

**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

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 131 – Прикладна механіка

на тему: «Формування та механічні властивості композиційних  
полімерних ємностей для зберігання речовин підвищеної небезпеки»

Виконала:  
студентка 2 курсу, групи  
ЛУ-11мн Романченко  
Олександра Сергіївна

\_\_\_\_\_

Керівник:  
зав. каф. ХПСМ, д.т.н. Сокольський О. Л.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Рецензент:

\_\_\_\_\_

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

Студентка \_\_\_\_\_

Київ – 2023 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського» Інженерно-хімічний факультет**

**Кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 131 – Прикладна механіка

Спеціалізація – Інжиніринг пакування та пакувального обладнання

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ О.Л. Сокольський

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію**

**студентці Романченко Олександрі Сергіївні**

1. Тема дисертації «Формування та механічні властивості композиційних полімерних ємностей для зберігання речовин підвищеної небезпеки», науковий керівник дисертації д.т.н., зав. каф. Сокольський Олександр Леонідович, затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.
2. Термін подання студентом дисертації:
3. Об'єкт дослідження: формування та механічні властивості селективно модифікованих полімерних ємностей.
4. Вихідні дані:
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Пояснювальна записка містить текстові частини: «Літературний та патентний огляд стану питання, обґрунтування запропонованої модернізації», «Охорона праці та навколишнього середовища», «Розробка стартап-проекту», «Висновки», «Перелік посилань».
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:  
Лист 1.  
Лист 2.  
Лист 3

7. Орієнтовний перелік публікацій: теза на XXI Науково-практичну конференцію молодих вчених «Новітні технології пакування 2023» (6 квітня 2023р.)

8. публікація в журнал «Упаковка» Інтелектуальні композиційні матеріали для пакувальних виробів ( червня 2022р.)

9. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

10.

Дата видачі завдання:

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Отримання завдання для магістерської дисертації	01.01.2023	
2	Проходження переддипломної практики	06.02-12.03.2023	
3	Здійснення пошуку патентів		
4	Обґрунтування модернізації		
5	Виконання розділу «Пояснювальна записка»		
6	Побудова 3Д моделі в програмі «SolidWorks»		
7	Виконання розділу «Розрахунки»		
8	Виконання розділу «Технологія монтажу та експлуатації»		
9	Побудова креслень в графічному редакторі «AutoCad»		
10	Здача магістерської дисертації		

Студентка

О.С. Романченко

Науковий керівник дисертації

О.Л. Сокольський

## РЕФЕРАТ

УДК \_\_\_\_\_

Магістерська дисертація «Формування та механічні властивості композиційних полімерних ємностей для зберігання речовин підвищеної небезпеки» / О.С. Романченко. КПІ ім. Ігоря Сікорського; н.керівник О.Л. Сокольський. Робота містить: 91 с., 65 рис., 7 табл., 1 дод., 30 посилань.

**Об'єкт дослідження:** формування та механічні властивості селективно модифікованих полімерних ємностей

**Предмет дослідження:** залежності міцнісних параметрів селективно модифікованих полімерних ємностей від їх конструктивних параметрів та механічних властивостей композиційних матеріалів.

**Мета роботи:** полягає у дослідженні міцнісних параметрів селективно модифікованих полімерних ємностей.

**Наукова новизна:** полягає у встановленні залежності зміни фізичних властивостей полімерної та модифікованої ємностей від зміни ступеня армування/наповнення та самого виду армуючого наповнення. Отримані залежності утворених напружень, деформацій та переміщень при зміні ступеня армування та виду армуючих частинок.

**Задачі дослідження:**

- 1) Виконати літературний огляд, проаналізувати відомі способи виготовлення композитних ємностей, рівняння стану матеріалів при пружнопластинчих деформаціях та виникнення зон пошкоджуваності в конструкціях, що досліджуються та знаходяться в умовах динамічного навантаження;
- 2) Провести серію розрахунків спочатку для звичайного ПЕТ, скловолокна, вуглеволокна та нанотрубок, а потім для ПЕТ з поступовим збільшенням в слабких ділянках ступеня армування по чергово за допомогою скловолокна, вуглеволокна та нанотрубок;
- 3) Проаналізувати отриманні результати та встановити закономірності залежності зміни деформації балона механічних властивостей композиційного матеріалу, у визначених ділянках.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ДЕФОРМАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ, КОМПОЗИТНА ПОЛІМЕРНА ЄМНІСТЬ, БАЛОН ВИСОКОГО ТИСКУ, РЕЧОВИНИ ПІДВИЩЕНОЇ НЕБЕЗПЕКИ.

## ABSTRACT

UDK \_\_\_\_\_

Master's thesis "Formation and mechanical properties of composite polymer containers for the storage of substances of increased danger" / O.S. Romanchenko. KPI is named after Igor Sikorsky; associate director O.L. Sokolsky. The work contains 91 p., 65 figures, 7 tables, 1 addendum, 30 references.

Research object: formation and mechanical properties of selectively modified polymer containers

Subject of research: dependence of strength parameters of selectively modified polymer containers on their design parameters and mechanical properties of composite materials.

The purpose of the work: is to study the strength parameters of selectively modified polymer containers.

Scientific novelty: consists in the study of the dependence of the change in the physical properties of polymer and modified containers on the change in the degree of reinforcement/filling and the type of reinforcing filling itself. The obtained dependences of the generated stresses, deformations and displacements upon changing the degree of reinforcement and the type of reinforcing particles.

Research objectives:

1) Carry out a literature review, analyze the known methods of manufacturing composite containers, the equation of state of materials under elastic plate deformations and the occurrence of damage zones in the structures under investigation and under dynamic load conditions;

2) Carry out a series of calculations first for ordinary PET, glass fiber, carbon fiber and nanotubes, and then for PET with a gradual increase in the weak areas of the degree of reinforcement alternately using glass fiber, carbon fiber and nanotubes;

3) Analyze the obtained results and establish regularities of the dependence of the balloon deformation on the mechanical properties of the composite material in the specified areas.

**KEYWORDS:** DEFORMATION PROPERTIES, COMPOSITE POLYMER CAPACITY, HIGH PRESSURE CYLINDER, SUBSTANCES OF INCREASED DANGER.

## ЗМІСТ

<b>Вступ .....</b>	<b>3</b>
<b>1.ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ .....</b>	<b>5</b>
1.1. УЯВЛЕННЯ ПРО КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ .....	5
1.2.ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИТІВ, ЇХ ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ .....	8
1.3.ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЇ КОМПОЗИТНИХ ПОЛІМЕРНИХ ЄМНОСТЕЙ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ РЕЧОВИН ПІДВИЩЕНОЇ НЕБЕЗПЕКИ .....	18
1.4.ВИГОТОВЛЕННЯ ЄМНОСТЕЙ З КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ . <b>Ошибка!</b>	
<b>Закладка не определена.</b>	
1.4.1.ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЄМНОСТЕЙ З КОМПОЗИТУ .....	29
1.4.2.ПРИКЛАД МЕТОДУ РОЗРАХУНКІВ <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	<b>33</b>
<b>2.МАТЕМАТИЧНА ПОСТАНОВКА КОНТИНУАЛЬНО-ДИСКРЕТНОЇ ЗАДАЧІ ДВОФАЗНОЇ ТЕЧІЇ РІДИНИ З ТВЕРДИМИ ЧАСТИНКАМИ<b>Ошибка! Закладка не определена.</b></b>	<b>5</b>
<b>3.РОЗРАХУНКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦІЙНИХ ЄМНОСТЕЙ .....</b>	<b>Ошибка! Закладка не определена.9</b>
3.1.ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖИ МІЦНОСТІ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ ПІД ЧАС РОЗТЯГУВАННЯ (СТИСНЕННЯ) .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.9</b>
3.2.ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОНАПРЯМЛЕНИХ КОМПОЗИТІВ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.45</b>
3.2.МЕТОДИ ВИЗНАЧЕНЬ НАПРУЖЕНЬ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.46</b>
3.3.РОЗРАХУНКИ НА МІЦНІСТЬ КОМПОЗИТНОГО БАЛОНА ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ РЕЧОВИН ПІДВИЩЕНОЇ НЕБЕЗПЕКИ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.56</b>
<b>4.РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....</b>	<b>Ошибка! Закладка не определена.73</b>
4.1.ОСНОВНА ІДЕЯ ПРОЕКТУ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.73</b>
4.2.АКТУАЛЬНІСТЬ ІДЕЇ СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	73
4.3.НОВИЗНА ОБРАНОГО СТАРТАПУ, .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.74</b>
4.4.АНАЛІЗ ПОПИТУ ТА ПРОПОЗИЦІЙ ... <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	<b>74</b>
4.5.ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ..... <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	<b>74</b>
4.6.ФІНАНСОВІ ПОКАЗНИКИ ПРОЕКТА .....	75
4.7.СТВОРЕННЯ РОБОЧИХ МІСЦЬ..... <b>7Ошибка! Закладка не определена.</b>	
4.8 ВИРОБНИЦТВО .....	76
4.8.1 ПРОДУКЦІЯ .....	76
4.8.2 СФЕРИ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ ЄМНОСТЕЙ .....	77
4.8.3 ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ ПЛАН .....	77
4.8.4 ПЛАН ЗАКУПІВЕЛЬ .....	78
4.9 АНАЛІЗ ДОХОДІВ І ВИТРАТ .....	79
4.9.1 ОБОРОТНІ ЦИКЛИ .....	79
4.9.2 ПОДАТКОВІ СТАВКИ .....	80
4.9.3 АНАЛІЗ РИЗИКІВ.....	81
4.9.4 КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ РИЗИКІВ .....	81
4.9.5 ЯКІСНИЙ АНАЛІЗ РИЗИКІВ.....	82
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	92
Додаток А Копії статей, доповідей та тез доповідей.....	95

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

### Умовні скорочення:

ІХФ – інженерно-хімічний факультет;

КПІ ім. Ігоря Сікорського – Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського;

ХПСМ – кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування;

SDEG – Scalar stiffness degradation;

CPP - Certificate of a Pharmaceutical Product.

(КМ) – композитний матеріал

(ПКМ) – полімерний композиційний матеріал

(ВНТ) – вуглецеві нанотрубки

### Умовні позначення:

M - максимальна робоча маса балона;

F – енергія;

L – товщина матриці;

E<sub>m</sub> – модуль матриці;

11, 12, 13 – розміри наповнювача;

e<sub>j</sub> — концентрація кожної фази;

d<sub>ч</sub>; S<sub>ч</sub> – відстань між армуючими частинками;

u — вектор швидкості;

q — густина;

p – термодинамічний тиск;

b – коефіцієнт передачі імпульсу межі розділу;

$\tau_s$  - представляє тензор напруження для твердої фази;

s<sub>1</sub> – тензор в'язкого напруження;

$\mu_s$  - динамічна в'язкість твердої фази;

$\nabla u_s$  - градієнт вектора швидкості твердої фази,

$(\nabla u_s)^T$  - транспонований градієнт вектора швидкості твердої фази,

$(\nabla \mathbf{u} \cdot \mathbf{I})\mathbf{I}$  - інваріантна складова градієнта вектора швидкості твердої фази,

$\xi_s$  - коефіцієнт в'язкості твердої фази,

$\nabla u_s$  - дивергенція вектора швидкості твердої фази,

$\mathbf{I}$  - одиничний тензор.

$p_s$  – тиск частинки;

$E_f$  – модуль волокна;

$\mathbf{u}$  – вектор швидкості рідкого середовища;

$\mathbf{u}_p$  – вектор швидкості твердих частинок;

$F_D(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p)$  – сила опору, віднесена до маси частинки;

$C_D$  – безрозмірний коефіцієнт гідравлічного опору;

$\rho_p$  – густина твердих частинок;

$d_p$  – усереднений діаметр твердих частинок;

$\rho_v$  – густина матеріалу волокон;

$\rho_m$  – густина матеріалу матриці;

$V_f, V_m$  - Відносний об'ємний вміст волокон і матриці;

$\Delta T$  – перепад температури;

$F_{Bp}$  - межа міцності волокна;

$E_B$  - модуль пружності волокна;

$F_{1p}$  – межа міцності КМ;

$E_1$  - модуль пружності КМ вздовж волокна;

$\rho$  – густина;

$[\sigma_{Ts}]$  – границя міцності;

$E$  – модуль пружності;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона;

## ВСТУП

### **Актуальність теми:**

Використання газокомпозитних балонів справило революцію у тому, як ми зберігаємо та транспортуємо газ. Ці циліндри виготовлені з легких матеріалів, таких як вуглецеве волокно, що робить їх набагато легшими, ніж традиційні сталеві циліндри. Це не лише полегшує їхню обробку, а й знижує транспортні витрати. Однією з найбільших істотних переваг газокомпозитних балонів є їхня здатність витримувати високі тиски. Це робить їх ідеальними для зберігання та транспортування стиснутих газів, таких як газ, кисень, азот та водень. Вони також стійкі до корозії, що означає, що вони мають триваліший термін служби, ніж традиційні циліндри. Виробничий процес включає обгортання вуглецевого волокна форми, а потім затвердіння його в печі. Це створює міцний та довговічний циліндр, який може витримувати високий тиск. Композитні ємності можуть бути заповнені набагато більше разів, ніж традиційні ємності. Це пов'язано з тим, що вони призначені, щоб витримувати стреси повторного використання і менш схильні до втоми. Що стосується дизайну та технічних характеристик композиційних ємностей, то вони значно варіюють залежно від виробника, проте основні вимоги до них залишаються незмінними.

Найчастіше, основна частина технології реалізується на термопластавтоматі, куди встановлюються розігріті до певної температури преформи (візуально в цей момент вони подібні до пластичних пробірок). Видування композиційних ємностей загалом нагадує створення мильних бульбашок – під високим тиском стиснене повітря "розправляє" податливий після нагрівання матеріал, а відповідність заданої зміни забезпечують стінки форми.

**Мета і завдання дослідження.** Метою даної роботи, згідно технічного завдання, є дослідження залежності зміни технічних характеристик від зміни кількості наповнювача та виду армуючої речовини та їх порівняння з метою подальшого визначення найкращого виду армуючого наповнення для підвищення технічних характеристик.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

**Об'єкт дослідження:** формування та механічні властивості селективно модифікованих полімерних ємностей

**Предмет дослідження:** залежності міцнісних параметрів селективно модифікованих полімерних ємностей від їх конструктивних параметрів та механічних властивостей композиційних матеріалів.

**Наукова новизна:** полягає у встановленні залежності зміни фізичних властивостей полімерної та модифікованої ємностей від зміни ступеня армування/наповнення та самого виду армуючого наповнення. Отримані залежності утворених напружень, деформацій та переміщень при зміні ступеня армування та виду армуючих частинок.

**Задачі дослідження:**

1) Виконати літературний огляд, проаналізувати відомі способи виготовлення композитних ємностей, рівняння стану матеріалів при пружнопластинних деформаціях та виникнення зон пошкоджуваності в конструкціях, що досліджуються та знаходяться в умовах динамічного навантаження;

2) Провести серію розрахунків спочатку для звичайного ПЕТ, скловолокна, вуглеволокна та нанотрубок, а потім для ПЕТ з поступовим збільшенням в слабких ділянках ступеня армування по чергово за допомогою скловолокна, вуглеволокна та нанотрубок;

3) Проаналізувати отриманні результати та встановити закономірності залежності зміни деформації балона механічних властивостей композиційного матеріалу, у визначених ділянках.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 3 наукових роботи.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків і переліку посилань. Основна частина дисертації представлена на 82 сторінках і містить 65 рисунків. Загальний обсяг роботи становить 91 сторінку, у тому числі 1 додаток і перелік посилань з 30 найменувань на 3 сторінках.

## РОЗДІЛ 1: ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

### 1.1. Уявлення про композиційні матеріали

Композитні матеріали (КМ) - це штучно створені матеріали, які складаються з двох або більше компонентів, окремих волокон або інших складових елементів, з'єднаних матрицею, які мають чітку межу між ними.

Згідно з цим визначенням, до композитів входять дисперсійно-зміцнені сплави, бетон, метали з покриттям та інші матеріали. Також до цього класу матеріалів можна віднести полікристалічні тіла, складені з одним продуктом, розглядаючи їх гранули з різною орієнтацією як різні фази. Однорідні матеріали з пустотами також можуть бути включені сюди. У зручності, одну з фаз називають матрицею або сполучною, а інші - включеними або армуючими елементами.

Основна властивість композитів виникає в тому, що їх характеристики відрізняються від властивостей складових матеріалів. Компоненти КМ не повинні взаємодіяти між собою, але вони повинні бути сумісними. Зазвичай такі матеріали класифікуються за формою включення, які можуть бути у вигляді макрочастинок (гранул), коротких або розірваних волокон, довгих безперервних волокон (ниток) або шарів.

Особливої уваги варто приділити застосуванню композитних матеріалів з армуючими волокнами в сучасних виробках. Вони створені з іншої матерії, яка посилена високоміцними волокнами, що мають більші модулі пружності, а також межі міцності.

Композити відрізняються своїм різноманіттям корисних і унікальних властивостей, а при поєднанні, це дає можливість створити ефективні конструкції з високими фізико-механічними характеристиками. Для досягнення бажаних властивостей композитів у процесі виготовлення конструкції важливо керувати характеристиками матеріалу, шляхом зміни орієнтації волокон і з'єднання шарів з використанням різних матеріалів. Цей підхід дозволяє отримувати матеріали з необхідними механічними характеристиками.

Це дає можливість створити матеріал, який найкраще відповідає призначенню, враховуючи дію навантаження та умови використання кожної окремої конструкції. Наявність цілеспрямованих характеристик композитних матеріалів означає, що вони можуть мати як високі значення в певних напрямках, так і не досить високі в решті напрямків. Проте, враховуючи їх унікальні особливості, ці матеріали можуть створити конструкцію з надзвичайно високим рівнем якісних характеристик, які неможливо отримати використовуючи звичайні матеріали.

### **Розподіл композитів за матеріалом, що використовується в якості матриці**

Одним із ключових факторів класифікації композитних матеріалів є матеріал, який використовується в якості матриці. Композити можуть мати різні матриці: металеві - що в своєму складі містять матрицю з металевими волокнами, відомі ще як (МКМ), полімерні - композиційні матеріали (ПКМ) з полімерною матрицею, керамічні - матеріали (ККМ) з керамічною матрицею. Крім того, Композиції, що складаються з двох або більше матричних матеріалів різного складу, відомі як поліматричні [1].

У назвах полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) традиційно використовують дві частини. Перша частина вказує на матеріал, що використовується в якості наповнювача, друга частина містить слово волокно. Наприклад, композити, які складаються з полімерної матриці і скловолокна, називаються склопластиками. Існують також назви, такі як органопластики для композитів з органічними волокнами, боропластики для композитів з органічними волокнами та вуглепластики для композитів з вуглецевими волокнами.

### **Класифікація в залежності від геометрії їх армуючих волокон**

Табл.1.1 наведена класифікація композитів за геометрією армуючих волокон

<b>Вид композиту</b>	<b>Класифікація матеріалів</b>
Порошкові КМ	Зміцнені композити з використанням порошків
Волокнисті КМ	Композиційні матеріали, армуються як безперервними, так і дискретними волокнами.
Пластичні КМ	Композити, що мають шарувату структуру

## Матричні композиційні матеріали залежно від схеми армування

Усі композиційні матеріали можна розділити на дві групи - ізотропні та анізотропні, які розрізняються за орієнтацією. Ізотропні матеріали мають однакові властивості у всіх напрямках, тоді як властивості анізотропних матеріалів змінюються залежно від сторони в об'єкті, що досліджується.

Композити, що мають матричну структуру розподіляють на хаотично-армовані та впорядковані (рис. 1.1). Хаотичні композити містять в своєму складі елементи у вигляді дисперсних включень, або волокон. Ці матеріали мають ізотропну або квазіізотропну структуру. Термін «квазіізотропний» означає, що КМ є анізотропним на мікрорівні, але в цілому обсязі виробу вони проявляють ізотропні властивості.

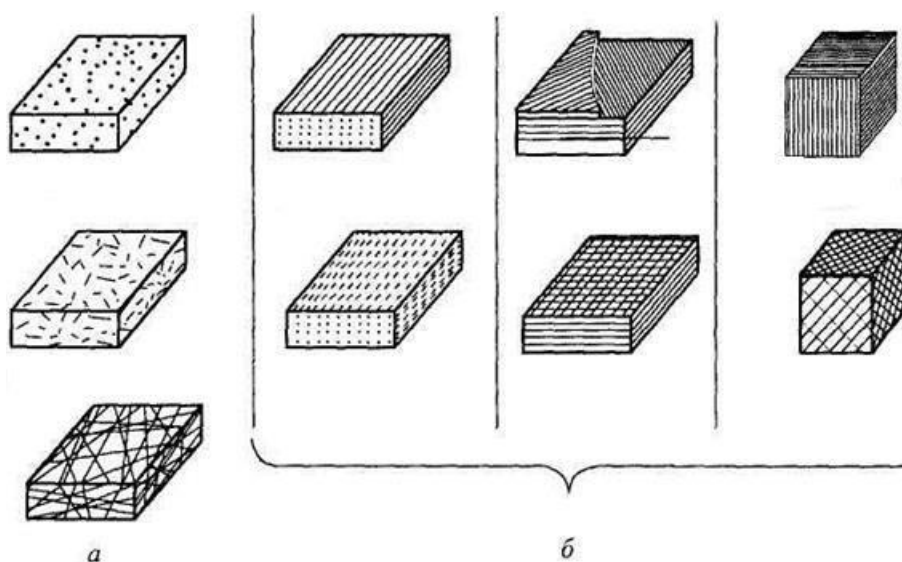


Рисунок. 1.1. – Композиційні матеріали залежно від їх конструктивних особливостей: хаотично-армовані (а), одномірно- та просторово-армовані (б).

### Способи отримання композиційних матеріалів

Згідно з даною класифікацією, композити поділяються на ті, що отримані за допомогою різних методів осадження.

До групи рідкофазного методу входять процеси просочення (застосування полімерів або розплавлених металів для просочення арматури), а також метод спрямованої кристалізації сплавів.

Твердофазні методи отримання КМ включають такі процеси, як екструзія, чи метод штамповки, волочіння і тп.

При використанні методів осадження - напилення для отримання композиційних матеріалів, матриця наноситься на волокна з використанням солей або з використанням плазми. Такі способи включають в себе використання декількох методів, які можуть застосовуватись послідовно або паралельно.

## **1.2. Властивості композитів, їх переваги та недоліки**

Зацікавленість у композитних матеріалах пояснюється їхнім унікальним набором властивостей які значно відрізняють їх від звичайних матеріалів. Найголовнішими перевагами є підвищена міцність при низькій щільності. Також, важливою перевагою є можливість активного впливу на механічні та фізичні характеристики під час створення композитного матеріалу для конструкцій. Технічні характеристики матеріалів змінюються від виду наповнення та кількості.

**Матриця** визначається як неперервна фаза в просторі, яка виконує ряд важливих функцій у композитних матеріалах. Вона забезпечує збереження форми, передає експлуатаційні навантаження та забезпечує захист від впливу зовнішніх умов, таких як вологість, температура, хімічні речовини та інші фактори, які можуть впливати на стійкість і довговічність композитного матеріалу.

Вимоги до матеріалів діляться залежно від характеристик на:

- 1) Перша група включає в собі міцнісні вимоги, а також вимоги теплостійкості;
- 2) Друга група містить в собі такі характеристики як гнучкість, здатність до опору тріщинам і здатність поглинати ударні навантаження;
- 3) Третя група включає вимоги до засвоюваності матриці, а також до її технологічних властивостей у процесі з'єднання.

Розрізняють наступні категорії матриць: металеві, що включають в собі алюмінієві сплави, алюміній, а також сплави з інших різних металів; полімерні, які включають різні види термопластів, таких як поліетилен і тд., реактопласти, до яких відносяться такі як фенолоальдегідні види смол, та різні види еластомерів.

### **Полімерні матриці**

При виборі полімерної матриці для композитів враховуються умови використання. Властивості композитного матеріалу, такі як міцність, теплостійкість і стійкість до вологи, значно залежать від властивостей полімерної матриці.

Крім того, вибір матеріалу особливо впливає на стійкість до впливу різних середовищ. Під час виготовлення пластиків найпоширенішими зв'язками є термореактивні, які під час нагрівання пройшли незворотні зміни. Однак, зростає використання термопластичних матеріалів, які здатні розплавлятися і знову затвердівати без незворотних змін у структурі під час нагрівання.

Використання термореактивних полімерів у чистому вигляді, без додавання структурних частинок, є досить рідкісним явищем. Під час початку процесу створення матеріалів, а в подальшому і виробів термо-сполуки проявляють невисоку в'язкість, яка сприяє легкості процесу формування. Завдяки використанню різних видів наповнювачів, можна отримати матеріали з широким спектром міцності електричних та інших властивостей, які впливають на ефективність роботи та якість експлуатації.

**Феноли** є результатом хімічної реакції між фенолами і альдегідами. Вони можуть мати різну хімічну будову, молекулярну масу і здатність до затвердіння, залежно від умов їх отримання, (рис. 1.2). Існує два основних типи фенолоформальдегідів (ФФБ) - резольні або ж новолачні.

Під час виробництва композитів за допомогою даного виду смол, перед початком вони піддаються переробці, яка просочення волокнистих, паперових, нетканих та інших наповнювачів. В кінці процесу затвердіння, до суміші матеріалів застосовуються різні методи обробки, такі як пряме і литтєве пресування.

**Епоксиди** – це хімічні, розчинні сполуки, що можуть набувати властивостей мономерів, олігомерів і тд., та розчинні в різних розчинниках. Коли епоксидні смоли не затверділи, вони можуть бути в формі термопластичних легких рідин або твердих речовин.

Отримання різних видів матеріалів, що засновані на різних видах смол включає такі кроки: просочування різних видів волокон у смолі, після чого матеріал висихає, а потім піддається обробці за допомогою різних методів, таких як пряме пресування, та інші.

**Поліетилен** є одним з найбільш популярних полімерів, який має широке застосування.

Існують дві основні варіації поліетилену: **поліетилен низького та високого тиску**. ПЕНТ відзначається вищою міцністю, теплостійкістю, а також хімічною стійкістю. З іншого боку, ПЕВТ має вищу газопроникність.

За звичайних температурних умов поліетилен виявляє високу стійкість до розбавлення сірчаною, азотною та іншими видами кислот, і також має низьку здатність до поглинання вологи. Поліетилен може бути перероблений шляхом екструзії, а також його легко зварювати і механічно обробляти.

**Поліпропілен** володіє високою стійкістю до зношування і виявляє добру гнучкість. Він також виявляє стійкість на дію різних кислот або лугів. Поліпропілен має слабку вразливість до концентрованої сірчаної кислоти, що має кімнатну температуру але руйнується катастрофічно при температурі мінус 60 °С. Зауважимо, що поліпропілен нестійкий до дії сильних окислювачів.

**Полістирол** – є досить крихким полімером, який проявляє високу стійкість до радіації, та швидко піддається властивостям старіння. Він виявляє стійкість до деяких видів кислот, лужних рідин, масел, проте вразливий до концентрованої азотної або ж оцтової кислоти, що спричиняє його подальші руйнування.

**Поліаміди** – утворюються в результаті полімеризації за участі іонів капролактаму. Вони відрізняються високою атомною міцністю, стійкістю до зношування, і стабільністю властивостей при досить високих температурах. Крім того, поліаміди проявляють стійкість до різного роду розчинників.

**Поліміди** – мають властивості, що характерні для виробів, виготовлених з такого матеріалу як: піромеллітова кислота. Вони відрізняються високим рівнем стабільності, невисоким рівнем повзучості при зашкальних температурах, а також термостійкістю та стійкістю до впливу  $\gamma$ -випромінювання, і тд.. Поліаміди практично не піддаються впливу розбавлених кислот.

Більшість термопластів відрізняються вищою продуктивністю і меншими енергозатратами під час формування деталей. Вони також дозволяють створювати деталі будь-якої форми та конфігурації. Термопласти можуть бути піддані вторинній переробці, мають знижену горючість, низьке утворення диму, а також відрізняються високою ударною міцністю.

У промисловості переробки пластмас, еластомери використовуються переважно як високомолекулярні пластифікатори, з метою покращення міцності та підвищення технічних характеристик полімерів.

Використання еластомерів, що присутні всередині композитів через їх низьку стійкість до старіння під впливом температур а також високий рівень липкості та деформованості таких матеріалів, що зазвичай не дозволяє їх використовувати у формі гранул, а в подальшому це призводить до проблем під час застосування.

Характеристики таких матеріалів змінюється в залежності від властивостей армуючого наповнювача, таких як форма та розмір, а також кількісний відсоток наповнювача. В залежності від форми, матеріали можна розділити на такі підгрупи які представлені на(рис. 1.3):

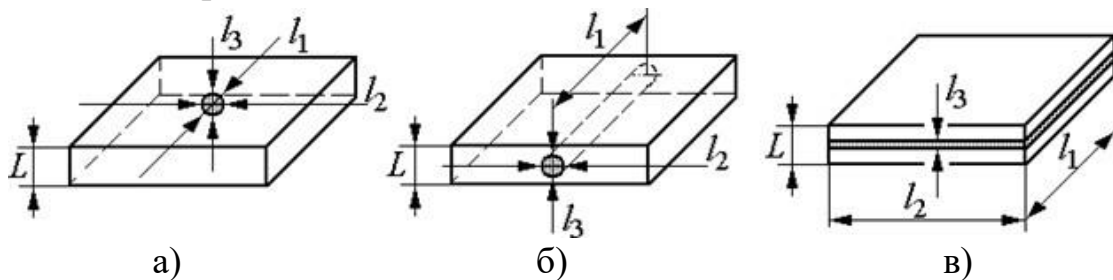


Рисунок. 1.2. – Види наповнювачів за формою: а – нульвимірні;  
б – одновимірні; в – двовимірні;

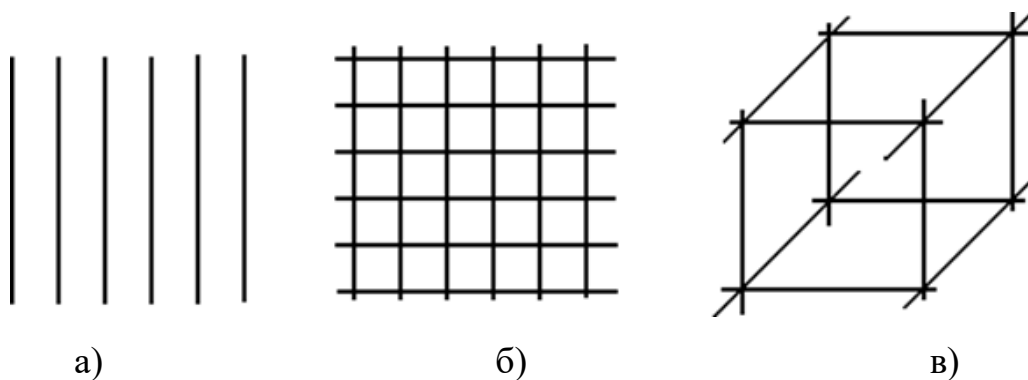


Рисунок. 1.3. – Види можливого армування:  
а – одновісна; б – двовісна; в – трьохвісна

де,  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  – відповідають за розміри наповнювача тоді як  $L$  позначає товщину матриці.

