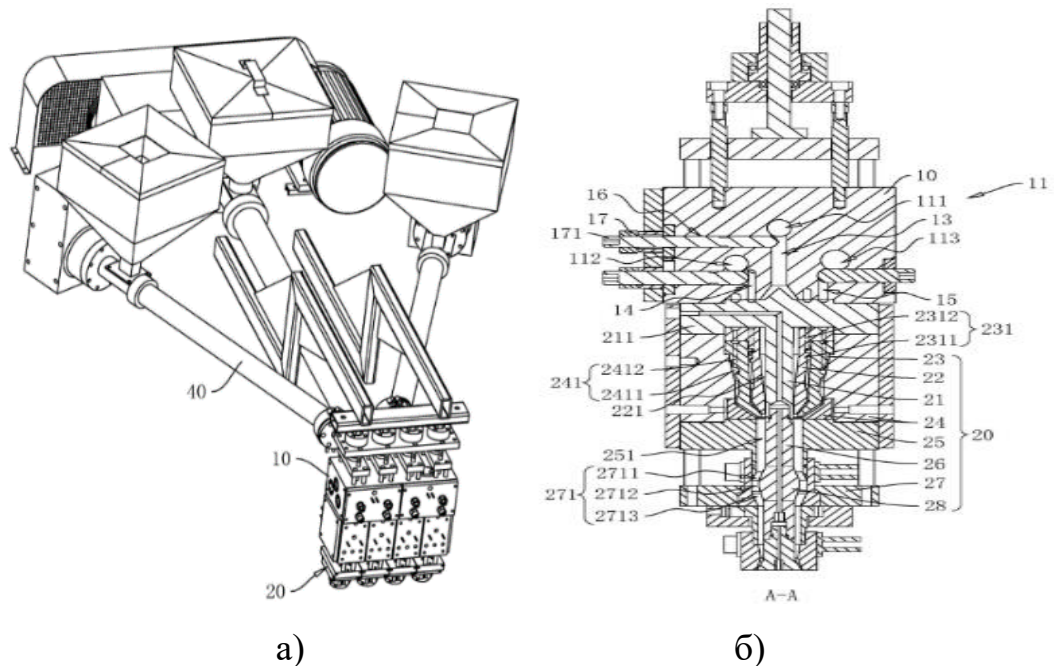


Рисунок 2.13 – патент CN115008716A – а) Три екструдери та тришарова головка; б) Схема тришарової головки у розрізі

Винахід [44] описує пристрій для виробництва багатошарової плівки (рисунок 2.14). Пристрій включає принаймні один екструдер, який розплавляє термопластичний матеріал, що складається з окремих шарів, з'єднаних між собою. Адаптер для коекструзії містить центральний канал для формування центрального шару композиційного матеріалу та додаткові канали для створення інших шарів. Пристрій оснащений переміщувальними регульовальними елементами і механізмами для їх управління. Приводний блок забезпечує рух регульовальних пристроїв, а вимірювальні засоби контролюють товщину та розподіл товщини кожного шару плівки. Контролер автоматично, часто ітеративно, коригує положення регульовальних елементів

залежно від виміряної товщини та її розподілу у багатошаровій плівці, що виходить з соплової частини.

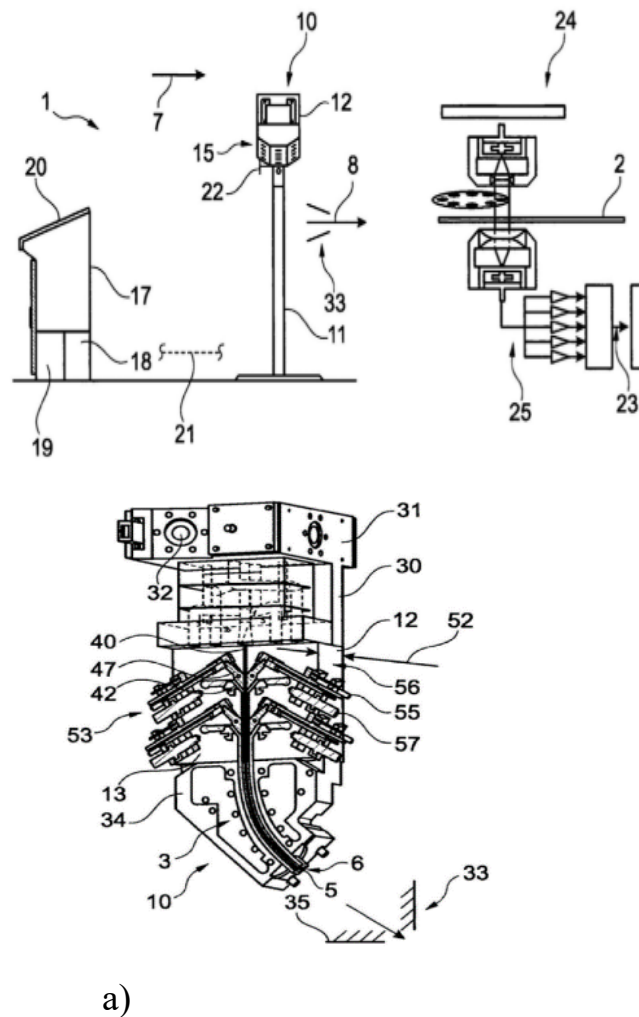


Рисунок 2.14 – Патент CN114786915A –а) Спрощена схема системи для виготовлення коекструзійної багатошарової плівки; б) Схематичне зображення поперечного перерізу коекструзійного адаптера

Винахід [45] описує композитну термоусадочну плівку з матеріалу ПЕТ (поліетилентерефталат), що складається з трьох шарів: поверхневого шару А, основного шару В і нижнього шару С, які формуються шляхом екструзії. Шари А та С містять функціональний матеріал ПЕТ, який складає 5,5-9,5% від загальної маси плівки, а шар В складається з функціонального матеріалу ПС (полістирол), який становить 14,5-21,5% від загальної маси плівки. Завдяки ефективному функціональному регулюванню шарів ПЕТГ і ПС під час спільної екструзії, вдається усунути дефект пульсацій на межі розділу фаз і

уникнути розшарування шарів плівки. Композитна термоусадочна плівка поєднує переваги обох матеріалів: зовнішня сторона легко друкується завдяки ПЕТ, що має низьку температурну чутливість, а внутрішній шар з ПС зменшує скорочення і полегшує процес термоусадки.

Винахід [46] описує пристрій для екструзії пластикових та/або гумових матеріалів. Пристрій включає шнековий екструдер, який пластифікує матеріал і передає його до шестеренчастого насоса. Насос створює достатній тиск для того, щоб пропустити матеріал через екструзійну головку. Осі шестерень насоса і шнека екструдера паралельні одна одній. Корпус насоса має бічний отвір, через який проходять циліндрична втулка та шнек екструдера, щоб подати матеріал у насос у вигляді неорієнтованої пластифікованої маси. Екструзійна головка може бути поперечною, з віссю, паралельною осям зубчастих коліс насоса та осі шнека екструдера. Крім того, пристрій дозволяє підключити інший екструзійний пристрій з шнековим екструдером та шестеренчастим насосом до іншої сторони екструзійної головки (рисунок 2.15).

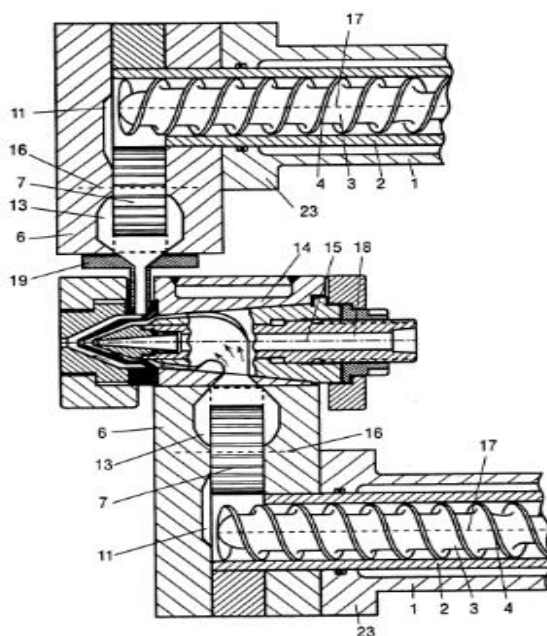


Рисунок 2.15 – Патент US5304053A – Пристрій співекструзії
пластикового або гумового матеріалу

Взаємодія між скрученими вуглецевими нанотрубками (СВНТ) та полімерною матрицею є ключовою для механічних, теплових і електричних властивостей нанокомпозитів, армованих СВНТ. У дослідженні [47] проведено молекулярно-динамічні (МД) моделювання з метою вивчення характеристик міжфазної взаємодії в полімерних нанокомпозитах (ПНК). Також оцінювався вплив форми СВНТ на механізм передачі навантаження. Для дослідження розтягуючої сили та міжфазового зсувного напруження (МЗН) виконано моделювання витягування для різних геометричних варіантів СВНТ. Результати показали, що максимальна розтягуюча сила зменшується при збільшенні внутрішнього діаметра СВНТ, збільшенні кута спіралі та зменшенні діаметра трубок. Відстань між СВНТ і полімерною матрицею змінювалась, і більша міжфазова відстань сприяє підвищенню МЗН. Зменшення внутрішнього діаметра СВНТ, кута спіралі та діаметра трубок призводить до збільшення МЗН. Описано також механізм посилення властивостей композитів СВНТ/полімер. Через відсутність експериментальних даних наведено лише результати числового моделювання. Це дослідження сприяє кращому розумінню адгезії між полімерною матрицею і СВНТ і може бути корисним для розвитку композитних матеріалів на їх основі.

Висновки до розділу 2

У багатьох країнах світу, зокрема в Китаї, США, Німеччині та Японії, дослідники активно вивчають вплив введення нанонаповнювачів у полімерну матрицю на фізико-механічні властивості багатошарових структур. Згідно з численними науковими працями [25, 27, 28, 37], така наномодифікація значно покращує міцнісні характеристики плівок, зменшує ризик руйнування під дією навантажень і сприяє підвищенню експлуатаційної надійності кінцевого матеріалу.

Особливо ефективною вважається наномодифікація саме середнього шару у тришарових структурах, що дозволяє забезпечити не лише механічну стабільність, а й додаткові функціональні властивості, зокрема стійкість до ультрафіолетового випромінювання, стирання, впливу агресивних середовищ тощо. Усе це робить такі плівки перспективними для застосування у галузях захисного, військового та спортивного одягу, упаковки та фільтраційних систем.

Втім, як зазначено у роботах [11, 39], технологія виготовлення багатошарових наномодифікованих плівок є більш складною і витратною порівняно зі звичайними полімерними плівками. Підвищення вартості пов'язане як із використанням нанонаповнювачів, так і з необхідністю точного контролю параметрів процесу, забезпечення рівномірного розподілу наночастинок і стабільності міжшарових з'єднань. Це підкреслює важливість економічної оцінки доцільності таких технологій, особливо в умовах масштабного виробництва.

Однак, додаткові витрати можуть бути повністю виправдані покращеними характеристиками кінцевого продукту, особливо в тих галузях, де критично важливими є надійність, зносостійкість та довговічність матеріалів. Потенціал подальших досліджень полягає в розробці більш ефективних та економічно вигідних методів введення нанонаповнювачів, пошуку нових типів наноматеріалів, що забезпечують бажаний ефект при

менших концентраціях, а також у створенні оптимізованих багатошарових структур із заданими функціональними властивостями.

Таким чином, розвиток технологій наномодифікації багатошарових полімерних плівок залишається актуальним напрямом сучасної науки і техніки, що потребує подальших досліджень, зокрема в контексті зниження вартості виробництва, підвищення масштабованості процесів та розширення галузей застосування таких матеріалів.

3 ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИТЯГУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВОЇ НАНОТРУБКИ З ПОЛІМЕРНОГО МАСИВУ

3.1 Математичне моделювання

У цьому підрозділі представлено математичне моделювання процесів взаємодії між вуглецевою нанотрубкою та полімерною матрицею, з урахуванням механічних властивостей компонентів і адгезійної взаємодії на міжфазній межі. Застосування числового підходу дозволяє дослідити деформаційно-руйнівну поведінку системи на основі фізично обґрунтованих моделей.

Для дослідження взято математичну модель визначення фізико-механічних характеристик адгезійного шару, що лягають в основу моделювання процесу руйнування адгезійного шару між вуглецевою нанотрубкою та полімерною матрицею, та математичну модель оцінки міцності наноармованого полімеру [49].

Перша модель містить у собі силу взаємодії ковалентного зв'язку між вуглецем (C-C) (рисунок 3.1):

$$F(\varepsilon_r) = 2\beta D_e (1 - e^{-\beta \varepsilon_r r_0}) e^{-\beta \varepsilon_r r_0}, \quad (3.1)$$

де $r_0 = 0,141$ нм – рівноважна міжатомна відстань; $\beta = 2,625 \times 10^{10} \text{ м}^{-1}$; $D_e = 6,03105 \times 10^{-19}$ нм.

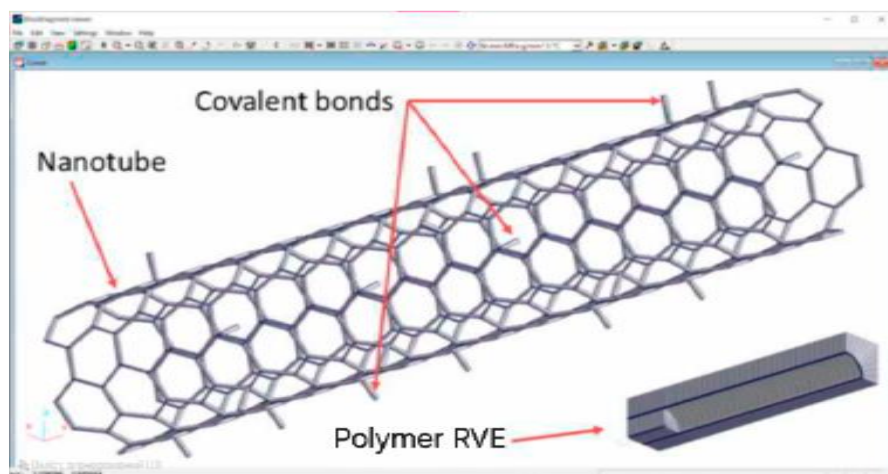


Рисунок 3.1 - Скінченно-елементна модель наномодифікованого матеріалу в програмному середовищі APROKS

У формулі (3.1) враховується рівноважна міжатомна відстань, параметри потенціалу та експоненційне затухання сили (рисунк 3.2). Ця залежність необхідна для моделювання поведінки нанотрубки на атомарному рівні.

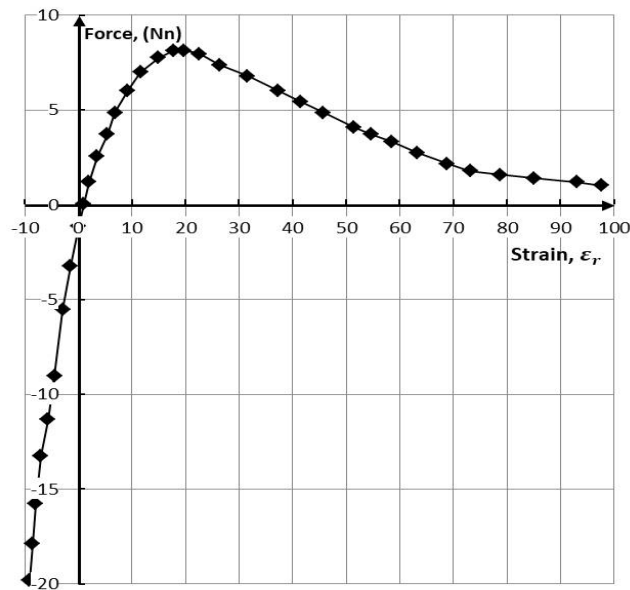


Рисунок 3.2 – Діаграма «сила-деформація» для зв'язку С-С

Важливо забезпечити фізично обґрунтоване описання умов контакту між нанотрубками та полімерною матрицею. У зв'язку з цим одним із першочергових завдань є визначення фізико-механічних параметрів інтерфейсного шару між нанотрубкою та полімером [48]. Для цього вводять глобальні змінні та дві локальні, та будується система координат, що показана рисунку 3.3.

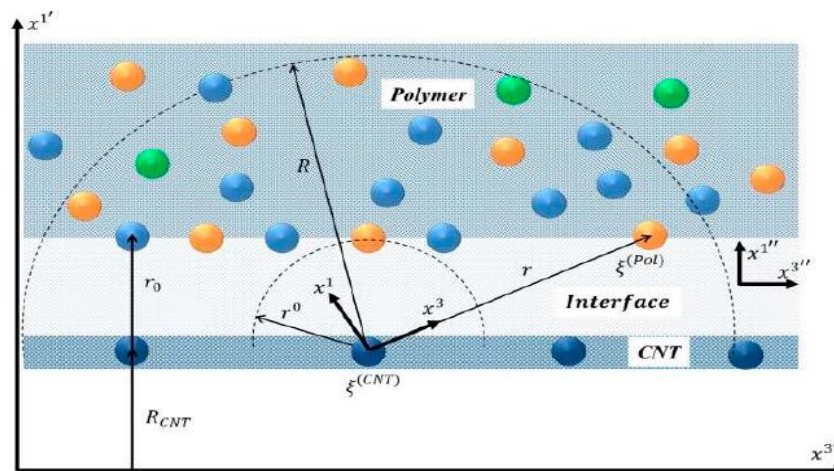


Рисунок 3.3 – Системи координат тришарової моделі «нанотрубка – полімер»

Отже, повний потенціал взаємодії між атомами вуглецевої нанотрубки та навколишніми атомами молекул полімеру:

$$\Pi = \sum_{n=1}^{Nc} \sum_{p=1}^{Np} U_{np} = \sum_{n=1}^{Nc} \sum_{p=1}^{Np} D_{e(np)} \left(e^{-2\alpha_{(np)} r_0^{(np)} \varepsilon_{33}^{(np)}} - 2e^{-\alpha_{(ij)} r_0^{(np)} \varepsilon_{33}^{(np)}} \right), \quad (3.2)$$

де U_{np} – питомий потенціал Морзе між атомом нанотрубки з індексом n , ($n = 1 \div Nc$) та атомом полімерного ланцюга p , ($p = 1 \div Np$); Nc – загальна кількість атомів у нанотрубці; Np – кількість атомів полімеру, що оточують n -й атом нанотрубки в межах радіусу впливу R між нанотрубкою та полімером, де $R > r$.

Ненормовані компоненти тензора фізико-механічних параметрів інтерфейсного шару, що формується між нанотрубкою та полімерною матрицею, можна подати у вигляді:

$$\tilde{C}^{i'j'k'l'} = 2 \sum_{n=1}^{Nc} \sum_{p=1}^{Np} D_{e(np)} (\alpha_{(np)} r_0^{(np)})^2 \delta_3^i \delta_3^j \delta_3^k \delta_3^l C_{i(np)}^{i''} C_{j(np)}^{j''} C_{k(np)}^{k''} C_{l(np)}^{l''} \quad (3.3)$$

Тензор фізико-механічних констант деформування:

$$\begin{aligned} \tilde{C}^{i''j''k''l''} &= \frac{\tilde{C}^{i'j'k'l'}}{\iiint \sqrt{g''} dV_{int}} = \\ &= \frac{2 \sum_{n=1}^{Nc} \sum_{p=1}^{Np} D_{e(np)} (\alpha_{(np)} r_0^{(np)})^2 \delta_3^i \delta_3^j \delta_3^k \delta_3^l C_{i(np)}^{i''} C_{j(np)}^{j''} C_{k(np)}^{k''} C_{l(np)}^{l''}}{\iiint \sqrt{\det|g^{i''j''}|} dV_{int}}, \end{aligned} \quad (3.4)$$

де dV_{int} – нескінченно малий об'єм елемента інтерфейсного шару; $g'' = \det|g^{i''j''}|$ – детермінант метричного тензора, що характеризує метриці системи координат шару інтерфейсу $x^{i''}$.

Друга модель оцінки міцності наноармованого полімеру містить у собі, крім визначення міцності, повну роботу, що витрачається на руйнування нанокомпозиту [49]:

$$A_{full} = A_{polym}^0 + A_{nnt}^{pull}, \quad (3.5)$$

де A_{polym}^0 – робота, що витрачається на руйнування неармованого полімерного зразка.