В залежності від форми наповнювача, композити можуть бути класифіковані як дисперсно-зміцнені, ті, що складені з волокон, або волокнисті а також шаруваті.

Залежно від схеми армування, композитні матеріали можуть бути поділені на групи за типом армуванням, як показано на (рис. 1.4.) При одноосьовому армуванні волокнистого композиту, вміст наповнювача становить від 1% до 5%. У випадку двохосьового армування, вміст наповнювача становить від 15% до 16%. При трьохосьовому армуванні волокнистого композиту, вміст наповнювача перевищує 15%. Шаруваті композити в своєму складі замість волокон, містять тонкі аркуші спеціального паперу, частіше тканини або ж азбестув якості наповнювачів.

Для покращення або посилення певних властивостей можуть використовуватись різні форми наповнювачів або наповнювачі з однієї форми, але з різним складом. Це дозволяє розширити набір характеристик композиційного матеріалу або підвищити певну властивість.

#### **Композиційний матеріал, який зміцнений за допомогою дисперсійно розподіленого наповнювача**

Дисперсно-зміцнений композиційний матеріал - це матеріал, у якому дисперсійні частинки (наповнювачі) розподілені рівномірно у матриці (основному полімері). Це дозволяє зміцнити матеріал та покращити його механічні властивості при різних температурах, такі як міцність, жорсткість, ударна стійкість і стійкість до зношування. Для досягнення високої міцності використовуються зміцнюючі частинки розміром 0,01-0,1 мкм. Об'ємний вміст цих частинок залежить від типу армування і зазвичай становить не більше 5-10% об'єму композиційного матеріалу.

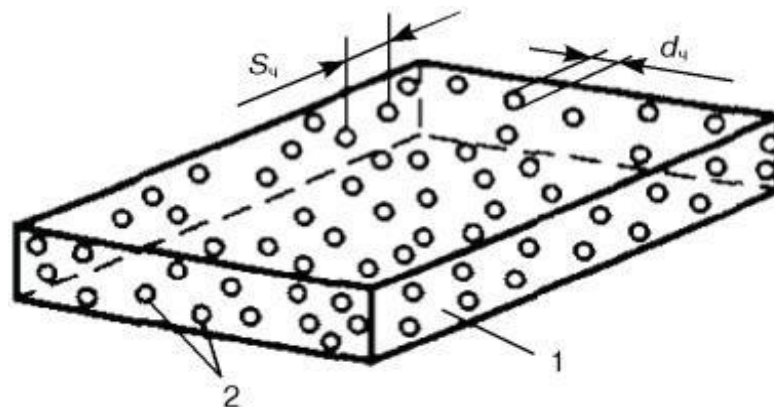


Рисунок. 1.4. – Композит з армуючими частками:

1 - матриця; 2 - армируючі частинки діаметром  $d_v$ ;  $S_v$  - відстань між частинками

Шаруваті пластики відрізняються тим, що їх наповнювач представлений у вигляді листів або різної товщини відповідних тканин. Такі матеріали, що містять шаруватий наповнювач, можна вважати шаруватими матеріалами, наприклад, шарувате скло або ті ж самі ламінати, що базуються на пластиках.

При додаванні одновісної розтягуючої напруги до шарового композиту з ортогональним армуванням  $[0^\circ / 90^\circ]$ , який зображений на малюнку праворуч, виникне короблення через різницю у модулі пружності вздовж і поперек волокон.

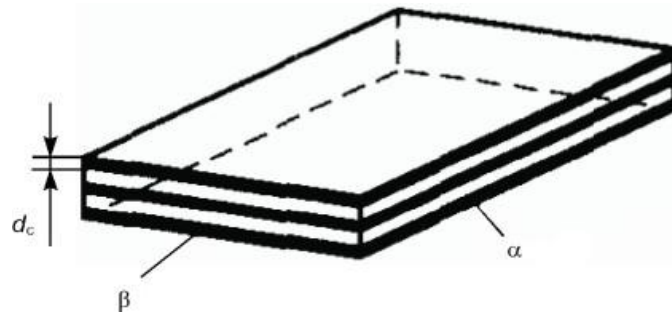


Рисунок. 1.5. – Схема шаруватого пластику:  
 $d_c$  - товщина шару;  $\alpha$  -  $\beta$  вид композиту

За напрямком волокон жорсткість матеріалу вища, відповідно, шар композиту з паралельно розташованими волокнами буде деформуватися менше під прикладеним навантаженням розтягу, у порівнянні з шаром, на який діє навантаження прикладене поперек волокна.

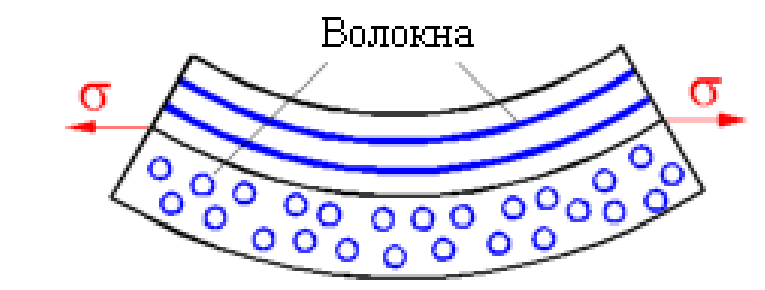


Рисунок. 1.6. – Схема будови шаруватого композиту

Дерево-шаруваті композити представляють собою композитні матеріали, в яких деревна шпона просочена смолами. Такий вид пластиків володіє високими технічними характеристиками. Однак, значним недоліком є їх чутливість до вологості. Гетинакс, що також відноситься до даного підвиду композитів створюється з паперу, який просочений смолами. Цей матеріал має хороші властивості та високу міцність, але в порівнянні з текстолітами виявляє трохи меншу стійкість.

Текстоліти є матеріалами, в яких тканина, така як хлопчато-паперова або синтетична тканина, використовується як наповнювач, в той час як просочення відбувається при використанні різних видів смол, залежно від потрібного рівня властивостей. Вони характеризуються низьким коефіцієнтом тертя та високою стійкістю до різних впливів.

**Склотекстоліт** - це композитний матеріал, в якому тканини зі скла використовуються як наповнювач, а епоксидні та інші види смол виступають як зв'язуючі компоненти. Склотекстоліт відрізняється високою стійкістю до різкої зміни температур, а також високою стійкістю до більшої кількості різних реагентів.

**Волокнисті композити** (рис. 1.7) зазвичай є матеріалами, в яких пластикна матриця посилюється високоміцними волокнами, та мають форму продовгуватих тонких волокон, подібних до ниток. Волокна відповідають за міцнісні характеристики, а також жорсткість матеріалу, в залежності від розташування волокон. Технічні характеристики представленого композиту залежать від взаємозв'язку трьох складових:

- 1) міцності волокна;
- 2) технічних характеристик матриці;
- 3) міцності взаємозв'язків волокно.

Волокнисті пластики можна поділити на різні категорії в залежності від природи їх компонентів, типу наповнювача та способу розташування компонентів у матриці.

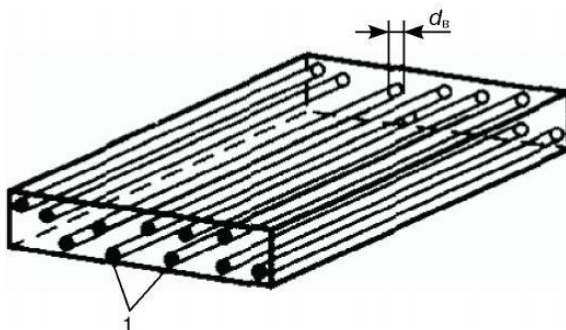


Рисунок. 1.7. – Схема волокнистого пластику: 1 - волокна,  $d_e$  - діаметр волокна

Шляхом використання волокон різних діаметрів та перетинів (таких як трикутні, квадратні, ромбічні), можна збільшити значення параметра для безперервних волокон.

Ущільнення полімерних та металевих волокон досягається за допомогою тиску. Модуль пружності для матеріалу з безперервними волокнами часто залежить від значення кута, який розташовано між напрямком та навантаженням, що прикладено.

Максимальна жорсткість композиту проявляється при додатку навантаження паралельно до осі волокон. Жорсткість шаруватих композитів з волокнами  $[+q/-q]$ , що взаємно перетинаються, вище, ніж у односпрямованих композитів, завдяки додатковому обмеженню зсувних деформацій, завдяки зсувним деформаціям.

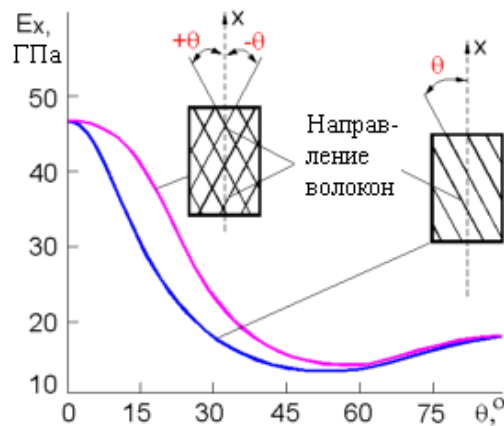


Рисунок. 1.8. – Графік залежності жорсткості від напрямку волокон

Зі збільшенням об'єму волокон  $V_f$  в односпрямованих композитах, зростає здатність даного матеріалу витримувати будь-які навантаження. Супротив волокон суттєво залежить від кута який лежить між навантаженням та напрямком волокон. Зі збільшенням даного кута, довговічність композиту суттєво спадає.

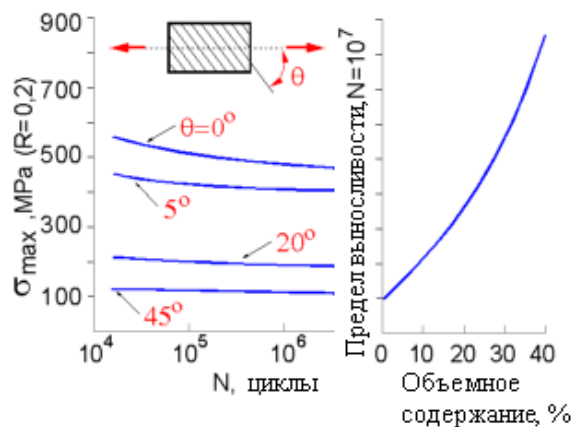


Рисунок. 1.9. – Графік залежності міцності від зміни кількості вмісту армуючого наповнення

Зі збільшенням відношення довжини волокна до діаметра ( $l/d$ ) міцність композитів з короткими волокнами збільшується. Міцність самого волокна залежить від його діаметра, і вона збільшується при зменшенні діаметра волокна при фіксованій довжині. При охолодженні шаруватих композитів з ортогональним армуванням виникають залишкові напруження, обумовлені термічною усадкою співосною до напрямку армування. При процесі охолодження, шари з волокнами, розташованими під кутом  $90^\circ$ , піддаються розтягуючим напруженням, тоді як шари матеріалу які розташованими під кутом  $0^\circ$ , навпаки стискаються.



Рисунок. 1.10. – графік залежності міцності від збільшення відношення довжини волокна до його діаметра.

### Вуглецеві нанотрубки

Відомі всього чотири основних типи вуглецю. Фулерени представляють собою молекули, які повністю складаються з атомів вуглецю і можуть мати форму деякої сфери, що пуста зсередини, а також у формі циліндра. У випадку, коли фулерени набувають форми циліндрів, їх називають нанотрубками. Даний вид фулерів, а саме вуглецеві нанотрубки можна отримати шляхом складання шарів графену у форму трубки, як показано на (рис. 1.11). Ці трубки складаються з циліндричних структур, які можуть бути одно- або багато- шаровими, залежно від кількості графенових шарів, що утворюють нанотрубку.

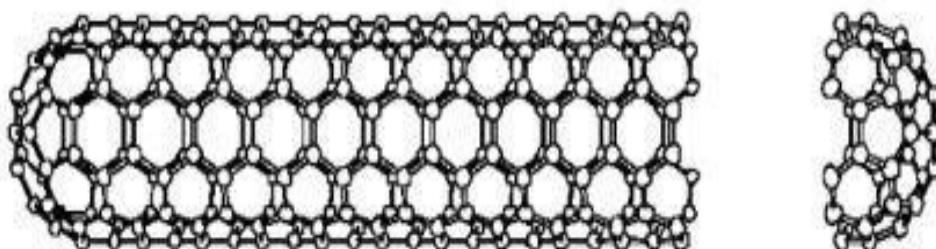


Рисунок 1.11– Схема ідеальної моделі нанотрубки

Вуглецеві нанотрубки мають цікаву властивість, оскільки вони можуть мати металеві або напівпровідникові характеристики. Це пов'язано з їхньою структурою - вони складаються з графенових листів, які згортаються у форму циліндра. Електричні властивості вуглецевих нанотрубок залежать від діаметра циліндра та кута, під яким згортається графен. Нанотрубки поділяють за двома категоріями:

- Вуглецеві багатошарові нанотрубки (MWNT) - характеризуються наявністю багатьох вкладених шарів вуглецю. MWNT складаються з кількох листів графену, які згорнуті у форму трубки, утворюючи структуру з багатьма шарами.

- Вуглецеві одношарові нанотрубки (SWNT) - представляють собою нанотрубки, складені з однієї шарової оболонки атомів вуглецю. Вони мають трубчасту структуру з діаметром кількох нанометрів і проявляють схожі властивості з графеном.

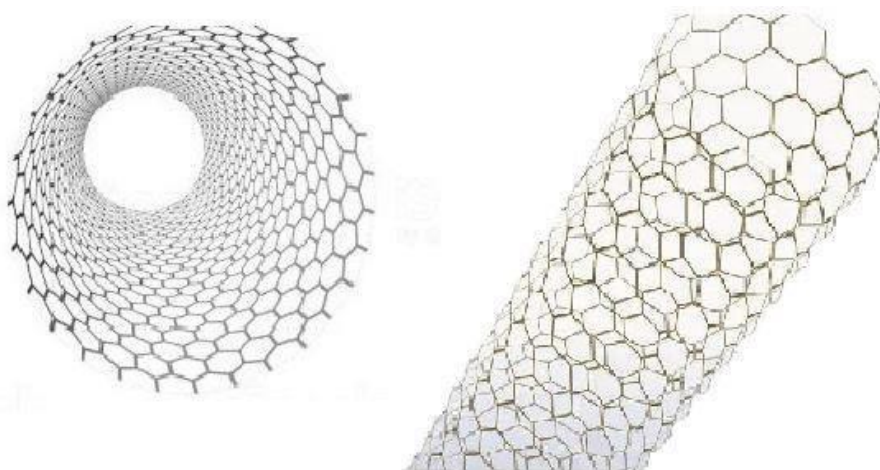


Рисунок 1.12 – схема будови нанотрубки

Мотузки або пучки нанотрубок, що складаються в основному з одного невеликого шару вуглецю, та зазвичай мають сильну взаємодію між собою. Вони виявляють фізичні властивості як у металів, так і у напівпровідників. Особливо одношарові вуглецеві нанотрубки (SWNT) визнані одними з найбільш перспективних кандидатів для мініатюризації електроніки, перевершуючи сучасні технології.

### **1.3. Патентний огляд конструкції композитних полімерних ємностей для зберігання речовин підвищеної небезпеки**

Під час виконання магістерської дисертації було зроблено огляд технічної літератури з метою аналізу конструкцій і вибору модернізації для формування композиційних полімерних ємностей для зберігання речовин підвищеної небезпеки, а також визначення їх переваг та недоліків. Проаналізовані джерела [1-6]. Обрана конструкція для формування композиційних полімерних ємностей для зберігання речовин підвищеної небезпеки на основі прототипу у джерелі [1].

В результаті аналізу конструкцій композитних полімерних ємностей для зберігання речовин підвищеної небезпеки виявлені такі її переваги (спрощення виробництва, підвищення рівня герметизації, уникнення явищ структурного зносу, підвищення міцності в області горловини) і недоліки (складність виробництва, проблеми герметизації балона та явища псування синтетичних матеріалів, низька міцність в зонах підвищеного навантаження) [1-6]. Виходячи з індивідуального завдання магістерської дисертації необхідно покращити попередньо визначені найбільш навантажені зони полімерних ємностей.

Для цього проведено патентно-літературний огляд способу формування композиційних полімерних ємностей для зберігання речовин підвищеної небезпеки. Для вибору варіанту модернізації конструкції композитних полімерних ємностей та способу їх виготовлення знайдено 13 технічних рішень на основі патентів [7-13]. Розглянемо їх детальніше.

Корисна модель [1] відноситься до способу виготовлення композитної ємності (1) під тиском із внутрішнім контейнером (4), виготовленим із термопластичного матеріалу, принаймні одним полюсним наконечником (6), розташованим у горловині (2), і з обмоткою (5), виготовленою з волокнистого матеріалу зміцнення внутрішнього контейнера (4), де спосіб включає виготовлення внутрішнього контейнера (4) шляхом екструзійного видувного формування, а полюс (6) формується на внутрішньому контейнері під час формування внутрішнього контейнера таким чином, що полюсний наконечник (6) щонайменше частково закрита внутрішнім контейнером (4).

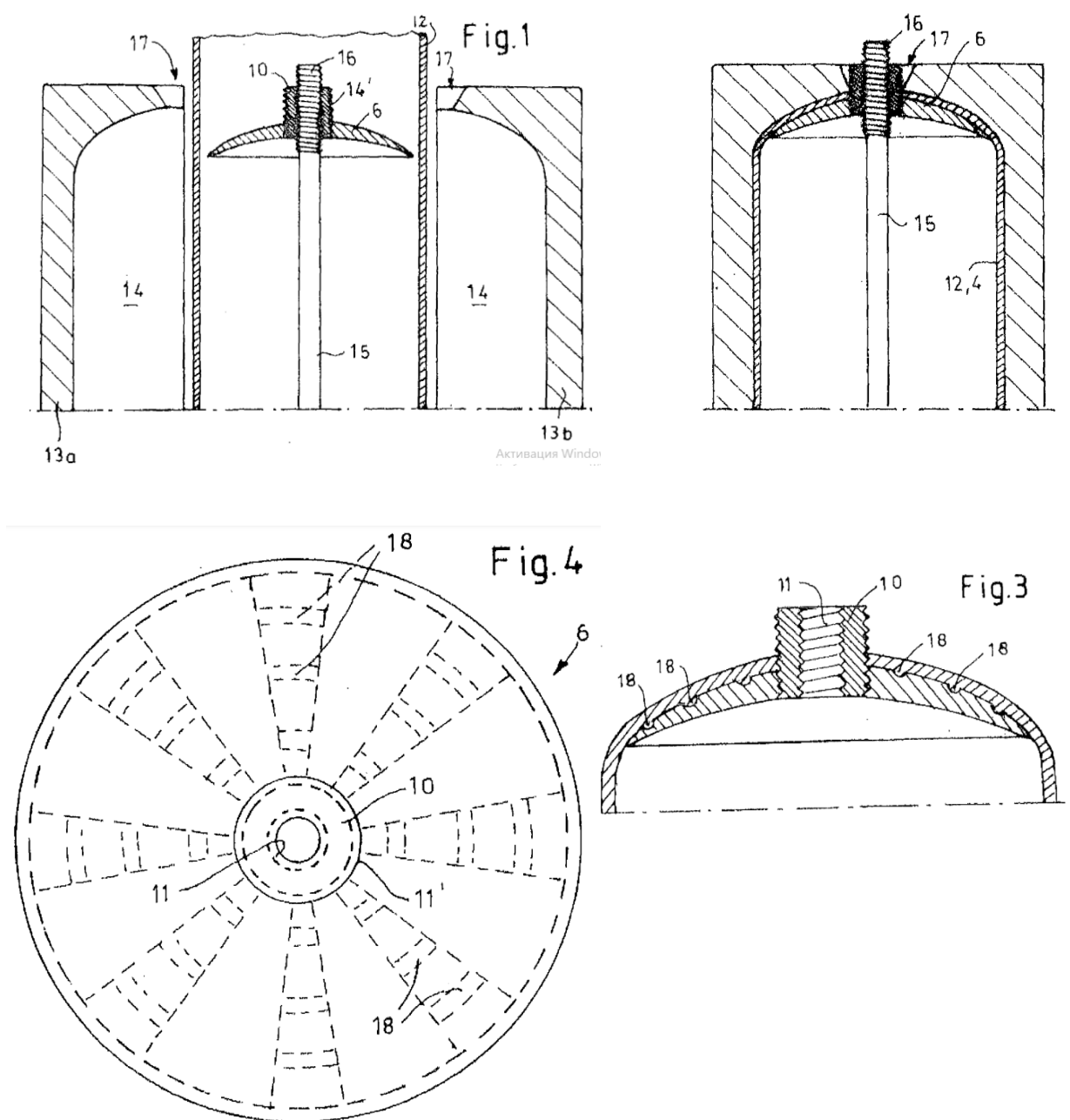


Рисунок 1.13 – Схема композитної ємності під тиском та стадій її формування

Винахід [2] має дві секції горловини разом з обмоткою з композитного волокнистого матеріалу, що зміцнює корпус ємності (2). Клапан з різьбою вкручується в одну або обидві секції, кожна з яких має кінець у напрямку до верхньої частини ємності і нахилена в місці з'єднання горловини з циліндричним кожухом.

У горловину вкручується затискне кільце, яке має зовнішню різьбову частину, до якої приєднується звичайний усічений конус, який працює проти кінця ущільнювача, щоб притиснути його до внутрішньої сторони шийки. Підкладка опирається на всю нижню частину коміра (6) на горловині (4). Циліндрична частина (14) горловини має одну або більше кільцевих канавок (9, 10) на внутрішній стороні, в які входить вкладиш. Затискне кільце (15) притискає ділянку (13) вкладиша, що проходить всередині секції горловини, до внутрішньої поверхні останньої.

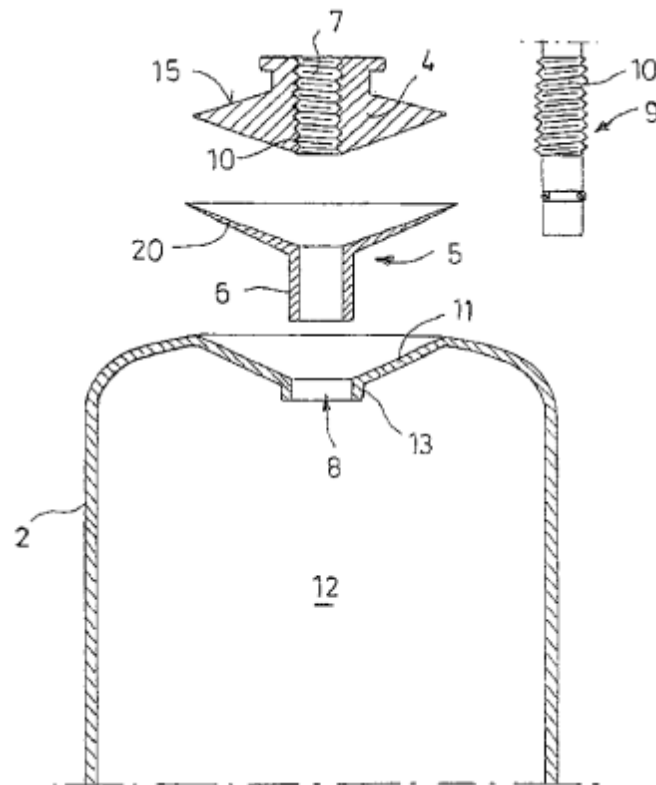


Рисунок 1.14 – Схема балону з двома секціями горловини з обмоткою з композитного волокнистого матеріалу

У [3] розкрито суть винаходу, який включає в себе тіло, що визначає щонайменше одну порожнисту область. Корпус включає в себе композитний матеріал з вуглецевого волокна, що включає велику кількість суцільно вирівняних безперервних вуглецевих волокон.

Джгут вирівняних вуглецевих волокон визначає головну вісь і другу вісь, перпендикулярну головній осі. Велика кількість вирівняних безперервних вуглецевих волокон включає в себе множину окремих кінцевих точок, розташованих у шаховому порядку відносно другої осі. Також надано способи виготовлення таких конструктивних компонентів, у тому числі шляхом формування роздуванням і пресуванням.

Вуглецеві волокна використовуються як легка армуюча фаза для виготовлення високоміцних легких полімерних композиційних матеріалів. Вуглецеві волокна можуть бути безперервними нитками довжиною в тисячі мікрометрів (мкм) або міліметрів (мм). Групу безперервних вуглецевих волокон часто класифікують як пучок безперервних ниток з вуглецевого волокна. Альтернативно, пучки вуглецевих волокон можна нарізати або подрібнити, утворюючи таким чином короткі сегменти вуглецевих волокон (нитки або пучки), які зазвичай мають середню довжину волокна від 50 мкм (приблизно 0,002 дюйма) до 50 мм (приблизно 1,97 дюйма). У той час як усі композити, що містять вуглецеві волокна, мають легку вагу та високу міцність, композити, що містять безперервні нитки з вуглецевого волокна, мають особливо високу міцність порівняно з композитами, які містять нарізані або подрібнені вуглецеві волокна

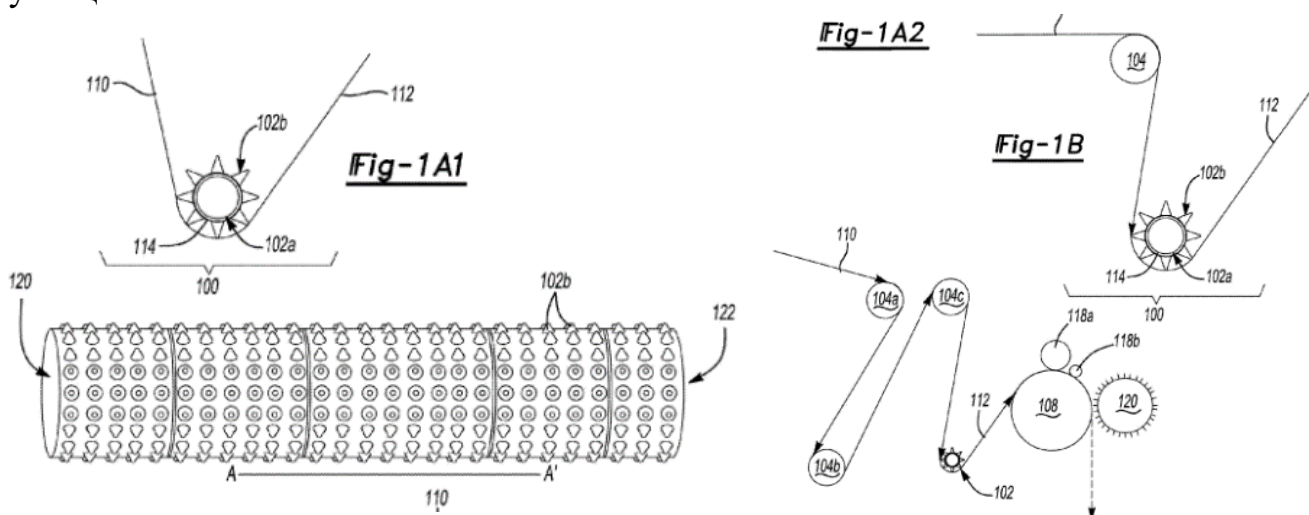


Рисунок 1.15 – Схема виготовлення корпусу ємності яка включає в себе композитний матеріал з вуглецевого волокна

Інноваційна розробка [4] – це газовий циліндр (1), що всередині визначає простір для зберігання газу (2), який можна закрити запірним клапаном (3), містить жорстку стінку (4), виготовлену з композитного матеріалу, що має армуючий шар (5), що містить армуючі волокна та внутрішню поверхню (6) і гнучку ущільнювальну стінку (13), з'єднану з жорсткою стінкою (4) через горловину (9) і придатну для прилягання до внутрішньої поверхні (6) жорсткої стінки (4) при натисканні.