Робота, що необхідна для витягування нанотрубки з масиву (рисунок 3.4):

$$A_{nnt}^{pull} = \int_0^{U_{max}} R(u) du, \quad (3.6)$$

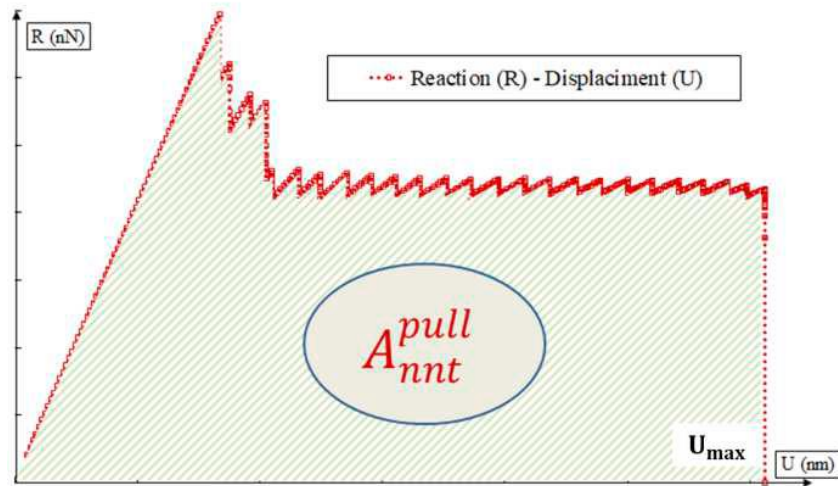


Рисунок 3.4 – Графік залежності повної реакції R, нН, при витягуванні ВНТ з кераміки примусовими переміщеннями U, нм.

Визначення межі міцності наноармованого матеріалу у формі:

$$[\sigma_{polym}^{nnt}] = [\sigma_{polym}^0] + \frac{k A_{nnt}^{pull}}{U_{max} S_{nnt}}, \quad (3.7)$$

де $[\sigma_{polym}^0]$ – межа міцності матеріалу без нанотрубок, S_{nnt} – площа нанотрубки.

Коефіцієнт армування наномодифікованого полімеру, який дозволяє оцінити, наскільки покращуються властивості полімеру через введення нанотрубок., знаходять за формулою:

$$\frac{S_{nnt}}{S_{rve}} = k, \quad (3.8)$$

де S_{rve} – площа об'ємного елемента.

Також тут враховано міжфазне зсувне напруження (МНЗ), яке виникає в адгезійному шарі між нанотрубкою і полімером. саме в адгезійному шарі зароджується руйнування під дією навантаження [50]:

$$\tau_{II} = \frac{F_{II}}{2\pi D a}, \quad (3.9)$$

де F_{II} – сила витягування нанотрубки, нН, D – діамет нанотрубки, нм, a – діапазон, в якому МНЗ розподіляється на кожному торці впроваджених ВНТ при заданому зміщенні витягування.

Воно є ключовим параметром, який контролює початок руйнування:

- якщо це напруження перевищує критичне значення, відбувається розшарування;
- якщо ні — зчеплення зберігається.

3.2 Опис обраних методу та програмного комплексу для дослідження

Для моделювання процесу витягування вуглецевої нанотрубки (ВНТ) з полімерного масиву було обрано метод скінченних елементів (МСЕ), що є одним із найефективніших чисельних підходів для аналізу напружено-деформованого стану композитних матеріалів із складною внутрішньою структурою. Застосування МСЕ дозволяє врахувати деталі геометрії, анізотропність властивостей, контактні взаємодії на міжфазних межах, а також реалізувати різноманітні умови навантаження та кріплення елементів системи.

У цьому дослідженні розглядається 3D-модель, в якій вуглецева нанотрубка занурена в полімерну матрицю, а на одному з її кінців знаходиться торець, що унеможлиблює деформацію нанотрубки вільним чином і забезпечує ефективну передачу навантаження під час витягування. Він імітує структурну фіксацію ВНТ, що часто зустрічається в реальних композитах через фізичне або хімічне закріплення кінців нанотрубки в матриці чи іншому елементі конструкції.

Моделювання проводиться за допомогою програмного комплексу APROKS, розробленого в НТУУ «КПІ» (Україна) на кафедрі хімічного, полімерного та силікатного машинобудування. Ця система спеціалізується на розв'язанні задач механіки деформованого тіла, зокрема із складними контактними умовами. У межах моделі реалізовано поступове прикладення активного навантаження, помноженим на коефіцієнт навантаження (яке починається від 0,001 на першому кроці та закінчується 0,100 на сотому кроці) до вільного кінця нанотрубки, в той час як полімерна матриця лишається нерухомою.

Таке числове моделювання дозволяє побудувати залежність сили витягування від коефіцієнту наноармування матеріалу, проаналізувати напружено-деформований стан у зоні міжфазної взаємодії, а також виявити критичні області концентрації напружень, які можуть стати джерелом ініціації руйнування. Це дає змогу оцінити ефективність міжфазного зчеплення в системі «нанотрубка–полімер».

3.3 Моделювання витягування нанотрубки в залежності від її характеристик з полімерного масиву

Числове моделювання процесу витягування нанотрубки за допомогою накладеного активного навантаження, що росте покроково-ітераційно, помноживши на коефіцієнт навантаження, здійснюється методом Ньютона-Канторовича.

Застосований метод дозволив здійснити поетапне навантаження конструкції витягуванням нанотрубки із поступовим зростанням сили — від 0.001 до 0.1 від повної величини, яка становила 100 ноньютонів. На кожному кроці розрахунку сила збільшувалась відповідно до заданого коефіцієнта навантаження. Наприклад, на десятому кроці застосовувалася сила 1 нН. Такий підхід дозволив відстежити не лише деформації, а й момент зародження та розвитку розшарування у системі.

Згідно з математичними моделями, що були описані раніше, отримано модель (рисунок 3.5) «нанотрубка – полімер» для подальших розрахунків. Накладені активне навантаження в 100 нН на вільний кінець нанотрубки, як показано на рисунку 3.6. Між нанотрубкою та полімер присутній адгезійний шар (рисунок 3.7)

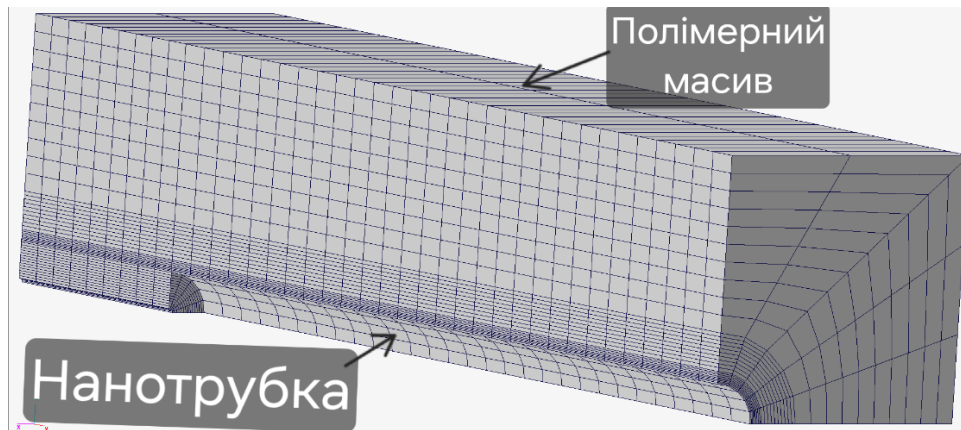


Рисунок 3.5 – Скінченно-елементна модель елементарного об'єму полімерного масиву з вуглецевою нанотрубкою

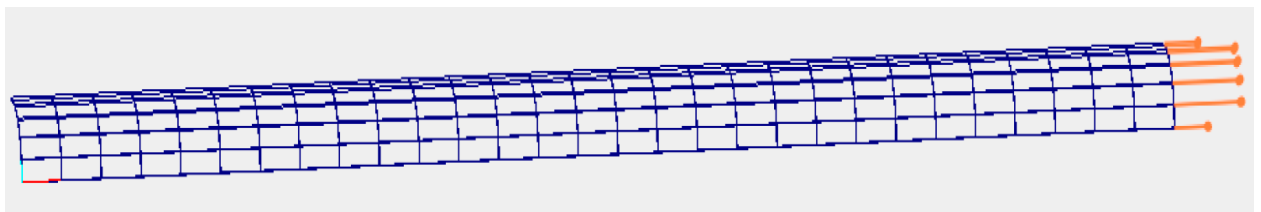


Рисунок 3.6 – Скінченно-елементна схема вуглецевої нанотрубки (ВНТ) з накладеними силами на вільному кінці

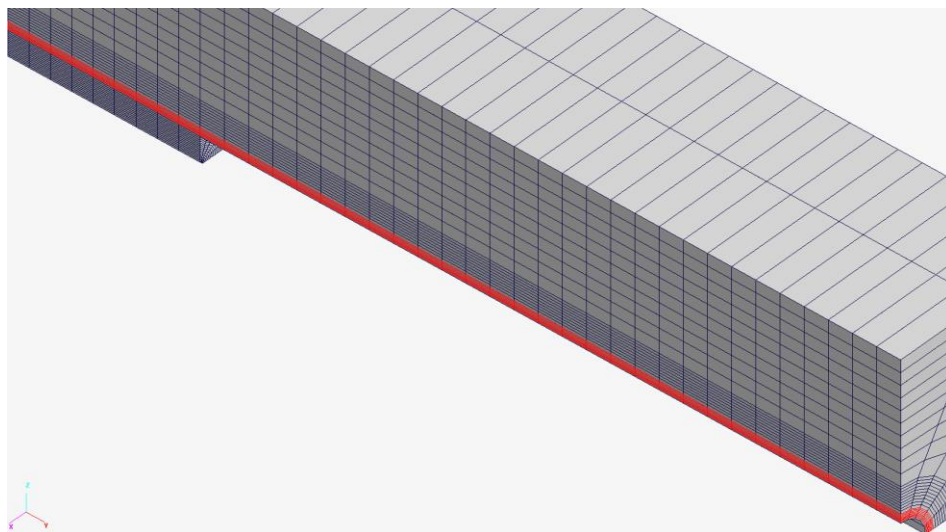


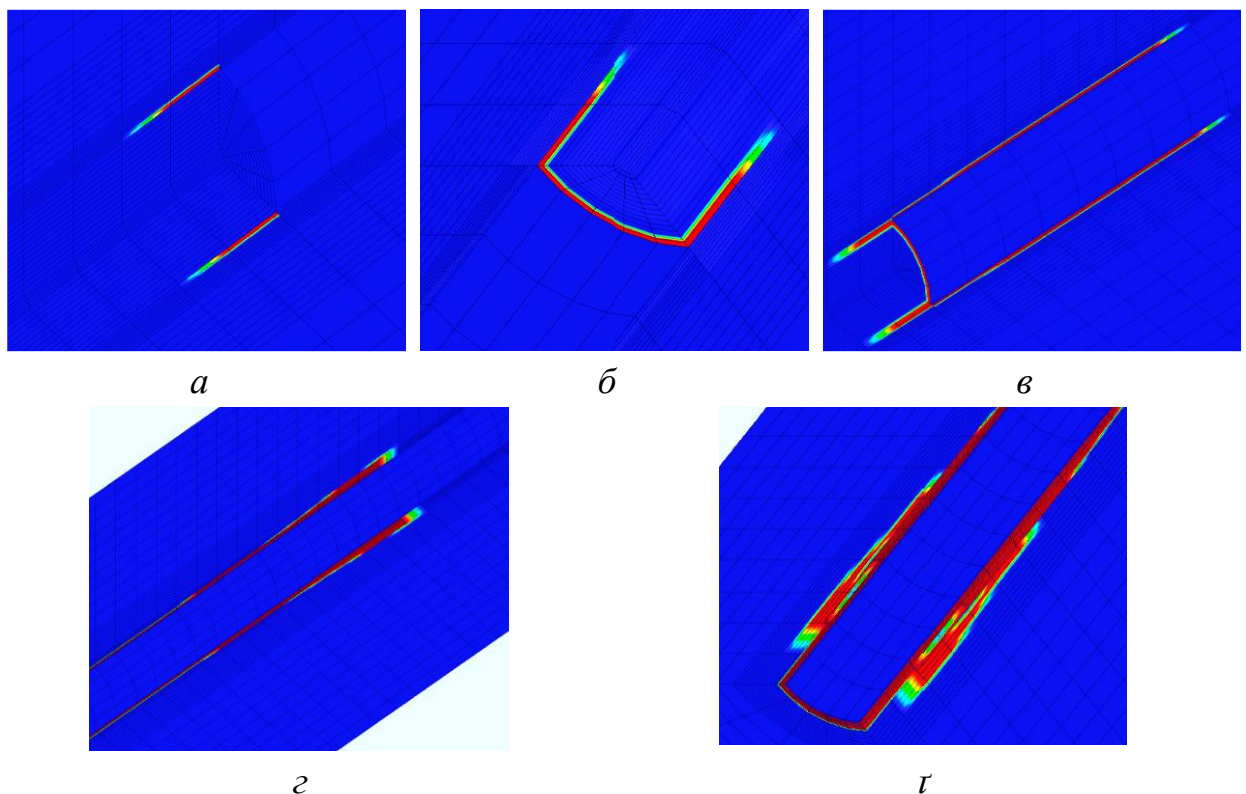
Рисунок 3.7 – Адгезійний шар між нанотрубкою та полімером

Фізико-механічні властивості матеріалів:

- Нанотрубка: $E = 1$ ТПа, $\nu = 0,3$;
- Адгезійний шар: $E = 4,5$ ГПа, $\nu = 0,4$;
- Полімер (ПЕВГ): $E = 750$ МПа, $\nu = 0,4$.

3.4 Визначення параметрів руйнування адгезійного шару між вуглецевою нанотрубкою та полімерною матрицею в залежності від коефіцієнту наноармування полімеру

Варто дослідити процес відшарування вуглецевої нанотрубки від полімерної матриці. Він починається з виникненням тріщин на торцевій частині – місці фіксації нанотрубки в полімерному масиві. Далі розшарування переходить на нанотрубку з торця та поступово розповсюджується до вільного кінця (рисунок 3.8).



a – початкова зона руйнування при навантаженні $F = 0,17$ нН; *б*, *в*, *г*, *д* – еволюція зони розшарування при силах $F = 0,171$; $0,1715$; $0,172$; $0,1723$ нН відповідно.

Рисунок 3.8 – Етапи процесу відшарування ВНТ від полімерної матриці

Для перевірки достовірності цих та подальших результатів було проведено порівняльну апробацію з експериментальними даними, наведеними в [47]. Наведено діаграму (рисунок 3.9) зі статті, на яку накладено точки отриманих даних у числовому моделюванні, з параметрами системи, які були описані авторами.

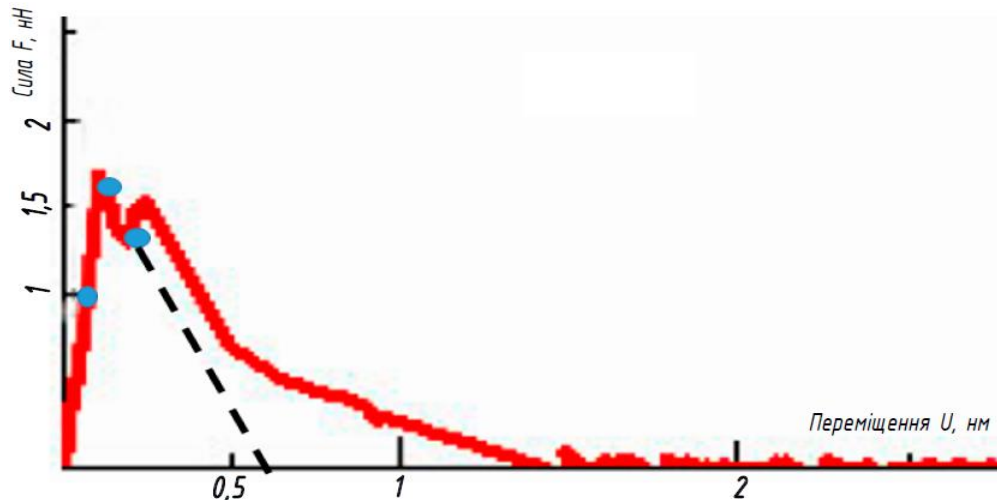


Рисунок 3.9 – Діаграма деформування «сила-переміщення» зі статті [47] з накладеними точками, отриманими в результаті розрахунків числового моделювання

На діаграмі вказано, що при навантаженні в 1 нН спостерігається певне переміщення, а початок руйнування фіксується при силі близько 1,7 нН. Точки, що були накладені, після проведення розрахунків мають аналогічний рівень сили при руйнуванні, що показано муарах на рисунку 3.10.

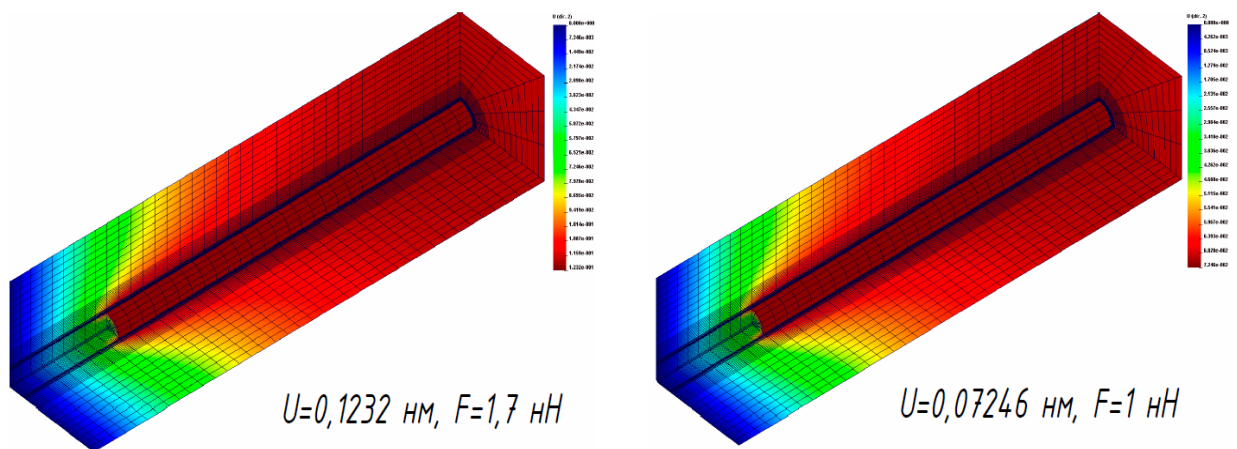


Рисунок 3.10 – Переміщення при точках F , нН (вказані на рисунках), що отримані для апробації

Ще показано спад на діаграмі, але показати його активними навантаженнями в середовищі APROKS неможливо. У висновку, апробація результатів успішна, і цю модель можна використовувати для серії розрахунків.

Для першої серії розраховано п'ять різних розмірів полімерної матриці (ПМ) в нм, в якій ВНТ без змін у діаметрі та довжині. Після проведення розрахунків з обраними розмірами, всі результати записано в таблиці 3.1 та побудовано графік залежності, що на рисунку 3.11.

Таблиця 3.1 – Зведені дані про руйнування з різними розмірами ПМ

Розміри, нм	1,345x1,345	1,6x1,6	2,69x2,69	2,8x2,8	4x4	5,38x5,38
Нанотрубка, нм	L=4,9; D=0,81					
Переміщення при силі F=1 нН, нм	-	-	0,07246	0,07036	0,05468	0,04592
Переміщення при силі F=1,7 нН, нм	-	-	0,1232	0,1196	0,09295	0,07806
Руйнація при силі F, нН	0,7	0,9	1,7	1,8	2,6	3,2
Переміщення U на початку руйнації, нм	0,09216	0,1008	0,1232	0,1266	0,1422	0,1469

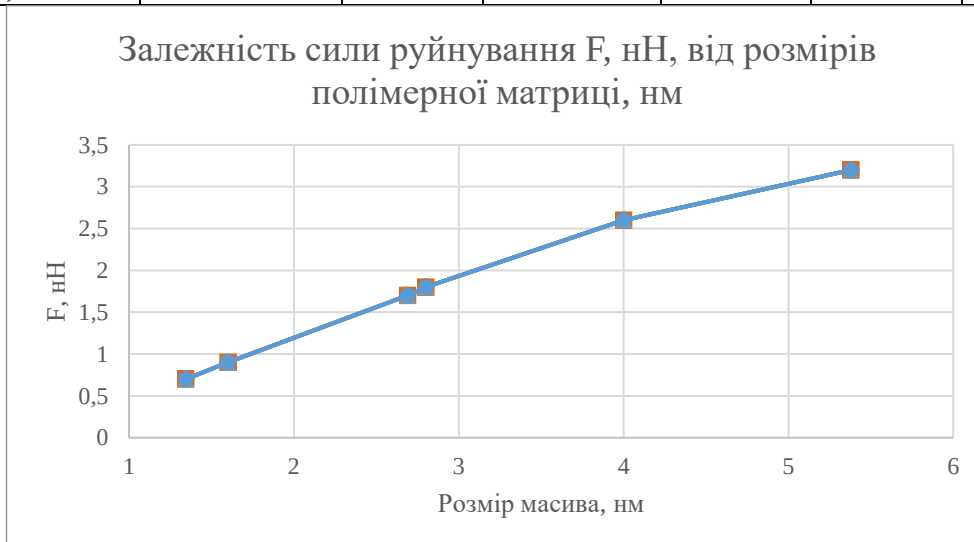


Рисунок 3.11 – Графік залежності сили руйнування від розміру ПМ

Встановлено, що при збільшенні об'єму полімерного середовища момент початку руйнування відтермінується. Інакше кажучи, руйнування

відбувається на пізніших кроках при більших прикладених силах. Це пояснюється покращеною стабілізацією системи завдяки більшій кількості матеріалу, що забезпечує кращу опору нанотрубі та зменшує концентрацію напружень.

Для другої серії розраховано п'ять різних діаметрів нанотрубки в нм, а полімерна матриця та довжина нанотрубки без змін. Після проведення розрахунків з обраними діаметрами, всі результати записано в таблиці 3.2 та побудовано графік залежності, що на рисунку 3.12.

Таблиця 3.2 – Зведені дані про руйнування з різними діаметрами ВНТ

Діаметри, нм	0,4	0,7	0,81	1,2	1,62	2
Полімерна матриця, нм	2,69x2,69					
Переміщення U при силі F=1 нН, нм	0,04302	0,06513	0,07246	0,09727	0,1257	-
Переміщення U при силі F=1,7 нН, нм	0,07313	0,1107	0,1232	-	-	-
Руйнація при силі F, нН	2,4	1,8	1,7	1,3	1,1	0,9
Переміщення U на початку руйнації, нм	0,1032	0,1172	0,1232	0,1265	0,1383	0,1422

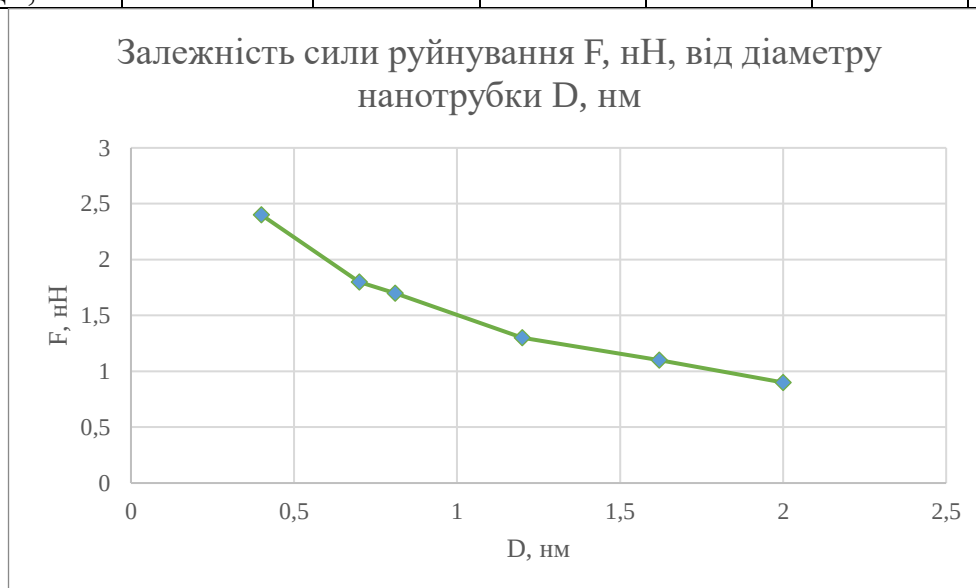


Рисунок 3.12 – Графік залежності сили руйнування від діаметру ВНТ

Зі збільшенням діаметра нанотрубки, навпаки, спостерігається зниження міцності з'єднання — руйнування настає раніше. Ймовірно, це пов'язано з тим, що при більшому діаметрі зростає контактна площа між трубкою та полімером, але при збереженні незмінного полімерного масиву сила адгезії виявляється недостатньою для утримання більш масивного елемента.

Для третьої серії розраховано п'ять різних довжин нанотрубки в нм, а розміри полімерної матриці та діаметр нанотрубки без змін. Після проведення розрахунків з обраними довжинами, всі результати записано в таблиці 3.3 та побудовано графік залежності, що на рисунку 3.13.

Таблиця 3.3 – Зведені дані про руйнування з різними довжинами ВНТ

Довжини, нм	2,45	4,2	4,9	6	7,9	9,8
Полімерний масив, нм	2,69x2,69					
Переміщення U при силі F=1 нН, нм	0,07325	0,07238	0,07246	0,0721	0,07284	0,07301
Переміщення U при силі F=1,7 нН, нм	-	0,1230	0,1232	0,1234	0,1238	0,1241
Руйнація при силі F, нН	1,4	1,7	1,7	1,7	2	2
Переміщення U на початку руйнації, нм	0,1026	0,1230	0,1232	0,1234	0,1346	0,1824

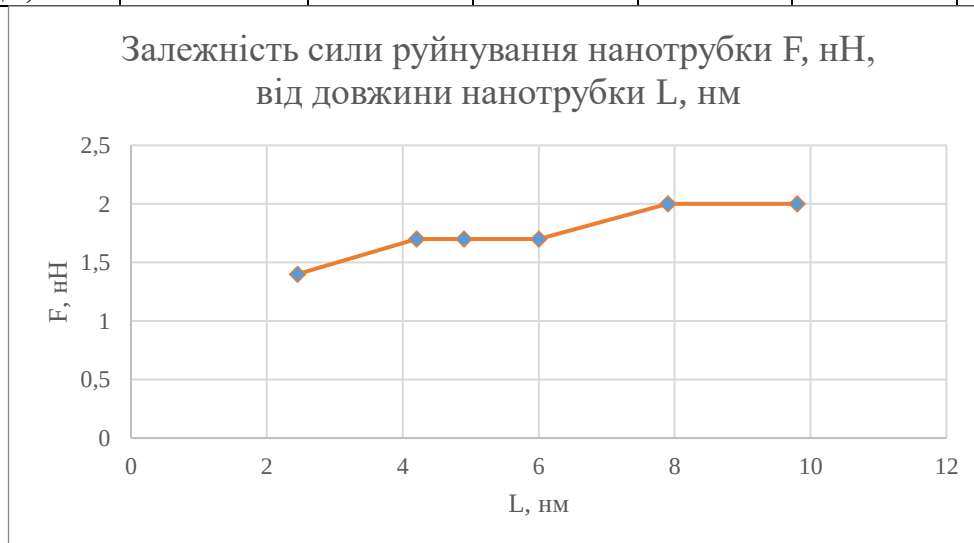


Рисунок 3.13 – Графік залежності сили руйнування від довжини ВНТ

Збільшення довжини трубки призводить до дещо пізнішого початку руйнування, хоча ефект виражений слабше, ніж у попередніх випадках. Це може бути зумовлено тим, що подовження трубки сприяє більш рівномірному розподілу навантаження вздовж її тіла. Водночас, на окремих етапах виявлено, що три зразки з різною довжиною зазнали руйнування при однаковому рівні навантаження, що свідчить про певну межу ефективності цього параметра.

Тобто, як висновок, можна сказати, що найбільший позитивний вплив на стійкість системи має збільшення об'єму полімерної матриці. Збільшення діаметру нанотрубки знижує її стійкість до зовнішніх навантажень, а довжина трубки має помірний позитивний вплив на стійкість, проте цей ефект обмежений.

Висновки до розділу 3

У роботі було проведено комплексне числове моделювання процесу витягування вуглецевої нанотрубки (ВНТ) з полімерного масиву, що є важливим етапом у вивченні механічних властивостей нанокомпозитних матеріалів. Запропоновано фізично обґрунтовані математичні моделі, які враховують не лише механічні характеристики нанотрубок і полімерної матриці, а й особливості адгезійної взаємодії на міжфазній межі.

Основною складовою дослідження стало визначення фізико-механічних параметрів інтерфейсного шару, який формує міцність і стійкість нанокомпозиту. За допомогою потенціалу Морзе та формули для сили взаємодії ковалентного зв'язку С-С була побудована детальна модель взаємодії між атомами нанотрубки і полімерного середовища. Введені тензори фізико-механічних констант дозволили кількісно оцінити механічну поведінку інтерфейсного шару при деформації.

Для опису міцності наноармованого полімеру використано модель, що поєднує роботу руйнування чистого полімеру і додаткову роботу, необхідну для витягування нанотрубки, що дозволяє адекватно оцінити зміцнюючий ефект наномодифікації. Особливу увагу приділено міжфазним зсувним напруженням, які контролюють початок руйнування і розшарування матеріалу при навантаженні. Визначено, що перевищення критичного зсувного напруження на межі нанотрубка–полімер є ключовим фактором, що ініціює механізм руйнування.

Застосування методу скінченних елементів (МСЕ) у програмному середовищі APROKS надало можливість реалізувати тривимірну модель, яка максимально наближена до реальних умов армування полімерів нанотрубками. Особливістю моделі є фіксація одного кінця нанотрубки, що відображає фізичні та хімічні умови закріплення у композиті. Поступове прикладення навантаження дозволило поетапно дослідити процес розвитку

деформацій та руйнування, виявити критичні зони концентрації напружень та оцінити ефективність адгезійного зв'язку.

Результати числового моделювання демонструють чітку залежність між механічними характеристиками нанотрубки (діаметр, довжина, розмір ПМ) та величиною сили, необхідної для її витягування з полімерного масиву. Ці залежності дають змогу оптимізувати структуру нанокомпозиту, підбираючи параметри нанотрубок та умови їх взаємодії з матрицею для підвищення міцності і довговічності матеріалу.

Найбільш суттєвим фактором, що підвищує стійкість системи, є збільшення об'єму полімерної матриці. Збільшення діаметра нанотрубки призводить до зниження її здатності протистояти зовнішнім навантаженням, тоді як довжина нанотрубки помірно сприяє підвищенню стійкості, однак цей позитивний ефект має обмежений характер.

Отже, запропонований підхід до математичного та числового моделювання є потужним інструментом для глибокого розуміння механізмів міжфазної взаємодії у наномодифікованих полімерних матеріалах. Він дозволяє не лише прогнозувати поведінку матеріалів під навантаженням, а й сприяє розробці нових композицій з покращеними механічними властивостями, що актуально для інженерних застосувань у різних галузях промисловості.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Відповідно до Закону України «Про охорону праці», ухваленого 14 жовтня 1992 року, кожен працівник має гарантоване конституцією право на захист свого життя та здоров'я у процесі трудової діяльності. При цьому все обладнання, виробничі установки й технологічні процеси повинні обов'язково відповідати встановленим вимогам щодо забезпечення безпечних і нешкідливих умов праці.

Тема магістерської дисертації – «Вплив наномодифікації полімеру на міцність багатошарових плівок». Основним виробничим устаткуванням є екструдер на базі моделі ЧП 45×25 (три одиниці обладнання), призначений для виготовлення тришарової полімерної плівки, що складається з двох шарів традиційних полімерів і одного шару, модифікованого нанодобавками. У цьому розділі представлено аналіз умов праці працівників у виробничому цеху площею $S = 1000 \text{ м}^2$ та об'ємом $V = 4000 \text{ м}^3$ під час процесу виготовлення багатошарової плівки.

До потенційно шкідливих і небезпечних факторів виробничого середовища належать:

- неочищене повітря або відхилення від нормативних показників у робочій зоні;
- недостатній рівень промислового освітлення;
- можливість ураження електричним струмом;
- ризики виникнення пожежних ситуацій;
- дія рухомих або обертових частин механізмів і переміщуваних матеріалів на працівника;
- виробничий шум, рівень якого перевищує встановлені санітарні норми.

4.1 Повітря робочої зони

У виробничому приміщенні працюють два оператори, які здійснюють контроль і нагляд за роботою всієї лінії виготовлення багатошарової плівки.

Оскільки виробничий комплекс має значні габарити та протяжність, діяльність операторів класифікується як фізична праця середньої тяжкості згідно з діючими нормативами. Зокрема, відповідно до ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони», виконувані роботи належать до категорії Па, яка характеризується енерговитратами у межах 176–232 Вт (151–200 ккал/год). Такий тип діяльності включає ходіння, перенесення легких предметів, роботу у положенні стоячи або сидячи та вимагає помірного фізичного навантаження.

Якість повітря в зоні робочих місць має відповідати встановленим нормам безпеки та гігієни праці, що визначені як українським законодавством, так і міжнародними стандартами. Систематичний моніторинг показників мікроклімату (температура, вологість, швидкість руху повітря) є обов'язковою умовою для забезпечення комфортних і безпечних умов праці. Для підтримання нормативних параметрів у теплий період року застосовується витяжна вентиляційна система, що забезпечує оперативне видалення пилу, випарів та інших шкідливих домішок із робочої зони. У холодний період експлуатується система опалення й кондиціонування, яка регулює температуру та рівень вологості.

У табл. 4.1 наведено порівняння нормативних і фактичних параметрів мікроклімату згідно з ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», де детально відображені показники для категорії робіт Па у холодний і теплий періоди року.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату виробничного приміщення

Період року	Категорія робіт	Температура, °C		Відносна вологість, %		Швидкість руху, м/с	
		Оптимальна	Фактична	Оптимальна	Фактична	Оптимальна	Фактична
Холодний	Па	19-21	19	40-60	45-55	0,2	0,2
Теплий	Па	21-23	22	40-60	45-55	0,3	0,3

Вимірювання показників повітря у виробничій зоні свідчать, що фактичні значення знаходяться в межах нормативних і відповідають оптимальним умовам. Окрім заходів щодо вентиляції й опалення, працівникам рекомендовано використовувати засоби індивідуального захисту органів дихання (респіратори або протигази), особливо під час технічного обслуговування обладнання чи у випадках аварійних ситуацій для мінімізації впливу шкідливих речовин.

Для додаткового контролю рекомендується використовувати сучасні системи моніторингу якості повітря з можливістю автоматичного збору даних, що дозволяє оперативно реагувати на будь-які відхилення від нормативів.

4.2 Промислове освітлення

Освітлення виробничих приміщень є одним із ключових чинників, що забезпечують безпечні та ефективні умови праці. Якісне промислове освітлення сприяє підвищенню продуктивності працівників, зменшує ризики виробничого травматизму та запобігає виникненню дефектів продукції. Освітлення може бути природним, штучним або комбінованим. У денний час приміщення виробничого цеху освітлюється за рахунок природного бокового світла, що надходить через віконні прорізи. Це дозволяє зменшити витрати електроенергії та створює сприятливе середовище для працівників.

Робоча зона повинна бути достатньо освітлена для зниження зорового навантаження операторів, що особливо важливо при роботі з точним обладнанням та контрольними приладами. Неналежний рівень освітленості може стати причиною підвищеної втоми, помилок під час виконання завдань, а це, у свою чергу, підвищує ризик аварійних ситуацій або псування виробу та обладнання.

Згідно з чинними нормами, рівень освітлення виробничих приміщень має відповідати нормативним значенням, встановленим у ДБН В.2.5-28:2018

«Природне і штучне освітлення». Для даного виробництва рекомендований нормативний рівень освітленості становить $E_n = 200$ лк (люксів), що забезпечує комфортні умови праці при виконанні завдань середньої складності.

Для забезпечення належного штучного освітлення обрано лампу EVRO-EB-100-03 6400K, яка має такі характеристики:

- товщина корпусу – $h = 90$ мм,
- ширина – $b = 295$ мм,
- довжина – $a = 295$ мм,
- кількість ламп у приміщенні – $n = 50$ шт.,
- світловий потік однієї лампи – $\Phi = 10000$ лм.

Освітленість (E) в люксах (лк) розраховується за формулою:

$$E = \frac{\Phi \cdot N \cdot U_f \cdot M_f}{S} = \frac{10000 \cdot 50 \cdot 0,5 \cdot 0,8}{1000} = 200 \text{ лк,}$$

де U_f – коефіцієнт використання світлового потоку (залежить від типу приміщення, кольору стін тощо), M_f – коефіцієнт запасу (враховує старіння ламп і забруднення; типово 0.8–0.9), S – площа освітлюваної поверхні (м^2).

Фактичний рівень освітленості в робочій зоні становить $E_{\text{факт}} = 200$ лк, що повністю відповідає нормативним вимогам. Система освітлення розташована рівномірно по периметру цеху, забезпечуючи якісне освітлення кожної ділянки виробництва. Освітлювальні прилади мають клас захисту IP65, що гарантує їхню стійкість до пилу та вологи – це особливо важливо у виробничих умовах із підвищеною запиленістю або вологою.

Крім того, для підвищення енергоефективності та зручності експлуатації рекомендовано встановити автоматизовану систему керування освітленням із можливістю регулювання яскравості залежно від часу доби та наявності природного світла.

4.3 Електробезпека

Виробнича лінія для виготовлення тришарової плівки, яка складається з двох звичайних полімерів та одного наномодифікованого, розміщується у відповідному сухому приміщенні з дотриманням оптимальних показників температури та вологості в процесі експлуатації. Згідно з вимогами ПУЕ-2017 (Правила улаштування електроустановок), дане приміщення класифікується як таке, що має підвищену електробезпеку, оскільки до складу обладнання входить три черв'ячні преси – обладнання, що належить до категорії з підвищеним ризиком через потужність і тип приводу.

Технологічна лінія живиться від трифазної мережі з напругою $U = 220 \dots 380$ В та частотою $f = 50$ Гц, що відповідає стандартам промислових електромереж. Рекомендовано використання мережі з ізольованою нейтраллю для додаткової безпеки.

Серед потенційних ризиків ураження електричним струмом можна виділити:

- пошкодження або зношування ізоляції кабелів і випадковий контакт із ними;
- неправильне підключення або запуск обладнання;
- дотик до відкритих токопровідних частин під час експлуатації чи обслуговування;
- підвищена вологість середовища, що може спричинити пробой ізоляції;
- коротке замикання через дефекти електричних компонентів або помилки в експлуатації.

Щоб мінімізувати ризик електротравм, обов'язковим є впровадження комплексу заходів безпеки:

- проведення регулярних інструктажів і навчання персоналу щодо правил безпечного користування електрообладнанням, а також обов'язкове ознайомлення з технічними паспортами й інструкціями до кожного агрегату;

- своєчасний огляд та ремонт електропроводки і заміна кабелів із пошкодженою ізоляцією;
- застосування захисного заземлення всіх металевих частин, що можуть опинитися під напругою у разі пошкодження ізоляції;
- використання діелектричних засобів індивідуального захисту (рукавичок, гумових килимків) під час робіт з підвищеним ризиком;
- дотримання принципу відключення обладнання від мережі перед виконанням будь-яких ремонтних або налагоджувальних робіт;
- регулярне тестування систем автоматичного вимкнення живлення при замиканнях або інших аварійних ситуаціях;
- уникання використання обладнання у вологому стані та забезпечення додаткового захисту (IP65 та вище) в умовах підвищеної вологості;
- встановлення систем аварійного відключення напруги, доступних персоналу.

Наголошується, що будь-які спроби ремонту чи огляду обладнання під напругою є суворо забороненими. Крім того, під час роботи всі агрегати повинні бути під постійним наглядом кваліфікованого оператора для своєчасного реагування на будь-які позаштатні ситуації.

4.4 Пожежна безпека

Приміщення, у якому розташовані три екструдери моделі ЧП 45x25 разом з іншими пристроями технологічної лінії, відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016 класифікується як об'єкт категорії пожежної небезпеки В. Згідно з ПУЕ, пожежонебезпечна зона віднесена до класу П-Па, що означає наявність твердих горючих матеріалів, пилу або волокон, що здатні займатися при певних умовах. Будівля має II ступінь вогнестійкості відповідно до норм ДБН В.1.1-7:2016, що визначає вимоги до конструкцій і матеріалів для обмеження поширення пожежі.

Особлива увага приділяється використанню полімерів і наномодифікаторів, які за своєю природою можуть бути горючими або сприяти розповсюдженню вогню. Це значно підвищує пожежну небезпеку виробництва, тому суворе дотримання правил пожежної безпеки є критично важливим.

Основні потенційні причини виникнення пожеж:

- коротке замикання в електромережах;
- несправність або перегрів електроприладів;
- витік розплавлених полімерних матеріалів;
- пошкодження електрокабелів або контакт з відкритими токопровідними частинами;
- накопичення пилу та його займання.

Для запобігання пожежам передбачені як конструктивні, так і організаційні заходи:

- використання матеріалів з високою вогнестійкістю для обшивки і корпусів обладнання;
- облаштування систем охолодження для вузлів, що піддаються сильному нагріванню;
- регулярний технічний огляд і обслуговування електрообладнання;
- заземлення і встановлення автоматичних систем аварійного вимкнення;
- ущільнення місць виходу кабелів і стиків обладнання для мінімізації ризику займання;
- організація тепловідведення для уникнення перегріву.

У випадку локалізованих осередків займання передбачено використання таких засобів пожежогасіння:

- вуглекислотні вогнегасники ОУ-5 у кількості 8 одиниць для боротьби з електричними пожежами та загоряннями обладнання при його знеструмленні;

- порошкові вогнегасники ОП-10 (16 одиниць) для гасіння як електрообладнання під напругою, так і горючих полімерних матеріалів;
- додатково цех обладнаний автоматичною системою порошкового пожежогасіння на основі ACD2-GTC, що дозволяє локалізувати займання ще до прибуття персоналу.

Відповідно до вимог СНіП 2.09.02-85, виробниче приміщення обладнане принаймні двома евакуаційними виходами, що забезпечують швидку і безпечну евакуацію у випадку надзвичайної ситуації. Усі агрегати розташовані на першому поверсі, що спрощує процедури евакуації. Мінімальна ширина евакуаційних шляхів становить не менше 1 метра, а дверні прорізи на маршруті мають ширину щонайменше 0,8 м, що відповідає сучасним вимогам безпеки.

Важливою частиною протипожежного захисту є наявність автоматичної системи оповіщення та сигналізації, що включає звукові і світлові сигнали, а також мережу датчиків виявлення диму і температурних змін, що дозволяє працівникам швидко дізнатися про пожежу ще на ранній стадії та своєчасно залишити приміщення.