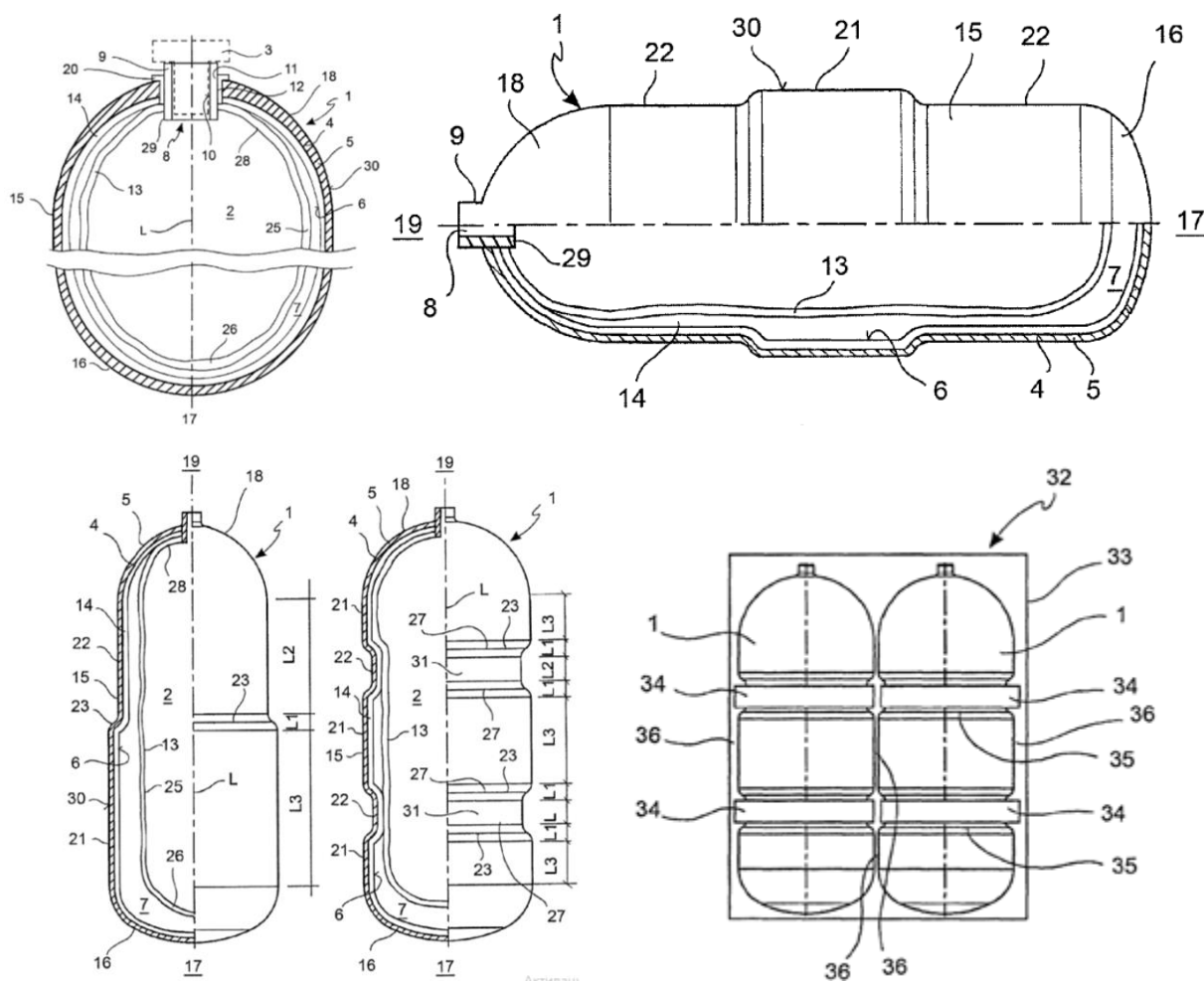


Рисунок 1.16 – Схема газового циліндру, що має армуючий шар, армуючі волокна та гнучку ущільнювальну стінку

Винахід [5] стосується композитного газового бака для зберігання газоподібних речовин під тиском з внутрішньою пластиковою ємністю.

Відомий типовий композитний газовий бак складається з пластикової ємності, що містить дві горловини, а також з підсилюючої обмотки з композитного матеріалу. Принаймні одна горловина виконана таким чином, що має циліндричну або конічну різьбу.

Обидві горловини в зоні більшого кінця, спрямованого до газового бака, мають плоский конусоподібний виріз, який оточений зсередини вкладенням і ззовні обмоткою.

Горловина, яка має різьбу, має на внутрішній стороні кільцевий жолоб для прийняття ущільнювача та ззовні має ключовий виріз для захисту від обертання.

Корисна модель [6] представляє ємність для зберігання речовин високого тиску має гофровану металеву внутрішню стінку та зовнішню стінку, армовану скловолокном. На внутрішню стінку наноситься пружний і нестисливий матеріал, що заповнює жолобки гофрів та лежить між внутрішньою металевою стінкою та зовнішньою стінкою зі скловолокна. Гофра є певної глибини і, відповідно, допускають внутрішню стіну значно розширюватися, не досягаючи межі пружності, незважаючи на вищий модуль пружності.

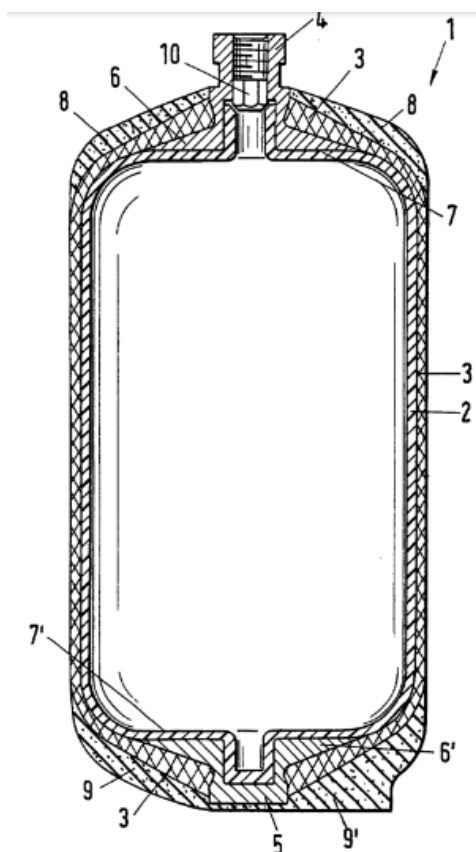


Рисунок 1.17 – Схема ємності для зберігання речовин високого тиску з гофрованою внутрішньою та зовнішньою стінкою, армованою скловолокном

У патенті [7] представлена- схема форми для лиття під тиском з пристроєм введення ІД в задану координату об'єму виробу, На термопластавтоматі проводиться процес впорскування розплавленого полімеру в форму до досягнення заданого тиску. Після цього, за допомогою щупа-датчика, вводять його на визначену координату щодо товщини та ширини виробу. Після завершення цієї операції, щуп вилучається з порожнини форми, тиск зменшується до значення, визначеного в технологічному регламенті, і зберігається протягом певного часу. Після цього форму охолоджують без застосування тиску, відкривають і виймають готовий виріб.

Винахід [8] відноситься до посудин під тиском, облицьованих металевою ниткою, розкриває скловолоконну ємність під тиском 10 що має металеву внутрішню стінку 11, в якій є невеликі гофри 12 та показує, що гофри 12, у більшості випадків, дуже малі щоб бути практично непомітними. Зовнішня пластикова стінка 13 складається з полімерного покриття нитки 15 намотаного на гофровану внутрішню стінку таким чином, що зміцнювальний матеріал 15 нитки перекриває западини 23.

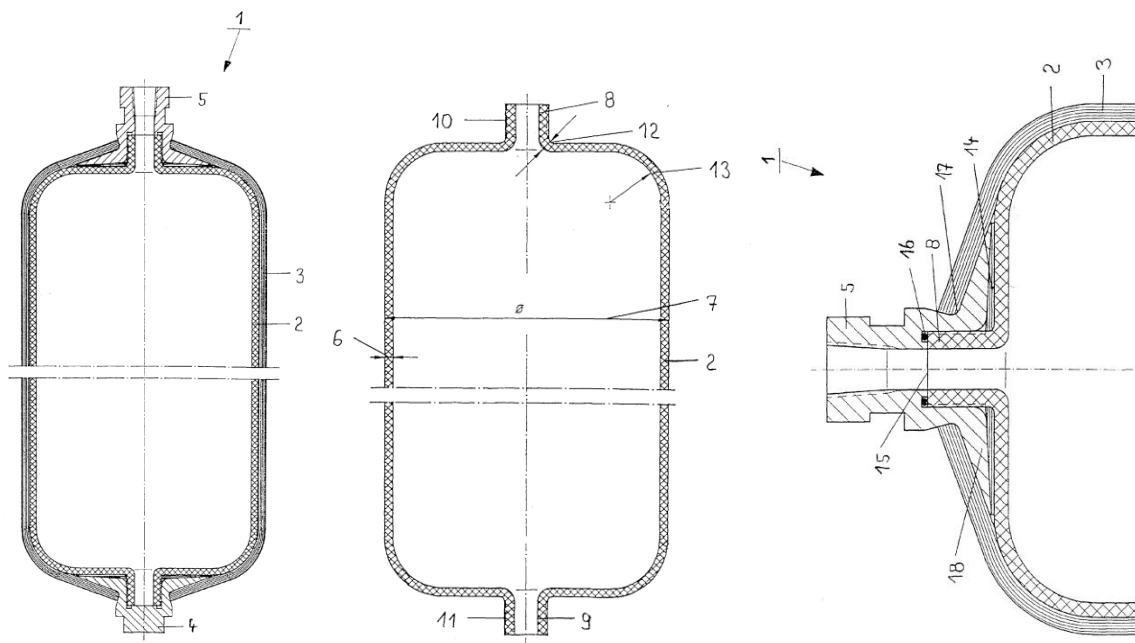


Рисунок 1.18 – Схема скловолоконної ємності під тиском, облицьованої металевою ниткою

Розробка вітчизняних вчених [9] – це сполучений балон високого тиску, що складається з внутрішньої герметичної оболонки, виготовленої з полімеру за допомогою екструзії. Оболонка має безшовну цілісну структуру, яка складається з циліндричної частини та двох днищ. Одне днище плавно переходить у горловину зовнішньою різьбою і внутрішньою конічною поверхнею для кріплення заправно-витратного вузла. Інше днище має виступ, який співвідноситься з горловиною і призначений для установки металевої частини технологічної опори, та зовнішню силову оболонку з композиційного матеріалу, отриману шляхом намотування на внутрішню оболонку високоміцного армуючий матеріал, просочений полімером, має особливість в тому, що перед формуванням зовнішньої оболонки у внутрішню оболонку заздалегідь надають надмірний тиск удвічі менший руйнівного тиску для оболонки з полімеру.

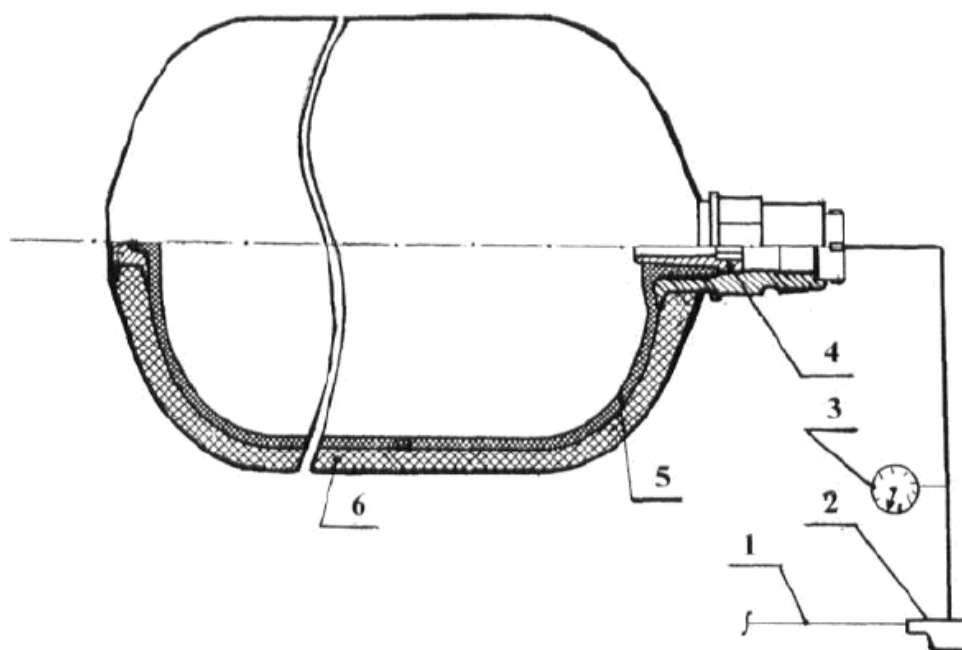


Рисунок 1.19 – Схема комбінованого балону що містить внутрішню порожнисту герметизуючу оболонку

Патент [10] відображає балон високого тиску, що містить герметичний корпус, який складається з двох півбалонів, з'єднаних між собою нерознімним з'єднанням, при цьому область останнього підсилена зовнішнім силовим елементом, який відрізняється тим, що частина балона на ділянці нерознімного з'єднання деформована так, що різниця зовнішнього діаметра балона  $D$  і діаметра деформованої ділянки  $D_1$  не менша двох товщин стінок балона  $S$ , а товщина  $h$  зовнішнього силового елемента не перевищує половини різниці вищевказаних діаметрів.

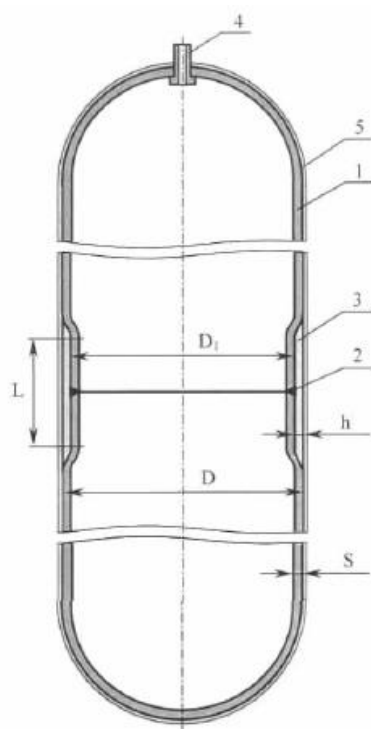


Рисунок 1.20 – Схема балону високого тиску, що містить герметичний корпус виготовлений з двох півбалонів

Українські винахідники розробили комбінований балон тиску [11], що містить внутрішню поліетиленову оболонку, зовнішню несучу склопластикову оболонку, яка має безпосередньо циліндричну частину і торцеві ділянки, де розташовані відформовані деталі сферичних днищ, який відрізняється тим, що циліндрична частина зовнішньої несучої склопластикової оболонки виконана у вигляді набору тороїдальних сегментів, підсилених у місцях стику тороїдальних сегментів шпангоутами з вуглепластику і захищених із внутрішньої сторони поліетиленовою оболонкою, а з зовнішньої - сталеву обшивку, що має також циліндричну частину і торцеві ділянки з сферичними днищами, що контактують, у свою чергу, з відформованими днищами сферичної форми несучої склопластикової оболонки.

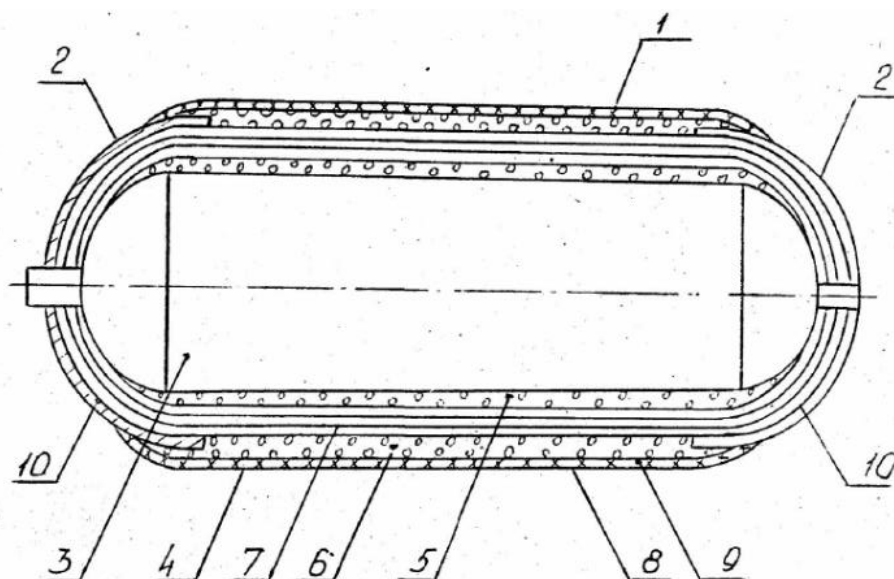


Рисунок 1.21 – Схема балону з внутрішньою поліетиленовою оболонкою, зовнішньою скловолоконною оболонкою та виконана у вигляді тороїдальних сегментів

Винахід [12] – це балон, що включає в себе внутрішню герметичну оболонку та зовнішню силову оболонку, виконану з волоконно-композитного матеріалу, яка складається з внутрішнього та зовнішнього шару кільцевої направленості волоконних матеріалів та проміжного прошарку з поперечною направленістю шару. Зовнішній захисний шар з поперечною направленістю відрізняється тим, що товщина зовнішнього і внутрішнього шару силової оболонки виконані однаковими в межах допусків на виготовлення оболонки методом намотки,

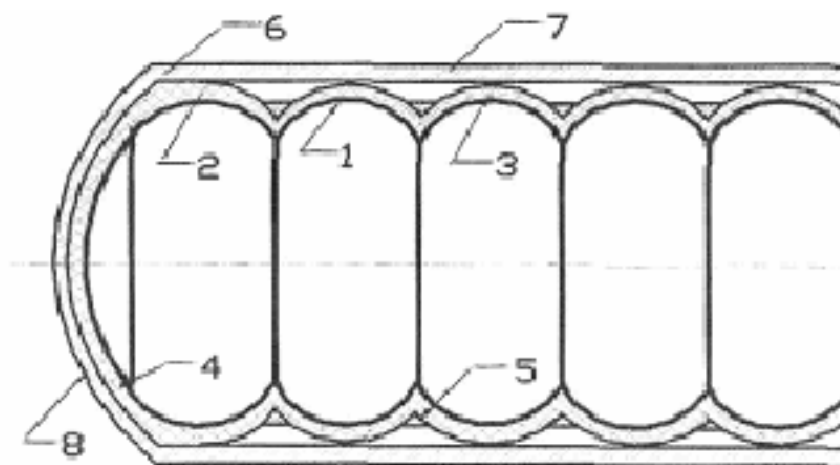


Рисунок 1.22 – Схема балону виконаного з внутрішнього та зовнішнього шару кільцевої направленості волоконних матеріалів

Винахід [13] відноситься до багат шарової посудини під тиском.

Було виявлено, що багат шарова конструкція оболонки має велике застосування в посудинах під високим тиском. Високоміцну сталь можна легко отримати у вигляді тонких листів, які можна згорнути в циліндри для виготовлення корпусу резервуара під тиском. Хоча голови або кінцеві секції посудини також можуть бути ламінованими, ця форма конструкції для них вносить стільки ускладнень, що краще використовувати суцільні кінцеві секції, виготовлені шляхом кування або пресування. Оскільки вони обов'язково мають масивну конструкцію для великих посудин, призначених для високого внутрішнього тиску, важко або практично неможливо отримати кінцеві секції з такою ж високою міцністю, як відносно тонкі листи, що використовуються для виготовлення оболонки посудини під тиском. Таким чином, кінцеві секції повинні бути зроблені відповідно товщі, ніж секції оболонки, і необхідно розробити засоби для задовільного з'єднання товстих кінцевих секцій з тоншою оболонкою, виготовленою з високоміцної сталі.

Основною метою цього винаходу є створення конструкції посудини під тиском, у якій товсті кінцеві секції об'єднані з більш тонкою секцією оболонки, виготовленою з безлічі листів металу з більш високою міцністю на розрив, ніж легко отримати в кінцевих секціях.

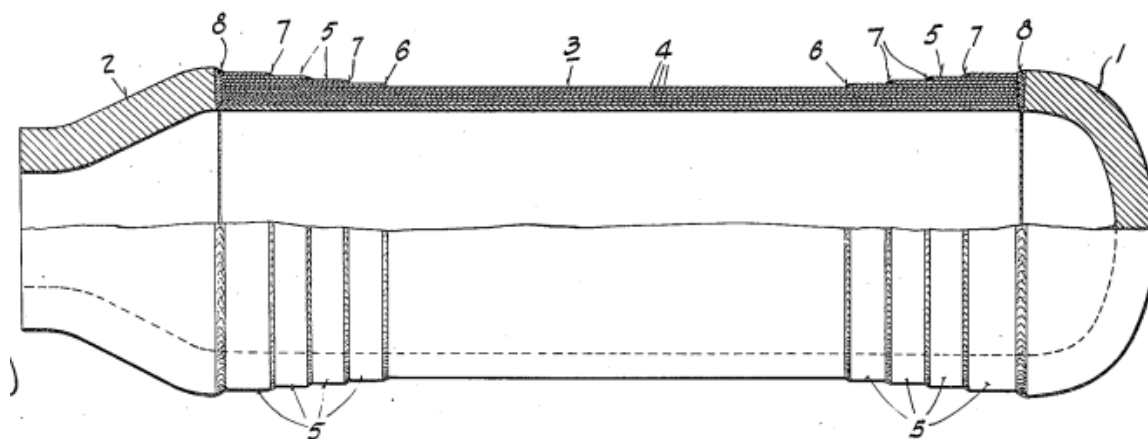


Рисунок 1.23 – Схема багат шарової посудини під тиском

## 1.4. Виготовлення ємностей з композитних матеріалів

Властивості балонів для зберігання газів та речовин підвищеної небезпеки, такі як дизайн чи будь-які інші характеристики можуть варіюватись від виробника до виробника, але є вимоги які незважаючи ні на що, мають бути виконані без змін. Ціна на ємності відповідного виробника визначається часом, та цілим переліком факторів які були затречені під час його виробництва.

### 1.4.1. Технологія виготовлення ємностей з композиту

Під час виготовлення ємностей описаних вище, зазвичай використовуються компактні екструдери з діаметром шнека в діапазоні 50-90 мм. Оскільки опір головки є невеликим, головною вимогою є отримання розплаву з високою однорідністю, тому довжина шнека не перевищує 15-18D. Процес виготовлення порожнистих виробів можна зобразити схематично, як показано на Рис. 1.25.

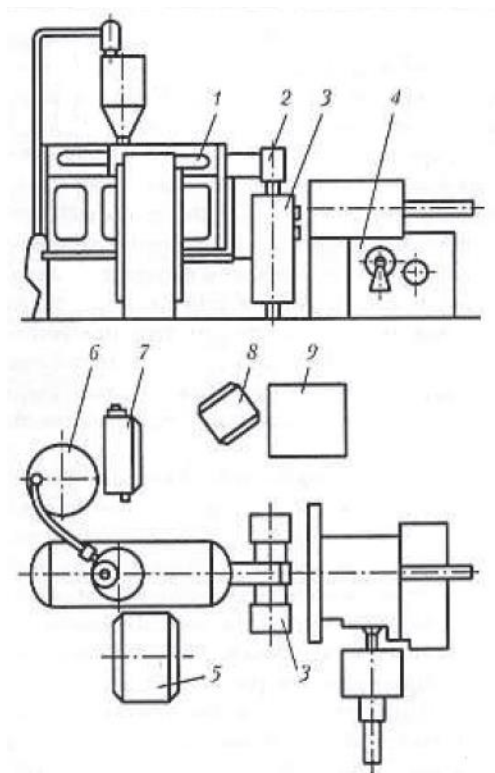


Рисунок 1.25 – Схема будови екструзійно-видувного апарату

- 1 – екструдер; 2 – головка; 3 – видувний пристрій; 4 – пристрій для видалення приливів; 5 – пристрій для підсушування гранул; 6 – пневмозавантажувач;  
7 – системи пневмо- та гідроприводу; 8 – шкаф теплової автоматики;  
9 – пульт управління

Матеріал, який був розплавлений та гомогенізований в екструдері, виводиться з головки у вигляді трубчастої заготовки, яка потрапляє в відкриту форму. Після досягнення необхідної довжини заготовки, півформи зчиняються, затискаючи нижній та верхній краї заготовки своїми бортами.

В результаті, нижній кінець заготовки зварюється, а на верхньому кінці утворюється отвір (або навпаки). Після зчинення форми, через дорн або ніпель в неї постачається стиснуте повітря, яке діє на розм'якшений матеріал заготовки і формує його внутрішню порожнину.

Внаслідок контакту з стінками форми які відрізняються за температурою, полімер затвердіває. Потім форма відкривається, готовий виріб виймається та направляється на наступну обробку, яка включає видалення приливів, виправлення задирок та інші операції. Виробництво даних ємностей здійснюється при використанні спеціально розроблених машин, які додатково до екструдера мають механізми переміщення, роз'єм та зчинення форми що приводяться в рух гідравлічним або пневматичним приводом.

При процесі екструзії, розплав, який подається до мундштука, повинен бути однорідним і мати постійну температуру по всій ширині заготовки. Видавлювання матеріалу здійснюється рівномірно і без перебоїв. Завдяки впливу власної ваги, заготовка виходить з головки і вступає в форму. Проте, через нерівномірність видавлювання по висоті, заготовка виходить з нерівною товщиною. Чим повільніше відбувається процес екструзії, тим більше часу діє сила тяжіння, що призводить до збільшення нерівномірності товщини заготовки

Зазвичай, для формування заготовки використовується низька температура розплаву і висока швидкість екструзії. У сучасних машинах використовуються головки з програмним регулюванням, які дозволяють контролювати форму, розміри та товщину стінок заготовки. Це досягається шляхом зміни швидкості подачі розплаву та осьового переміщення конічного дорну. Таке програмне регулювання дозволяє формувати заготовку з потрібним рівнем різнотовщинності. Мінімальна різнотовщинність досягається, коли коефіцієнт видуву становить від 3 до 3,5.

Програма для формування заготовок розробляється заздалегідь з урахуванням геометрії виробу, параметрів процесу та характеристик розплаву. Перед кожним наступним формуванням заготовки, дорн повертається в початкове положення відповідно до програми.

Залежно від дизайну виробу та формуючого інструменту, стиснене повітря для формування виробу може постачатися через дорн зверху, спеціальний ніпель знизу або порожнисту голку, як показано на Рис. 1.26. Звичайно, останній метод застосовується при виробництві замкнутих виробів, де не потрібні отвори. В такому випадку формуючий отвір є дуже маленьким і після видалення голки він заповнюється розігрітим матеріалом [2].

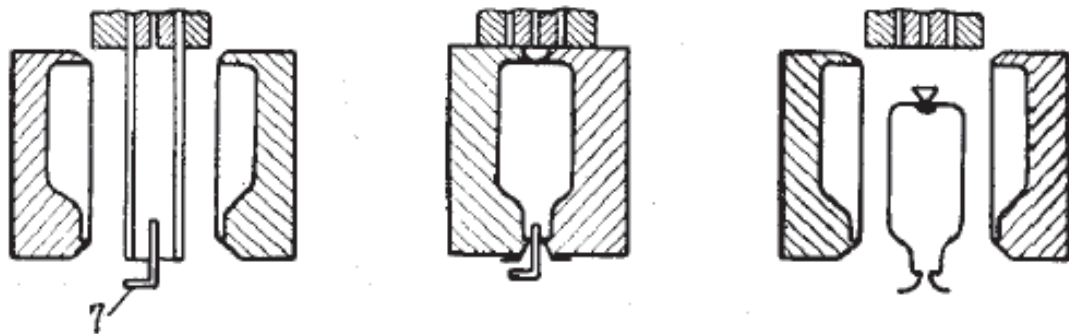


Рисунок 1.26 – Схема подачі стисненого повітря знизу (в)

1 – форма; 2 – заготовка; 3 – дорн; 4 – головка; 5 – виріб; 6 – порожниста голка; 7 – штуцер; I – змикання півформи; II – видування заготовки і її охолодження; III – розмикання форми і вилучення виробу

Якщо потрібно виготовити великі вироби за вагою, звичайний екструдер не може забезпечити достатню швидкість видавлювання заготовки. Використання високопродуктивного екструдера з великим діаметром шнека не є вигідним, оскільки процес формування виробу є періодичним, і великий екструдер буде використовуватися малоефективно.

Тому для виробництва великогабаритних виробів зазвичай використовується агрегат, який оснащений копильником - горизонтальним або вертикальним гідравлічним пресом. У цьому пресі матеріальний циліндр має обігрівачі. Розплав з екструдера потрапляє в копильник через спеціальну головку

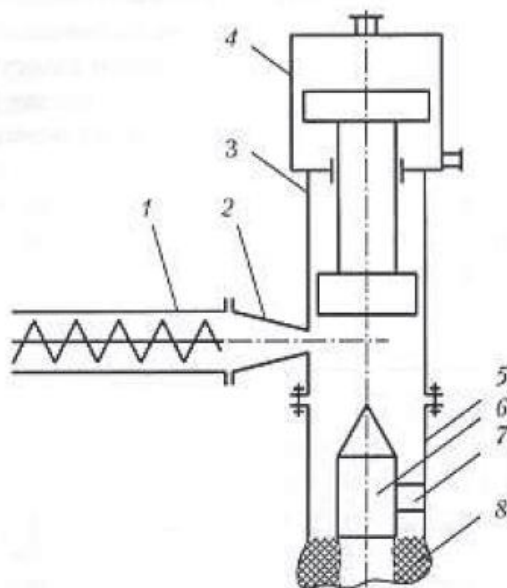


Рисунок 1.27 – Схема вузла головки екструдера

1 – екструдер; 2 – проміжна головка; 3 – копильник; 4 – гідродвигун плунжера копильника; 5 – рукавна головка; 6 – дорн; 7 – дорнотримач; 8 – рукав, що екструдуються

Після того як копильник заповнений, екструдер припиняє рух. У пресовій гідросистемі копильника створюється тиск, який змушує поршень рухатись з заданою швидкістю. Це дозволяє видавлювати необхідну кількість розплавленого полімеру через куту головку. Трубочаста заготовка потрапляє у форму, яка розміщена на спеціальній рамі. Після змикання форми, екструдер запускається, щоб подати нову порцію розплавленого матеріалу в копильник. У цей час в формі відбувається процес формування та охолодження виробу. Для формування виробів використовується повітря з тиском, який становить до 0,5 МПа. Однак, для видавлювання заготовки в гідросистемі використовується значно вищий тиск, який може досягати 15 МПа.