4.5 Небезпека від впливу частин, що рухаються або обертаються

У складі технологічної лінії для виробництва тришарової плівки з наномодифікованим середнім шаром наявні різні рухомі та обертові частини, такі як: муфти, черв'ячні передачі, підшипники, вентилятори, валки, ролики та інші механізми. Рухомі елементи становлять серйозну загрозу для життя і здоров'я працівників, зокрема небезпеку травматизму при випадковому контакті з обертовими або поступально рухомими деталями.

Відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 12100:2014 («Безпечність машин. Загальні принципи конструювання. Оцінювання ризику і зниження ризику»), всі такі частини повинні бути оснащені засобами активного та пасивного

захисту. Основним заходом є встановлення суцільних огорожень, які фізично унеможливлюють доступ до небезпечних зон під час роботи обладнання.

У випадках, коли контроль за процесом вимагає візуального доступу, допускається використання сітчастих або прозорих огорожень (наприклад, з полікарбонатних панелей), що відповідають критеріям міцності і безпеки. Таке рішення можливе лише у разі, якщо забезпечено достатній рівень захисту відповідно до технічних норм та проведена відповідна оцінка ризиків.

Експлуатація технологічної лінії без установлених огорожень категорично заборонена, оскільки контакт з рухомими частинами може призвести до серйозних травм – від порізів і забоїв до ампутації кінцівок.

Крім фізичних бар'єрів, на підприємстві впроваджуються такі заходи безпеки:

- проведення регулярних інструктажів та навчань працівників щодо безпечної експлуатації обладнання;
- обов'язкове використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) під час обслуговування та ремонту обладнання;
- встановлення сигнальних табличок і маркування небезпечних зон;
- організація планових технічних оглядів і своєчасна заміна пошкоджених або зношених частин огороження;
- обладнання систем аварійного зупинення з легкодоступними кнопками екстреного вимкнення.

Відповідно до рекомендацій ISO 13857:2019 («Безпечність машин. Відстані для запобігання доступу верхніми та нижніми кінцівками до небезпечних зон»), розміри отворів в сітчастих огороженнях мають бути підібрані таким чином, щоб унеможливити проникнення пальців, кисті або інших частин тіла у небезпечну зону.

Особливий акцент робиться на культурі безпеки праці: кожен працівник повинен розуміти потенційні ризики і діяти відповідно до затверджених

інструкцій, оскільки лише комплексний підхід до безпеки дозволяє мінімізувати ризики травмування.

4.6 Виробничий шум

Основними джерелами шуму у виробничому процесі виготовлення тришарової плівки є електродвигуни, редуктори, а також допоміжні системи, зокрема система охолодження, яка запобігає перегріванню технологічного обладнання та знижує ризик виникнення пожежі або аварійних ситуацій. Додаткові джерела шуму можуть включати вентилятори, привідні ремені та інші обертові чи рухомі частини лінії.

Відповідно до ДСН 3.3.6.037-99 «Державні санітарні норми виробничого шуму», рівень шуму на постійних робочих місцях не повинен перевищувати допустимі значення: для виробничих приміщень, де шум має постійний характер, рівень звукового тиску не повинен перевищувати 80 дБА при 8-годинному робочому дні.

Перевищення допустимих норм шуму має негативний вплив на здоров'я працівників і може призводити до наступних наслідків:

- погіршення слуху (до розвитку професійної глухоти);
- головний біль, підвищена стомлюваність;
- уповільнення реакції та зниження уваги;
- підвищений ризик травмування або аварій через неуважність;
- погіршення якості продукції через зниження концентрації працівників.

Наприклад, шум одного екструдера ЧП 45х25 у процесі роботи може сягати 90–100 дБА, що перевищує допустимі значення. З метою приведення виробничого середовища до нормативних умов передбачено впровадження комплексу технічних і організаційних заходів:

- застосування шумозаглушувальних кожухів на найбільш гучних вузлах;

- своєчасна технічна профілактика, зокрема змазування деталей, перевірка та заміна зношених частин, що можуть спричиняти додатковий шум;
- впровадження акустичних бар'єрів або звукопоглинаючих панелей на стінах виробничих приміщень;
- автоматизація процесів, що дозволяє обмежити постійну присутність людей біля шумних машин;
- використання індивідуальних засобів захисту слуху (протишумові навушники, вкладиші) працівниками, що працюють у зоні з підвищеним рівнем шуму.

Завдяки зазначеним заходам рівень шуму можна знизити до 70–80 дБА, що відповідає нормативам для безпечної тривалої роботи. Також рекомендовано регулярно здійснювати шумові аудити та контроль санітарних умов у приміщенні за допомогою сертифікованого шумоміра.

Відповідно до оновлених норм, на які варто орієнтуватися також, наприклад ДСТУ ISO 9612:2021 «Акустика. Оцінювання впливу шуму на людину на робочих місцях», додаткову увагу приділяють персоналізованим оцінкам впливу шуму на конкретних працівників, що є актуальним для високоризикових об'єктів.

Висновки до розділу 4

У розділі охорони праці магістерської дисертації детально проаналізовано умови праці на виробництві багатошарової наномодифікованої полімерної плівки. Встановлено, що робочі місця забезпечені необхідними заходами безпеки відповідно до чинного законодавства та нормативів. Параметри мікроклімату, рівень промислового освітлення та організація електробезпеки відповідають встановленим стандартам, що підтверджує безпечність умов для операторів екструзійного обладнання.

Особливу увагу приділено дотриманню вимог до якості повітря, організації вентиляції, освітлення та використанню засобів індивідуального захисту. Застосування сучасних систем моніторингу та автоматизації сприяє зменшенню виробничих ризиків, підвищенню ефективності праці й збереженню здоров'я працівників. Таким чином, умови праці в цеху відповідають принципам безпечного виробничого середовища та є прикладом впровадження сучасного підходу до охорони праці.

5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

5.1 Опис ідеї продукту

Коли сучасність не стоїть на місці та вимагає підвищених вимог до функціональності й довговічності матеріалів особливого значення набуває створення інноваційних рішень для захисного, спортивного та військового одягу. Споживачі очікують від таких матеріалів не лише легкості й комфорту, а й виняткової міцності, стійкості до впливу навколишнього середовища, збереження властивостей у екстремальних умовах. Одним із перспективних підходів для досягнення цих вимог є застосування наномодифікації полімерних матеріалів, зокрема — у вигляді багат шарових плівок із надміцними властивостями.

Стартап-проект NanoUAWear (рисуюнок 5.1) компанії NanoModiUA Company (NMUAC) (рисуюнок 5.2) присвячений розробці та впровадженню інноваційних надміцних багат шарових плівкових матеріалів для спортивного та військового одягу, в яких середній шар модифікований нанонаповнювачами. Використання наноматеріалів, таких як вуглецеві нанотрубки, графен, наночастки кремнезему чи глинозему, дозволяє суттєво підвищити механічні характеристики, водо- та повітронепроникність, стійкість до стирання, ультрафіолетового випромінювання й агресивних середовищ.



Рисуюнок 5.1 – Логотип стартап-проекту



Рисуюнок 5.2 – Логотип компанії

Основна ідея та головна відмінність від існуючих аналогів і замінників полягає у створенні багатошарової плівки, де:

- **зовнішній шар** виконує захисну функцію, забезпечуючи опір стиранню, ультрафіолетовому випромінюванню, вологі й хімічним реагентам;
- **середній наномодифікований шар** формує ядро конструкції, значно підвищуючи міцність, стійкість до розтягування та розриву, забезпечує ефективне розсіювання навантажень;
- **внутрішній шар** відповідає за комфорт користувача, волого- та паропроникність, а також взаємодію матеріалу зі шкірою або підкладкою.

Нанонаповнювачі, такі як вуглецеві нанотрубки, графен, наночастки оксиду кремнію чи оксиду алюмінію, демонструють високу ефективність у зміцненні полімерних матриць завдяки утворенню міцної міжфазної взаємодії та зміни мікроструктури полімеру. За допомогою цього багатошарові плівки NanoUAWear можуть надавати матеріалам такі характеристики, як підвищена ударостійкість, гнучкість, зносостійкість, термостабільність та збереження цілісності навіть під час значних деформацій.

Метою даного стартап-проекту є розробка інноваційної технології виготовлення багатошарових плівок для спортивного, військового та захисного одягу, що поєднує комп'ютерне моделювання, лабораторні дослідження та оптимізацію режимів виробництва. Такий підхід дозволить прогнозувати вплив наномодифікації на властивості матеріалу, мінімізувати витрати ресурсів і часу, а також забезпечити масштабованість технології для масового виробництва.

Областями застосування NanoUAWear можуть бути спортивний одяг та екіпірування (наприклад, ультралегкі куртки, вітрівки, наколінники, налокітники, захисні вставки у взутті й аксесуарах тощо), військовий та тактичний одяг (наприклад, бронежилети, комбінезони, чохли, шоломи, намети тощо), промисловий спецодяг (наприклад, захисні костюми для

хімічної, нафтохімічної, гірничої промисловості, костюми пожежників, рятувальників) та туристичне спорядження (наприклад, рюкзаки, намети, тенти, спальні мішки, каремати, що потребують максимальної міцності при мінімальній вазі).

Серед вигод, якщо оцінювати загалом, а не окремо в кожній області застосування, наявні такі, як:

- збільшення строку служби одягу та екіпірування;
- зменшення ваги виробів при збереженні або навіть підвищенні захисних властивостей;
- покращення ергономіки й комфорту користування;
- зниження витрат на обслуговування та ремонт;
- екологічність — використання мінімальної кількості наноматеріалів без шкоди для навколишнього середовища.

Завдяки синергії нанонаповнювачів і багат шарової структури матеріалів NanoUAWear, стає можливим розширення сфери застосування плівок, а також відкривається шлях до виробництва нового покоління «розумних» матеріалів. Зокрема, перспективними є дослідження щодо додавання сенсорних або терморегулюючих компонентів, що дозволить створювати інтерактивні матеріали для військового та спортивного одягу.

Таким чином, стартап-проект NanoUAWear має потенціал стати лідером ринку інноваційних матеріалів завдяки унікальній комбінації високої механічної міцності, легкості, функціональності та адаптивності до потреб різних галузей.

Для виконання цієї роботи було застосовано матеріали з методичних вказівок [51, 52].

Зміст ідеї, її напрямки застосування та вигоди для кінцевого користувача в кожній з галузей надано в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Запуск виробництва багатошарових полімерних плівок з наномодифікованим середнім шаром для спортивного, військового та захисного одягу з підвищеними експлуатаційними характеристиками.	Спортивний одяг та екіпірування (куртки, налокітники, рюкзаки)	Зменшення ваги екіпірування, підвищення еластичності, збільшення зносостійкості, комфорт при носінні, краща вентиляція.
	Військовий та тактичний одяг (бронежилети, комбінезони, шоломи)	Підвищена ударостійкість, захист від порізів і проколів, стабільність при екстремальних температурах, легкість пересування, зниження навантаження на солдата.
	Промисловий спецодяг (пожежні костюми, захисні костюми для хімічної промисловості)	Термостійкість, захист від агресивних хімічних середовищ, підвищена механічна міцність, безпека працівника, довший термін служби спецодягу.
	Туристичне спорядження (намети, спальні мішки, тенти)	Зменшення ваги спорядження, підвищення водонепроникності, захист від поривів вітру й дощу, компактність при транспортуванні, довговічність.

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів та включає в себе [51, 52]:

- визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;

- визначення попереднього кола конкурентів та збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
- проводиться порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Визначення слабких та сильних, нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Характеристика ідеї	Потенційні конкуренти				W	N	S
		Мій проект (NanoUAWear)	Конкурент 1 (Kevlar by DuPont)	Конкурент 2 (Cordura by Invista)	Конкурент 3 (Gore-Tex)			
1.	Міцність	+	+	+-	-			+
2.	Гнучкість / еластичність	+	-	+-	+			+
3.	Стійкість до вологи	20 000 мм водяного стовпа	10 000 мм водяного стовпа	5 000 мм водяного стовпа	28 000 мм водяного стовпа		+	
4.	Ударостійкість	+	+-	+-	-		+	
5.	Захист від УФ-випромінювання	+	+-	+-	+-			+
6.	Екологічність виробництва	+	-	-	+-			+
7.	Масове виробництво	-	+	+	+	+		
8.	Довговічність (велика кількість циклів прання/зносу)	>1200 циклів прання, >250 000 циклів зносу	>1000 циклів прання, >200 000 циклів зносу	~500–800 прань, ~20 000–50 000 циклів зносу	~700–1000 прань, ~50 000 циклів зносу			+

9.	Стійкість до хімічних агентів	+	+-	-	+-			+
----	-------------------------------	---	----	---	----	--	--	---

Згідно з таблицею 5.2, можна виділити в результаті такі сильні сторони проєкту NanoUAWear, як: висока гнучкість та еластичність, відмінна стійкість до вологи, висока ударостійкість у порівнянні з конкурентами, надійний захист від ультрафіолетового випромінювання, екологічність виробництва, що значно перевершує конкурентів, та поєднання багатьох характеристик (міцність + гнучкість + водостійкість), що рідко зустрічається в існуючих матеріалах. Слабкими сторонами проєкту можна вважати відсутність масового виробництва через те, що технологія є новою та потребує додаткових тестувань та сертифікації.

5.2 Технологічний аудит проєкту

Важливо оцінити, чи можливо здійснити проєкт на основі наявних сьогодні технологій, оскільки від цього значною мірою залежить як успішність реалізації стартапу, так і витрати часу та ресурсів. З цією метою проводиться технологічний аудит, який дозволяє виявити, які саме технології підходять для реалізації проєкту, чи є вони доступними на ринку, чи потребують розробки з нуля або вдосконалення. Враховуючи постійний розвиток технологій, необхідно не лише перевіряти їхню наявність, але й оцінювати їхню адаптивність до конкретних завдань проєкту. Це передбачає аналіз того, як саме можна впровадити існуючі технологічні рішення у виробництво, наскільки вони сумісні з іншими етапами розробки, а також чи є доцільним їх використання без змін. У випадках, коли потрібна модифікація технології, важливо визначити обсяг таких удосконалень, ресурси, які знадобляться, та можливості їхньої реалізації в рамках наявної інфраструктури. Таким чином, технологічний аудит допомагає знизити ризики, пов'язані з технічними обмеженнями, та забезпечити більш раціональне планування етапів розробки та впровадження проєкту.

У таблиці 5.3 наведено аналіз доступних технологій для реалізації ідей проєкту, чи наявна вона та яка її доступність.

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проєкту

№	Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Виробництво надміцних плівкових матеріалів з наномодифікацією	Екструзія багатошарових полімерних плівок з використанням наночастинок (нанокремнезем, наноглини, нанотрубок)	Технологія екструзії є наявною; рецептури з нанодобавкам и потребують оптимізації	Університетські лабораторії, науково-дослідні центри, партнерські виробництва
2	Нанесення захисних покриттів (гідрофобних, антибактеріальних, UV-стійких)	Технології плазмового напилення, хімічного осадження з парової фази (CVD), поверхневої модифікації полімерів	Технології є наявними, потребують адаптації до конкретного полімеру	Доступні через співпрацю з НДІ та спеціалізованими компаніями
3	Масштабування виробництва для промислових потреб	Лінії промислової екструзії, ламінації, контролю якості	Є наявними, потребують налаштування під новий продукт	Потребує залучення промислових партнерів та інвесторів
Обрана технологія реалізації ідеї проєкту: Екструзія багатошарових полімерних плівок з використанням наночастинок				

За результатами аналізу таблиці вище встановлено, що технологічна реалізація проєкту NanoUAWear є можливою. Серед розглянутих технологій найбільш доцільним на початковому етапі є використання технології екструзії багатошарових полімерних плівок з нанодобавками, оскільки ця технологія є наявною на ринку, частково доступною авторам проєкту (через лабораторне

обладнання університету), а також має високу адаптивність до масштабування на промисловий рівень за умови залучення партнерів. Інші технології, такі як нанесення захисних покриттів та промислове масштабування, потребуватимуть додаткової адаптації, співпраці з науково-дослідними установами та промисловими підприємствами.

5.3 Аналіз ринкових можливостей реалізації стартап-проекту

Аналіз ринкових можливостей є ключовим етапом підготовки стартап-проекту до ринкового впровадження, оскільки дозволяє оцінити як потенціал зростання, так і ризики, з якими може зіткнутися команда розробників. Визначення ринкових можливостей, які можна використати для розвитку проекту, а також ринкових загроз, що можуть перешкодити його реалізації, дає змогу сформулювати обґрунтовану стратегію просування продукту, враховуючи стан ринкового середовища, потреби потенційних клієнтів і конкурентну ситуацію.

Стартап-проект NanoUAWear орієнтований на створення інноваційних надміцних багатошарових плівкових матеріалів з наномодифікованим середнім шаром для спортивного та військового одягу. Завдяки використанню нанотехнологій, ці матеріали поєднують високу міцність, гнучкість, ударостійкість, волого- та UV-стійкість, що робить їх конкурентоспроможними як на внутрішньому, так і на міжнародному ринку.

В Україні існує значний попит на високоякісний військовий та спеціальний одяг, зокрема з урахуванням потреб Збройних Сил України, силових структур, рятувальників, а також на ринку спортивного екіпірування. З огляду на триваючі військові дії, реформи в оборонній промисловості та розширення внутрішнього виробництва, попит на інноваційні матеріали в оборонному секторі продовжує зростати. Паралельно зростає сегмент цивільного спортивного ринку: Україна поступово наближається до

європейських трендів зі зростанням популярності активного способу життя, бігу, велоспорту, туризму.

Крім того, Україна має низку конкурентних переваг: розвинену наукову базу, доступ до сировини, потужності легкої промисловості та зростаючий попит на локальні високотехнологічні розробки. Водночас існують виклики: потреба у відповідності європейським стандартам, проходженні сертифікацій, складнощі з доступом до інвестицій і певні регуляторні бар'єри.

Таким чином, перед запуском проекту важливо провести всебічний аналіз ринку, зокрема визначити: обсяги попиту, кількість гравців, динаміку розвитку ринку, наявність обмежень для входу, специфічні стандарти та очікувану рентабельність. Це дозволить обґрунтовано оцінити доцільність комерційного впровадження проекту NanoUAWear в Україні та сформувану ефективну стратегію виходу на ринок. Для цього наведено характеристику стану ринку в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од.	5–7 основних гравців ринку високотехнологічних текстильних матеріалів (DuPont, Invista, Gore та інші)
2	Загальний обсяг продаж	≈1,5–2 млрд USD на рік у світовому масштабі (≈60–80 млрд грн)
3	Динаміка ринку	Зростає (~5–7% на рік)
4	Наявність обмежень для входу	Високий поріг науково-дослідних робіт (R&D), необхідність патентного захисту, обов'язкова сертифікація за стандартами ISO, ASTM, військовими стандартами

5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Тестування на розрив, стійкість до проколів, водонепроникність, захист від ультрафіолету, екологічні сертифікати
6	Середня норма рентабельності	12–20%

Ринок для впровадження стартапу NanoUAWear є привабливим для входження. Причини наступні:

- ринок демонструє сталу тенденцію зростання (приблизно 5–7% на рік),
- обсяг ринку є значним і має перспективи подальшого розширення ($\approx 1,5$ –2 млрд USD на рік),
- середня рентабельність у галузі (12–20%) перевищує прибутковість банківських інвестицій (~ 5 –7%), що свідчить про інвестиційну привабливість,
- хоча на ринку існують обмеження для входу — високий рівень НДДКР, патенти, сертифікаційні бар'єри — команда проєкту володіє необхідним науковим потенціалом та має доступ до партнерських мереж, що дає змогу ефективно впровадити продукт.

Таким чином, проєкт NanoUAWear має високий потенціал комерційного успіху, особливо за умови правильної R&D-стратегії, маркетингової підтримки та побудови партнерських відносин із виробниками спорядження та військової екіпіровки.

Важливо визначити характеристики потенційних клієнтів стартап-проєкту задля подальшого розвитку. Серед таких характеристик потрібно розуміти, чи є потреба в такому проєкті та виробі, яка його цільова аудиторія, які є відмінності в потребах кожної з груп цільової аудиторії та їхні вимоги (таблиця 5.5).

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Надійний захист під час бойових операцій та тренувань	Збройні Сили України (інших країн), спецпідрозділи, силові структури	Високі вимоги до стандартів НАТО, обов'язкова сертифікація; купівля централізовано через державні закупівлі; важлива зносостійкість та гарантія	Максимальна міцність, ударостійкість, вологостійкість, легкість, стійкість до УФ, відповідність військовим стандартам, гарантія виробника
2	Надійний захист для рятувальників та пожежників	Державна служба з надзвичайних ситуацій, муніципальні служби	Важливість сертифікації по ДСТУ, пожежо- та термостійкість; часто закупівлі через тендери; важливий сервіс постачальника та післяпродажне обслуговування	Висока термостійкість, захист від вологи, зносостійкість, ергономічність, легка вага, можливість ремонту або заміни окремих частин
3	Екіпірування для екстремальних видів спорту та туризму	Виробники спортивного одягу, ритейлери outdoor-екіпірування, спортсмени-аматори та професіонали	Орієнтація на брендові рішення, важлива естетика, комфорт, технічні характеристики;	Гнучкість, легкість, вологостійкість, дихаючі властивості, захист від ультрафіолету, сучасний

			чутливість до ціни; рішення про купівлю часто приймаються споживачами самостійно	дизайн, гарантія на кілька років
4	Спеціальний одяг для промисловості	Гірничодобувні, металургійні компанії, будівельні компанії	Важливість відповідності технічним регламентам, сертифікація промислової безпеки; закупівлі централізовано; велике значення мають термін служби та можливість масового постачання	Вогнестійкість, зносостійкість, стійкість до агресивних середовищ, висока міцність, можливість кастомізації під конкретні виробничі потреби

Проект NanoWear має хороші перспективи на українському ринку, оскільки охоплює кілька важливих і зростаючих сегментів. Основними споживачами можуть стати військові та силові структури, рятувальні служби, спортсмени й туристи, промислові компанії, а також екологічно орієнтовані споживачі. Попит на продукт формують ключові потреби, такі як захист життя та здоров'я, комфорт під час роботи або активності у складних умовах, дотримання екологічних стандартів, а також підвищення продуктивності й безпеки праці.

Цільові групи споживачів мають свої особливості. Військові та рятувальники висувають найвищі вимоги до стандартів якості та надійності. Спортсмени й туристи акцентують увагу на комфорті, легкості та ергономіці виробів. Промислові компанії зацікавлені у довговічності, захисті від механічних пошкоджень та впливу навколишнього середовища.

Екоорієнтовані споживачі очікують високого рівня екологічності виробництва та використаних матеріалів.

Основні вимоги до продукту включають високу міцність, легкість, стійкість до вологи й ударів, відповідність українським та міжнародним стандартам, а також екологічність виробництва.

Отже, український ринок є привабливим для впровадження стартапу NanoWear. Водночас, завдяки універсальності продукту та глобальному попиту на інноваційні захисні матеріали, міжнародний ринок також є перспективним для масштабування проекту. Важливо врахувати вимоги кожної цільової групи, пройти сертифікацію за національними й міжнародними стандартами та вибудувати довіру через співпрацю з авторитетними замовниками й пілотні проєкти.

Перед виходом на ринок важливо не лише оцінити попит і характеристики клієнтів, а й провести аналіз зовнішнього середовища, яке може впливати на успішність впровадження проекту. Такий аналіз дозволяє виявити як загрози, які можуть перешкоджати реалізації проекту, так і можливості, які здатні посилити його конкурентні переваги. У таблиці 5.6 наведено основні фактори загроз, що стосуються як внутрішнього (українського), так і міжнародного ринку, їхній зміст та можливі реакції компанії.

Таблиця 5.6 – Фактори загрози

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Високі витрати на сертифікацію	Необхідність сертифікації за міжнародними стандартами збільшує витрати	Передбачити бюджет на сертифікацію, шукати гранти.
2	Конкуренція зі світовими брендами	Конкуренти мають впізнаваність, довіру й маркетингові ресурси.	Сконцентруватися на нішах та унікальних властивостях

3	Залежність від імпорту сировини	Частина сировини може імпортуватися, що підвищує ризики логістики та цін.	Знайти кількох постачальників, розвивати локальні ланцюги.
4	Нестабільність української економіки через воєнні дії	Валютні коливання, нестабільність ринку.	Диверсифікувати ринки збуту, виходити на експорт.
5	Складність у залученні інвестицій	Високий рівень ризику може стримувати інвесторів.	Показати пілотні результати, брати участь у акселераторах.

Аналіз загроз показує, що основними викликами для проекту є висока конкуренція, коливання цін на сировину та необхідність сертифікації продукції, проте завдяки гнучкості стратегії та проактивному управлінню ризиками компанія має можливість успішно подолати ці бар'єри.

Окрім аналізу загроз, важливо також визначити ринкові можливості, які можуть сприяти успішному впровадженню проекту. Такі можливості створюють передумови для зростання, зміцнення конкурентних позицій та розширення ринку збуту. У таблиці 5.7 наведено основні фактори можливостей, їхній зміст та можливі дії компанії для ефективного використання цих можливостей.

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання попиту на захисні матеріали	Попит зростає як серед військових, так і в спортивній та промисловій галузях.	Активна робота з військовими, спортивними брендами.
2	Підтримка інноваційних проектів	Державні та міжнародні гранти, акселераційні програми.	Подаватися на гранти, шукати партнерів-інвесторів
3	Експортний потенціал	Вихід на ринки ЄС, США, Азії.	Пройти міжнародну сертифікацію, знайти дилерів за кордоном.

4	Нішевий характер продукту	NanoUAWear має унікальні властивості, що відрізняють його від масових рішень.	Акцентувати унікальні переваги в маркетинговій стратегії.
5	Еко-тренд	Зростання попиту на екологічні рішення у текстильній промисловості.	Просувати екологічність як конкурентну перевагу.

Аналіз факторів можливостей свідчить, що проєкт NanoUAWear має значний потенціал для успішного виходу на ринок завдяки зростаючому попиту на високотехнологічні матеріали як у спортивній, так і у військовій галузях. Додатковими можливостями є розширення ринків збуту, зокрема за межами України, можливість залучення міжнародних партнерів та інвесторів, а також інтеграція у глобальні ланцюги постачання. Використання цих можливостей дозволить не лише підвищити конкурентоспроможність продукту, а й забезпечить стійке зростання компанії на перспективних ринках.

Для повного розуміння ринкової ситуації та визначення шансів успішного впровадження стартап-проєкту NanoWear важливо провести аналіз конкурентного середовища (таблиця 5.8). Такий аналіз дає змогу оцінити основні риси конкуренції на ринку, зрозуміти її структуру та механізми, що впливають на діяльність компанії. Знання про тип конкуренції, рівень боротьби, характер конкурентних переваг та інші аспекти допомагають сформулювати стратегію, яка забезпечить конкурентоспроможність і стійке позиціонування продукту на ринку.

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Тип конкуренції: Олігополія	На ринку зосереджена обмежена кількість великих компаній, але	NanoUAWear може активно використовувати унікальність своїх

	новим бар'єри входу є зависokими.	технологій для досягнення конкурентної переваги.
2. Рівень конкурентної боротьби: Національний	В Україні слабка конкуренція стосовно наномодифікованих плівок для одягу військового, спортивного тощо, щодо міжнародного рівня говорити зарано, оскільки конкуренція там вже кілька десятиків років.	Розширення на міжнародні ринки, створення бренду, маркетингові кампанії для залучення уваги до нових матеріалів.
3. Галузева ознака: Внутрішньогалузева	Конкуренція серед виробників матеріалів для одягу.	Зосередження на унікальних властивостях матеріалів, таких як наномодифікація, для диференціації від конкурентів.
4. Конкуренція за видами товарів: Товарно-видова	Конкуренція в сегменті спортивного та військового одягу тощо.	Акцент на розробку матеріалів для спеціалізованого одягу, що підвищує міцність і зносостійкість, використовуючи нанотехнології.
5. Характер конкурентних переваг: Нецінова	Головний акцент на якість виготовленого матеріалу, його інновації.	Інвестування в R&D для підвищення властивостей матеріалів, забезпечення високої якості та довговічності продукції.
6. Інтенсивність конкуренції: Не марочна	Бренд не є основним фактором, а конкуренція зводиться до ціни, функціональності чи інших об'єктивних характеристик товару чи послуги.	Створення сильного бренду через використання передових технологій, розробка унікальних пропозицій для конкретних галузей.

Аналіз конкуренції на ринку показує, що NanoUAWear оперує в умовах олігополії, де кілька великих компаній домінують на ринку, і входження нових

гравців ускладнене. В Україні конкуренція на ринку наномодифікованих плівок для одягу є слабкою, що дає можливість стартапу розвиватися на національному рівні, але для міжнародної експансії потрібно активізувати маркетингові та брендові стратегії. Конкуренція зосереджена в основному серед виробників матеріалів для одягу, тому NanoUAWear має вигідну позицію завдяки своїм інноваційним технологіям наномодифікації, які підвищують міцність та зносостійкість матеріалів. Основна конкурентна перевага — це якість і технологічні інновації, а не ціна. Важливим кроком для успіху буде створення сильного бренду, що зможе диференціювати продукцію і зробити її конкурентоспроможною на ринку, де конкуренція не зосереджена на марці.

Таблиця 5.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Компанії, що виробляють звичайний міцний одяг (DuPont, Invista, Gore та ін), а також компанії, що намагаються вийти на ринок на інноваційності.	Високі бар'єри через технологічну складність виготовлення наномодифікованих матеріалів, необхідність значних інвестицій у дослідження та розробку (R&D), а також патентування технологій. Також важливим бар'єром є потреба в розвитку бренду та	Постачальники сировини для наноматеріалів (наприклад, вуглецеві нанотрубки, графен, оксиди кремнію та алюмінію) мають великий вплив через високу вартість і обмежену кількість	Споживачі можуть диктувати умови через свої вимоги до якості, терміну служби, легкості та комфорту одягу. Оскільки ринок високотехнологічного одягу для спорту та військових потребує спеціалізованих рішень, від споживачів можуть надходити високі вимоги	Заміною для матеріалів NanoUAWear можуть стати традиційні синтетичні матеріали з високою міцністю, що вже використовуються в спортивному та військовому одязі. Інші замінники — це нові технології, які можуть з'явитись у майбутньому

		виведенні нової продукції на ринок, що вимагає значних маркетингових зусиль.	постачальників на ринку. Також важливим фактором є складність у забезпеченні постійної якості матеріалів.	до характеристик матеріалів.	у, такі як біополімери чи інші нові матеріали, що можуть мати кращі властивості або дешевшу вартість.
Висновки:	Інтенсивність конкуренції на ринку серед прямих конкурентів — середня, оскільки компанії з традиційними матеріалами домінують, але наноматеріали ще не стали масовим продуктом.	Бар'єри для входу в ринок високі, але потенціал для інновацій дозволяє зайняти свою нішу. Потенційні конкуренти можуть з'явитися, але для цього необхідні значні інвестиції в наукові дослідження та виробничі потужності.	Постачальники можуть диктувати умови через високу ціну та обмежену кількість постачальників наноматеріалів.	Споживачі можуть вимагати високу якість та інноваційні характеристики, тому важливо спрямувати зусилля на розвиток продукції відповідно до їхніх потреб.	Загроза замінників є помірною, але варто бути готовим до нових технологій, які можуть знизити конкуренцію в галузі.

Аналіз конкуренції за моделлю 5 сил М. Портера показує, що стартап NanoUAWear має значний потенціал на ринку, але стикається з високими бар'єрами входу через технологічну складність та обмежену кількість

постачальників наноматеріалів. Пряма конкуренція на національному рівні є помірною, оскільки ринок наномодифікованих матеріалів для одягу ще не заповнений. Проте загроза від потенційних конкурентів та замінників є реальними, тому важливим завданням є інвестування в інновації, якість та брендинг для забезпечення конкурентних переваг.

Для забезпечення конкурентоспроможності на ринку стартапу NanoUAWear необхідно враховувати ряд факторів, які є критичними при виборі постачальника матеріалів для спортивного та військового одягу, а також спеціалізованих продуктів для інших галузей. З урахуванням попиту на інноваційні, високоякісні та довговічні матеріали, а також характеристик конкурентів, можна виокремити фактори, які впливають на успішність проекту та його позиціонування на ринку. У таблиці 10 наведено основні фактори конкурентоспроможності, що визначають вибір клієнтів між NanoUAWear і конкурентами.

Таблиця 5.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Інноваційність нанотехнологій	Клієнти обирають постачальника, якщо його продукція вирізняється інноваційними характеристиками, яких немає в конкурентів. Висока технологічність і використання наноматеріалів дають можливість виробляти продукцію з унікальними властивостями, такими як надміцність і зносостійкість, що особливо важливо для спеціалізованого спортивного, військового та промислового одягу.
2	Довговічність матеріалів	Споживачі часто віддають перевагу постачальнику, чия продукція довше служить і краще витримує екстремальні умови. Клієнти, що

		потребують високоякісних матеріалів для специфічних умов, будуть обирати продукцію NanoUAWear завдяки використанню висококласних нанонаповнювачів, що забезпечують високі показники міцності, термостабільності та зносостійкості.
3	Нанодиференціація продукції	Ринок спортивного та військового одягу потребує спеціалізованих рішень. Клієнти обирають постачальника, який може запропонувати індивідуально адаптовані продукти. Завдяки різноманіттю застосувань та особливій структурі багатошарових плівок, NanoUAWear має можливість задовольнити потреби різних груп споживачів (спортсмени, військові, промислові робітники).
4	Стійкість до агресивних умов	Для споживачів, що використовують одяг в екстремальних умовах, важливими є характеристики стійкості до хімічних речовин, ультрафіолету, стирання і вологості. NanoUAWear, завдяки своїй інноваційній конструкції, забезпечує високу стійкість до цих факторів, що робить продукцію привабливою для клієнтів, які шукають довговічні та надійні матеріали.
5	Потенціал для масштабування	Клієнти на міжнародному ринку шукають постачальників, здатних забезпечити стабільні обсяги виробництва без втрати якості. Масштабованість технології NanoUAWear дозволяє йому підтримувати постійну якість на великих обсягах виробництва, що важливо для великих компаній і державних замовників.
6	Інвестиції в дослідження та розвиток (R&D)	Споживачі віддають перевагу постачальникам, які постійно інвестують у вдосконалення своєї продукції та впровадження нових технологій. Це дозволяє підтримувати

		актуальність продуктів, відповідно до змінюваних вимог ринку. Інвестування в R&D забезпечує конкурентоспроможність на довгострокову перспективу, що важливо для клієнтів, які прагнуть мати доступ до новітніх технологій.
7	Маркетингова стратегія та брендинг	Вибір постачальника також залежить від довіри до бренду. Клієнти схильні обирати компанії з сильною маркетинговою стратегією, яка підкреслює унікальність продукту. Бренд NanoUAWear, що асоціюється з інноваційністю та високою якістю, допомагає вигравати у конкурентів, оскільки споживачі часто обирають перевіреного постачальника з гарною репутацією.
8	Унікальні властивості матеріалу	Клієнти обирають постачальників, чия продукція має унікальні властивості, що відповідають їхнім специфічним потребам. Багатошарова конструкція плівок NanoUAWear, що поєднує захист, міцність та комфорт, дозволяє задовольнити вимоги до спеціалізованого одягу, надаючи йому перевагу перед конкурентами, що пропонують лише один вид матеріалу.

Таким чином, для успішної конкуренції на ринку NanoUAWear має зосередитися на інноваціях, якості матеріалів, масштабованості виробництва та наданні спеціалізованих рішень для різних сегментів споживачів. Чітке розуміння і використання зазначених факторів дозволить забезпечити перевагу над конкурентами та сприятиме стабільному розвитку проекту в умовах конкурентного середовища.

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 5.10) аналізуються сильні та слабкі сторони стартап-проекту (табл. 5.11).

Таблиця. 5.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів конкурентів – порівнянні з NanoModiUA (NanoUAWear)						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Інноваційність нанотехнологій	19	1,2,3						
2	Довговічність матеріалів	18		2	3	1			
3	Нанодиференціація продукції	20	1,2,3						
4	Стійкість до агресивних умов	15				1,2,3			
5	Потенціал для масштабування	15							1,2,3
6	Інвестиції в дослідження та розвиток (R&D)	12				1,2,3			
7	Маркетингова стратегія та брендинг	10						1	2,3
8	Унікальні властивості матеріалу	20		2	1,3				

1 - Kevlar by DuPont; 2 - Cordura by Invista; 3 - Gore-Tex

Інноваційність нанотехнологій відразу дає великий плюс серед конкурентів, що таке не використовують, а отже споживачам буде цікавіший товар цього проекту. Також сильною стороною є унікальні властивості наномодифікованого матеріалу та нанодиференціація продукції. Але слабкими сторонами залишаються маркетинг, реклама та масштабування, особливо при меншому бюджеті ніж у конкурентів.

Для більш детального розуміння внутрішніх та зовнішніх факторів, що впливають на розвиток стартапу NanoUAWear, проведено SWOT-аналіз, що надано в таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: 1. Висока гнучкість та еластичність; 2. Відмінна стійкість до вологи; 3. Висока ударостійкість у порівнянні з конкурентами; 4. Надійний захист від ультрафіолетового випромінювання; 5. Екологічність виробництва, що значно перевершує конкурентів; 6. Поєднання багатьох характеристик (міцність + гнучкість + водостійкість), що рідко зустрічається в існуючих матеріалах; 7. Інноваційність нанотехнологій, що дозволяє створювати матеріали з унікальними властивостями.	Слабкі сторони: 1. Відсутність масового виробництва; 2. Низький рівень впізнаваності бренду на ринку, порівняно з більш усталеними конкурентами (наприклад, Gore-Tex, Cordura); 3. Обмежений досвід у масштабному виробництві та виході на міжнародні ринки; 4. Високі початкові витрати на дослідження та розробку (R&D), що може вплинути на рентабельність на ранніх етапах; 5. Залежність від зовнішніх постачальників наномодифікованих матеріалів (наприклад, вуглецевих нанотрубок, графену); 6. Технічна складність виробничих процесів та потреба у спеціалізованому обладнанні; 7. Маркетинг, реклама та масштабування
Можливості: 1. Зростаючий попит на високоякісні та функціональні матеріали для спортивного та військового одягу; 2. Розширення на міжнародні ринки,	Загрози: 1. Висока конкуренція з боку вже усталених брендів на ринку, таких як Gore-Tex, Cordura;

зокрема в сегменті високотехнологічного одягу; 3. Зростання зацікавленості в екологічно чистих та інноваційних матеріалах; 4. Співпраця з військовими та урядовими організаціями для постачання спеціалізованого одягу та спорядження; 5. Розвиток нових продуктів та технологій для екстремальних умов (наприклад, для космічної або арктичної діяльності).	2. Економічна нестабільність та потенційне зниження доходів споживачів, що може посилити цінову конкуренцію; 3. Технологічні бар'єри в досягненні високої якості продукції при масовому виробництві; 4. Можливі зміни в регулюванні чи технічних стандартах для матеріалів, що використовуються в одязі та екіпіровці; 5. Невизначеність щодо довгострокових перспектив та швидкості технологічних змін у галузі.
--	---

SWOT-аналіз стартап-проекту NanoUAWear показує, що проект має значний потенціал завдяки інноваційним технологіям та унікальним властивостям матеріалів. Однак є ряд слабких сторін, таких як низька впізнаваність бренду і високі витрати на дослідження та розвиток. З огляду на можливості, важливо фокусуватися на міжнародному розширенні та співпраці з військовими та урядовими організаціями. Проте слід враховувати загрози у вигляді сильної конкуренції та економічних ризиків, що можуть вплинути на розвиток ринку та попит.

На основі попереднього аналізу формується перелік альтернатив у стратегії впровадження у ринок стартап-проекту (таблиця 5.13).

Таблиця 5.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Запуск на національному ринку через партнерства з військовими та спортивними брендами. Включає маркетингову кампанію та технічні тестування матеріалів.	Висока (на основі вже наявних технологій та досліджень).	1-2 роки.
2	Вихід на міжнародні ринки з фокусом на високотехнологічні матеріали для одягу з використанням R&D для покращення властивостей. Включає участь у міжнародних виставках, підготовка до сертифікації.	Середня (необхідні додаткові інвестиції в R&D і маркетинг).	2-3 роки.
3	Співпраця з виробниками спецодягу для хімічної, нафтохімічної та гірничої промисловості. Технічне удосконалення продукту для більш специфічних умов.	Висока (багато потенційних партнерів і потреби в таких матеріалах).	1 рік.
4	Створення віртуального бренду і запуск онлайн-продажів для створення попиту на інноваційні матеріали. Включає активну цифрову маркетингову стратегію.	Середня (залежить від швидкості створення бренду і мережі дистрибуції).	1-1.5 роки.
5	Розробка та виробництво інноваційного одягу для екстремальних умов (наприклад, космічна діяльність, арктичні умови). Стратегічне партнерство з урядами та науковими організаціями.	Низька (потребує значних ресурсів на дослідження та технічну розробку).	3-4 роки.

Обрана альтернатива – запуск на національному ринку через партнерства з військовими та спортивними брендами.

Ця альтернатива є найбільш перспективною, оскільки ймовірність отримання ресурсів висока (завдяки наявним технологіям, партнерам і вже сформованим потребам ринку). Також вона має найбільш стислі строки реалізації (1-2 роки), що дозволяє швидко вийти на ринок і розпочати отримувати перші результати.

5.4 Розроблення ринкової стратегії стартап-проєкту

Першим кроком у розробці ринкової стратегії стартап-проєкту є визначення стратегії охоплення ринку. Це передбачає сегментацію ринку та вибір цільових груп потенційних споживачів для подальшого впровадження продукту. Визначення цільових груп дозволяє компанії точніше спрогнозувати потреби та вимоги споживачів, а також знизити ризики при виході на ринок.

Вибір цільових груп залежить від готовності споживачів сприйняти нові технології, попиту в межах сегменту, інтенсивності конкуренції в кожному сегменті та простоти входу на ринок. Стратегія охоплення ринку може варіюватися в залежності від кількості сегментів, з якими компанія планує працювати, а саме:

- **Концентрований маркетинг** — компанія зосереджується на одному сегменті ринку;
- **Диференційований маркетинг** — компанія працює з кількома сегментами, для кожного з яких розробляється окрема програма ринкового впливу;
- **Масовий маркетинг** — компанія орієнтується на весь ринок, пропонуючи стандартизовану програму.