Таким чином, технологічний процес екструзійно-видувного формування для отримання виробу складається з наступних етапів:

- Гомогенізація розплаву та видавлювання рукавної заготовки.
- Видування заготовки у формі та формування виробу.
- Охолодження виробу та його видалення з форми.
- Завершальна обробка готових виробів.

Геометрія формуючого каналу, швидкість видавлювання заготовки і рішення технолога щодо формуючого інструменту визначають розбухання екструдату. Товщина стінки через розтяг може бути контрольована шляхом зниження температури розплаву, проте до певного обмеження. Це може призводити до підвищення тиску на етапі формування виробу і погіршення якості поверхні готових виробів.

#### 1.4.2. Приклад методу розрахунків

Проведемо аналіз безмоментної теорії для складеної замкнутої оболонки, яка складається з циліндра і двох днищ (див. рис. 1.28). В даному випадку, розумно розглянути циліндр і днища окремо, а потім вивчити можливість з'єднання цих оболонок, дотримуючись вимог безмоментної теорії, наскільки це можливо.

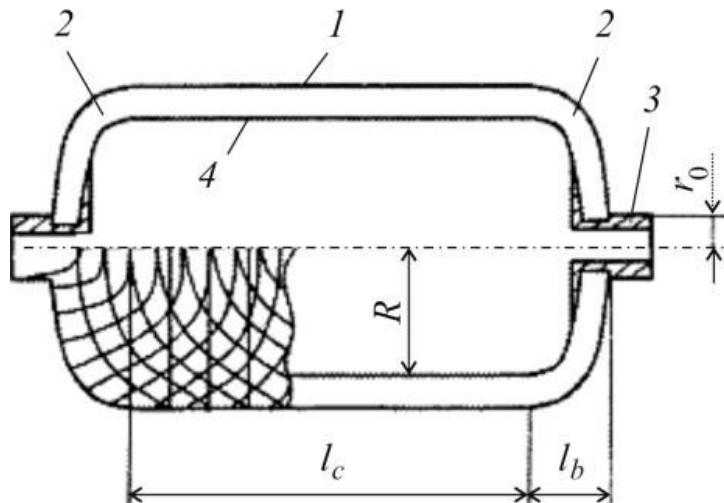


Рисунок 1.28. - Схема методу виготовлення ємності високого тиску

Тиск руйнування  $p = 50$  МПа; Внутрішній об'єм  $V = 0,03$  м<sup>3</sup>; Радіус внутрішнього циліндру  $R = 0,12$  м; Радіус фланця  $r_0 = 0,032$  м;

Межа міцності композиційного матеріалу (ОКМ) за напрямком армуючих волокон  $\sigma_1 = 2350$  МПа.

Потрібно провести розрахунок для циліндричної частини БВД і визначити значення кута спірального намотування  $\varphi_0$ , а також висоти  $h_\varphi$  і  $h_{90}$ . Кут  $\varphi_0$  вибирається таким чином, щоб при намотуванні днища по геодезичним лініям стрічка щільно прилягала до кола  $r_0$ , що є частиною заставного фланця (див. рис. 1.29).

Геодезична лінія має властивість з'єднувати дві точки на поверхні обертання за найкоротшим шляхом. Крім того, коли гнучка нитка розташована на абсолютно гладкій поверхні оболонки, вона не зсунеться з цієї поверхні. Згідно з теоремою Клеро, геодезична лінія повинна задовольняти таку умову:

$$r \cdot \sin \varphi = \text{const},$$

де  $r$  - радіус;  $\varphi$  – кут, що відраховується від меридіана (рис. 1.29)

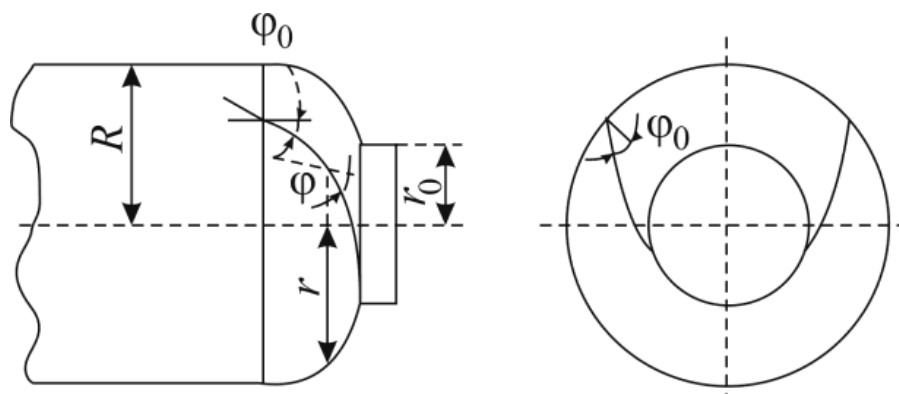


Рисунок 1.29. Схема методу визначення кута намотування

Для визначення кута спірального шару на циліндрі будуть використовуватись параметри дна ємності, які повинні задовольняти умовам

$$\varphi = \arcsin 0,032 = 0,3015 \text{ рад.} \quad (1)$$

### Висновки до розділу

1. В результаті проведення літературного та патентного огляду було проведено аналіз конструкцій композитних полімерних ємностей та виявлені такі їх переваги (спрощення виробництва, підвищення рівня герметизації, уникнення явищ структурного зносу, підвищення міцності в області горловини) і недоліки (складність виробництва, проблеми герметизації балона та явища псування синтетичних матеріалів, низька міцність в зонах підвищеного навантаження)

2. Було розроблено технології та пристрої для позиціонованого позонного введення наповнювачів у вироби з полімерних матеріалів безпосередньо в процесах формування заготовки. Таким чином, застосування модифікації наповнювачами попередньо визначених найбільш навантажених зон полімерних ємностей дозволить покращити їх механічні властивості і конкурувати з традиційними більш дорогими технологіями виготовлення композиційної тари.

## 2. МАТЕМАТИЧНА ПОСТАНОВКА КОНТИНУАЛЬНО-ДИСКРЕТНОЇ ЗАДАЧІ ДВОФАЗНОЇ ТЕЧІЇ РІДИНИ З ТВЕРДИМИ ЧАСТИНКАМИ

Модель з дискретною фазою (Discrete Phase Models (DPM)) використовує дві системи відліку - Ейлера для рідкої фази та Лагранжа для твердої фази (Euler-Lagrange), що становить основу для формулювання континуально-дискретної задачі двофазної течії.

Математичну модель течії рідини з частинками твердої фази можна представити у вигляді системи рівнянь, записаних у системі відліку Ейлера. Ця модель включає квазістаціонарне рівняння нерозривності та нестаціонарне рівняння збереження кількості руху:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_j \rho_j) + \nabla \cdot (\varepsilon_j \rho_j \mathbf{u}_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_l \rho_l \mathbf{u}_l) + \nabla \cdot (\varepsilon_l \rho_l \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l) = \varepsilon_l \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_l - \varepsilon_l \nabla p - \beta(\mathbf{u}_l - \mathbf{u}_s) \quad (2)$$

де  $j = l$  для рідкої фази та  $s$  для твердої фази,  $\varepsilon_j$  — концентрація кожної фази,  $\mathbf{u}$  — вектор швидкості,  $\rho$  — густина,  $p$  — термодинамічний тиск,  $\beta$  — коефіцієнт передачі імпульсу межі розділу та  $\varepsilon_l$  — тензор в'язкого напруження.

Рівняння Нав'є-Стокса, що описує баланс імпульсу для рідкої фази, модифікується для включення міжфазового члена передачі імпульсу. Також, у рівнянні використовується тензор в'язкого напруження, який відповідає за внутрішні сили взаємодії в рідині.

$$\boldsymbol{\tau}_l = \mu_l [\nabla \mathbf{u}_l + (\nabla \mathbf{u}_l)^T] - \frac{2}{3} \mu_l (\nabla \mathbf{u}_l) I \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\tau}_s = \mu_s \left\{ [\nabla \mathbf{u}_s + (\nabla \mathbf{u}_s)^T] - \frac{2}{3} (\nabla \mathbf{u}_l) I \right\} + \xi_s \nabla \cdot \mathbf{u}_s I \quad (4)$$

де:  $\boldsymbol{\tau}_s$  представляє тензор напруження для твердої фази,  $\mu_s$  відображає динамічну в'язкість твердої фази,  $\nabla \mathbf{u}_s$  є градієнтом вектора швидкості твердої фази,  $(\nabla \mathbf{u}_s)^T$  позначає транспонований градієнт вектора швидкості твердої фази,  $(\nabla \mathbf{u}_l) I$  показує інваріантну складову градієнта вектора швидкості твердої фази,  $\xi_s$  представляє коефіцієнт в'язкості твердої фази,  $\nabla \mathbf{u}_s$  показує дивергенцію вектора швидкості твердої фази,  $I$  позначає одиничний тензор.

Ця формула дозволяє враховувати в'язкість і напруження твердої фази, що виникає в результаті її руху. Вона може бути використана в контексті моделювання течій з участю рухомих твердих частинок, де враховуються їхня в'язкість та вплив на навколишнє середовище. Рівняння, яке визначає баланс імпульсу твердої фази, можна сформулювати так:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s u_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s u_s u_s) = -\varepsilon_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \tau_s + f_m + \beta (u_l - u_s) \quad (5)$$

де  $p_s$  – тиск частинки, який представляє нормальні сили частинки, спричинені взаємодією між частинками.

Сила, яка діє на частинку віртуальної маси:

$$f_m = -0.5 \varepsilon_p \rho_l \left( \frac{du_l}{dt} - \frac{du_p}{dt} \right) \quad (6)$$

Закон Кросса використовується для визначення закону стану полімеру:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^m}$$

де  $\mu$  – коефіцієнт консистенції;  $\lambda$  – час релаксації;  $\dot{\gamma}$  – швидкість зсуву;  $n$  – степеневий індекс,  $m = n - 1$ ;  $\mu_0$  – в'язкість розплаву полімеру при мінімальній швидкості зсуву.

Траєкторії руху твердих частинок визначаються шляхом інтегрування рівнянь балансу сил, що діють на частинку, за допомогою псевдо-часових кроків в рамках Лагранжевої системи відліку:

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = F_D (\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) + \frac{\mathbf{g}(\rho - \rho_p)}{\rho_p}, \quad (2.2)$$

де  $\mathbf{u}$  – вектор швидкості рідкого середовища, м/с;  $\mathbf{u}_p$  – вектор швидкості твердих частинок, м/с;  $F_D (\mathbf{u} - \mathbf{u}_p)$  – сила опору, віднесена до маси частинки, м/с<sup>2</sup>;

$F_D = \frac{18\mu C_D \text{Re}}{\rho_p d_p^2 24}$ , 1/с;  $C_D$  – безрозмірний коефіцієнт гідравлічного опору;  $\rho_p$  – густина

твердих частинок кг/м<sup>3</sup>,  $d_p$  – усереднений діаметр твердих частинок, м;

$\text{Re} = \frac{\rho d_p |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}|}{\mu}$  – число Рейнольдса.

Початкові умови системи рівнянь (2.1) визначають розподіл полів компонент вектора швидкості та тиску, які формулюються у системі відліку Ейлера:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_0 = \mathbf{v}(x, y, z); \\ p_0 = p(x, y, z), \end{cases} \quad (2.3)$$

де  $(x, y, z) \in \Omega$  – декартові координати, м;  $\Omega$  – розрахункова область.

Граничні умови для (2.1), які формулюються у системі відліку Ейлера, включають наступні вимоги: у вхідному перерізі задається нормальна швидкість (2.4); у відхідному перерізі маємо нульовий градієнт тиску (2.5); на поверхнях контакту рідини зі стінками каналу застосовуються умови проковзування (2.6):

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = v_{inlet}(t) \quad (2.4)$$

$$\mathbf{n} \cdot \nabla p = 0 \quad (2.5)$$

$$\bar{\boldsymbol{\tau}} = \boldsymbol{\tau}_{wall} \vee F_{slip} (\mathbf{v}_w - \mathbf{v}_t) \cdot \mathbf{t} + (\bar{\boldsymbol{\tau}} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{t} = 0 \rightarrow \boldsymbol{\tau}_{w\ sh\ str} = -F_{slip} (v_{wt} - v_{tt}) \quad (2.6)$$

Початкові умови для рівнянь (2.2) та (2.3), які виражаються у системі відліку Лагранжа, включають початкові значення координат, початкову швидкість та температуру твердих частинок.

Граничні умови для рівнянь (2.2) та (2.3), які виражаються у системі відліку Лагранжа, мають два можливих випадки при взаємодії частинки з твердою границею розрахункової області: відбиття або поглинання. Якщо частинка виходить за межі розрахункової області, вона не враховується у подальших обчисленнях.

Для того аби довести дану математичну постановку континуально-дискретної задачі двофазної течії, було побудовано 3Д модель ємності та проведено розрахунок в програмі ANSYS Workbench. Результати розрахунків та моделювання представлені нижче:

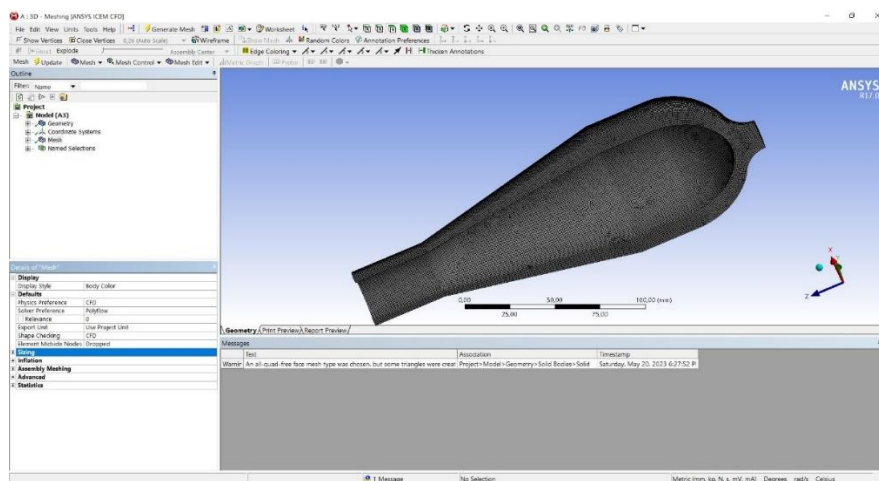


Рисунок 1.30. 3Д модель з сіткою порожнини головки екструдера (199611 елементів)

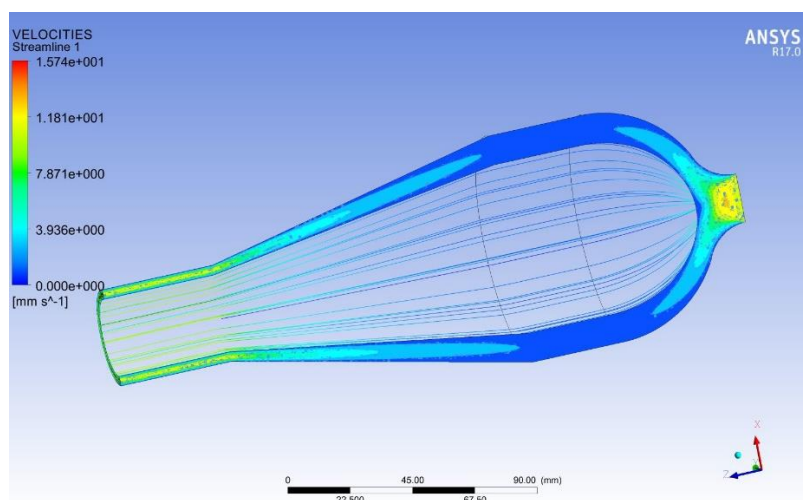


Рисунок 1.31. Швидкість з траекторіями від початку

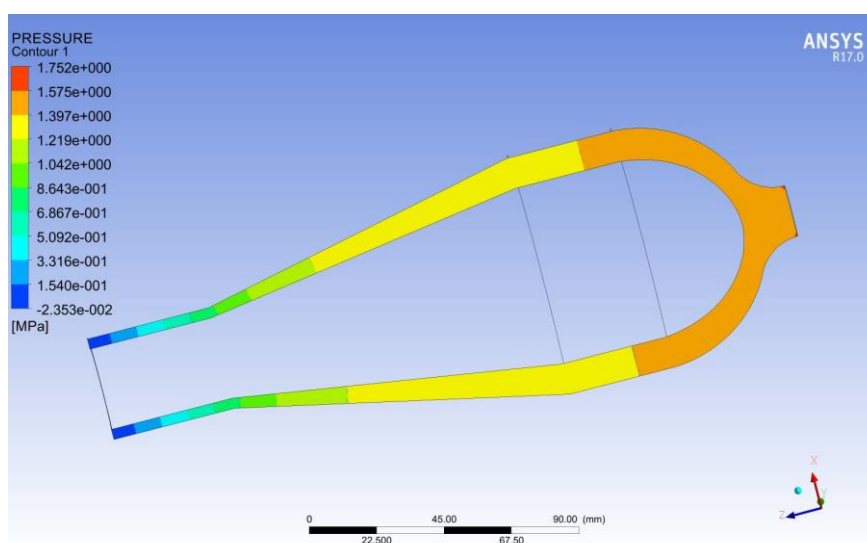


Рисунок 1.32. Тиск в порожнині з траекторіями від початку

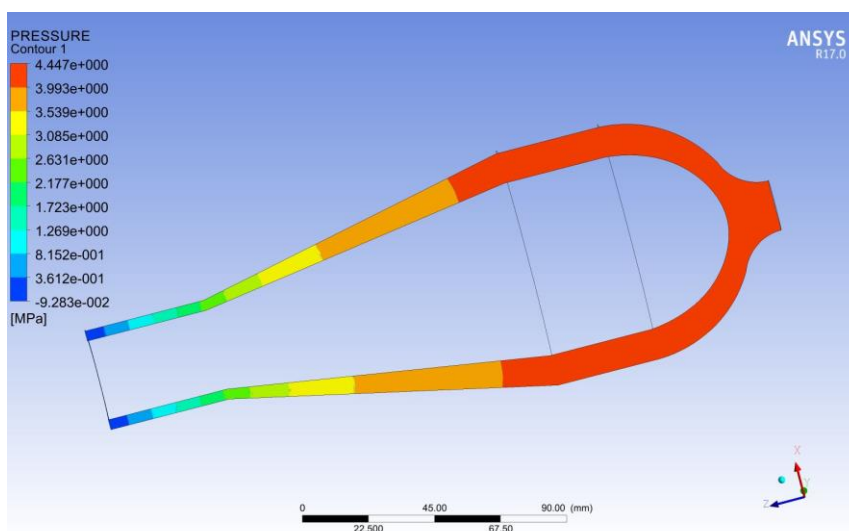


Рисунок 1.33. Тиск в порожнині з траекторіями від початку з вприском армуючих ВОЛОКОН

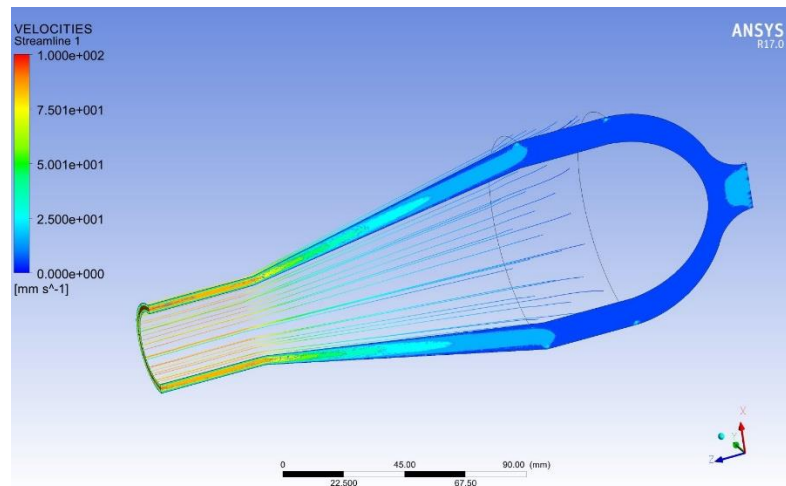


Рисунок 1.34. Швидкість з траекторіями від початку з вприском армуючих волокон

З наведених рисунків можна встановити, що розподіл армуючих частинок за такої схеми введення буде достатньо рівномірним.

### Висновки за розділом

1. Для доведення математичної постановки континуально-дискретної задачі двофазної течії було побудовано 3D модель ємності головки екструдера та проведено розрахунок в програмі ANSYS Workbench.

2. Поведінка руху рідкої фази та частинок моделюється за допомогою методу дискретних елементів - обчислювальної гідродинаміки в рідко-твердому флюїдизованому шарі.

3. Інформація на рівні частинок дозволяє аналізувати локальне поле руху частинок та динаміку частинок у системі. Поведінка руху частинок виявляється результатом хаотично змінюваної позиції, розміру та швидкості частинок через їх взаємодію.

4. Ці результати демонструють, що дана математична постановка континуально-дискретної задачі двофазної течії відповідає спостережуваним фізичним явищам та може бути використана для моделювання і аналізу подібних систем.

### 3. РОЗРАХУНКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦІЙНИХ ЄМКОСТЕЙ

#### 3.1. Визначення межі міцності композитного матеріалу під час розтягування (стиснення)

Давайте розглянемо поведінку композитного матеріалу при збільшенні навантаження вздовж осі 1 при розтягуванні. Наша мета полягає у визначенні максимальної напруги  $F1p$ , при якій матеріал починає руйнуватись. Тут індекс "p" вказує на розтягування.

Для визначення початкового моменту руйнування композитного матеріалу необхідно мати доступ до діаграм розтягування (або стиснення) як волокна, так і матриці.

Діаграма розтягування (або стиснення) волокна вказує на залежність напруги від деформації під час розтягування (або стиснення) волокна. Ця діаграма дозволяє визначити межу між еластичною поведінкою та початком пластичної деформації або руйнування волокна.

Діаграма розтягування (або стиснення) матриці вказує на залежність напруги від деформації під час розтягування (або стиснення) матриці. Ця діаграма також дозволяє визначити межу між еластичним поведінкою та початком пластичної деформації або руйнування матриці.

Зважаючи на ці діаграми, можна визначити критичні значення напруги, при яких починається руйнування волокна або матриці. Зазвичай, руйнування композитного матеріалу відбувається, коли один з компонентів досягає своєї межі міцності або пластичності.

Таким чином, для визначення початкового моменту руйнування композитного матеріалу необхідно мати доступ до відповідних діаграм розтягування (стиснення) як волокна, так і матриці.

Якщо значення деформації  $\epsilon_{ov}$  менше за значення деформації  $\epsilon_{om}$ , то це означає, що руйнування композитного матеріалу є результатом деформації руйнування волокна.

$$\varepsilon_{1limit} = \varepsilon_{0B} = \frac{F_{Bp}}{E_B} = \frac{F_{1p}}{E_1};$$

де  $F_{Bp}$  - межа міцності волокна;  $E_B$  - модуль пружності волокна;  $F_{1p}$  – межа міцності КМ;  $E_1$  - модуль пружності КМ вздовж волокна. Отже,

$$F_{1p} = \frac{F_{Bp}}{E_B} [E_B \psi + E_M (1 - \psi)]$$

Якщо  $\varepsilon_{0B} > \varepsilon_{0M}$ , тоді  $\varepsilon_{1limit} = \varepsilon_{0M} = \frac{F_{Mp}}{E_M} = \frac{F_{1p}}{E_1}$ , звідси знайдемо наступне:

$$F_{1p} = \frac{F_{Mp}}{E_M} [E_B \psi + E_M (1 - \psi)]$$

Межа міцності композитного матеріалу при стисканні визначається за аналогічним принципом. Однак, варто зазначити, що межа міцності волокон і матриць може відрізнятись при розтягуванні і стисканні.

Якщо  $\varepsilon_{0B} < \varepsilon_{0M}$ , тоді:

$$F_{1p} = F_{Bp} \frac{E_M}{E_B}; \text{ а не } F_{1p} = F_{1M}$$

Це явище можна пояснити, розглядаючи концепцію "межі міцності" для композитного матеріалу, де розрив навіть невеликої кількості волокон може призвести до повної руйнації всього матеріалу.

Якщо  $\varepsilon_{0B} > \varepsilon_{0M}$ , при  $\psi = 1$  :

$$F_{1p} = F_{Mp} \frac{E_B}{E_M}; \text{ а не } F_{1p} = F_{1B}$$

Пояснення цього факту подібне до попереднього випадку, де розрив невеликої області матриці при наближенні  $\psi$  до 1 призводить до розриву всієї матриці.

Співвідношення, що виражає значення цієї кінцевої сили, має наступний вигляд:

$$F_{1p} = F_{Bp} \psi$$

З урахуванням цих рівнянь, ми можемо записати такий вираз для граничної міцності реального композитного матеріалу:

$$F_{1p} = \max \frac{F_{Mp}}{E_M} E_B \psi + (1 - \psi) ; F_{Bp} \psi ;$$

При проектуванні конструкцій з композитів застосовуються два підходи. Перший підхід полягає в тому, що міцність композитного матеріалу вичерпується при руйнуванні двох компонентів. Другий підхід передбачає, що міцність композитного матеріалу не вичерпується при руйнуванні лише одного з компонентів, і гранична міцність всього композиту зменшується недостатньо. Аналогічним чином можна визначити межу міцності однонаправленого композиту при стисканні вздовж волокна.

Для визначення модуля пружності композитного матеріалу (КМ) поперек волокон була використана модель, в якій КМ розглядається як послідовне з'єднання його складових компонентів, таких як волокна і матриця. Згідно з цією моделлю, несуча здатність цієї системи складових компонентів при розтягуванні або стисканні визначається найслабшою компонентою - матрицею, волокном або їх адгезійною сполукою.

Проте, експериментальні випробування не підтверджують цю модель, але вказують на те, що міцність КМ поперек волокон значно залежить від об'ємної частки його компонентів.

У науковій літературі описано різні методи визначення межі міцності композитного матеріалу поперек волокон. Один з варіантів відповідних формул, який показує добру узгодженість з експериментальними результатами і застосовується в практичних розрахунках, наведено нижче (без роботи висновків):

Міцність композитного матеріалу при розтягуванні поперек волокон:

$$F_{2p} = \sigma_{MP} E_2 \left[ \frac{2R}{t} \left( \frac{1}{E_B} - \frac{1}{E_M} \right) + \frac{1}{E_M} \right],$$

$$\text{де } \frac{2R}{t} = \frac{2\psi}{0,45\pi};$$

Міцність композитного матеріалу при стисканні поперек волокон:

$$F_{2p} = F_{2p} = \frac{\sigma_{MC}}{\sigma_{MP}}$$

Цей метод використовується для практичних розрахунків і показує задовільну узгодженість з експериментальними даними.