Нижче наводиться таблиця 5.14, в якій можна описати обрані цільові групи потенційних споживачів та відповідно до цього вибрати стратегію охоплення ринку для стартапу NanoUAWear.

Таблиця 5.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
1	Споживачі спортивного одягу (спортсмени, любителі активного відпочинку)	Висока	Середній	Висока	Середня
2	Військовий сектор (армія, спецпідрозділи, охоронні служби)	Висока	Високий	Середня	Низька
3	Промислові підприємства (хімічні, нафтохімічні, рятувальники)	Середня	Середній	Низька	Низька
4	Туристи та любителі кемпінгу (рюкзак, намети, спортивне спорядження)	Висока	Середній	Середня	Середня
Які цільові групи обрано: 1, 2, 3					

Обрано такі цільові групи потенційних споживачів:

1. Військовий сектор — армія, спецпідрозділи, охоронні структури;
2. Спортивний сектор — виробники одягу та спорядження для екстремальних видів спорту;
3. Туристичний сектор — виробники спорядження для туризму та активного відпочинку.

Для цих груп NanoUAWear використовуватиме **стратегію диференційованого маркетингу**, розробляючи окремі маркетингові програми

під кожен сегмент. Для того, щоби працювати в обраних сегментах ринку потрібно сформуванати базову стратегію розвитку (таблиця 5.15).

Таблиця 5.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкуренто-спроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Вихід на ринок військового, спортивного та туристичного сегментів	Диференційований маркетинг	Інноваційність нанотехнологій, унікальні властивості матеріалів, висока довговічність	Стратегія диференціації

Обрана стратегія розвитку — стратегія диференціації — є найбільш відповідною для стартапу NanoUAWear, оскільки компанія орієнтується на кілька цільових сегментів (спортсмени, туристи, військові) і пропонує продукцію з унікальними, значущими для кожного сегменту характеристиками. Завдяки інноваційним властивостям матеріалів, модифікованих нанонаповнювачами, стартап формує сильні конкурентні переваги та підвищує лояльність споживачів, що є основою успішної реалізації стратегії диференціації. Після цього обирають стратегію конкурентної поведінки, що визначають у таблиці 5.16.

Загалом, обрана стратегія конкурентної поведінки для стартапу NanoUAWear є стратегією лідера, яка фокусується на розширенні первинного попиту та створенні нового ринку через інноваційні продукти та рішення.

Таблиця 5.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	Чи є проект «першопроходцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Так, проект використовує новітні нанотехнології для створення унікальних матеріалів, що дають суттєві конкурентні переваги.	Компанія орієнтована на нових споживачів, зокрема у секторі військових, рятувальників та екстремальних видів спорту.	Компанія не буде копіювати характеристики товару конкурентів, а використовуватиме власні інновації.	Стратегія лідера

Таблиця 5.17 – Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентно-спроможні позиції власного стартап проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
1	Максимальна міцність, ударостійкість, вологостійкість, легкість, стійкість до УФ, відповідність	Диференціація	Унікальна наномодифікація матеріалу; відповідність військовим та НАТО-	«Максимальний захист», «Військові стандарти якості», «Інноваційні нанотехнології»

	військовим стандартам, гарантія.		стандартам; сертифікація	
2	Висока термостійкість, захист від вологи, зносостійкість, ергономічність, легка вага, можливість ремонту або заміни окремих частин	Диференціація	Термостійкі нанопокриття; можливість модульного ремонту; сервісне обслуговування	«Захист у екстремальних умовах», «Термостійкість нового покоління», «Надійність сервісу»
3	Гнучкість, легкість, вологостійкість, дихаючі властивості, захист від ультрафіолету, сучасний дизайн, гарантія на кілька років	Диференціація	Легкі наноматеріали; інноваційний дизайн; багаторічна гарантія	«Легкість та комфорт», «Дизайн майбутнього», «Нанозахист від природи»
4	Вогнестійкість, зносостійкість, стійкість до агресивних середовищ, висока міцність, можливість кастомізації під конкретні потреби	Диференціація	Висока зносостійкість; кастомізація під замовника; захист у промислових умовах	«Захист на виробництві», «Кастомізація під задачу», «Міцність без компромісів»

На основі таблиці 5.17, стратегія позиціонування стартапу NanoUAWear полягає в формуванні унікального образу на ринку завдяки використанню інноваційних наноматеріалів, що забезпечують високі характеристики міцності, ударостійкості, термостійкості, вологостійкості, зносостійкості та захисту від ультрафіолету. Продукти компанії відповідають найвищим міжнародним стандартам, зокрема військовим та НАТО-стандартам, що

дозволяє закріпити позицію на ринку високоякісних захисних матеріалів для екстремальних умов. Вибір асоціацій, таких як «Максимальний захист», «Військові стандарти якості», «Інноваційні нанотехнології», а також акцент на «Захист у екстремальних умовах» і «Термостійкість нового покоління», підкреслює переваги бренду, орієнтуючи споживачів на високий рівень безпеки, надійності та інноваційності. Таким чином, стартап формує сильну конкурентну позицію, акцентуючи увагу на технологічних інноваціях та безпеці, що є важливим для цільових груп, таких як військові, рятувальники, спортсмени та інші професіонали, що працюють в екстремальних умовах.

5.5 Розроблення маркетингової стратегії стартап-проекту

У таблиці 5.18 підсумовуються основні переваги продукту стартап-компанії NanoUAWear, визначені на основі попереднього аналізу конкурентоспроможності товару. Основні потреби споживачів, на які орієнтується товар, це захист, надійність і комфорт в екстремальних умовах. Вигода, яку пропонує товар, полягає в високих технічних характеристиках, таких як ударостійкість, термостійкість, зносостійкість та легкість. Ключові переваги перед конкурентами, які потрібно створити або вже мають місце, включають використання інноваційних наноматеріалів, що забезпечують неперевершену міцність і надійність, відповідність військовим стандартам, а також можливість кастомізації продукту під конкретні потреби клієнтів.

Таблиця 5.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує послуга	Ключові переваги перед конкурентами
1	Захист у екстремальних умовах (ударостійкість, термостійкість)	Висока надійність, захист від механічних пошкоджень та температурних змін	Унікальні наноматеріали, відповідність військовим стандартам, сертифікація

2	Легкість, зручність, вологостійкість	Підвищений комфорт, забезпечення захисту при мінімальній вазі	Інноваційні наноматеріали, що знижують вагу при високих характеристиках міцності
3	Стійкість до ультрафіолетового випромінювання, захист від вологи	Покращена довговічність і захист матеріалів в екстремальних умовах	Наноматеріали з підвищеною стійкістю до УФ та водонепроникності
4	Можливість кастомізації під потреби клієнта	Індивідуальний підхід до кожного замовлення, оптимізація під особисті вимоги	Кастомізація матеріалів для конкретних завдань, широкий спектр варіантів налаштувань

Концепція потенційного товару орієнтована на створення унікального продукту, який пропонує значні конкурентні переваги завдяки використанню інноваційних наноматеріалів. Це дозволяє досягти високих показників міцності, легкості, стійкості до екстремальних умов, а також відповідності військовим і НАТО-стандартам. Ключовими перевагами є ударостійкість, терmostійкість, водо- та ультрафіолетова стійкість, а також можливість кастомізації та надання індивідуальних рішень для клієнтів. Завдяки цим характеристикам товар може зайняти сильні позиції на ринку, пропонуючи унікальне поєднання надійності та інноваційності.

Для уточнення ідеї продукту, його фізичних складових та особливостей процесу його надання, розробляється трирівнева маркетингова модель товару (таблиця 5.19).

Таблиця 5.19 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Потреба у високоякісному, стійкому до агресивних умов одязі для військових і спортсменів. Одяг має бути не тільки міцним, але й легким, комфортним, з високими захисними властивостями, включаючи водо- та повітропроникність, стійкість до ультрафіолетового

	випромінювання та агресивних середовищ. Цей товар також повинний відповідати стандартам якості військової техніки та надавати можливість кастомізації.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	1. Нанозахист матеріалів (ударостійкість, термостійкість, водо- та повітропроникність, зносостійкість); 2. Високий рівень ергономічності та комфорт для тривалого використання; 3. Сертифікація за військовими стандартами та стандартами НАТО.	-	-
	Якість: Висока якість матеріалів, перевірена на відповідність міжнародним стандартам для військового та спортивного одягу.		
	Пакування: Компактне, стійке до пошкоджень, з можливістю багаторазового використання. Підтримує вказівки щодо правильного догляду та експлуатації.		
	Марка: NanoUAWear by NanoModiUA Company		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: рекламні кампанії, участь у виставках та тестування продукту в реальних умовах (військові навчання, спортивні заходи), консультації з фахівцями.		
	Після продажу: підтримка клієнтів, гарантійне та сервісне обслуговування, заміна або ремонт елементів одягу, доступна гаряча лінія.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Патентування інноваційних технологій наномодифікації, захист інтелектуальної власності на матеріали та розробки, унікальність бренду			

Модель товару NanoUAWear включає три основні рівні, що чітко відображають концепцію продукту, його реальне виконання та підкріплення для підтримки конкурентоспроможності на ринку. На першому рівні продукт задовольняє потребу у високоякісному, технологічно інноваційному одязі, який відповідає суворим вимогам до міцності, захисту та комфорту в екстремальних умовах. На другому рівні реалізуються ключові

характеристики, що включають нанотехнології для забезпечення ударостійкості, термостійкості та зносостійкості, а також сертифікацію за військовими та міжнародними стандартами. Третій рівень зосереджений на підкріпленні товару завдяки активним маркетинговим заходам, наданню підтримки клієнтам, що забезпечує лояльність і постійний контакт з кінцевими споживачами. Також важливим аспектом є захист продукту від копіювання через патентування технологій та охорону інтелектуальної власності. Вся структура моделі забезпечує стійку позицію на ринку та сприяє довгостроковому успіху стартапу.

Варто визначити межі встановлення цін для запропонованого товару на основі товарів-замінників чи аналогів, що вказано у таблиці 5.20.

Таблиця 5.20 – Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціна на товар/послугу
1	2500-8000 грн (стандартний спортивний одяг)	10000-16000 грн (спортивний одяг з основними властивостями: водо- та повітропроникність, зносостійкість)	Високий рівень доходів (професійні спортсмени, військові)	Верхня межа: 28,000–32,000 грн; нижня межа: 16,000–20,000 грн
2	6,000–14,000 грн (одяг з	14,000–22,000 грн (одяг для	Середній та високий	Верхня межа: 20,000–24,000

	термостійкими та водовідштовхуючими властивостями)	екстремальних умов)	рівень доходів (спортивні клуби, підприємці)	грн; нижня межа: 10,000–14,000 грн
3	1,000–3,000 грн (спортивний одяг економкласу)	4,000–8,000 грн (одяг з покращеними функціями)	Середній рівень доходів (спортсмени-любители)	Верхня межа: 12,000–16,000 грн; нижня межа: 5,000–8,000 грн
4	10,000–16,000 грн (базовий військовий одяг)	18,000–24,000 грн (військовий одяг з додатковими функціями, без нанотехнологій)	Високий рівень доходів (військові організації, держзакупівлі)	Верхня межа: 24,000–28,000 грн; нижня межа: 14,000–18,000 грн

Аналіз рівнів цін на товари-замінники та аналоги показав, що продукція NanoUAWear орієнтована на середній та високий ціновий сегмент ринку, де ключовими клієнтами виступають професійні спортсмени, військові структури, спортивні клуби й підприємці. Встановлені цінові межі (від 5,000–8,000 грн до 28,000–32,000 грн залежно від сегмента) дозволяють позиціонувати продукцію як високотехнологічну, що забезпечує унікальні властивості, недоступні у звичайних аналогах. Це формує потенційно високу конкурентоспроможність за рахунок інноваційності, що виправдовує вищий рівень ціни порівняно з ринком.

У таблиці 5.21 представлено основні компоненти, що визначають систему збуту для стартапу NanoUAWear. Згідно з характеристиками цільових клієнтів і специфікою закупівельної поведінки, були визначені функції, які має виконувати постачальник товару, а також оптимальна глибина каналу збуту та

система збуту. Це дозволить ефективно організувати процес продажу продукції через прямі канали, партнери і посередники, враховуючи потреби кожної групи споживачів.

Таблиця 5.21 – Формування системи збуту

№	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які маж виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Великі обсяги закупівель для військових та державних замовлень; довгі переговори, тендери	Індивідуальні переговори, участь у тендерах, консалтинг, логістика	Прямий збут (0 рівень)	Власна система збуту через відділ продажу, робота з держзакупівлями
2	Закупівлі спортивними клубами, підприємствами; замовлення за специфікаціями	Персоналізоване обслуговування, демонстрація зразків, післяпродажний сервіс	Непрямий збут (1 рівень)	Залучення регіональних дилерів та дистриб'юторів
3	Індивідуальні покупки спортсменами, любителями через роздріб	Швидка доставка, консультації, гарантійне обслуговування	Непрямий збут (2 рівень)	Інтернет-магазин, партнерство з магазинами спортивного екіпірування

У цьому випадку для ефективного збуту продукції компанії NanoUAWear було обрано комбіновану систему збуту, яка передбачає як прямий, так і непрямий збут через партнерів та посередників. Для великих клієнтів, таких як військові організації та державні структури, використовуватиметься прямий

збут, оскільки ці закупівлі зазвичай здійснюються через тендери та індивідуальні угоди. У свою чергу, для спортивних клубів та підприємців доцільно залучати регіональних дистриб'юторів і дилерів, що дозволить розширити охоплення ринку. Для кінцевих споживачів, таких як спортсмени-любители, буде створена система онлайн-продажів через інтернет-магазин і партнерства з роздрібними мережами спортивного одягу, що спростить процес покупки та доставки продукції.

Для успішного просування продукції NanoUAWear необхідно розробити ефективну концепцію маркетингових комунікацій, яка буде спиратися на чітке позиціонування товару, враховуючи специфіку поведінки цільових клієнтів. Це включає в себе вибір відповідних каналів комунікацій, визначення ключових позицій бренду та створення рекламних повідомлень, які максимально відповідатимуть потребам і вподобанням цільової аудиторії (таблиця 5.22).

Таблиця 5.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Професійні спортсмени, військові, підприємці, спортивні клуби	Онлайн-платформи (сайти, соцмережі), спеціалізовані магазини, рекламні кампанії на заходах, виставках	Висока якість, інноваційність, підвищена стійкість до зовнішніх факторів, легкість та комфорт	Підвищення обізнаності про продукт, підкреслення конкурентних переваг, інноваційність матеріалу	Реклама, що демонструє унікальні характеристики тканини, її стійкість до погодних умов, комфорту та ефективності під час спортивних

					чи військових активностей.
2	Споживачі середнього та високого рівня доходів (військові організації, спортсмени-любители)	Онлайн-магазини, спеціалізовані точки продажу, вебсайти компаній, email-розсилки	Довговічність, захист, стильний вигляд, надійність при екстремальних умовах	Створити образ продукту як високотехнологічного, зручного та ефективного для активного способу життя	Використання креативних відео та фото матеріалів, де продукт підкреслює важливість комфорту, безпеки та надійності в складних умовах.
3	Спортивні ентузіасти, люди, що ведуть активний спосіб життя	Інтернет-реклама, соціальні мережі (Instagram, TikTok), блогери, інфлюенсери	Модний дизайн, технологічність, комфорт для активного використання	Сформувати позитивний імідж бренду через відомих особистостей та лояльність користувачів	Кампанії за участі спортивних інфлюенсерів, що підкреслюють комфорт та функціональність продукції в реальних умовах.

Розробка концепції маркетингових комунікацій має на меті не лише поширення інформації про продукт, але й створення міцного бренду, що асоціюється з високою якістю, інноваційними рішеннями та комфортом для цільових груп клієнтів. Канали комунікацій повинні орієнтуватися на ефективні платформи для досягнення кінцевого споживача, включаючи онлайн-продажі, виставки та співпрацю з інфлюенсерами. Позиціонування бренду має акцентувати увагу на його унікальності та перевагах в умовах активного використання.

Висновки до розділу 5

Проведений аналіз ринку показує наявність значного попиту на інноваційні багатошарові матеріали для спортивного та військового одягу, що володіють високими характеристиками механічної міцності, водо- та повітропроникності, а також стійкістю до агресивних середовищ. Споживачі виявляють інтерес до продуктів, що забезпечують не лише високий рівень захисту, але й мають новітні нанотехнологічні рішення. Ринок має стабільну динаміку з попитом на продукти, які можуть покращити захист у складних умовах, що робить можливим успішну комерціалізацію проекту. Рентабельність роботи на ринку забезпечується завдяки високій цінності продукту та його унікальним властивостям, що дозволяє встановлювати конкурентоспроможні ціни, зокрема завдяки диференціації продукту.

Основними групами клієнтів для проекту є професійні спортсмени, військові, а також спортивні клуби та підприємства, які потребують високотехнологічного одягу для екстремальних умов. Оскільки ці клієнти мають високий рівень доходів, вони готові інвестувати в продукцію, що забезпечує високу якість і надійність. Бар'єри входження на ринок є мінімальними, оскільки зважаючи на постійний розвиток технологій наноматеріалів, ринок пропонує значні можливості для нових гравців, особливо за умов наявності інноваційних переваг, таких як наномодифікація матеріалів. Стан конкуренції на ринку показує високий рівень розвитку, однак проєкт має конкурентні переваги, такі як інноваційність, висока якість та можливість кастомізації.

Зважаючи на характеристики ринку та перспективи розвитку, доцільно обрати стратегію диференціації як основну стратегію впровадження продукту. Вона забезпечує розрізнення товару від конкурентів завдяки унікальним властивостям, таким як наномодифікація та висока технологічність. Крім того, необхідно сприяти розвитку дистрибуції через власні канали та сервіси, оскільки це дозволить контролювати якість обслуговування клієнтів та

збільшити лояльність. Система збуту повинна включати як прямий продаж, так і партнерські канали для розширення охоплення ринку.

З урахуванням результатів аналізу, стартап-проект NanoUAWear має значний потенціал для успішної імплементації та подальшого розвитку на ринку. Висока конкурентоспроможність проекту завдяки інноваційним характеристикам продукту та правильно обраній стратегії позиціонування дозволяють реалізувати проект з перспективою на довгострокове існування та розвиток. Подальша імплементація цього проекту є доцільною, оскільки на ринку є попит на такі інноваційні рішення, а впровадження таких технологій матиме значний попит у різних секторах, зокрема в оборонному та спортивному.

Отже, стартап NanoUAWear має великий потенціал для успішної реалізації та комерціалізації на ринку, з можливістю виходу на нові сегменти та залучення нових груп споживачів у майбутньому.

ВИСНОВКИ

У межах магістерської роботи проведено комплексне дослідження механічної поведінки вуглецевої нанотрубки, вбудованої в полімерну матрицю, при дії зовнішнього навантаження з урахуванням міжфазної взаємодії в зоні адгезійного контакту.

Побудовано фізично обґрунтовану модель структури «нанотрубка – адгезійний шар – полімер», реалізовану у програмному середовищі APROKS. Для моделювання прикладалося поступово зростаюче навантаження за допомогою ітераційно-крокового методу Ньютона–Канторовича, що дозволило простежити процес зародження та розвитку руйнувань.

Апробація результатів, здійснена шляхом порівняння з літературними даними, підтвердила високу точність моделі.

Числове моделювання дозволило виявити вплив геометричних параметрів системи (коефіцієнту наноармування) на її міцнісні характеристики:

- Збільшення об'єму полімерного масиву сприяє зростанню сили руйнування;
- Збільшення діаметра нанотрубки знижує опір розшаруванню;
- Зміна довжини нанотрубки має незначний, але позитивний вплив на стійкість системи.

У роботі також було здійснено огляд сучасного стану досліджень багатошарових полімерних плівок, включаючи аспекти їх наномодифікування, що є перспективним напрямом підвищення експлуатаційних характеристик гнучких пакувальних матеріалів. Розглянуто типові конструкції плівок та принципи формування їхніх функціональних властивостей шляхом послідовного формування шарів із різними фізико-хімічними характеристиками.

Окрему увагу приділено технологічному оснащенню сучасного виробництва: в роботі проаналізовано екструдер ЧП45×25, його конструктивні

особливості, а також технологічну лінію, що включає три таких екструдера та одну тришарову плоскощільну екструзійну головку, що дозволяє отримувати високоякісні багат шарові наномодифіковані плівки.

Крім науково-технічного аналізу, у роботі виконано розділ «Охорона праці», де розглянуто ризики, пов'язані з роботою на обладнанні для виробництва полімерних плівок, і надано рекомендації щодо безпеки праці у виробничих умовах.

У рамках розділу «Розробка стартап-проєкту» було запропоновано концепцію NanoUAWear — проєкт, що базується на використанні наномодифікованих плівкових матеріалів для створення функціонального одягу з підвищеними експлуатаційними властивостями (наприклад, вологостійкість, механічна стійкість, сенсорні можливості). Запропоновано базову бізнес-структуру та потенційні сфери застосування проєкту.