### Міцність композитного матеріалу при зсуві:

Для виведення залежності межі міцності композитного матеріалу при зсуві від фізико-механічних властивостей його компонентів, потрібно мати діаграму напруження-деформації ( $\tau$ - $\gamma$ ) і визначити, який з компонентів руйнується першим. Однак, метод виведення не відрізняється від методу визначення міцності композиту вздовж волокон, тому наведені лише кінцеві результати:

$$F_{12} = \frac{\tau_M}{G_M}; \text{ при } \frac{\tau_M}{G_M} < \frac{\tau_B}{G_B};$$

$$F_{12} = \frac{\tau_B}{G_B} \cdot G_{12}; \text{ при } \frac{\tau_M}{G_M} > \frac{\tau_B}{G_B}$$

При розрахунках для визначення межі міцності однонапрявленого склопластика було використано наступні вихідні дані:

скловолокно ( $E_c = 0,7 \times 10^6$  МПа,  $\mu_c = 0,27$ );

вуглепластика ( $E_u = 2 \times 10^2$  МПа,  $\mu_u = 0,32$ );

основний матеріал, який використовувався в якості матриці – поліетилентерефталат ( $E_m = 3600$  МПа,  $\mu_m = 0,27$ );

Об'ємний вміст волокон:  $\psi = 0,62$

Межа міцності матриці:  $\sigma_{Mr} = 60$  МПа

Межа міцності матриці:  $\sigma_{Mc} = 140$  МПа

Межа зсувної міцності матриці:  $\tau_M = 30$  МПа

Межа міцності скла:  $\sigma_{sr} = 1800$  МПа

Межа міцності скла при руйнуванні на стиснення:  $\sigma_{ss} = 1300$  МПа

Межа зсувної міцності скла:  $\tau_s = 650$  МПа

Межа міцності вуглецевого волокна:  $\sigma_{ur} = 3000$  МПа

Межа міцності вуглецевого волокна при руйнуванні на стиснення:  $\sigma_{us} = 2500$  МПа

Межа зсувної міцності вуглецевого волокна:  $\tau_u = 1250$  МПа

### 3.1.1 Міцність композитного матеріалу на розтягування вздовж волокон:

$$F_{1p} = \frac{F_{Mp}}{E_M} [E_B \psi + E_M (1 - \psi)]$$

$$F_{1p} = \frac{F_{Bp}}{E_B} [E_B \psi + E_M (1 - \psi)]$$

$$\frac{\sigma_{MP}}{E_M} = \frac{40}{3700} = 0,017; \quad \frac{\sigma_{CP}}{E_C} = \frac{2800}{75000} = 0,03; \quad \frac{\sigma_{yP}}{E_y} = \frac{2000}{500000} = 0,024;$$

Тоді, для склопластика, міцність композитного матеріалу на розтягування вздовж волокон буде:

$$F_{1p} = 0,017 \cdot 48590 = 750 \text{ МПа};$$

для вуглепластика:

$$F_{1yp} = 0,03 \cdot 293210 = 165 \text{ МПа};$$

Міцність композитного матеріалу при стисканні вздовж волокон:

$$F_{1c} = \frac{\sigma_{MC}}{E_M} [E_B \psi + E_M (1 - \psi)],$$

$$F_{1c} = \frac{\sigma_{MC}}{E_M} [E_B \psi + E_M (1 - \psi)]$$

$$\frac{\sigma_{MC}}{E_M} = \frac{230}{3700} = 0,047; \quad \frac{\sigma_{CC}}{E_C} = \frac{2800}{75000} = 0,032; \quad \frac{\sigma_{yC}}{E_y} = \frac{3700}{470000} = 0,024;$$

СКЛОВОЛОКНО:

$$F_{1cC} = 0,014 \cdot 57320 = 802 \text{ МПа};$$

ВУГЛЕПЛАСТИК:

$$F_{1yC} = 0,008 \cdot 187520 = 1562 \text{ МПа};$$

### 3.1.1. Міцність КМ на розтягування поперек волокон:

$$F_{2P} = \sigma_{MP} E_2 \left[ \frac{2R}{t} \left( \frac{1}{E_B} - \frac{1}{E_M} \right) + \frac{1}{E_M} \right], \quad \text{де } \frac{2R}{t} = \frac{2\psi}{0,45\pi};$$

СКЛОВОЛОКНО:

$$F_{2cP} = 30 \cdot 9615 \left[ \frac{0,72}{0,35 \cdot 3,14} \left( \frac{1}{75000} - \frac{1}{5400} \right) + \frac{1}{5400} \right] = 96,5 \text{ МПа};$$

ВУГЛЕПЛАСТИК:

$$F_{2yP} = 40 \cdot 10302 \left[ \frac{0,62}{0,65 \cdot 3,14} \left( \frac{1}{460000} - \frac{1}{5300} \right) + \frac{1}{2700} \right] = 75,7 \text{ МПа};$$

### 3.1.2 Міцність композитного матеріалу на стиск поперек волокон:

Міцність композитних матеріалів на стиск поперек волокон розраховується за наступною формулою:

$$F_{2c} = \frac{\sigma_{MC}}{\sigma_{MP}}$$

СКЛОВОЛОКНО:

$$F_{2cC} = \frac{96,5 \cdot 240}{30} = 150 \text{ МПа};$$

ВУГЛЕПЛАСТИК:

$$F_{2yC} = \frac{56,5 \cdot 170}{80} = 247 \text{ МПа};$$

### 3.1.2. Міцність КМ на зсув:

$$F_{12} = \frac{\tau_M}{G_M}; \text{ при } \frac{\tau_M}{G_M} < \frac{\tau_B}{G_B};$$

$$F_{12} = \frac{\tau_B}{G_B} \cdot G_M; \text{ при } \frac{\tau_M}{G_M} > \frac{\tau_B}{G_B}$$

$$F_{12} = \frac{\tau_M}{G_M} = \frac{20}{1478} = 0,0175;$$

$$F_{12} = \frac{\tau_c}{G_c} = \frac{570}{47156} = 0,0275;$$

$$F_{12} = \frac{\tau_y}{G_y} = \frac{1390}{147951} = 0,053;$$

СКЛОВОЛОКНО:

$$F_{12C} = 0,0174 \cdot 3767 = 65,4 \text{ МПа};$$

ВУГЛЕПЛАСТИК:

$$F_{12y} = 0,03 \cdot 3756 = 42,4 \text{ МПа};$$

### 3.2 Визначення питомих характеристик однонапрямлених композитів

Визначення питомої жорсткості та питомої міцності односпрямованого склопластика і вуглепластика вздовж волокон при розтягуванні буде проведено. В даному випадку матеріалом матриці є поліетилентерефталат (ПЕТ). Щільність скловолокна позначимо як  $\rho_c = 2580 \text{ кг/м}^3$ , а щільність вуглеволокна -  $\rho_y = 1700 \text{ кг/м}^3$ . Значення модуля пружності та міцності КМ будуть взяті з попередніх розрахунків.

Щільність склопластика:

$$\rho_c = 2670 \cdot 0,56 + 1400 \cdot (2 - 0,74) = 1374 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

Щільність вуглепластика:

$$\rho_y = 3400 \cdot 0,42 + 1400 \cdot (1 - 0,41) = 1758 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

На основі виконаних обчислень, ми можемо отримати наступні результати/величини/значення:

- жорсткість:

$$\frac{E_{1c}}{\rho_c} = \frac{54620}{2134} = 48,4 \cdot 10^6 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2};$$

- міцності:

$$\frac{E_{1cP}}{\rho_c} = \frac{750}{1964} = 0,51 \cdot 10^6 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2};$$

- жорсткість, вуглепластик:

$$\frac{E_{1y}}{\rho_y} = \frac{196520}{1678} = 137,1 \cdot 10^6 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2};$$

- міцності, вуглепластик:

$$\frac{E_{1yP}}{\rho_y} = \frac{1475}{1268} = 1,36 \cdot 10^6 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2};$$

Для порівняння, зазначимо характеристики матеріалу поліетилентерефталат (ПЕТ), який має широке застосування у виготовленні композитних газових ємностей.

- Жорсткість поліетилентерефталату:

$$\frac{E}{\rho} = \frac{17600}{2430} = 24,2 \cdot 10^6 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2};$$

- Міцності поліетилентерефталату:

$$\frac{\sigma_T}{\rho} = \frac{242}{2360} = 0,34 \cdot 10^6 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2};$$

**Висновок:** питома жорсткість та питома міцність композитного матеріалу (КМ) перевищують аналогічні характеристики поліетилентерефталату (ПЕТ). Це означає, що при однаковій міцності (жорсткості) конструктивні елементи з композитного матеріалу будуть значно легшими в порівнянні зі стандартними сталевими або навіть звичайними полімерними елементами. Зниження вагомості конструкційних елементів з різних матеріалів при однаковій несучій здатності визначається співвідношенням їх питомих характеристик.

### 3.2. Методи визначень напружень композиційного матеріалу

Після використання формул для температурних напружень у волокнах і матриці та підстановки в них виразу для коефіцієнта лінійного температурного розширення композиту  $\alpha_1$  вздовж волокон, отримуємо перетворені вирази:

$$\sigma_{1B} = E_B E_M \Delta T (1 - \psi) \frac{\alpha_M - \alpha_B}{E_B \psi - E_M (1 - \psi)} = \frac{E_B E_M \Delta T (1 - \psi) (\alpha_M - \alpha_B)}{E_1};$$

$$\sigma_{1M} = E_B E_M \Delta T \psi \frac{\alpha_M - \alpha_B}{E_B \psi + E_M (1 - \psi)} = \frac{E_B E_M}{E_1} \Delta T \psi (\alpha_M - \alpha_B);$$

де  $\Delta T$  – перепад температури.

При зменшенні температури на  $150^\circ \text{К}$ , отримуємо залишкові температурні напруження для склопластика та вуглепластика у волокнах та матриці. Коефіцієнт лінійного температурного розширення для скловолокна (КЛТР) складає  $6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$ , для вуглеволокна  $-3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$ , а для матриці (поліетилентерефталату)  $-60 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$ . Об'ємний вміст волокон становить  $\psi=0,62$ . Модулі пружності для волокон і матриці можна взяти з прикладу, наведеного у попередніх пунктах.

- напруження, спричинені температурними змінами, що виникають у скловолокнах:

$$\sigma_{Bc} = 78000 \cdot 3700(-130)(1 - 0,73) \frac{(73-8) \cdot 10^{-6}}{78000 \cdot 0,73 + 3700(1-0,73)} = -28,4 \text{ МПа};$$

$28,4 \text{ МПа} < \sigma_{Bc}$ , де  $\sigma_{Bc}$  – міцність скловолокна при стисканні  $\sigma_{Bc} = 1800 \text{ МПа}$ ;

- напруження, що виникають у вуглеволокнах через зміни температури:

$$\sigma_{By} = 270000 \cdot 3400(-170)(1 - 0,52) \frac{(40+3) \cdot 10^{-6}}{270000 \cdot 0,52 + 3400(1-0,52)} = -34 \text{ МПа};$$

34 МПа <  $\sigma_{By}$ , де  $\sigma_{By}$  – міцність вуглеволокна при стисканні  $\sigma_{By} = 3400$  МПа.

- напруження, спричинені температурними змінами, що виникають у матриці склопластику:

$$\sigma_{Mc} = 83000 \cdot 2700(-140) \cdot 0,37 \frac{(6-50) \cdot 10^{-6}}{83000 \cdot 0,37 + 2700(1-0,37)} = 42,7 \text{ МПа};$$

42,7 МПа <  $\sigma_{Mr}$ , де  $\sigma_{Mr}$  - міцність матриці при розтягуванні  $\sigma_{Mr} = 50$  МПа;

- напруження, що виникають у вуглепластику через зміни температури у матриці:

$$\sigma_{My} = 86000 \cdot 1800(-140) \cdot 0,37 \frac{(-3-50) \cdot 10^{-6}}{860000 \cdot 0,37 + 2400(1-0,37)} = 40,7 \text{ МПа};$$

40,7 МПа < 50 МПа.

Отже, можна сказати, що астосування можливе для композиційних матеріалів з встановленими параметрами.

Для наповнення термопластів використовуються рубане волокно довжиною від 3 мм до 12 мм або скляний порошок з волокнами довжиною 0,3-0,5 мм. Товщину, необхідну для днища, обчислюємо за допомогою формули:

$$h(r) = R \cdot h_{\phi} \cos \phi / r \cdot \cos \phi \text{ при } r_0 + c \leq r \leq R,$$

$$h(r) = h(r_0 + c) \text{ при } r_0 \leq r \leq R + c$$

де  $c = t \cdot \cos \theta'$ ,  $t$  – ширина стрічки,  $t = 0,01$  м,  $\theta'$  – кут конусності днища на полиці,  $\theta' = 5,7^\circ$ .

### Розрахунок механічних властивостей полімерів

Для вивчення механічних властивостей поліетилену, зміцненого одношаровими вуглецевими нанотрубками (ОВНТ), була розроблена спрощена модель, що описує взаємодію полімерної матриці, у даному випадку поліетилентерефталату (ПЕТ), з ОВНТ. Геометричну модель композитної системи було побудовано з використанням програмного забезпечення ANSYS Workbench, і ця модель зображена на рисунку 2.3.

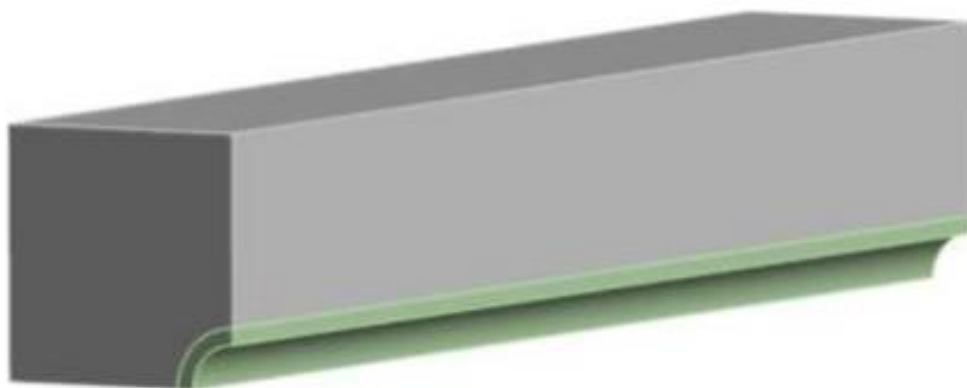


Рисунок 3.1 – Частина моделі розраховуваної ємності системи

Для виконання розрахунків, властивості матеріалів для кожної частини моделі були призначені відповідно до значень, які приведені в таблиці 2.2.

$\rho$  – густина,  $[\sigma_{TS}]$  – границя міцності,  $E$  – модуль пружності,  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

Для визначення значень модуля пружності та модуля зсуву було проведено серію експериментів на композитних матеріалах, які були посилені нанотрубками з різними хіральними індексами: (8, 8), (12, 12) та (15, 15). Для забезпечення однакових умов для всієї системи були залишені сталими:

- Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) мають довжину  $l=14,65$  нм.
- Товщина стінки ВНТ становить  $t=0,34$  нм.
- Об'єм полімерної матриці у системі складає  $V_{ПНТ}=89,714$  нм<sup>3</sup>.

У таблиці 2.3 наведено змінні параметри моделей композитних систем.

Таблиця 3.1 – Параметри нанотрубок у поєднанні з композитами

№	індекси	Орієнтовний діаметр нм	d1/d2, нм	V <sub>ОВНТ</sub> , нм <sup>3</sup>
1	(8,8)	1,24	0,984/1,347	2,147
2	(12,12)	2,05	1,76 /2,16	3,245
3	(15,15)	2,37	1,945 /2,748	4,231

Об'єм ОВНТ було визначено за допомогою системи ANSYS. З отриманих значень можна обчислити об'ємну частку поліетилену та ОВНТ у композиті за відповідними формулами:

$$\alpha_{\text{ПНТ}} = \frac{V_{\text{ПНТ}}}{V_{\text{ПНТ}} + V_{\text{ОВНТ}}};$$

$$\alpha_{\text{ОВНТ}} = \frac{V_{\text{ОВНТ}}}{V_{\text{ПНТ}} + V_{\text{ОВНТ}}};$$

Отримані значення достатні для визначення ефективних значень модуля пружності та модуля зсуву композиту, які є усередненими за Фогойтом та Реусом. Результати розрахунків для кожного композиту приведені в таблиці 2.4.

Для визначення значень модуля пружності за допомогою методів структурної механіки потрібно сконструювати матрицю жорсткості анізотропного матеріалу.

Для визначення значень модулів пружності E1 (E1=E2) та E3, необхідно провести два випробування системи в напрямках X та Z. Для визначення модуля зсуву G, необхідні випробування в напрямках XY та YZ. Це означає, що для кожного композиту потрібно провести по чотири випробування (2 на розтяг та 2 на зсув), які відрізняються заданням відповідних граничних умов.

Граничні умови для випробувань задаються наступним чином::

$$\langle c_{i,j} \rangle = \frac{\langle \sigma_i \rangle}{\langle \epsilon_j \rangle}, \quad i, j = \overline{1,9}$$

### 3.2.1. Розтяг в напрямку X:

- На площинах  $x = 0$  і  $y = 0$  встановлюються умови симетрії.
- На площині  $y = Lu$  зафіксовується переміщення  $u_y = 0$ .

- На площині  $x = Lx$  встановлюється переміщення  $ux = Lx\varepsilon$ , де  $\varepsilon = 10^{-3}$  - деформація.

- На площинах  $z = 0$  і  $z = Lz$  забезпечується фіксація  $uz = 0$ .

На основі отриманих значень  $\langle \sigma_{xx} \rangle$ ,  $\langle \sigma_{yy} \rangle$  та заданого значення  $\langle \varepsilon_{xx} \rangle = 10^{-3}$ , визначаються середні компоненти матриці жорсткості  $\langle c_{11} \rangle$  та  $\langle c_{21} \rangle$  за такими співвідношеннями:

$$\langle c_{11} \rangle = \frac{\langle \sigma_{xx} \rangle}{\langle \varepsilon_{xx} \rangle}, \quad \langle c_{21} \rangle = \frac{\langle \sigma_{yy} \rangle}{\langle \varepsilon_{xx} \rangle};$$

За умови симетрії моделі, ми отримуємо, що компонента  $\langle c_{11} \rangle$  матриці жорсткості дорівнює компоненті  $\langle c_{22} \rangle$ , а компонента  $\langle c_{21} \rangle$  дорівнює компоненті  $\langle c_{12} \rangle$ .

3.2.2 Випробування на розтяг в напрямку  $Z$  має наступні умови:

- На площинах  $x = 0$  і  $y = 0$  задаються умови симетрії.

- На площині  $y = Ly$  задається закріплення  $uy = 0$ .

- На площині  $x = Lx$  задається нульове переміщення по  $ux = 0$ .

- На площинах  $z = 0$  задається закріплення по  $uz = 0$ .

- На площині  $z = Lz$  задається переміщення  $uz = Lz\varepsilon$ , де  $\varepsilon = 10^{-3}$  є деформацією.

На основі аналогії з першим випробуванням, ми визначаємо значення шляхом використання відповідних співвідношень:

$$\langle c_{13} \rangle = \frac{\langle \sigma_{xx} \rangle}{\langle \varepsilon_{xx} \rangle}, \quad \langle c_{33} \rangle = \frac{\langle \sigma_{zz} \rangle}{\langle \varepsilon_{xx} \rangle};$$

У симетричній матриці значення  $\langle c_{13} \rangle$  дорівнює  $\langle c_{31} \rangle$ .

**3.2.1.** Зсув за площиною  $XY$ :

- на площинах  $x = 0$  і  $x = Lx$  – задається фіксація зсуву  $uy = 0$ ;

- на площині  $y = 0$  – задається фіксація зсуву  $ux = 0$ ;

- на площині  $y = Ly$  – задається зсув  $ux = Lx\varepsilon$ ;

- на площинах  $z = 0$  і  $z = Lz$  – фіксація зсуву по  $uz = 0$ ,

На основі отриманих результатів визначаємо значення навантаження:

$$\langle c_{44} \rangle = \frac{\langle \tau_{xy} \rangle}{\langle \gamma_{zz} \rangle};$$

### 3.2.2. Переміщення відносно площини YZ:

- На площинах  $z = 0$  і  $z = Lz$  – встановлюється закріплення зі значенням  $u_z = 0$ .
- На площині  $y = 0$  – встановлюється закріплення зі значенням  $u_z = 0$ .
- На площині  $y = Ly$  – встановлюється закріплення зі значенням  $u_z = Lz\varepsilon$ .
- На площинах  $x = 0$  і  $x = Lx$  – встановлюється закріплення зі значенням  $u_x = 0$ .

На основі отриманих результатів визначаємо значення навантаження

$$\langle c_{55} \rangle = \langle c_{66} \rangle = \frac{\langle \tau_{yz} \rangle}{\langle \gamma_{yz} \rangle}$$

На рисунках 2.4–2.6 представлені результати розрахунків полів напружень та деформацій для композитного матеріалу ПЕТ+ОВНТ (12,12).

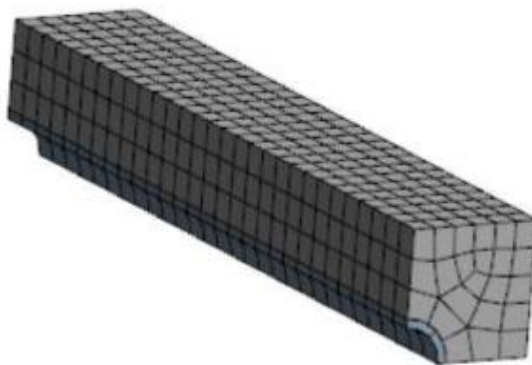
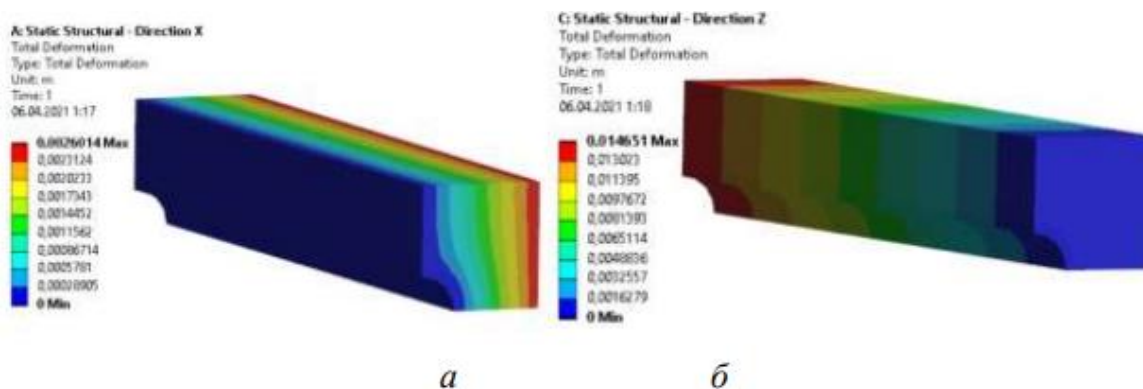


Рисунок 3.2 – Розбиття моделі зразку композитної ємності на дискретні елементи

Метод подвійного перерахунку використовувався для визначення сіткової збіжності числових моделей для обернених задач нелінійної динаміки структур.



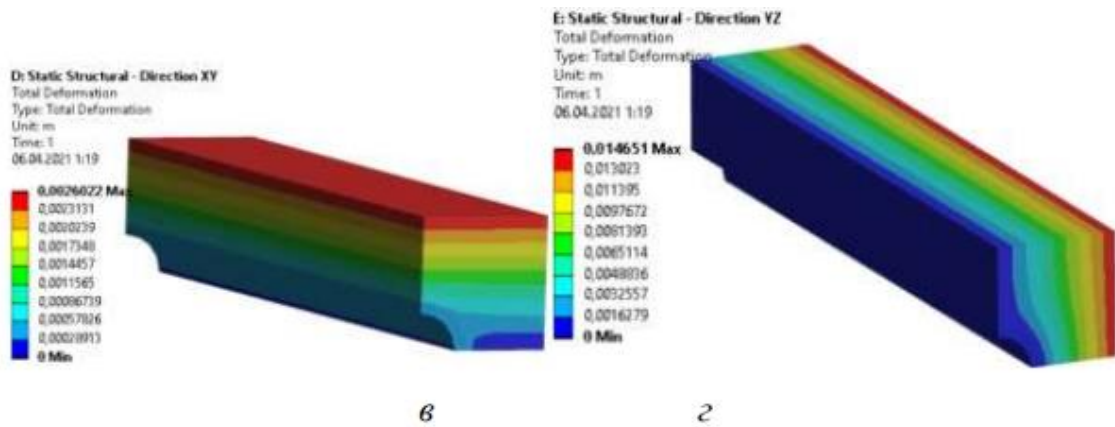


Рисунок 3.3 – Розрахунки відносно полів переміщень:  
 Рисунок А відображає переміщення у напрямку X,  
 Рисунок Б показує переміщення у напрямку Z,  
 Рисунок В представляє переміщення в площині XY,  
 Рисунок Г відображає переміщення в площині YZ

За використанням отриманих значень була складена матриця жорсткості композитного матеріалу

$$[C] = \begin{bmatrix} 2,179 & 0,575 & 0,536 & 0 & 0 & 0 \\ 0,575 & 2,179 & 0,536 & 0 & 0 & 0 \\ 0,536 & 0,536 & 36,468 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,792 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4,8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4,8 \end{bmatrix} 10^{-9}.$$

Для визначення векторів модуля пружності E, модуля зсуву G та компонентів тензора коефіцієнтів Пуассона потрібно обчислити обернений до матриці [C] декартовий тензор другого рангу піддатливості

За допомогою оберненого до матриці піддатливості можна визначити модулі пружності:

$$E1 = E2 = \frac{1}{d_{11}}, E3 = \frac{1}{d_{33}};$$

модулі зсуву:

$$G1 = \frac{1}{d_{44}}, G2 = G3 = \frac{1}{d_{55}};$$

та коефіцієнти Пуассона:

$$v_{ij} = d_{ij}E_i, i, j = \overline{1,3}, i \neq j$$

Отримані результати були внесені до таблиці 3.2 і відображені на діаграмах (рисунки 3.4–3.8). Порівняння отриманих даних представлено в таблиці 3.3.

Отримаємо модуль пружності:

$$E1 = E2 = \frac{1}{d_{11}}, E3 = \frac{1}{d_{33}};$$

модуль зсуву:

$$G1 = \frac{1}{d_{44}}, G2 = G3 = \frac{1}{d_{55}};$$

коефіцієнти Пуассона:

$$v_{ij} = d_{ij}E_i, i, j = \overline{1,3}, i \neq j$$

Таблиця 3.2. – Результати числових досліджень механічних властивостей композитів, методом структурної механіки

Композит	$E_1=E_2$ , ГПа	$E_3$ , ГПа	$\nu_{12} = \nu_{21}$	$\nu_{23} \neq \nu_{32}$	$\nu_{13} \neq \nu_{31}$	$G1$ , ГПа	$G2=G3$ , ГПа
(8,8)	1,97	21,7	0,247	0.027 0.196	0.025 0.218	0,77	4,47
(12,12)	2,05	39,5	0,234	0.021 0.198	0.019 0.213	0,85	5,23
(15,15)	2,47	43,2	0,296	0.0098 0.217	0.0192 0.176	0,93	6,21

Таблиця 3.3 – Зведена таблиця результатів

Композит	Середній діаметр ОВНТ	$E_3$ , ГПа	$G1$ , ГПа	$E^{Vef}$ , ГПа	$E^{Ref}$ , ГПа	$\delta E$ , %	$\delta G$ , %
(8,8)	1,746	27,86	0,784	26,49	0,724	9,6	7,8
(12,12)	1,97	39,25	0,795	34,15	0,732	2,7	13,4
(15,15)	2,34	47,23	0,897	47,62	0,694	1,5	17,3

$$\delta_E = \frac{E^{Vef} - E_3}{E^{Vef}}; \delta_G = \frac{G_3 - G^{Ref}}{G_3};$$

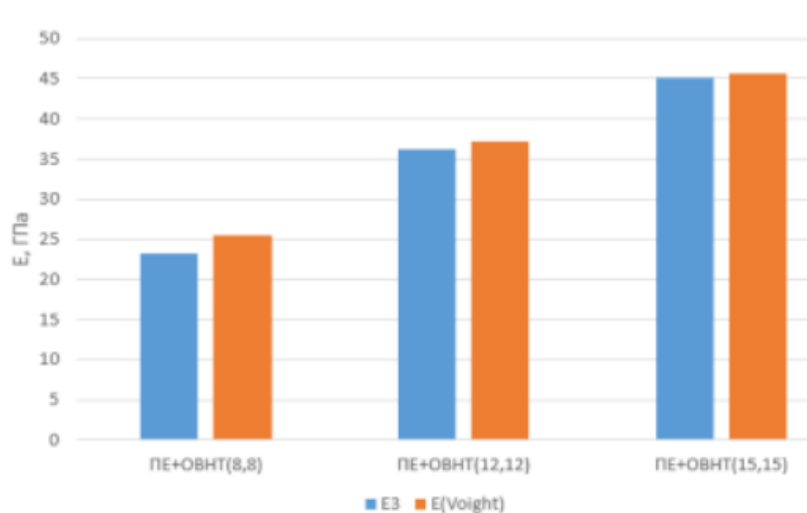


Рисунок 3.4 – Порівняння досліджень модуля пружності від ступеню величини діаметру нанотрубок

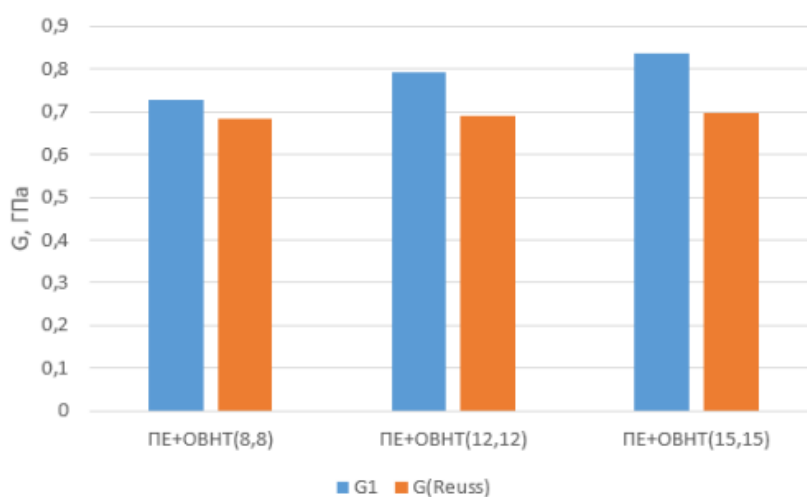


Рисунок 3.5 – Порівняння досліджень модуля зсуву від ступеню величини діаметру нанотрубок

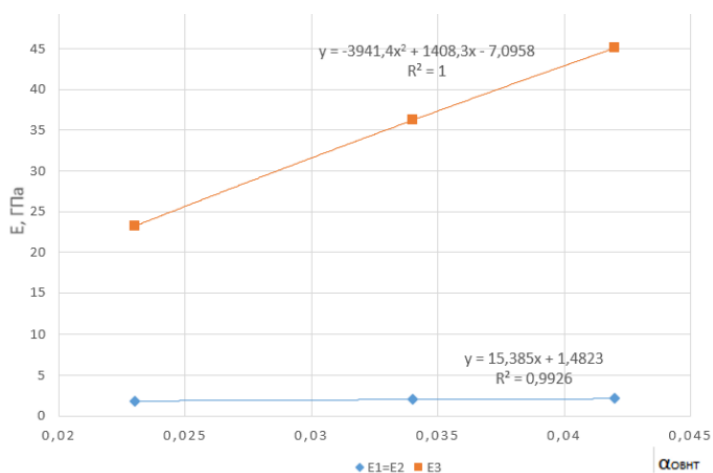


Рисунок 3.6 – Залежності модуля пружності композитів і зміною відсоткової частки арумвального волокна.