Отже, отримані результати мають як фундаментальне значення для глибшого розуміння поведінки наноструктур у полімерному середовищі, так і прикладне значення для розробки нових наномодифікованих матеріалів, що можуть знайти застосування в пакувальній промисловості, текстильній інженерії, захисному одязі та високотехнологічних гнучких елементах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Deepak Langhe, Michael Pontin. Manufacturing and Novel Applications of Multilayer Polymer Films, William Andrew Publishing. 2016. с. 1-15. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323371254000010> (дата звернення: 15.02.2025).
2. Junfeng Cheng, Hao Li, Zheng Cao, Dun Wu, Chunlin Liu, Hongting Pu. Nanolayer coextrusion: An efficient and environmentally friendly micro/nanofiber fabrication technique. Materials Science and Engineering: C. Volume 95, 2019. с. 292-301. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928493118303175> (дата звернення: 22.02.2025)
3. Laryssa Meyer, Alex Jordan, Kyungtae Kim, Bongjoon Lee, Frank S. Bates, Chris Macosko, Ehsan Behzedfar, Olivier Lhost, Shaffiq Jaffer, Yves Trolez. Improving thermoformability of IPP through multilayer coextrusion. Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings. Volume 2. 2020. с. 567-569. URL: <https://experts.umn.edu/en/publications/improving-thermoformability-of-ipp-through-multilayer-coextrusion-2> (дата звернення: 23.02.2025).
4. Jean-François Agassant, Yves Demay. Investigation of the Polymer Coextrusion Process: A Review. Polymers. Volume 14, Issue 7. 24 March 2022. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/7/1309> (дата звернення: 15.02.2025).
5. Jin-ping Qu, Yue Luo. A novel method for industrial manufacturing of thermoplastic multilayer films: Processing, microstructure, and properties. Polymer Engineering & Science. Volume 59, Issue S1. 2018. с. E339-E349. URL: <https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.24969> (дата звернення: 16.02.2025).
6. Guo-Chiuan Tzeng, Ren-Haw Chen. Flow shear stress in the co-extrusion of polymer multilayer film: variations and effects on interfacial instability. Advances in Materials and Processing Technologies.

Volume 3, 2017 - Issue 1. с. 52-57. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/2374068X.2016.1247337> (дата звернення: 16.02.2025).

7. John R. Wagner, Jr. Multilayer Flexible Packaging. 2016. с. 99-122. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323371001000077> (дата звернення: 15.02.2025).

8. Sushil Kainth. 12 - Coextrusion Three-Layer Die (ø20.00 mm to ø65.00 mm). Die Design for Extrusion of Plastic Tubes and Pipes. A Practical Guide. 2018, с. 263-296. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/book/9781569906729> (дата звернення: 15.02.2025)

9. Behtash Mani, H.A. Tavakolinia, R. Babaie Moghadam. A new design for co-extrusion dies: Fabrication of multi-layer tubes to be used as solid oxide fuel cell. Journal of Science: Advanced Materials and Devices. Volume 2, Issue 4, December 2017, с. 425-431. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468217917301004> (дата звернення: 15.02.2025).

10. Zhenpeng Li, Andrew Olah, Eric Baer. Micro- and nano-layered processing of new polymeric systems. Progress in Polymer Science. Volume 102, March 2020, 101210. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670020300034> (дата звернення: 17.02.2025).

11. V. Bazhenov, A. Protasov, I. Ivitskiy, D. Ivitska, Simulation of nanomodified polymers testing by the electric capacitive method. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4/5 (88) 2017. с.4-9. URL: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Vejpte_2017_4\(5\)_2.pdf](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Vejpte_2017_4(5)_2.pdf) (дата звернення: 23.02.2025).

12. Swathi Murthy, Maria Matschuk, Qian Huang, Nikolaj K. Mandsberg, Nikolaj A. Feidenhans'l, Peter Johansen, Lars Christensen, Henrik Pranov, Guggi Kofod, Henrik C. Pedersen, Ole Hassager, Rafael Taboryski, Fabrication of Nanostructures by Roll-to-Roll Extrusion Coating. Advanced Engineering Materials, Volume 18, Issue 4, April 2016, с. 484-489. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adem.201500347#> (дата звернення: 26.02.2025).

13. Junfeng Cheng, Zhiru Chen, Jiaqi Zhou, Zheng Cao, Dun Wu, Chunlin Liu, Hongting Pu. Influences of layer thickness on the compatibility and physical properties of polycarbonate/polystyrene multilayered film via nanolayer coextrusion. Applied Surface Science. 15 May 2018. Volume 440. с. 946-954. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169433218302721> (дата звернення: 23.02.2025)

14. E. Zīle, O. Bulderberga, S. Stankevich, D. Zeleniakiene, A. Aniskevich, Effective mechanical properties of multilayer nano-modified polymer composite laminates. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 43, Article №413, 2021. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40430-021-03142-x> (дата звернення: 24.02.2025).

15. Nadiim Domun, Cihan Kaboglu, Keith R. Paton, John P. Dear, Jun Liu, Bamber R.K. Blackman, Gholamhossein Liaghat, Homayoun Hadavinia. Ballistic impact behaviour of glass fibre reinforced polymer composite with 1D/2D nanomodified epoxy matrices. Composites Part B: Engineering. Volume 167. 15 June 2019, с. 497-506. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836818334929> (дата звернення: 24.02.2025)

16. Yao Qiao, Marco Salviato, Study of the fracturing behavior of thermoset polymer nanocomposites via cohesive zone modeling. Composite Structures Volume 220, 15 July 2019, с. 127-147.

- URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822318325789> (дата звернення: 24.02.2025).
17. A. V. Gondlyakh, A. L. Sokolskiy, A. E. Kolosov, A. O. Chemeris, V. Yu. Shcherbina, S. I. Antonyuk, Modeling the Mechanisms of Fracture Formation in Nanomodified Polymers. 2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9309637> (дата звернення: 24.02.2025).
18. Chunhai Li, Yingying Gao, Lishen Wang, Jiang Li, Shaoyun Guo. Fabrication, structure, and properties of Poly-(Lactide) multilayers with ultrahigh content, ordered, and continuous transcrystallinity. Polymer. Volume 228, 16 July 2021, 123933. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032386121005565> (дата звернення: 18.02.2025).
19. Ma Xiuqinga, Zhai Wenbina, Liu Ming. Interface analysis of three-layer co-extrusion blown film. AIP Conference Proceedings. Volume 2065, Issue 1. 2019. URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5088334> (дата звернення: 23.02.2025).
20. Vasile C. Polymeric Nanocomposites and Nanocoatings for Food Packaging: A Review. Materials (Basel). 2018 Sep 26;11(10):1834. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30261658/> (дата звернення: 18.02.2025).
21. Sinnott, S. B., & Andrews, R. (2001). Carbon nanotubes: Synthesis, properties, and applications. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 26, 145–249. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/20014091104189> (дата звернення: 20.02.2025).
22. Chowreddy, R. R., Nord-Varhaug, K., & Rapp, F. (2018). Recycled polyethylene terephthalate/carbon nanotube composites with improved processability and performance. Journal of Materials Science, 53, 7017–7029. URL:

https://www.researchgate.net/publication/322562631_Recycled_polyethylene_terephthalate_carbon_nanotube_composites_with_improved_processability_and_performance (дата звернення: 20.02.2025).

23. Khan, W. S., Asmatulu, R., Davuluri, S., & Dandin, V. K. (2014). Improving the economic values of the recycled plastics using nanotechnology associated studies. *Journal of Materials Science & Technology*, 30, 854–859. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1005030214001327> (дата звернення: 22.02.2025).

24. Lopez Manchado, M. A., Valentini, L., Biagotti, J., & Kenny, J. M. (2005). Thermal and mechanical properties of single-walled carbon nanotubes–polypropylene composites prepared by melt processing. *Carbon*, 43, 1499–1505. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008622305000771> (дата звернення: 22.02.2025).

25. Zainab Al-Maqdasi, Guan Gong, Birgitha Nyström, Nazanin Emami, Roberts Joffe, Characterization of Wood and Graphene Nanoplatelets (GNPs) Reinforced Polymer Composites. *Materials* 2020, 13(9), 2089. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/9/2089> (дата звернення: 26.02.2025).

26. T. Dyachkova, I. Gutnik, V. Nagdaev, A. Maksimkin, E. Burakova, E. Galunin, N. Memetov, Yu. Khan, T. Dayyoub, Studying the surface of UHMWPE films modified with graphene nanoplatelets using a Raman mapping method. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, Volume 28, Issue 7, 2020, с. 561-564. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1536383X.2020.1724103> (дата звернення: 27.02.2025).

27. Dongli Li, Jingyong Zhang, Wencai Xu, Yabo Fu, Effect of SiO₂/EVA on the mechanical properties, permeability, and residual solvent of polypropylene packaging films. *Polymer Composites*, Volume 37, Issue 1, January 2016, с. 101-107. URL:

<https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pc.23159> (дата звернення: 25.02.2025)

28. Mingjun Shi, Application and Mechanism Characterization of Nanofibers for Interlaminar Toughening of Composite Materials, 2022. URL: <https://repository.lib.gifu-u.ac.jp/bitstream/20.500.12099/88114/2/ek0612.pdf> (дата звернення: 24.02.2025).

29. Stéphanie Vuong, Liliane Léger, Frédéric Restagno. Controlling interfacial instabilities in PP/EVOH coextruded multilayer films through the surface density of interfacial copolymers. Polymer Engineering & Science. Volume 60, Issue 7. 2020. с. 1420-1429. URL: <https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pen.25389> (дата звернення: 23.02.2025).

30. A. E. Kolosov, E. P. Kolosova, Short Review of Studies on Modeling of Technology and Technical Means Used for Production of Classical and Nanomodified Functional Polymer Composite Materials. International Journal of Engineering & Technology, 7 (2.23), 2018, с. 483-488. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/323532653.pdf> (дата звернення: 24.02.2025).

31. Yaser Dahman. Chapter 6 - Nanopolymers. Nanotechnology and Functional Materials for Engineers. Micro and Nano Technologies. 2017. с. 121-144. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978032351256500006X?via%3Dihub> (дата звернення: 25.02.2025).

32. M.B. El-Arnaouty, A.M. Abdel Ghaffar, M. Eid, Maysara E. Aboulfotouh, N.H. Taher, El-Sayed Soliman, Nano-modification of polyamide thin film composite reverse osmosis membranes by radiation grafting. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, Volume 11, Issue 3, July 2018, с. 204-216. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687850717301772> (дата звернення: 26.02.2025).

33. Ming Li, Wen Liu, Fangxin Zhang, Xinyu Zhang, Altyeb Ali Abaker Omer, Zhisen Zhang, Yang Liu, Shutao Zhao. Polymer multilayer film with excellent UV-resistance & high transmittance and its application for glass-free photovoltaic modules. Solar Energy Materials and Solar Cells. Volume 229, 15 August 2021, 111103. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024821001458> (дата звернення: 16.02.2025).

34. Jung-Kai Tseng, Kezhen Yin, Zhongbo Zhang, Matthew Mackey, Eric Baer, Lei Zhu. Morphological effects on dielectric properties of poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene) blends and multilayer films. Polymer. Volume 172, 20 May 2019, с. 221-230. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032386119303088> (дата звернення: 18.02.2025).

35. Claudio Roberto Lima de Souza, Jingxing Feng, Andrew Olah, Eric Baer, Raquel Santos Mauler, Gary Wnek. A novel PLA high oxygen barrier multilayer film/foam. SPE Polymers. Volume 3, Issue 4. 14 November 2022. с. 179-191. URL: <https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pls2.10079> (дата звернення: 18.02.2025).

36. Yue Luo, Xiao-dan Chang, Jin-ping Qu. Improved heat shrinkage and mechanical performances of polyethylene trilayer blown film prepared via novel multilayer coextrusion method. Packaging Technology and Science. Volume 32, Issue 6. 2019. с. 309-321. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pts.2439> (дата звернення: 22.02.2025).

37. Abhinay Thakur, Savaş Kaya, Ashish Kumar, Recent Trends in the Characterization and Application Progress of Nano-Modified Coatings in Corrosion Mitigation of Metals and Alloys. Applied Sciences 2023, 13(2), 730. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/2/730> (дата звернення: 25.02.2025).

38. Mehdi Honarvar Nazari, Xianming Shi, Polymer-Based Nanocomposite Coatings for Anticorrosion Applications. Industrial Applications for Intelligent Polymers and Coatings, First Online : 15 May 2016, с.373-398. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-26893-4_18 (дата звернення: 26.02.2025).

39. Ahmed, Sadeaka A.; El-Bordiny, Mahmoud M.; El-Sebaay, Abdellatif S.; El-Ella, Amr A.; El-Din, Mohamed A. Tag; Attia, Yasser A. Heavy Metal Removal with NanoTiO₂/Chitosan Modified Poly(Vinylidene Chloride). Nanoscience & Nanotechnology-Asia, Volume 12, Number 5, 2022, с. 24-32. URL:<https://www.ingentaconnect.com/content/ben/nanoasi/2022/00000012/00000005/art00004> (дата звернення 25.02.2025).

40. Hao Chen, Lin Li, Wei Zhao, Xiao-Rui Zhang, Ling Weng, Corona Resistance Mechanism of Nano-Modified Polyimide. Polymers 2022, 14(24), 5469. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/24/5469> (дата звернення: 24.02.2025).

41. Пат. EP4549145A1, Німеччина, B32B27/10, B32B27/30, B32B27/36, B32B7/06. Polymer multilayer, Bröckel Jens, Döhmen Ben, заяв. – 06.11.2023, опубл. – 07.05.2025.

42. Пат. CN115008719A, Китай, B29C48/18, B29C48/32, B29C48/49, B29C48/70. Splicing co-extrusion machine head and extrusion equipment with machine head, Ye Wangnian, заяв. – 10.06.2022, опубл. – 06.09.2022.

43. Пат. CN115008716A, Китай, B29C48/18, B29C48/30, B29C48/49, B29C48/70. Three-layer co-extrusion machine head and extrusion equipment with same, Ye Wangnian, заяв. – 10.06.2022, опубл. – 06.09.2022.

44. Пат. CN114786915A, Китай, B29C48/08, B29C48/21, B29C48/25, B29C48/305, B29C48/495, B29C48/92. Device for producing a coextruded multilayer film, device for coextruded multilayer coextruded composite material and method for coextrusion, and method for operating a device and/or a device related thereto, Siebigtroth Peter, заяв. – 15.10.2019, опубл. – 22.07.2022.

45. Пат. CN113696572A, Китай, B29C48/08, B29C48/21, B29C48/49, B32B27/08, B32B27/18, B32B27/30, B32B27/36, C08J5/18, C08K3/36, C08K3/38, C08L23/08, C08L25/06, C08L67/02, C08L71/02, C08L83/04. Composite PETG heat shrink film and preparation system thereof, Wu Peifu, Ding Yansen, Wang Qi, заяв. – 31.08.2021, опубл. – 26.11.2021.

46. Пат. US5304053A, США, B29C48/12; B29C48/34; B29C48/38; B29C48/395; B29C48/46; B29C48/49. Apparatus for extrusion of plastic and/or rubber mixtures, Gohlisch Hans-Joachim, Baumgarten Wilfried, заяв. – 08.05.1992, опубл. – 19.04.1994.

47. Huang, F.; Zhou, S. Molecular Dynamics Simulation of Coiled Carbon Nanotube Pull-Out from Matrix. *Int. J. Mol. Sci.* 2022, 23, 9254. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms23169254> (дата звернення: 28.02.2025)

48. Гондляр О. В. Зносостійкість деталей екструдера при виробництві полімерних наномодифікованих виробів / Гондляр О. В., Янковський І. О., Мінченко І. О. // Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2024. – № 1 (23). – С. 9-22. – Бібліогр.: 31 назва. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2024.300974> (дата звернення: 1.03.2025)

49. A. Gondlyakh, A. Sokolskiy, T. B. Shylovych, Y. I. Shylovych, A. Chemeris and S. I. Antonyuk, "Numerical Determination of the Strength of Nanomodified Ceramics," 2021 *IEEE 11th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, Odessa, Ukraine, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/NAP51885.2021.9568580 (дата звернення: 1.03.2025)

50. Yuan Li, Yaolu Liu, Xianghe Peng, Cheng Yan, Sen Liu, Ning Hu, Pull-out simulations on interfacial properties of carbon nanotube-reinforced polymer nanocomposites, *Computational Materials Science*, Volume 50, Issue 6, 2011, Pages 1854-1860, ISSN 0927-0256, URL: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.01.029> (дата звернення 1.03.2025)

51. Щербина В.Ю., Лелека С.В., Безверхий І.О. Методологія проектування. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2024. 119 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/67997>
52. Маркетинг стартап-проектів : навчальний посібник для усіх спеціальностей другого освітнього ступеню «магістр» / С. О. Солнцев, О. В. Зозульов, Н. В. Юдіна, Т. О. Царьова, Н. В. Язвінська ; за заг. ред. С.О. Солнцева ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 218 с. URL : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27437>
53. Розроблення стартап-проекту : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 28 с.
54. Щербина В.Ю., Гондляр О.В., Чемерис А.О., Швачко Д.Г. AutoLISP при проектуванні технологічного обладнання [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2024. 175 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/67865> .
55. Щербина В.Ю., Степанюк А.Р. Кожухотрубні теплообмінники. Конструкторське проектування обладнання [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2024. 117 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/67996>
56. Yudina N. V. Methods of the Startup-Project Developing Based on ‘the Four-Dimensional Thinking’ in Information Society // *Marketing and Management of innovations*. 3’2017, P. 245-256. DOI:10.21272/mmi.2017.3-23 <http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/journals/2017/3/245-256>.
57. Yudina, N. Economic “Butterfly” and Futurology of the War in Ukraine. *Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*. Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2022. №23 (2022). PP. 77-82. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.23.2022.264637>.

58. Yudina, N. Algorythm Of Marketing Decision Making. *Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*. Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 2022. №22 (2022). PP. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.22.2022.260163>.

59. Yudina, N. Future Study Implementation Into Marketing Activity Of Companies. *Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*. Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 2021. №19 (2021). PP. 1-9 URL : <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/240315>.

60. Yudina, N., Pidlisna, O. Marketing Perception Of Technological Uncertainty By Decision-Makers. *Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*. Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 2021. №18 (2021). PP. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.18.2021.238105>.

61. Yudina, N., Instrumenty Zarządzania Przyszłością. *Marketing Instytucji Naukowych I Badawczych*, Vol. 38, Issue 4,, 2020, Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Lotnictwa. Poland, Warszawa, p. 1-19 ISSN 2353-8503 eISSN 2353-8414. http://minib.pl/wp-content/uploads/2020/12/4-Yudina_pl.pdf. DOI: 10.2478/minib-2020-0027.

62. Yudina, N. Business Forecasting of Marketing Activity Riskiness of Companies in Markets. *Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*. №17(2020). P. 372-383. URL : <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/216380/>

ДОДАТКИ

[illegible]

Форма	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
				<u>Документація</u>		
A1			ЛУЗ1мн017241.002-70 СК	Тришарова плоскощілинна головка		
				<u>Складальні одиниці</u>		
		1		Корпус	1	Сталь 40 X
		2		Кришка	1	Сталь 40 X
		3		Адаптер	1	Сталь 40 X
		4		Фланець кріплення	2	Сталь 45
		5		Решітка	1	Сталь 40 X
		6		Гільза	1	Сталь 45
		7		Живильний блок для співектрузії	1	Сталь 40 X
		8		Фланець кріплення 50-1,0	2	Сталь 45
				<u>Стандартні вироби</u>		
		9		Сітка СД 64-08 X 18 Н ГОСТ 3187-76	2	
		10		Хомут	2	
		11		Хомутувий нагрівач	2	
		12		Рим-болт М16 ДСТУ ISO 3266:2010	3	
		13		Гвинт М8 x 30 ГОСТ 1478-93	13	
		14		Штифт 10 x 40 ГОСТ 3128-70	2	
		15		Штифт 10 x 60 ГОСТ 3128-70	2	
		16		Штифт 20 x 140 ГОСТ 3128-70	4	
		17		Гвинт М20 x 120 Гост 11738-84	10	
				ЛУЗ1мн017241.002-70 СП		
Зм.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата	Тришарова плоскощілинна головка	
Розроб.		Безверхий І.О.				
Перев.		Ченерис А.О.				
Н.контр.						
Затв.		Ченерис А.О.				
					Літера	Аркуш
						1
					Архів	1
					КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІХФ	

СЕКЦІЯ МАШИНИ І ТЕХНОЛОГІЇ ПАКУВАННЯ



Наномодифікація пластикових відходів для повторного використання з високими фізико-механічними властивостями

Безверхий І.О., студ., Шилович Т.Б., к.т.н., доц.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Розглянуто питання, як наномодифікація поліпшує фізико-механічні властивості пластикових відходів, якими найбільш поширеними матеріалами можна наномодифікувати їх на нанорівні, й як саме вони впливають на кінцеві характеристики переробленого матеріалу, уточнено переваги наномодифікування, як процесу збільшення або повернення міцності харчовій упаковці після переробки пластику.

Ключові слова: наномодифікація, нанотехнології, пластикові відходи, переробка, повторне використання.