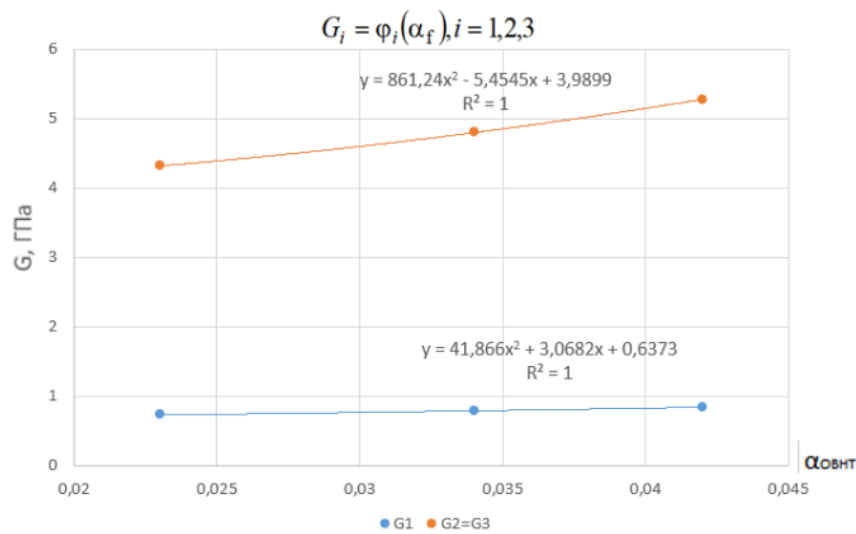


Рисунок 3.7 – Графік залежності модуля зсуву композитів від зміни об'єму волокон

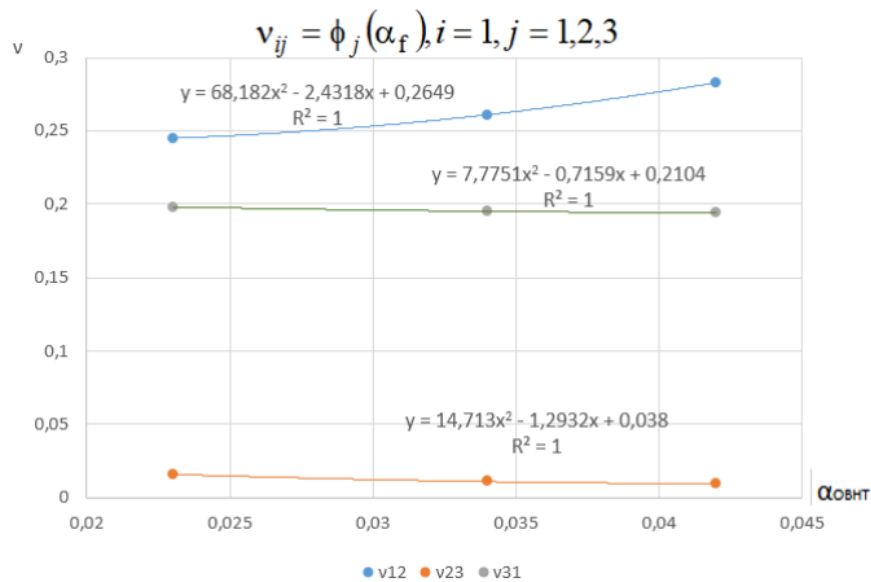


Рисунок 3.8 –Графік залежності коефіцієнта Пуассона композитів від зміни об'єму волокон

Отримані залежності, представлені на рисунках 3.6-3.8, можуть бути використані для прогнозування ефективних механічних властивостей композитів на основі пластику з включенням нанотрубок. Це дозволить спростити процес розв'язання різного роду задач, а особливо уникнути складних та трудомістких числових експериментів.

### 3.3. Розрахунки на міцність композитного балона для зберігання речовин підвищеної небезпеки

На сьогоднішній день відомо багато різних систем автоматизованого проектування, таких як AutoCAD, Abaqus, Approx, SolidWorks, CATIA, ANSYS та ін. Для моделювання процесу в роботі обрано систему розрахунків на міцність SolidWorks, яка базується на методі скінченних елементів та є дуже ефективною для чисельного розв'язування таких задач. Для коректного моделювання була створена 3Д модель композитної ємності



Рисунок 3.9 – Балон з однорідного полімерного матеріалу– 3D-модель  
(товщина стінки  $t$  – 5 мм)

Також на рис. 3.10 представлена модель балону з однорідного полімерного матеріалу, яку розбито тривимірними елементами. Тип скінченних елементів: чотирьохвузловий лінійний тетраедр C3D4 з стандартної бібліотеки SolidWorks.

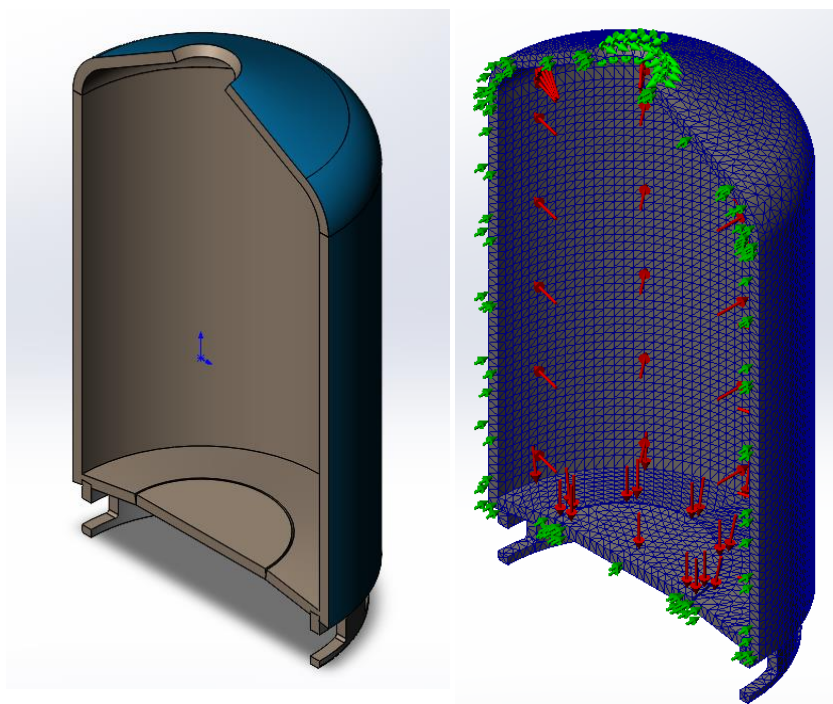


Рисунок 3.10 – Оболонкова 3D-модель балону з однорідного полімерного матеріалу розбита тривимірними елементами

Балон навантажено внутрішнім тиском величиною 1 МПа, матеріал основи балона – ПЕТ. Було розроблено технології та пристрої для позиціонованого позонного введення наповнювачів у вироби з полімерних матеріалів. Під час моделювання процесу введення наповнювачів у вироби з полімерних матеріалів безпосередньо в процесах формування в ослаблені зони, а саме (кришку та днище) було отримано ряд значень еквівалентних напружень за Мізесом, а також переміщень та деформацій в залежності від збільшення кількості армуючого наповнювача та збільшення внутрішнього тиску.

За умови, що товщина стінки:  $l = 10$  мм, товщина шару склопластику:  $l_{CB} = 8$  мм, осереднені властивості матеріалу наведені в таблиці 3.4

Таблиця 3.4 – Властивості матеріалів оболонкової моделі

Матеріал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	E, ГПа	$\nu$	$\sigma_{TS}$ , МПа
ПЕТ	950	1,6	0,2	19
Нанотрубка (12*12)	1300	1038,1	0,167	60
ПЕТ+СВ	1658	46,1	0,3	1420
ПЕТ+ВП	1567	154,3	0,64	86
ПЕТ+ нанотрубка (12*12)	980	36.23	0,15	54

Для порівняння проведено числовий аналіз ємності, матеріал якої володіє властивостями обраного пластику, а також армованого склопластиком, вуглепластиком та нанотрубками з розмірами 12 на 12, об'ємна частка яких становить 15%, 30% та 45%. Характеристики матеріалу приведені в таблиці 3.4.

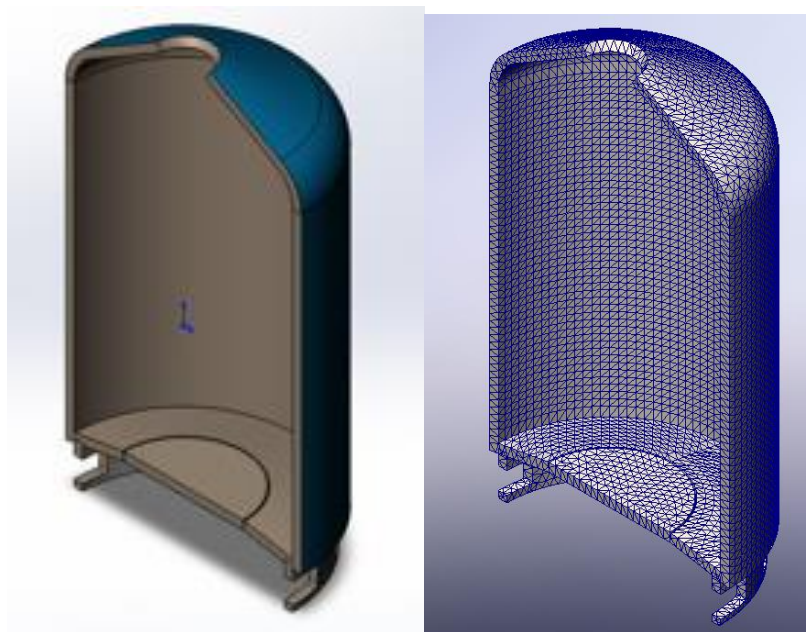


Рисунок 3.11 – Дискретизація числової моделі ємності: вузлів – 2927, випробування на розрив композитних газових балонів проводяться за тиску 1 МПа. На рисунку 3.12 наведені схема закріплення та навантаження числової моделі.

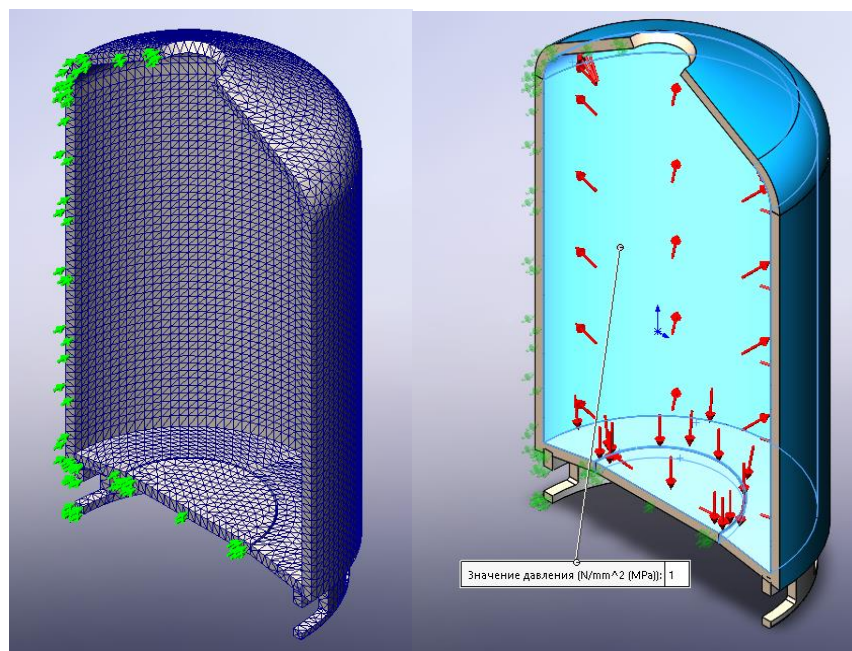
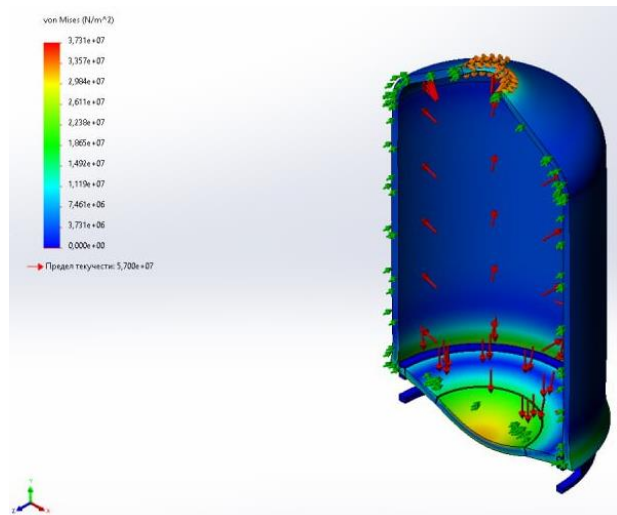
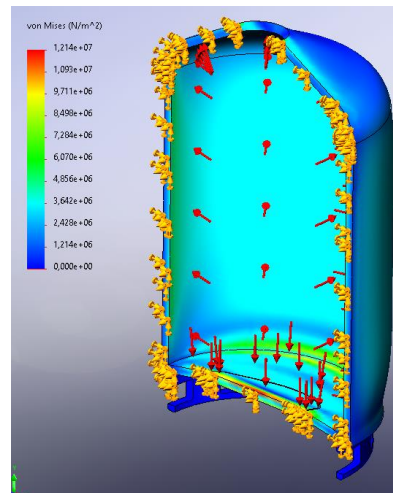


Рисунок 3.12 – Схема закріплення та навантаження композитної ємності. Результати розрахунків на міцність наведено на рисунку 2.15. Відносна похибка розрахунку  $\delta$  становить не більше 0,6%.

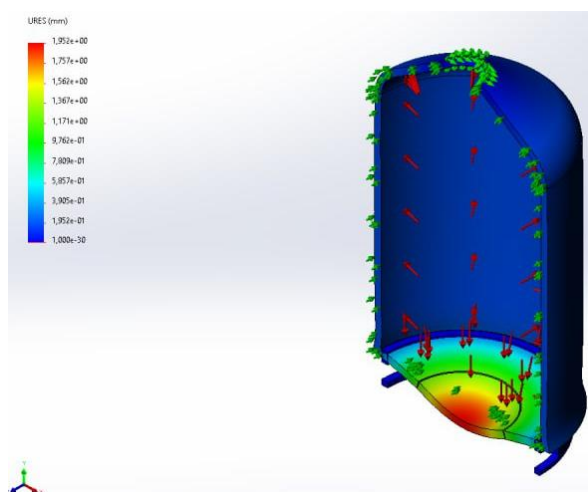
а- поле еквівалентного напруження ПЕТ



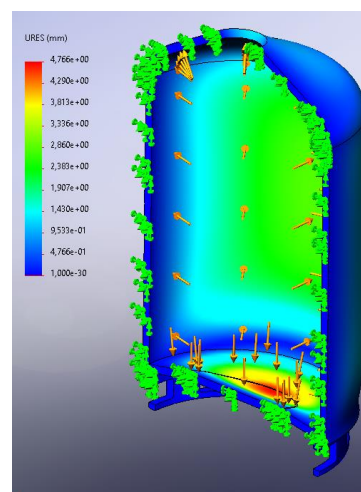
а- поле еквівалентного напруження СВ



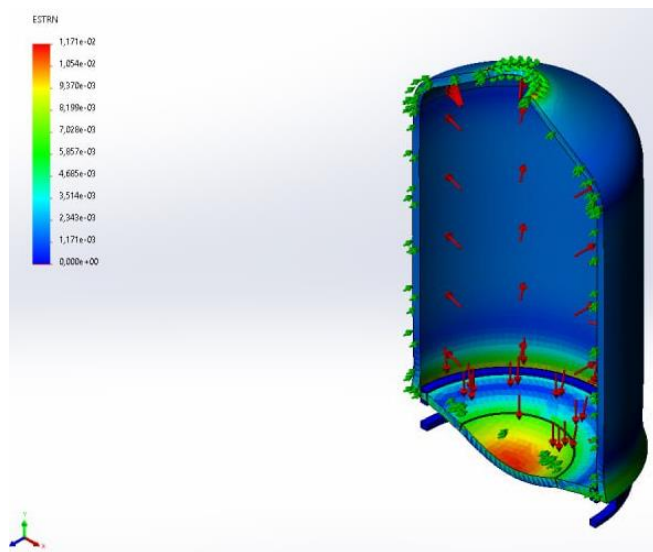
б - поле переміщення ПЕТ



в - Поле переміщення СВ



в - Поле деформації ПЕТ



в - Поле деформації СВ

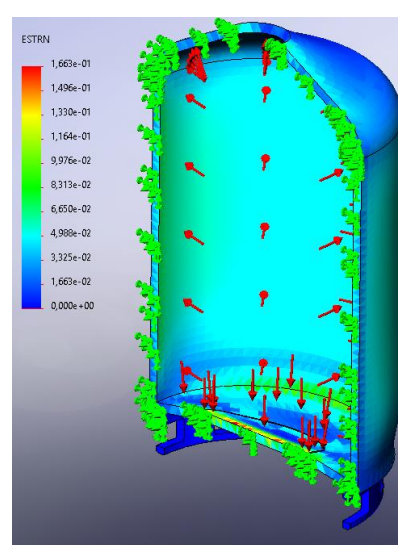


Рисунок 3.13 – Числовий аналіз композитних ємності повністю виконаної з однорідного ПЕТ та композиту з СВ

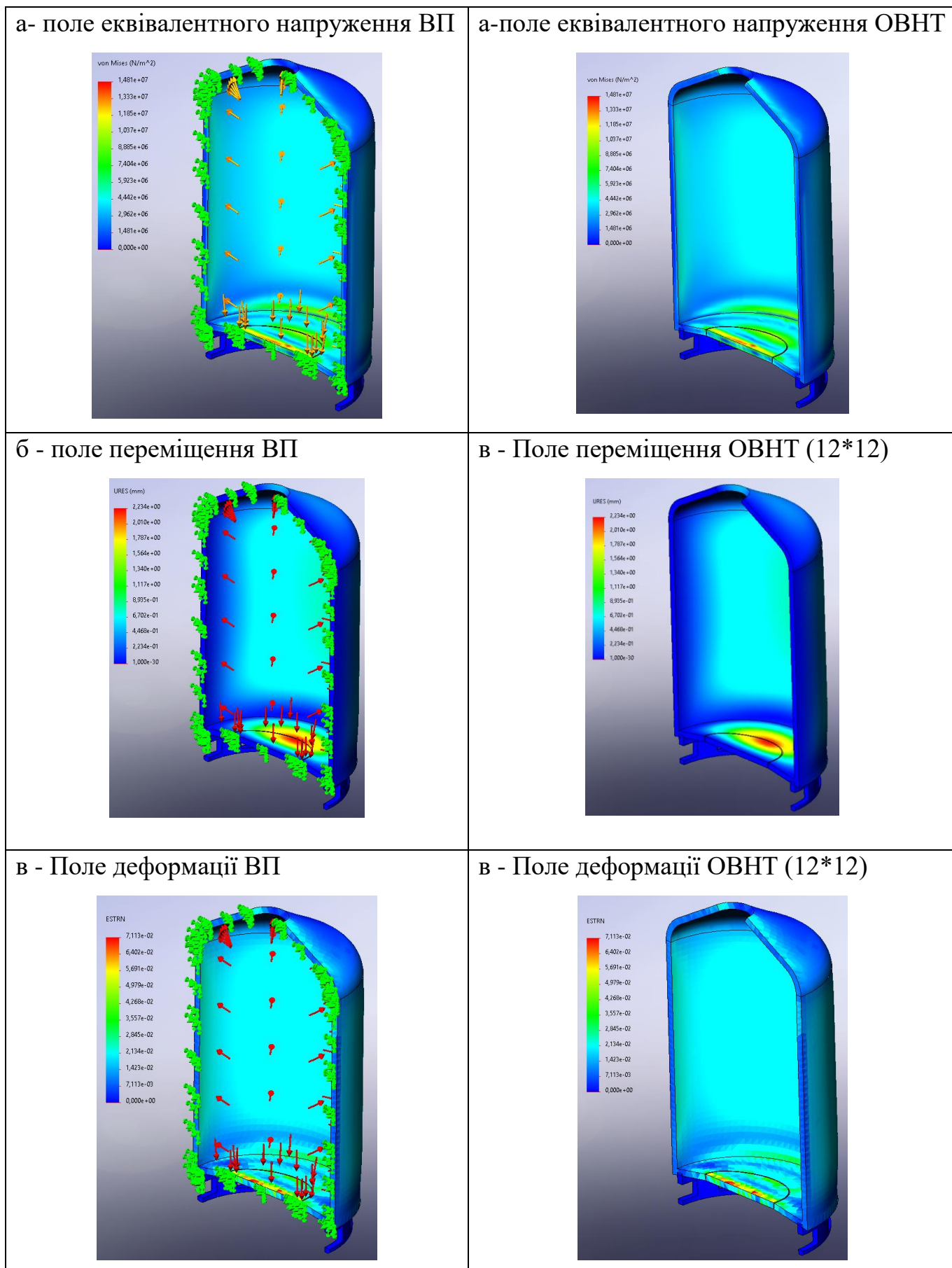


Рисунок 3.14 – Числовий аналіз композитних ємності повністю виконаної з вуглепластичного матеріалу та обраних нанотрубок

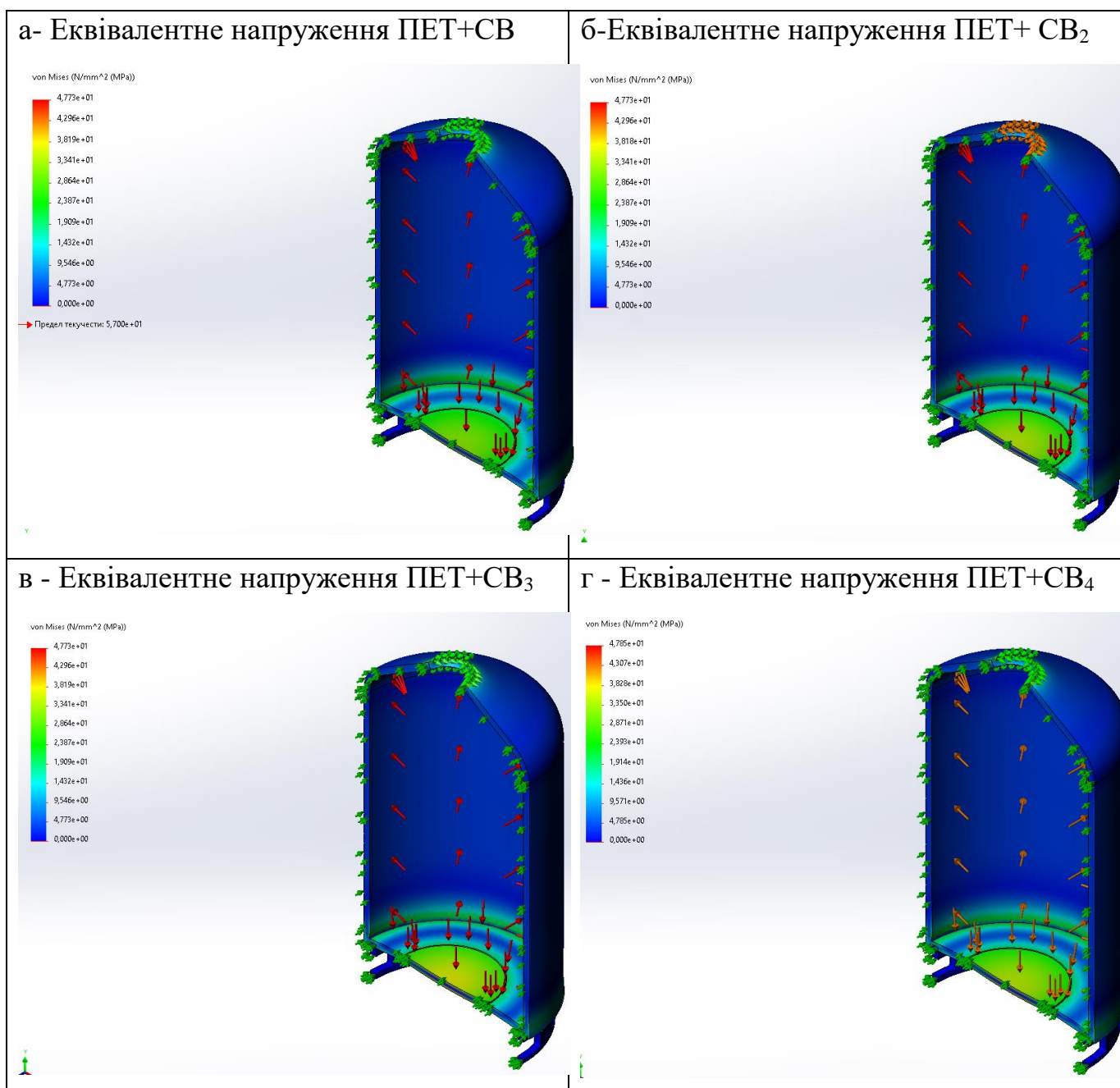


Рисунок 3.15 – Числовий аналіз залежності зміни еквівалентного напруження в композитній ємності від збільшенні кількості армуючої речовини (збільшення відсоткового вмісту склволокна)

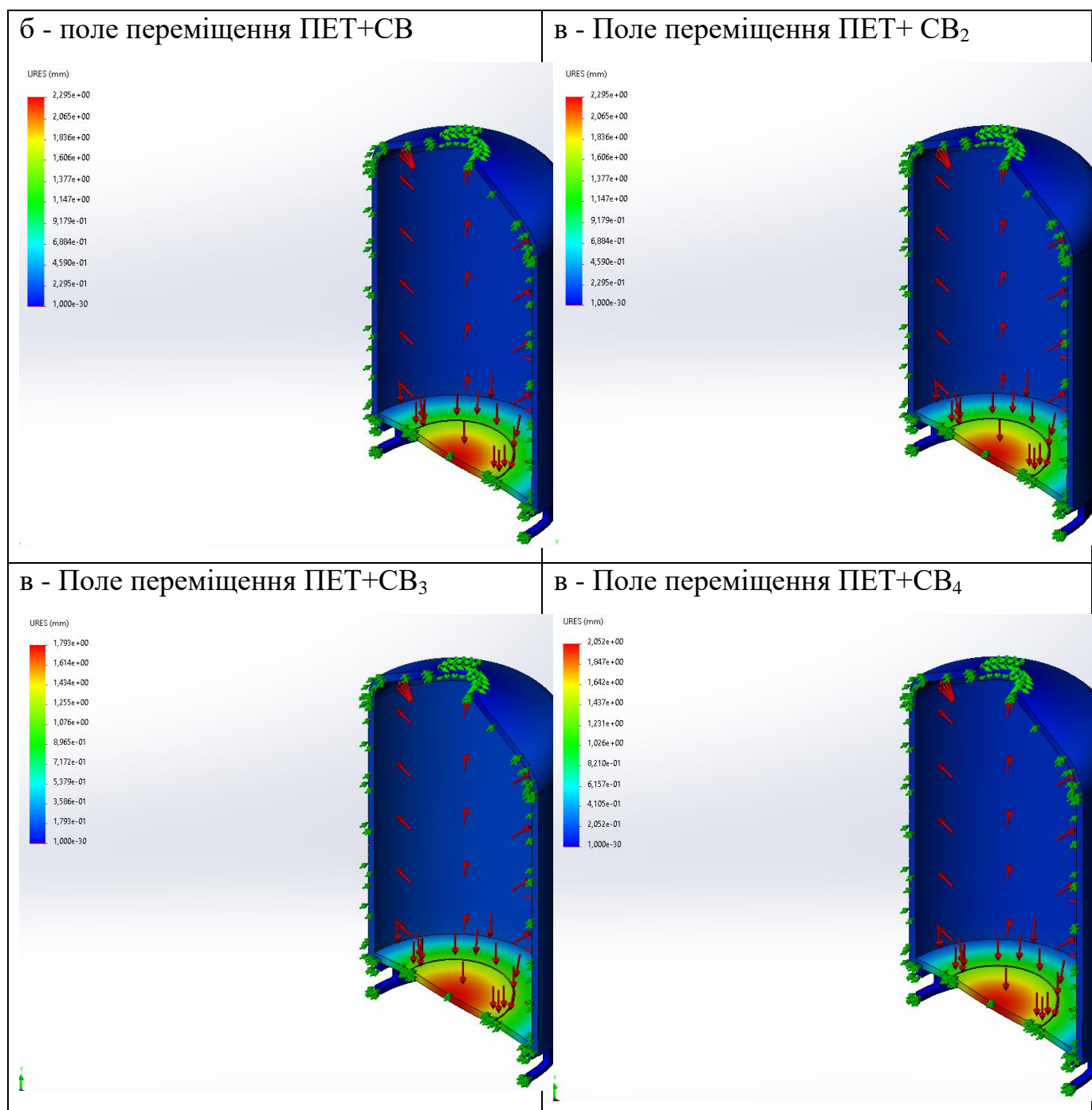


Рисунок 3.16 – Числовий аналіз залежності зміни переміщення в композитній ємності від збільшенні кількості армуючої речовини (збільшення відсоткового вмісту скловолокна)

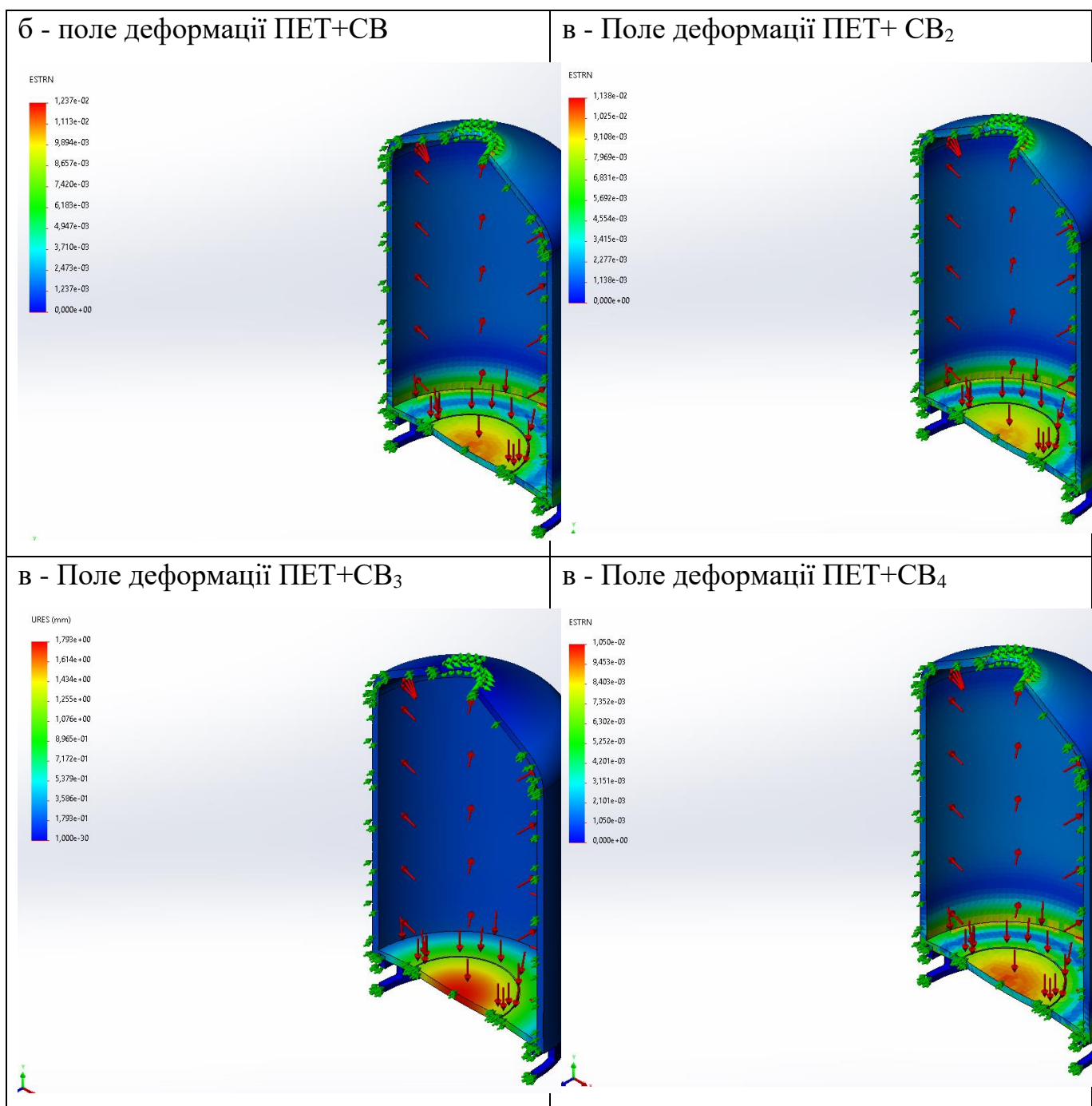


Рисунок 3.17 – Числовий аналіз залежності зміни деформації в композитній ємності від збільшенні кількості армуючої речовини (збільшення відсоткового вмісту скловолокна)

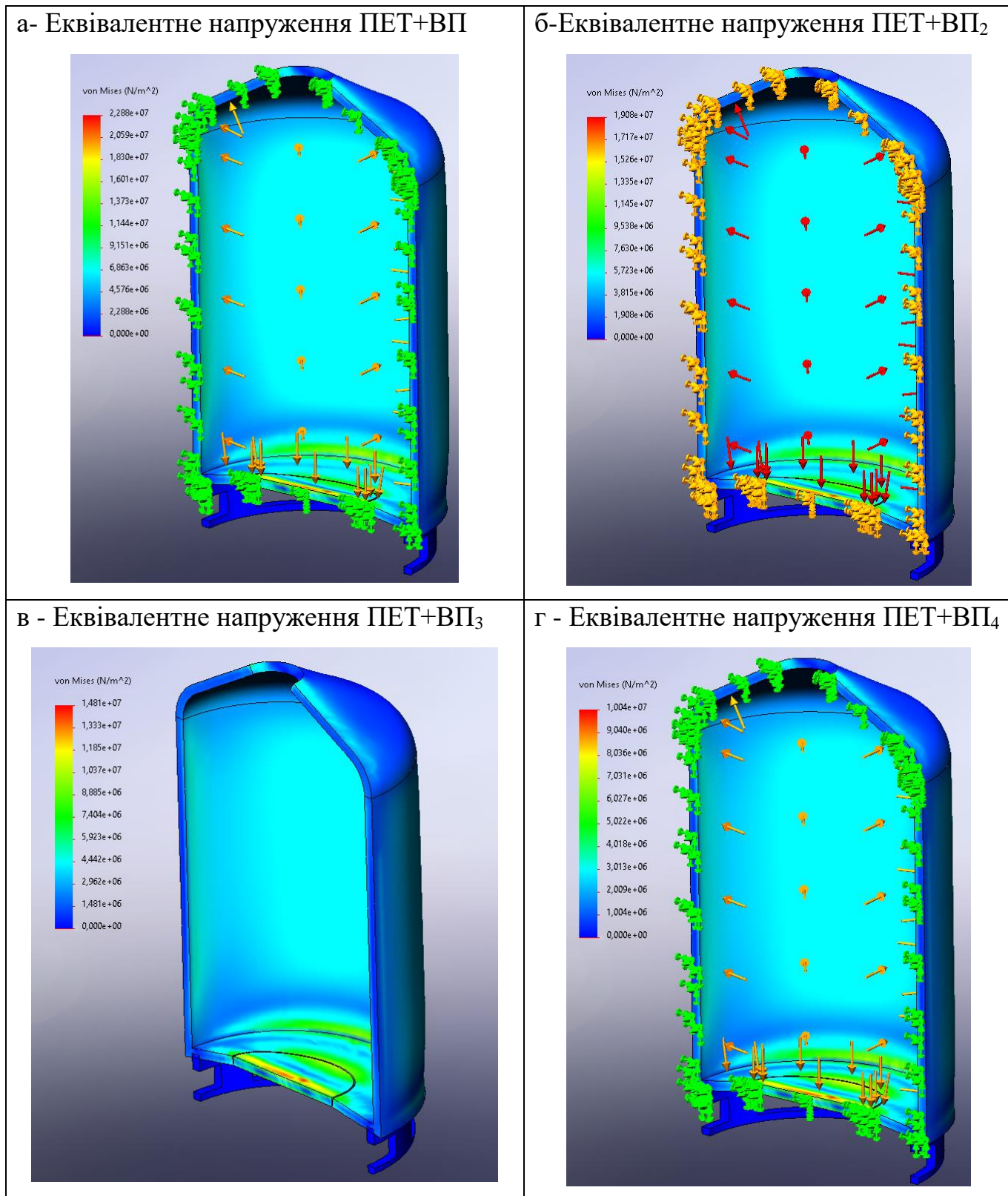


Рисунок 3.18 – Числовий аналіз залежності зміни еквівалентного напруження в композитній ємності від збільшенні кількості армуючої речовини (збільшення відсоткового вмісту вуглеволокна)

б - поле переміщення ПЕТ+ВП

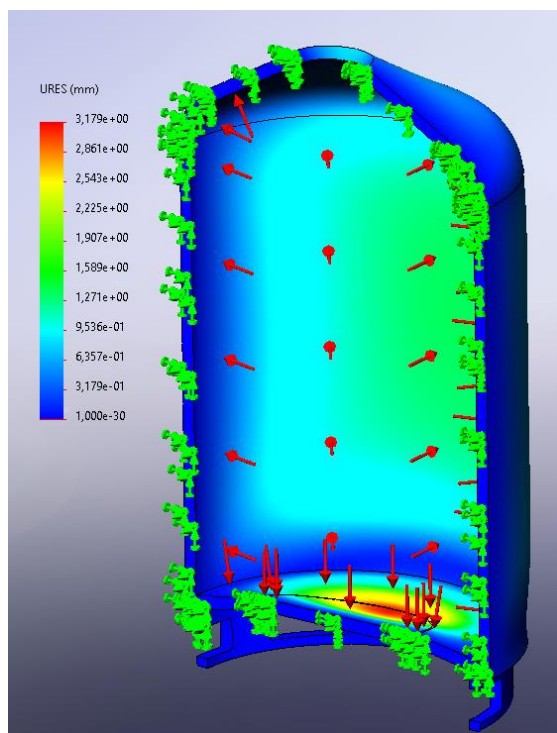
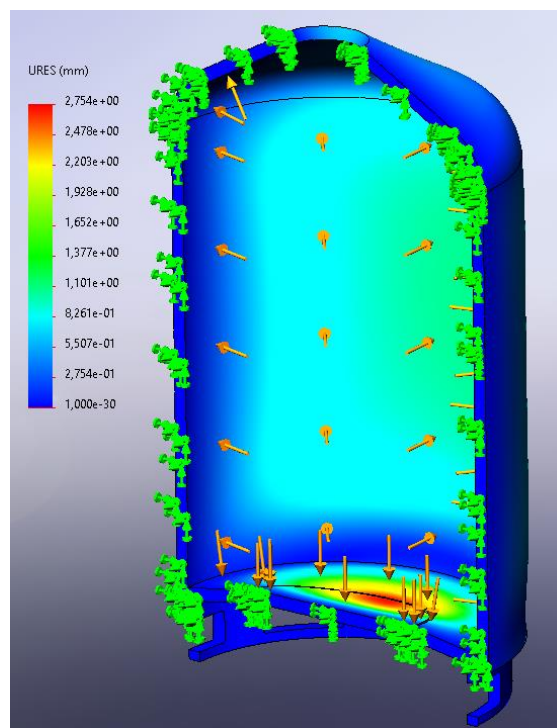
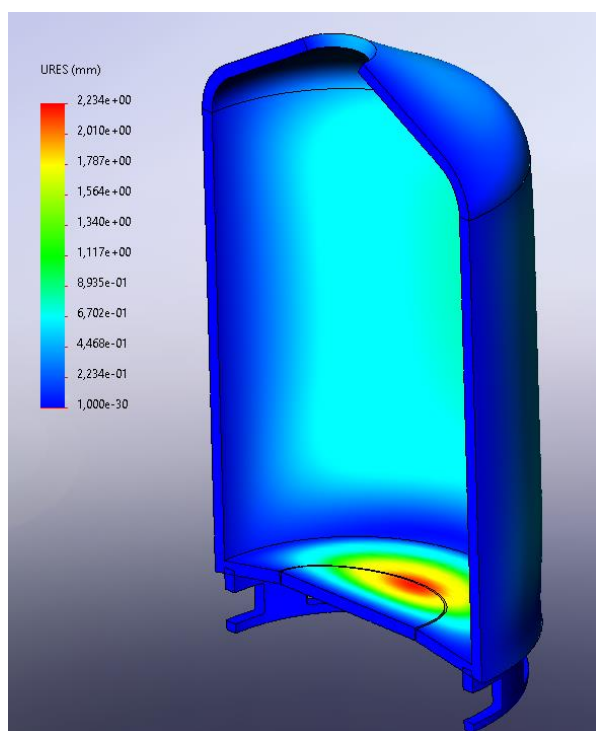
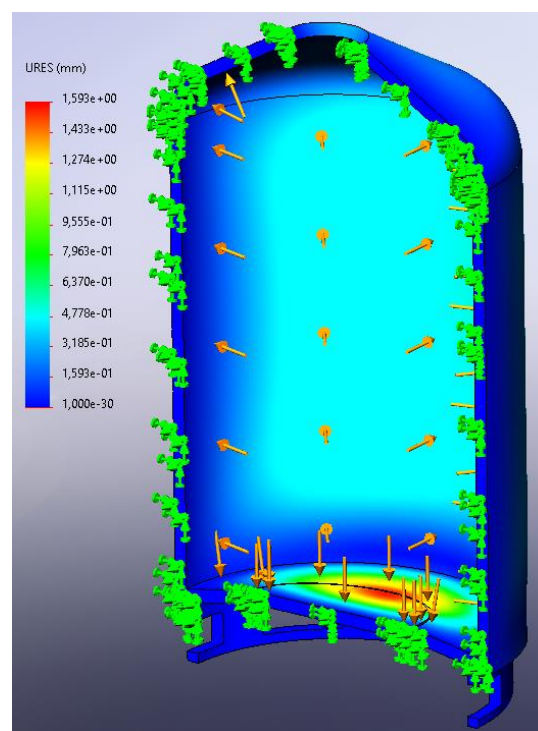
в - Поле переміщення ПЕТ+ВП<sub>2</sub>в - Поле переміщення ПЕТ+ВП<sub>3</sub>в - Поле переміщення ПЕТ+ВП<sub>4</sub>

Рисунок 3.19 – Числовий аналіз залежності зміни переміщення в композитній ємності від збільшенні кількості армуючої речовини (збільшення відсоткового вмісту вуглеволокна)

б - поле деформації ПЕТ+ВП

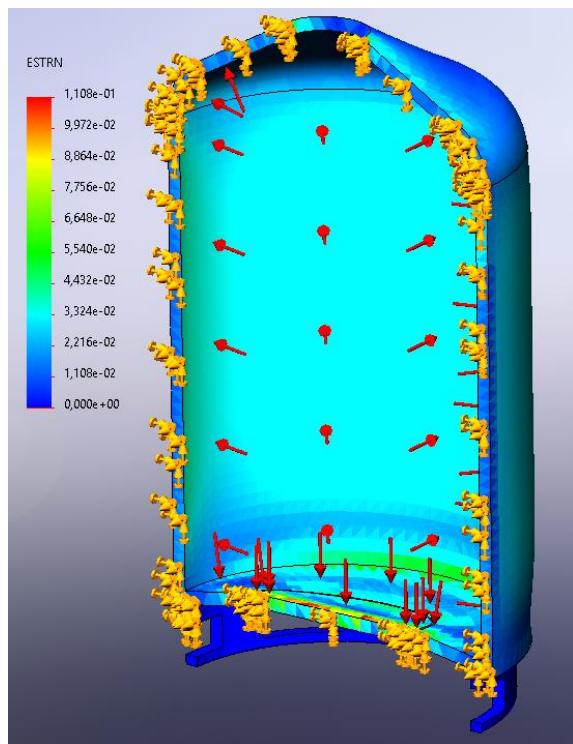
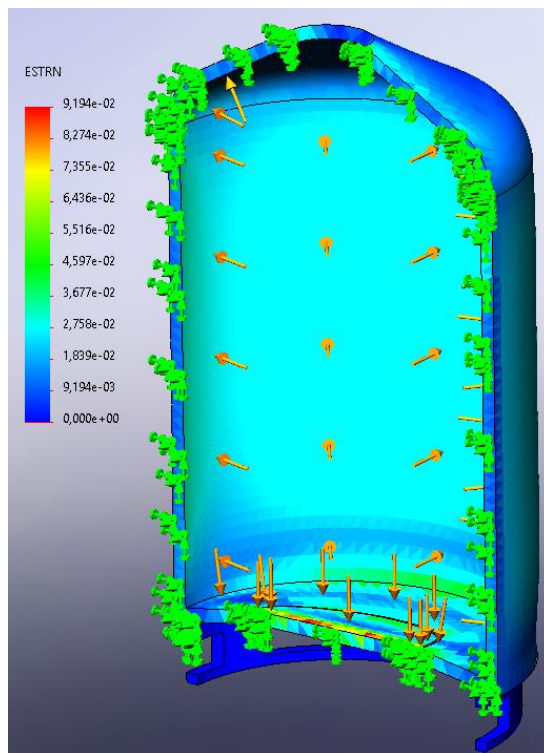
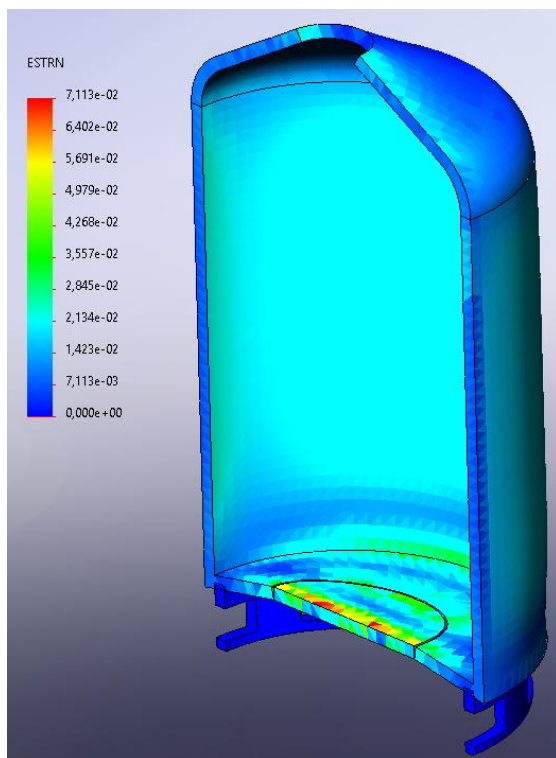
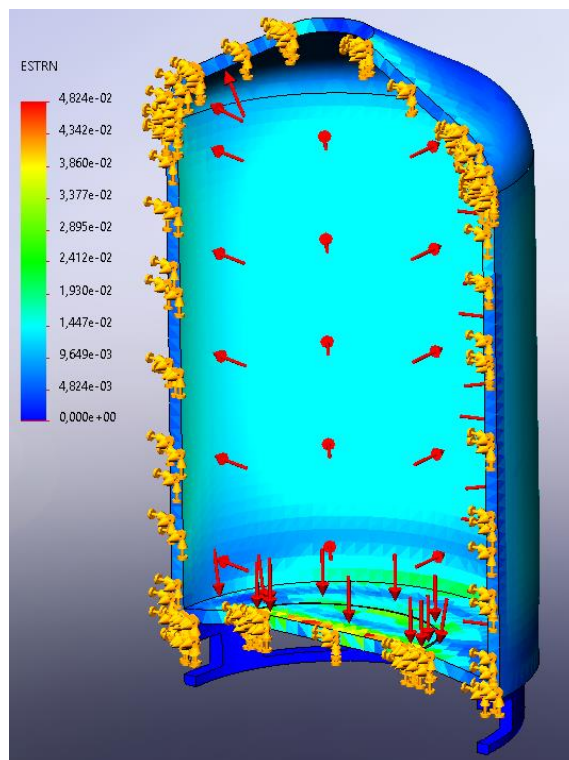
в - Поле деформації ПЕТ+ВП<sub>2</sub>в - Поле деформації ПЕТ+ВП<sub>3</sub>в - Поле деформації ПЕТ+ВП<sub>4</sub>

Рисунок 3.20 – Числовий аналіз залежності зміни деформації в композитній ємності від збільшенні кількості армуючої речовини (збільшення відсоткового вмісту вуглеволокна)

Представлення аналізу результатів розрахунків може бути здійснене у формі графіка, який відображає залежність найбільшої деформації балона від модуля пружності композиційного матеріалу на визначених ділянках. Наведений графік можна спостерігати на рисунку 2.23.

### **Залежності механічних характеристик композиційних балонів від ступеню наповнення скловолокном (СВ)**

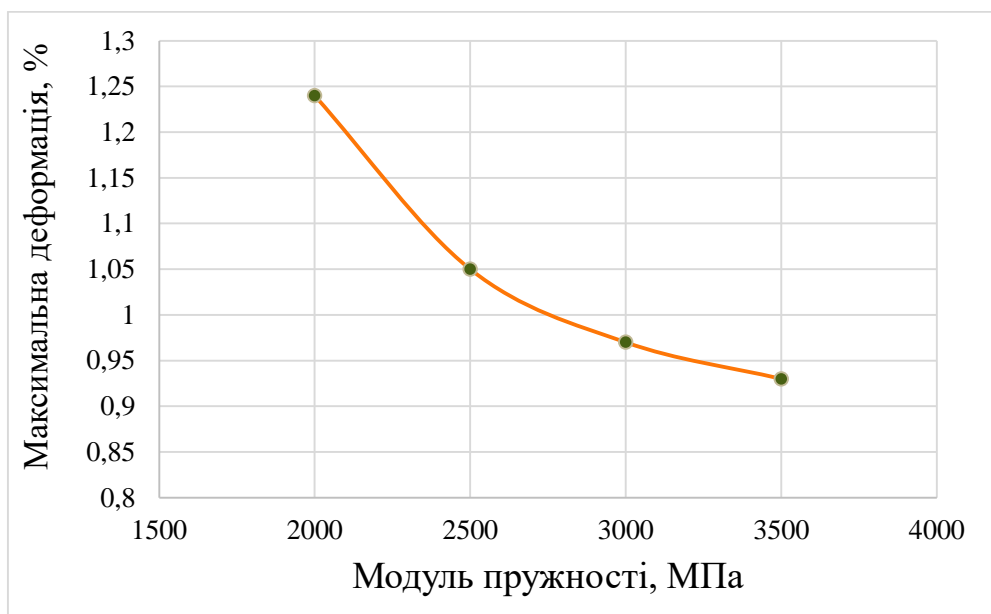


Рисунок 3.21 – Залежність максимальної деформації балона від модуля пружності композиційного матеріалу

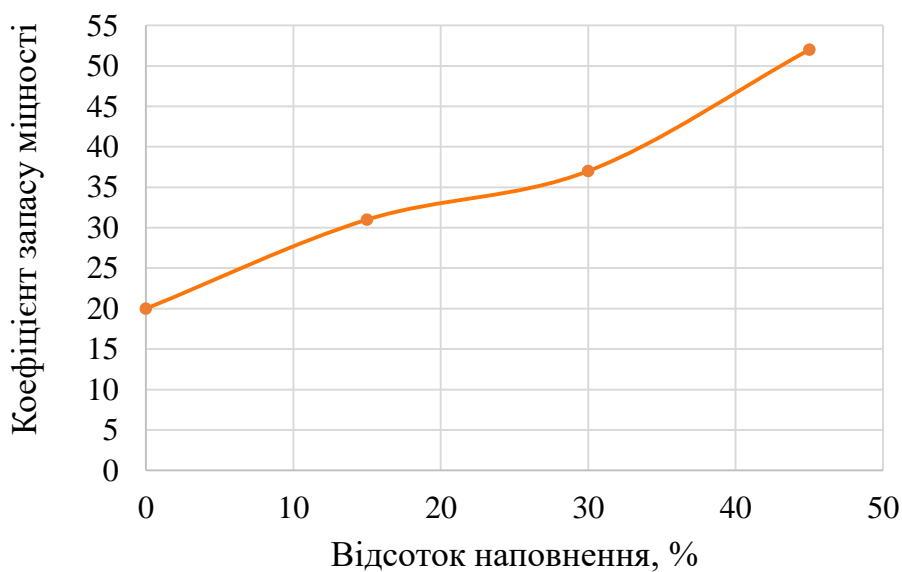


Рисунок 3.22 – Залежність коефіцієнту запасу міцності балона від відсотку наповнення композиційного матеріалу

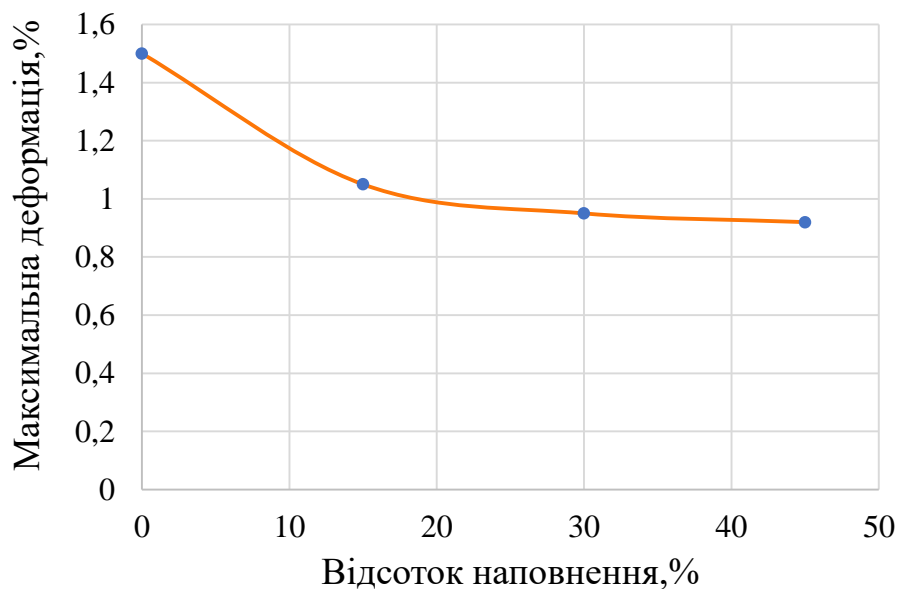


Рисунок 3.23 – Залежність максимальної деформації балона від ступеню наповнення композиційного матеріалу

**Залежності механічних характеристик композиційних балонів від ступеню наповнення вуглеволокна(ВВ)**

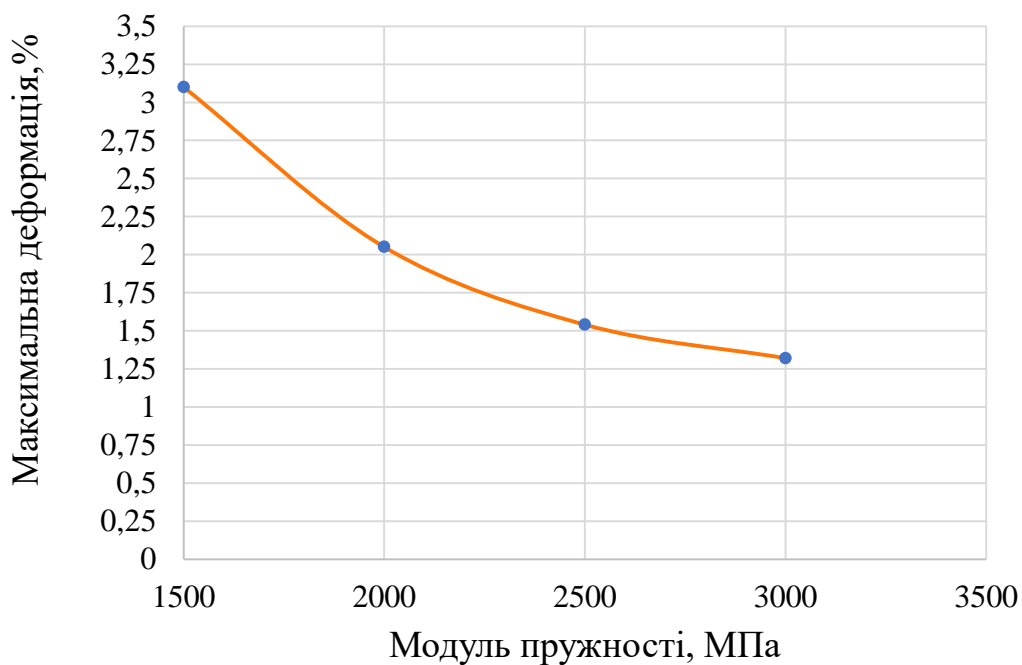


Рисунок 3.24 – Залежність максимальної деформації балона від модуля пружності композиційного матеріалу

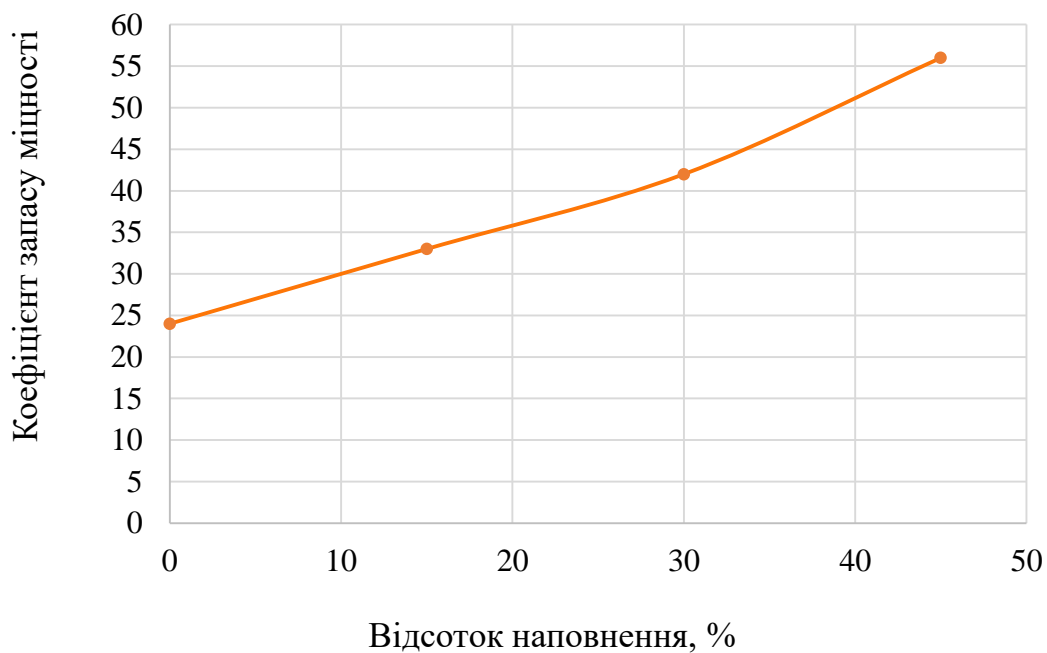


Рисунок 3.25 – Залежність коефіцієнту запасу міцності балона від відсотку наповнення композиційного матеріалу

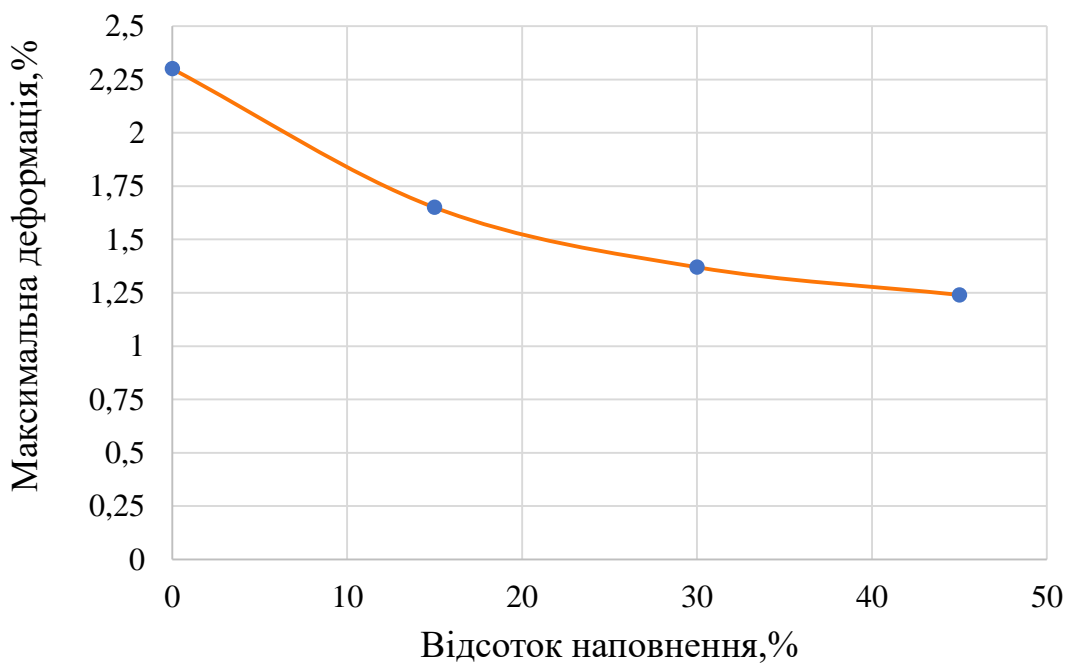


Рисунок 3.26 – Залежність максимальної деформації балона від ступеню наповнення композиційного матеріалу