Вступ. У сучасні часи стає більш актуальною проблема з відходами, а особливо з пластиковими, в Україні наразі це є серйозною проблемою. Пластикові відходи «захоплюють» світ, оскільки, як зазначено в дослідженні [1], у 2014 році їх було вироблено 311 мільйонів тонн, прогнозується збільшення цього обсягу ледь не у вдвічі до 2030-х років та вчетверо до 2050 року. Через це в суспільства виникає гостра потреба знайти якомога швидше способи переробки пластикових відходів таким чином, щоби перероблений пластик мав високу міцність, майже таку, як до переробки після переробки пластик має вже нижчі механічні та бар'єрні властивості в порівнянні з первинним [2]. На допомогу у вирішенні цієї проблеми приходять наноматеріали, які дозволяють наномодифікувати перероблений пластик на нанорівні. Застосування нанотехнології – це одне з рішень для того, щоби продовжити життя переробленому пластику, надавши властивості на рівні первинних, особливо у випадку, коли застосування цих пакувань припадає саме на харчову галузь. Отже, сутність застосування нанотехнологій полягає у зменшенні негативного впливу переробки на фізико-механічні властивості матеріалів, що досягається шляхом розробки нанокомпозитів та введенням армування нанорозмірного розміру в полімерні матриці [3].

Наномодифікація. Наномодифікація в галузі харчових пакувань має застосовуватися для створення поліпшеної переробленої упаковки та/або упаковки з антимікробними функціями [3]. Для наномодифікування пластикових відходів, які застосовуються для виробництва упакувань, можна застосовувати такі поширені матеріали, як наноглина, вуглецеві нанотрубки, графен, графіт тощо.

Наноглина (ММТ). Глина широко застосовується для наноармування в полімерних матрицях завдяки своїй високій площі поверхні, співвідношенню сторін та економічній ефективності. Існує багато типів наноглин, наприклад, бентоніт, каолінит, гекторит, галоїт і монтморилоніт (ММТ). ММТ, найпоширеніша природна глина, що застосовується в полімерах для пакування та іншого, пропонує поліпшені характеристики при змішуванні в низьких концентраціях з переробленими полімерами, такі як підвищена межа текучості, модуль пружності, жорсткість, твердість і стійкість до вологості. Структурна організація ММТ полягає в об'єднанні площини апікальних іонів кисню двох тетраедричних шарів кремнезему з площинами гідроксильних іонів октаедричного шару, в результаті чого утворюється гідратований алюмосилікат з ламінарною структурою типу 2:1, що відповідає октаедричному шару між тетраедричними шарами кремнезему [4]. Глиняні шари є бар'єром для газів і води, тобто має опір від їхньої дії, а також деякі з них мають антимікробні бар'єри [5].

Вуглецеві нанотрубки. Вони, а також графен і графіт, застосовуються задля створення нанокомпозитів з покращеними властивостями. Детальні дослідження щодо придатності проводилися, але поки не дуже в харчовій промисловості. Вуглецеві нанотрубки мають зараз високу увагу від науковців через свої властивості: висока механічна стійкість, гнучкість, електричні та теплові характеристики [6]. Перевірено, що застосування вуглецевих нанотрубок у перероблених поліетилентерефталаті (ПЕТФ), полістиролі (ПС) та поліпропілені (ПП) призводить до поліпшення міцності матеріалу [7 - 9].

Графен. Графен - це двовимірна вуглецева структура, що складається з одного шару атомів вуглецю sp^2 в гексагональній мережі, подібно до графіту. Незважаючи на те, що товщина становить тільки один атом, графен має високу міцність, приблизно в 100 разів міцніший за сталь. Дослідження [10 - 12] полімерних нанокомпозитів доводять, що графен пропонує ліпші можливості у порівнянні з вуглецевими нанотрубками, маючи високу конкурентоспроможність завдяки низькій вартості, простоті диспергування, більшій площі поверхні та чудовим механічним, оптичним і термічним властивостям. Оскільки це пропонує високу бар'єрну продуктивність навіть при дуже низьких навантаженнях графену, це стає привабливим для виробництва упаковок харчових продуктів [13].

Графіт. Застосовується задля високої провідності для електронних виробів, таких як електроди, батареї та сонячні панелі, але й має інші властивості, що є корисним в інших застосуваннях. Наприклад, графіт був доданий до переробленого поліетилену високої щільності (HDPE) для середньотемпературних систем зберігання енергії [14].

Висновки. Проаналізовано можливість застосування наномодифікації пластикових відходів та інших матеріалів при їх переробці, що дає змогу підвищити міцність вторинного продукту. Наномодифікування таких відходів як, наприклад, монтморилонітом, вуглецевими нанотрубками, графеном чи графітом надає друге життя пакуванню харчових продуктів та є перспективним у вторинній переробці пластикових відходів, оскільки наномодифікація поліпшує його фізико-механічні властивості в порівнянні з немодифікованим. Відомі дослідження доводять можливість поліпшити якість вторинного пластику, тому ця технологія може бути застосована при його переробці.

Перелік посилань

1. Ellen MacArthur Foundation. (2016). The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics & catalysing action. URL: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics> (дата звернення 29.04.2024).
2. Zdiri, K., Elamri, A., Hamdaoui, M., Khenoussi, N., Harzallah, O., & Brendle, J. (2018). Impact of Tunisian clay nanofillers on structure and properties of post-consumer polypropylene-based nanocomposites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 32, 1159–1175. URL: <https://doi.org/10.1177/0892705718792377> (дата звернення: 30.04.2024).
3. Vasile, C. (2018). Polymeric Nanocomposites and Nanocoatings for Food Packaging: A Review. *Materials*, 11(10), 1834. URL: <https://doi.org/10.3390/ma11101834> (дата звернення: 30.04.2024).
4. Okada, A., & Usuki, A. (2006). Twenty years of polymer-clay nanocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 291, 1449–1476. URL: <https://doi.org/10.1002/mame.200600260> (дата звернення: 30.04.2024).
5. Darie, R. N., Pâslaru, E., Sdrobis, A., Pricope, G. M., Hitruc, G. E., Poiată, A., ... Vasile, C. (2014). Effect of Nanoclay Hydrophilicity on the Poly(lactic acid)/Clay Nanocomposites Properties. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53, 7877–7878. URL: <https://doi.org/10.1021/ie500577m> (дата звернення: 01.05.2024).
6. Sinnott, S. B., & Andrews, R. (2001). Carbon nanotubes: Synthesis, properties, and applications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 26, 145–249. URL: <https://doi.org/10.1080/20014091104189> (дата звернення: 01.05.2024).
7. Chowreddy, R. R., Nord-Varhaug, K., & Rapp, F. (2018). Recycled polyethylene terephthalate/carbon nanotube composites with improved processability and performance. *Journal of Materials Science*, 53, 7017–7029. URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2014-0> (дата звернення: 01.05.2024).

8. Khan, W. S., Asmatulu, R., Davuluri, S., & Dandin, V. K. (2014). Improving the economic values of the recycled plastics using nanotechnology associated studies. *Journal of Materials Science & Technology*, 30, 854–859. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2014.07.006> (дата звернення: 01.05.2024).
9. Lopez Manchado, M. A., Valentini, L., Biagotti, J., & Kenny, J. M. (2005). Thermal and mechanical properties of single-walled carbon nanotubes–polypropylene composites prepared by melt processing. *Carbon*, 43, 1499–1505. URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.01.031> (дата звернення: 01.05.2024).
10. Asmatulu, R., Khan, W. S., Reddy, R. J., & Ceylan, M. (2015). Synthesis and analysis of injection-molded nanocomposites of recycled high-density polyethylene incorporated with graphene nanoflakes. *Polymer Composites*, 36, 1565–1573. URL: <https://doi.org/10.1002/pc.23063> (дата звернення: 02.05.2024).
11. Asmatulu, R., Khan, W. S., Reddy, R. J., Ceylan, M., & Misak, H. E. (2011). Physical properties of injection molded graphene nanocomposites from recycled plastics. Paper presented at SAMPE Fall Technical Conference, Fort Worth, TX, 11, October 17–20. URL: https://www.researchgate.net/publication/290261338_Physical_properties_of_injection_molded_graphene_nanocomposites_produced_from_recycled_plastics (дата звернення: 02.05.2024).
12. Husin, M. R., Arsad, A., & Al-Othman, O. (2015). Effect of graphene loading on mechanical and morphological properties of recycled polypropylene/polyaniline nanocomposites. *MATEC Web Conference*, 26, 01008. URL: <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20152601008> (дата звернення: 02.05.2024).
13. Allahbakhsh, A. (2017). High barrier graphene/polymer nanocomposite films. In *Food Packaging* (Chapter 20, pp. 699–737). Academic Press: Cambridge, UK. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804302-8.00020-0> (дата звернення: 02.05.2024).
14. Yang, C., Navarro, M. E., Zhao, B., Leng, G., Xu, G., Wang, L., ... Ding, Y. (2016). Thermal conductivity enhancement of recycled high density polyethylene as a storage media for latent heat thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 152, 103–110. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.02.022> (дата звернення: 02.05.2024).

Прийнято до публікації, але на момент здачі магістерської дисертації, конференція не проходила (12-13 червня 2025 р – дата випуску)

Посилання: https://cpsm.kpi.ua/Doc/Conf_XXI_CPSM_2025.pdf

XXI Всеукраїнська конференція «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки»

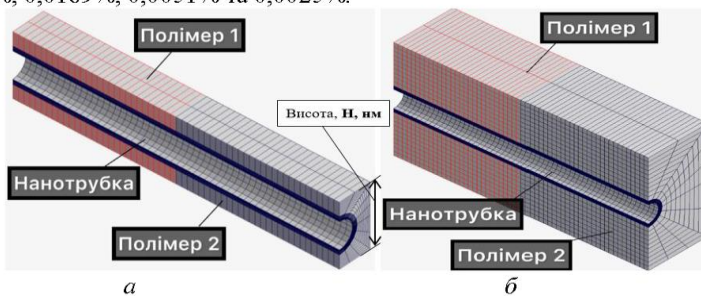
Вплив рівня наномодифікації полімеру на міцність кінцевого виробу
Безверхий І. О., студ., Гондляр О. В., д.т.н., проф., Чемерис А.О., к.т.н., доц.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Розглянуто вплив рівня наномодифікації полімеру на міцність кінцевого виробу при виготовленні багатошарових плівок. У межах дослідницької роботи проаналізовано літературні та патентні джерела, в яких відображено активну зацікавленість закордонних вчених у дослідженні багатошарових нанокомпозитів. Отримані, за допомогою математичного моделювання процесу в середовищі APROKS, результати показують доцільність використання наномодифікованого полімеру у середньому шарі плівки для підвищення міцності. Запропоновані технічні рішення сприяють зменшенню енерговитрат та збільшенню ефективності технологічного процесу, а також покращенню механічних характеристик кінцевого виробу.

Ключові слова: багатошарова плівка, наномодифікований полімер, екструдер, коекструзія, міцність.

Вступ. Сучасна полімерна промисловість активно впроваджує нанодобавки до термопластів для покращення міцності, термостійкості та бар'єрних властивостей продукції. У багатошарових плівках нанонаповнювачі концентрують у функціональному шарі, що знижує навантаження на зовнішні. Це стимулює інтерес до використання нанотехнологій у коекструзії, яка дозволяє поєднувати шари з різними властивостями. Дослідження [1-4] свідчать про зростання уваги до впливу наночастинок на переробку полімерів і роботу обладнання. Водночас бракує технічних рішень щодо впровадження таких матеріалів у виробництво гнучкої плівки.

Основна частина. Для аналізу впливу наномодифікації середнього шару тришарової полімерної плівки на міцність застосовано числове моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) у середовищі APROKS, розробленому на кафедрі хімічного, полімерного та силікатного машинобудування НТУУ «КПІ». Досліджено елементарний об'єм плівки з вуглецевою нанотрубкою (ВНТ) на межі двох полімерних шарів на основі ПЕВГ (рис. 1). Це дозволяє оцінити вплив структури матеріалу та рівня наномодифікації на деформацію й руйнування. Розрахунки виконано для чотирьох висот зразка Н (0,8; 1; 1,5; 2 нм), основне порівняння — між крайніми значеннями. Геометрія ВНТ залишалась сталою, змінювалися розміри полімерних шарів, що дозволило варіювати коефіцієнт заповнення. Відповідні масові коефіцієнти армування K_m становили: 0,0821%, 0,0189%, 0,0051% та 0,0025%.



а – зразок із $H = 0,8$ нм та $K_{m1} = 0,0821\%$; б – зразок із $H = 2$ нм та $K_{m4} = 0,0025\%$

Рисунок 1 – Скінченно-елементні моделі елементарного об'єму (розрахункова схема)

Моделювання включає поступове навантаження зразка [5] в режимі зсуву, при якому верхній і нижній полімерні шари зміщуються в протилежних напрямках на значення U (вимушене зміщення), що вимірюється в нм (рис. 2). Таким чином створюються реалістичні умови, що імітують деструкцію плівки в умовах експлуатації.

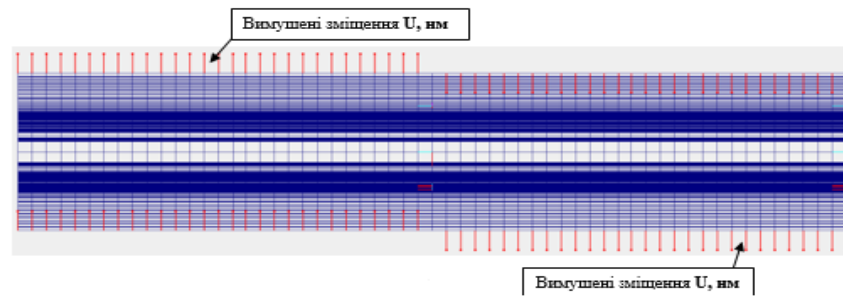


Рисунок 2 – Розрахункова схема з умовами навантаження на зразок

Для зразка з $K_{\text{ад}} = 0,0821\%$, утворення тріщин зсуву відбувається у зонах прикладення зміщень — на верхній і нижній межах. Після їх появи спостерігається перерозподіл напружень, що призводить до формування вертикальних тріщин і, зрештою, лавиноподібної втрати несучої здатності зразка при $U = 0,063$ нм. Натомість у зразка з мінімальним армуванням ($K_{\text{ад}} = 0,0025\%$) руйнування починається не на межах, а між двома сусідніми нанотрубками в об'ємі полімеру. Зона зсуву розвивається вздовж зразка і спричиняє повну втрату міцності вже при $U = 0,032$ нм — майже вдвічі менше, ніж у більш армованого аналога. Таким чином, чітко простежується зв'язок між підвищенням концентрації нанотрбок та стійкістю плівки до деструкції. На основі цього побудований графік залежності реакцій R, N у вузлах від вимушених зміщень U (рис. 3), який демонструє, що максимальні реакції спостерігаються при більшому вмісті ВНТ. Крім того, зразки з вищим коефіцієнтом заповнення мають більш стабільний характер зміни напружень, що свідчить про зменшення концентрації напружень у критичних зонах.

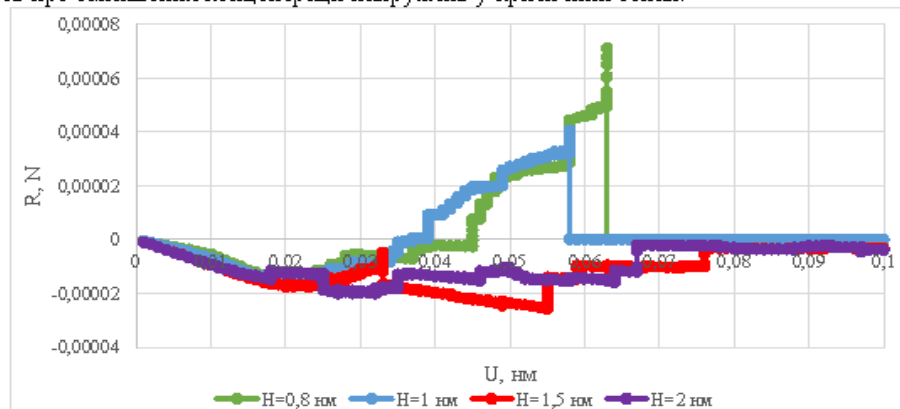


Рисунок 3 – Графік залежності реакцій R, N , від рівня вимушених зміщень зсуву U , нм

Процес руйнування проходить у чотири основні етапи (наприкладі першого та останнього зразка):

1. Зародження зон локального напруження — на ділянках, де прикладено переміщення (рис. 4);

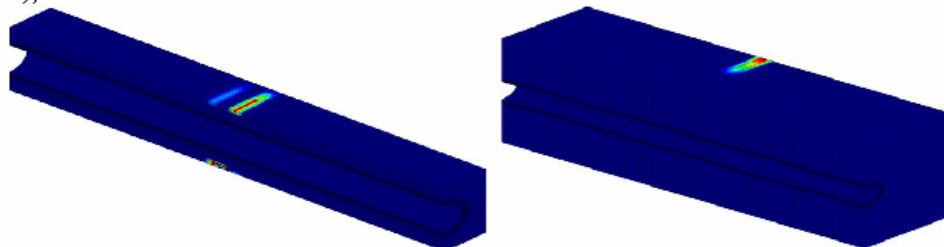


Рисунок 4 – Початок руйнування зразків

2. Формування тріщин зсуву — спостерігається поступове поширення по висоті полімерного шару;

3. Відривні процеси — з'являються вертикальні тріщини, перпендикулярні до осі нанотрубки;

4. Втрата несучої здатності — відшарування нанотрубки або руйнування зони контакту «нанотрубка-полімер» (рис. 5).

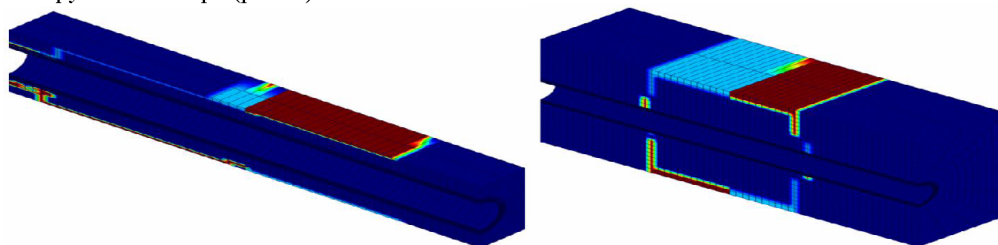


Рисунок 5 – Повне руйнування зразків.

Висновки. У ході числового моделювання впливу концентрації вуглецевих нанотрубок у середньому шарі тришарової полімерної плівки на її міцність було встановлено, що рівень наномодифікації має принциповий вплив на характер напружено-деформованого стану матеріалу та механізм його руйнування. Зразки з вищим коефіцієнтом заповнення демонструють стійкіший опір зсувному навантаженню та мають більш прогнозовану траєкторію руйнування, в якій нанотрубки фактично виконують роль мікроармування, перерозподіляючи еквівалентні напруження по структурі. Навпаки, при низькому вмісті нанотрубок утворюються зони концентрації напружень між полімерними ділянками, що прискорює процес деградації та знижує загальну несучу здатність плівки. Залежність рівня несучої здатності від концентрації нанотрубок виявилася нелінійною, з різницею у допустимому зсуві більш ніж у два рази між крайніми варіантами армування ($U = 0,063$ нм проти $U = 0,032$ нм). Це підкреслює важливість точного підбору вмісту нанонаповнювача при розробці плівкових композитів. Ці висновки відкривають широкі перспективи для хімічної промисловості, зокрема у розробці пакувальних матеріалів з підвищеною міцністю та бар'єрними властивостями, створенні захисних покриттів для хімічно активних речовин, а також у виробництві мембран для фільтрації та сепарації, де стійкість до механічних навантажень та довговічність є критично важливими. Можливість контролювано змінювати механічні властивості полімерних плівок за допомогою наномодифікації дозволяє оптимізувати матеріали для специфічних застосувань, зменшуючи витрати та підвищуючи безпеку в хімічних виробничих процесах.

Перелік посилань

1. Langhe D., Pontin M. Manufacturing and Novel Applications of Multilayer Polymer Films. *William Andrew Publishing*. 2016. P. 1–15. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-37125-4.00001-0>.
2. Li Z., Olah A., Baer E. Micro- and nano-layered processing of new polymeric systems. *Progress in Polymer Science*. 2020. Vol. 102. P. 101210. URL: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2020.101210>
3. Agassant J.-F., Demay Y. Investigation of the Polymer Coextrusion Process: A Review. *Polymers*. 2022. Vol. 14, no. 7. P. 1309. URL: <https://doi.org/10.3390/polym14071309>
4. Vasile C. Polymeric Nanocomposites and Nanocoatings for Food Packaging: A Review. *Materials*. 2018. Vol. 11, no. 10. P. 1834. URL: <https://doi.org/10.3390/ma11101834>
5. Gondlyakh A. V., Sokolskiy A. L., Kolosov A. E., Chemeris A. O., Shcherbina V. Y., Antonyuk S. I. Modeling the mechanisms of fracture formation in nanomodified polymers. *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, Sumy, Ukraine, August 23–27, 2020. Sumy State University, P. 02TM06-1–02TM06-7. URL: <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309637>