**Залежності механічних характеристик композиційних балонів від ступеню наповнення нанотрубок(ОВНТ)**

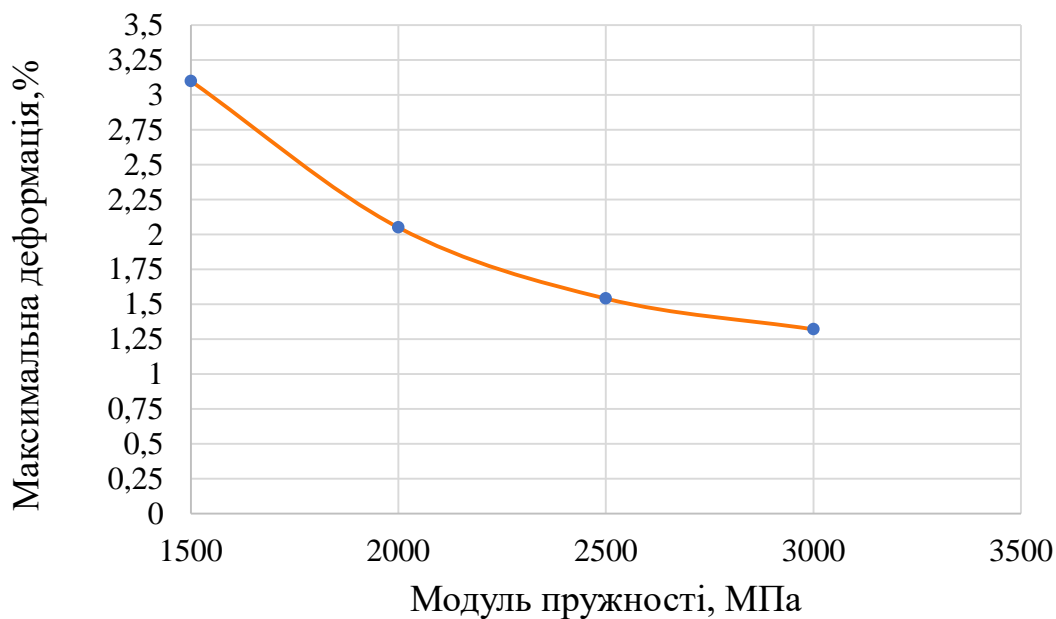


Рисунок 3.27 – Залежність максимальної деформації балона від модуля пружності композиційного матеріалу

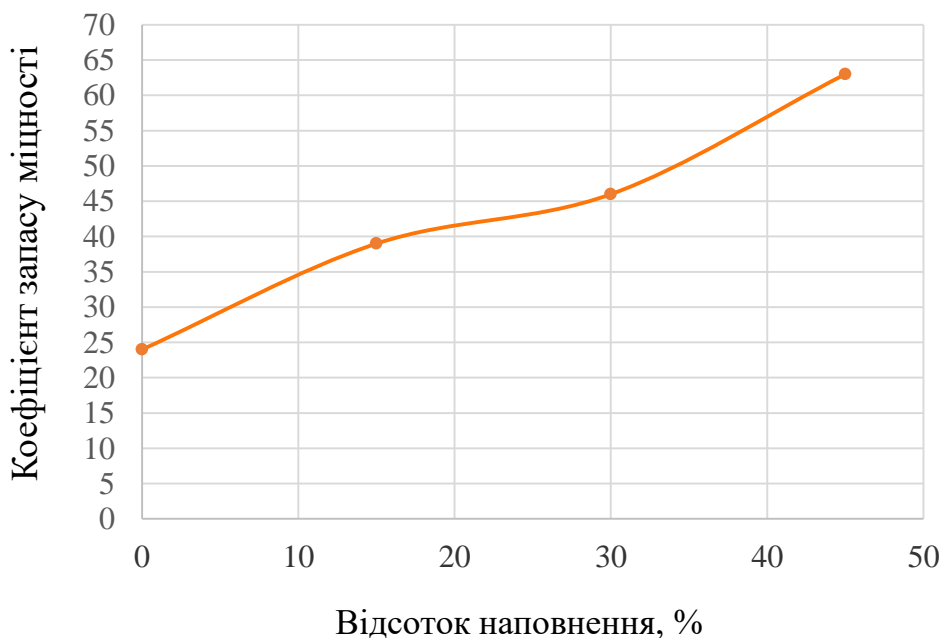


Рисунок 3.28 – Залежність коефіцієнту запасу міцності балона від відсотку наповнення композиційного матеріалу

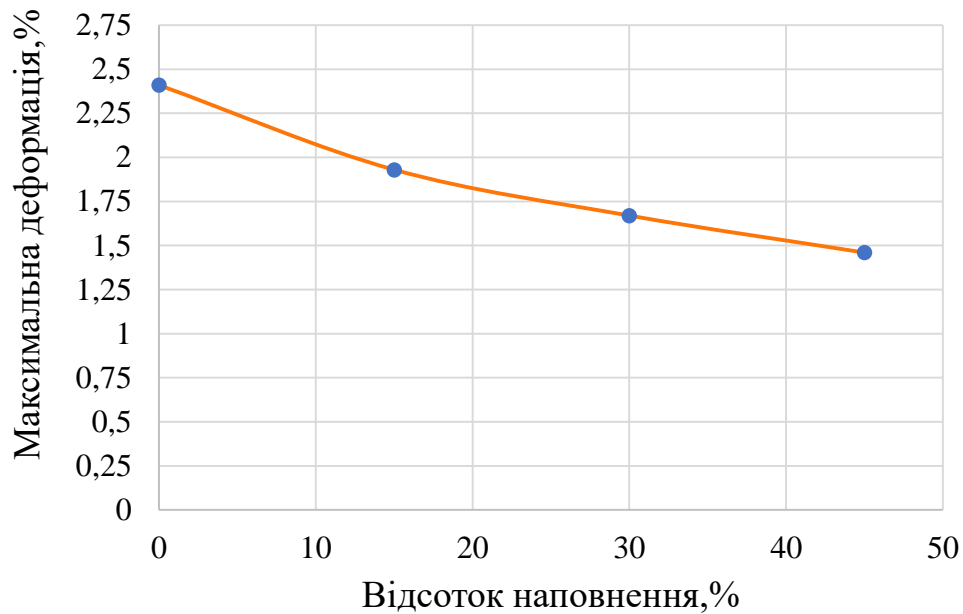


Рисунок 3.29 – Залежність максимальної деформації балона від ступеню наповнення композиційного матеріалу

Результати моделювання показують, що жорсткість конструкції збільшується зі збільшенням концентрації армуючого наповнювача саме в тих ділянках балона, де напруження максимальні, а також, що у разі використання наномодифікованого ПЕТ для виготовлення ємності газового балону, запас міцності зростає в 1,5 рази ніж при використанні ПЕТ+СВ

З результату моделювання витікає, що найбільші напруження діють поблизу верхнього клапана і на донці балона. Для подальших розрахунків змодельовано наявність введеного в дані області дисперсного армуючого наповнювача в різних концентраціях, що збільшує модуль пружності і межу текучості.

## Висновки до розділу

1. Отримано залежності для прогнозування ефективних механічних властивостей на основі ПЕТ+ОВНТ.

2. Розроблено числову модель НДС композитного балону для зберігання та використання скрапленого газу. Встановлено, що заміна матеріалу колби з ПНТ+СВ на композит ПНТ+ОВНТ(12, 12) з об'ємною часткою армувального елемента 3,4% підвищує запас міцності в 1,5 рази, що дає змогу зменшити товщину стінки колби та шару скловолокна, зменшуючи кількість використаного матеріалу чи збільшити ємність тари за збереження умови міцності. Відносна похибка розрахунку  $\delta$  становить не більше 0,6%.

3. Найбільші напруження діють поблизу верхнього клапана і на донці балона

4. Числовим моделюванням підтверджено доцільність застосування технології селективного введення армуючих наповнювачів у найбільш навантажені зони порожнистих полімерних виробів, зокрема балонів, що працюють під тиском.

5. Жорсткість конструкції збільшується зі збільшенням концентрації армуючого наповнювача саме в тих ділянках балона, де змодельовано введення наповнювача

6. Найбільші значення жорсткості та запасу міцності спостерігаються за умови наповнення ВНТ.

7. Зі збільшенням ступеню наповнення запас міцності конструкції зростає.

## **4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ**

### **4.1 Основна ідея проекту**

Ідея виробництва газових балонів з композитних матеріалів полягає у створенні альтернативної системи постачання газу населенню та промисловим об'єктам в ситуаціях, коли економічно не вигідно будувати газопроводи для транспортування газу. Основна ідея полягає в розробці технології виробництва газових балонів з композитних матеріалів, які мають численні переваги порівняно зі звичайними металевими балонами. Композитні газові балони є безпечними, легкими, мають антикорозійну стійкість і є зручними у використанні. Використання полімерно-композитних матеріалів робить газові балони абсолютно безпечними, завдяки волокнам, що армують їх. Вони є вибухобезпечними, а використання протикорозійних матеріалів робить їх довговічними.

Технологія виготовлення композитних газових балонів є унікальною і не має аналогів у світі. У процесі виробництва застосовуються інноваційні високоякісні матеріали, а на кожному етапі проводиться суворий контроль якості, включаючи тестування на міцність під тиском. Балони з вуглецевого волокна демонструють найвищу міру безпеки, витримуючи тестування на надлишковий тиск, ударостійкість і вогнестійкість.

### **4.2 Актуальність ідеї стартап-проекту**

Для доставки природного газу споживачам застосовуються традиційні засоби транспорту, які перевозять газ у балонах високого тиску. Цей метод дозволяє забезпечити споживачів газом до того моменту, коли будуть побудовані газопроводи та розподільні мережі.

Однак при використанні сталевих балонів, які широко застосовуються на сьогоднішній день, об'єми перевозимого газу обмежені вантажопідйомністю транспортних засобів. Використання легких композитних балонів дозволить збільшити об'єм перевозимого газу в 1,7 рази, а зниження вартості балонів сприятиме зменшенню вартості транспортування газу.

### **4.3 Новизна обраного стартапу**

Виробництво цього типу балонів є високотехнологічним і вимагає значних зусиль, що обумовлює їх застосування для зберігання стислих газів під високим тиском, особливо в умовах потреби у частому переміщенні балонів. У результаті, балони, виготовлені за вищезазначеною технологією, характеризуються коефіцієнтом масової досконалості  $K_m = 0,6$  кг/дм<sup>2</sup> та коефіцієнтом цінової досконалості  $K_c = 4$  кг/дм<sup>2</sup>.

Порівняння цих даних зі значеннями коефіцієнтів найближчих аналогів показує, що за масовим коефіцієнтом  $K_m$  запропоноване рішення досягає рівня кращих зразків (у аналогів 0,6-0,9 кг/дм<sup>2</sup>), а за вартісним коефіцієнтом  $K_c$  його перевершує (у аналогів 5-14 кг/дм<sup>2</sup>). При цьому тривалість порівнянних етапів виготовлення балонів скорочується.

### **4.4 Аналіз попиту та пропозицій**

Після аналізу даних щодо потенційного ринку і інформації про кількість балонів, що перебувають у використанні серед населення, можна зробити висновок, що загальна кількість металевих балонів становить від 40 до 60 мільйонів одиниць. На сьогоднішній день в Україні існує лише кілька великих виробників полімерно-композитних газових балонів.

### **4.5 Очікувані результати**

Завдяки використанню новітніх технологій у виробництві газових балонів, можна уникнути вибухів у випадку екстремальних або надзвичайних ситуацій. Це дозволяє усунути один з основних факторів, що впливають на безпеку використання газу, та значно зменшити кількість постраждалих. Реалізація такого проекту має велике значення для збереження людських життів, що є надзвичайно цінним.

Альтернативна система газопостачання спростить використання газу як населенням, так і підприємствами, сприяючи зростанню споживання газу в межах країни. Це особливо актуально в контексті можливого зниження зовнішнього споживання газу.

#### **4.6 Фінансові показники проекту**

Для реалізації проекту з орбітального намотування композитного шару на балон необхідні фінансові ресурси у розмірі 2,73 млн грн, що включає витрати на полімерну сировину, фурнітуру, оренду приміщення та електроенергію протягом перших трьох місяців роботи. Очікується, що попит на продукцію збільшиться у зв'язку з розвитком промислового сектора.

Середня світова ціна на вуглецеве волокно, що використовується для оплетення балона, змінюється в залежності від року і застосування, наприклад, у 2012 році вона становила 24 євро за кілограм, а у 2013 році вже 30 євро за кілограм.

З урахуванням вартості дорогоцінних матеріалів, повна окупність запропонованого проекту очікується протягом 1 року. Загальні витрати на придбання лінії, виробництво першої партії балонів і будівництво першої черги виробництва побутових газових балонів з композитних матеріалів оцінюються в 7,2 млн грн. Таким чином, загальні початкові інвестиції, включаючи перші три місяці роботи і загальні господарські витрати, становитимуть

Виробництво буде розташоване на площі понад 900 квадратних метрів, яка буде орендована. У цеху будуть присутні канали для відведення скляного пилу, пари, розподілу стислого повітря і прокладки електричних кабелів.

#### **4.7 Створення робочих місць**

Реалізація цього проекту призведе до створення 10 нових робочих місць з середньою заробітною платою в розмірі 21,4 тис. крб на підприємстві. Планується набір та підготовка 10 співробітників для роботи на підприємстві. Перша черга виробництва передбачає випуск 15 000 побутових полімерно-композитних газових балонів протягом першого року. Заданий обсяг продажу повністю буде реалізований, оскільки на ринку ще є великий потенціал для насичення.

Важливою особливістю проекту є його швидкий період окупності, оскільки час між початком проектного циклу та початком експлуатації є досить коротким, що впливає на розмір показника періоду окупності проекту. Крім того, проект потребує детальнішого дослідження місцевих ринків щодо просування продукції, маркетингу та реклами, що також вимагатиме капітальних вкладень.

## 4.8 Виробництво

### 4.8.1 Продукція

Таблиця 4.1 Характеристика майбутньої продукції

<b>Балони низького тиску (LPG)</b>	<b>Балони високого тиску (CNG)</b>
на 70% легше металевих	підвищена міцність
не зазнають корозії	велика місткість газу
виключення можливості вибуху	легкість та антикорозійна стійкість
видимість рівня газу всередині балона	безпека

Проект передбачає виробництво спеціально розроблених систем перевезення газів, які включають в себе резервуари для безпечного перевезення стислого природного газу (СПГ), водню (CH<sub>2</sub>), азоту та гелію. Для зберігання та транспортування резервуарів з газом будуть використовуватись стаціонарні та мобільні модулі. Ці модулі забезпечують швидке наповнення, легкий доступ, мінімальне технічне обслуговування та економічну ефективність. Завдяки цим системам можна перевозити газ в два рази більших обсягах та на великі відстані порівняно з традиційними технологіями.

У виробництві газових балонів передбачається використання унікальної системи активного чопа, яка дозволяє відстежувати інформацію про походження, виробництво, технічні характеристики та місцезнаходження всього виробничого-збутового ланцюжка систем зберігання та транспортування газу (СХТГ) та експлуатації обладнання.

Виробництво здатне виготовляти контейнери як низького тиску (LPG - пропан/бутан), так і високого тиску (CNG - метан). У майбутньому, проект планує розширити виробництво і встановити безперервний цикл виробництва, використовуючи автоматизовану лінію з роботами-маніпуляторами для намотування скловолоконних ниток, процесу "запечення" і покриття епоксидною смолою. Після сушіння, на балоні встановлюється різьбова латунна деталь для подальшого приєднання арматури (вентиль, клапан).

#### 4.8.2 Сфери застосування композитних ємностей:

- Газопостачання та опалення для житлових будинків, дач і котеджів;
- Використання балонів об'ємом від 14,8 л до 20,6 л у туристичних поїздках, рибалці, походах для обігріву, готування їжі та освітлення;
- Застосування в будівництві, промисловості та інших галузях.

Таблиця 4.2 Порівняльні характеристики газових балонів

	<b>Полімерно-комполітний балон</b>	<b>Металевий балон</b>	<b>Металево-комполітний балон</b>
<b>Легкість (вага)</b>	Легкий (на 70% легше металевого)	Важкий	Середньої ваги
<b>Прозорість (видимість рівня газу)</b>	Видно рівень газу	Непрозорий	Непрозорий
<b>Безпека при експлуатації</b>	Абсолютна вибухобезпека	Небезпечний (уламки при розриві)	Середня міра вибухобезпеки
<b>Антикорозійна стійкість</b>	Відсутність появи корозії	Корозія з внутрішньої і зовнішньої сторін	Корозія з внутрішньої сторони (міт, лейнер)
<b>Удароміцність</b>	Підвищена	Мала	Середня
<b>Вентиль</b>	Є перепускний клапан	Немає перепускного клапана	Використовуються різні види вентилів

#### 4.8.3 Організаційний план

Управління проектом буде засновано на простій лінійно-функціональній структурі, де організація розбивається на окремі компоненти, кожен з яких має визначену задачу та відповідальності.

Варто зауважити, що цей тип лінійно-функціональної структури часто застосовується в невеликих підприємствах, оскільки дозволяє швидко реагувати на зміни в ситуації і контролювати ключові бізнес-процеси в компанії.

#### 4.8.4 План закупівель

В даний період спостерігається збільшений попит на побутові газові балони, що сприяє їх легкій реалізації. Це призводить до планування більших закупівель комплектуючих для виробництва побутових балонів в майбутньому.

Крім того, в перспективі планується збалансувати частки побутових балонів і балонів для автомобілів, щоб мати можливість запропонувати покупцям розширений асортимент.

У реальному житті плани закупівель можуть бути кориговані залежно від вимог замовника, проте це не призведе до погіршення показників проекту.

Собівартість виготовлення одиниці продукції, включаючи витрати на виготовлення та весь комплекс робіт від прийому вантажу до упаковки і складування, складає 1300 грн. за балон. Ця цифра була використана для реалістичного економічного обґрунтування виробництва продукції.

#### **4.9 Аналіз доходів і витрат**

- Для бізнес-проекту було проведено оцінку доходів і витрат за допомогою унікальної фінансової моделі, розрахованої на період одного року.

- Кожен крок прогнозування в рамках моделі відповідає одному місяцю.

- Витрати були визначені на основі ринкових цін і врахування потреб бізнес-проекту.

- Вибраний основний сценарій розвитку подій був консервативним. У випадку відсутності точних значень вхідних параметрів для розрахунків, використовувалися верхня межа для оцінки витрат і нижня межа для оцінки доходів.

##### **4.9.1 Оборотні цикли**

Передбачається, що період повного обороту грошових коштів, починаючи від оплати постачальникам сировини до отримання платежів від кінцевих покупців, становитиме 2 тижні. Поступово, залежно від надходження грошових коштів від покупців, здійснюються замовлення нової партії матеріалів, що дозволяє забезпечувати неперервний технологічний процес. У зв'язку з тим, що крок моделей розрахунку складає один місяць, було прийнято припущення про виконання виробничого процесу у 2-тижневих циклах, щоб спростити розрахунки при фінансовому моделюванні.

У перший місяць після початку проекту закупівлі проводяться у тих же обсягах, що й у початковому "0-періоді", для відпрацювання основних бізнес-процесів.

#### **4.9.2 Податкові ставки**

Для розглядаємого проекту застосовується ставка відсотків у розмірі 18%. Витрати на страхування, ФОП (фізичні особи-підприємці) та страхові внески не підлягають оподаткуванню ПДВ.

Тарифи страхових внесків складаються наступним чином:

- Пенсійний фонд - 26%
- Фонд соціального страхування - 2,9%
- Федеральний фонд обов'язкового медичного страхування - 5,1%

Ставка базового податку на прибуток становить 20%. Об'єктом оподаткування є прибуток організації, який розраховується шляхом зменшення отриманих доходів на величину виробничих витрат (валовий прибуток). Також існує податок на майно у розмірі 2%.

Податкова ставка застосовується з моменту введення підприємства в експлуатацію. У загальній динаміці структури витрат характеризується поступовим зниженням частки податкових витрат завдяки амортизації та зменшенню залишкової вартості обладнання. Амортизація розраховується за лінійним методом, а термін амортизації аналогічного обладнання становить 10 років.

#### **4.9.3 Аналіз ризиків**

Для отримання інформації про ризики в проекті був використаний метод "Опит експертів". Цей метод допомагає уникнути повторного зіткнення з вже відомими проблемами. Планування управління ризиками проекту з великою уважністю та деталізацією дозволяє:

- відвести достатньо часу і ресурсів для виконання заходів з управління ризиками,
- встановити загальні основи для оцінки ризиків,
- збільшити ймовірність успішного досягнення цілей проекту.

#### **4.9.4 Кількісний аналіз ризиків**

В даному проекті був використаний метод аналізу чутливості для визначення ризиків, які можуть мати найбільший потенційний вплив на проект.

Один з ключових ризиків проекту пов'язаний зі зниженням попиту. В рамках даного проекту розглядається можливість зменшення торгової націнки. Критичним значенням приймається NPV (чиста приведена вартість), рівна нулю, що є межею, за якою ще можлива реалізація проекту.

#### **4.9.5 Якісний аналіз ризиків**

Аналіз ризиків проекту, здійснений з точки зору якості, включає в себе оцінку як зовнішніх ризиків, пов'язаних зі зміною економічної ситуації, так і внутрішніх ризиків, пов'язаних з діяльністю, що здійснюється в рамках проекту.

#### **Висновки до розділу**

З огляду на матеріали, що були викладені у п'ятому розділі, можна зробити наступні висновки:

1. Розроблено стартап-проект, об'єктом якого є організація виробництва і реалізації композиційних полімерних ємностей для зберігання речовин підвищеної небезпеки.
2. Проаналізований ринок та визначенні цільова аудиторія, конкуренти та конкурентна перевага.
3. Вираховано бюджет та визначено ресурси на запуск стартапу.

## ВИСНОВКИ

За результатами магістерської дисертації на тему: “ Формування та механічні властивості композиційних полімерних ємностей для зберігання речовин підвищеної небезпеки ” можна зробити такі висновки:

1. Дослідженні залежності зміни технічних характеристик від зміни кількості наповнювача та виду армуючої речовини та їх порівняння з метою подальшого визначення найкращого виду армуючого наповнення для підвищення технічних характеристик. Найбільші напруження діють поблизу верхнього клапана і на донці балона

2. Виконано літературний огляд, проаналізувано відомі способи виготовлення композитних ємностей, рівняння стану матеріалів при пружнопластинних деформаціях та виникнення зон пошкоджуваності в конструкціях, що досліджуються та знаходяться в умовах динамічного навантаження;

3. Проведена серія розрахунків спочатку для звичайного ПЕТ, скловолокна, вуглеволокна та нанотрубок, а потім для ПЕТ з поступовим збільшенням в слабких ділянках ступеня армування по чергово за допомогою скловолокна, вуглеволокна та нанотрубок;

4. Проаналізовані отриманні результати та встановити закономірності залежності зміни деформації балона механічних властивостей композиційного матеріалу, у визначених ділянках.

5. Результати математичної моделі демонструють, що дана математична постановка континуально-дискретної задачі двофазної течії відповідає спостережуваним фізичним явищам та може бути використана для моделювання і аналізу подібних систем.

6. Числовим моделюванням підтверджено доцільність застосування технології селективного введення армуючих наповнювачів у найбільш навантажені зони порожнистих полімерних виробів, зокрема балонів, що працюють під тиском.

7. Жорсткість конструкції збільшується зі збільшенням концентрації армуючого наповнювача саме в тих ділянках балона, де змодельовано введення наповнювача

8. Найбільші значення жорсткості та запасу міцності спостерігаються за умови наповнення ВНТ. Зі збільшенням ступеню наповнення запас міцності конструкції зростає.

За темою магістерської дисертації опубліковано 3 наукових роботи.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. . Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов: Учебник для вузов /Басов Н.И., Брагинский В.А., Казанков Ю.В.– М: Химия, 1991. – 352 с.: ил.
2. Производство изделий из полимерных материалов: Учеб. пособие /Крыжановский В.К. и др. – СПб.: Профессия, 2004 с., ил.
3. Оборудование предприятий по переработке пластмасс/Завгородний В.К., Калиничев Э.Л., Махаринский Е.Г. – М.: Химия, 1972. – 464 с.:ил.
4. <https://hpcr.com.ua/composit-ballons.html>
5. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов /Басов Н.И. М: Химия, 1986. 488 с.
6. Технология лекарств промышленного производства: учебник для студ. высш. учебн. завед.: перевод с укр. яз /В. И. Чуешов и др. – Винница : Нова Книга, 2014. – 696 с.
7. <https://findpatent.ru/patent/252/2528773.html>
8. Сирохман, І. В. Товарознавство пакувальних матеріалів і тари: підруч. /Сирохман І.В, Завгородня В.М. – К. : ЦНЛ, 2005. – 614 с.
9. Blow molding device for a rotary bottle blowing machine – Patent US 9050749B1, B29C 49/36, 09.06.2015.
10. An extrusion head for blow moulding of hollow bodies with a system of distribution of the thickness of the walls of the parizon – Patent WO 2008011893A1, B29C 47/22, 25.07.2006.Gutman, R.G. (2022). Membrane filtration. The technology of pressure-driven crossflow processes
11. Kim, Young-hoon & Eom, Jung-yeol & Kim, Kwanyeop & Lee, Yong-Soo & Kim, Hyung-soo & Hwang, Sun-Jin. (2010). Applicability study of backwash water treatment using tubular membrane system with dead-end filtration operation mode. Desalination. 261.
12. Shafiquzzaman, Md & Al-Mahmud, Abdullah & AlSaleem, Saleem & Haider, Husnain. (2018). Application of a Low Cost Ceramic Filter for Recycling Sand Filter Backwash Water. Water. 10.

13. Al-Shammari, Musa & Alwan, Husam. (2019). Evaluation of treated gray water by pilot filter.
14. Park, Sang & Sun, Young. (2022). An Experimental Study of the Mesh Filter Application on Pressure Relief Valve. Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers. 30.
15. Ibyatov, R & Zinnatullina, A & Kiseleva, N. (2021). Mathematical modeling of filtering suspensions of non – newtonian behavior in alluvial filters. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 808.
16. Lavanya, Madhura & Kanchi, Suvadhan & Sabela, Myalowenkosi & Bisetty, Krishna & ., Inamuddin. (2017). Membrane technology for water purification. Environmental Chemistry Letters.
17. Gehrke, Ilka & Geiser, Andreas & Somborn-Schulz, Annette. (2015). Innovations in nanotechnology for water treatment. Nanotechnology, science and applications.
18. EN 12245 Transportable gas cylinders – Fully wrapped composite cylinders. European standard— [Действующий от 2012-02]. – М. 2012. – IV, 48 с.
19. Композитный газовый баллон Ragasco LPG. [Электронный ресурс] / Ragasco // Режим доступа: <http://komposit.com.ua/katalog/kompozitnye-gazovye-ballony/ragasco-norge/ragasco-lpg-18-product.html>.
20. Prediction of Binary Gas Diffusivities. [Электронный ресурс]/ Fuller, Schettler, and Giddings Correlation // Режим доступа: <http://www.umich.edu/~elements/course/lectures/eleven/exam4.htm>
21. Бортников В.Г. Основы технологии переработки пластических масс: Учебное пособие для вузов. – Л.: Химия, 1983. – 304 с.
22. Shahinpoor M., Schneider H. J. Intelligent Materials. Faculty and Staff Monograph Publications. The Royal Society of Chemistry, 2008. 532 p.
23. Басов Н.И., Казанков Ю.В., Любартович В.А. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов: Учебник для вузов. – М.: Химия, 1986. – 488 с.
24. Торнер Р.В., Акутин М.С. Оборудование заводов по переработке пластмасс. – М.: Химия, 1986. – 400 с.

25. Modeling the electrostatic control over depth of the introduction of intelligent sensors into a polymer composite material / I. Ivitskiy, V. Sivetskiy, V. Bazhenov, D. Ivitska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 1. №5(85). P. 4—9.
26. Техника переработки пластмасс/Под ред. Н.И. Басова и В. Броя. – М.: Химия, 1985. – 528 с.
27. Басов Н.И., Ким В.С., Оборудование для производства объемных изделий из термопластов. – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.
28. Ким В.С. Теория и практика экструзии полимеров. – М.: Химия, КолосС, 2005. –568 с.
- 29.Щербина В.Ю., Сівецький В.І., Гондляр О.В. Механічні процеси і обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів. Підготовка сировинних матеріалів і устаткування для змішування та формування [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2022. – 131с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/4573>
- 30.Сівецький В.І., Щербина В.Ю., Гондляр О.В. Інжиніринг інноваційних технологій та обладнання. Лінії для виготовлення листових і профільних полімерних виробів [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2022. – 113 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45732>
31. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
32. <https://findpatent.ru/patent/216/2167019.html>

**Додаток А**  
**Копії статей, доповідей та тез доповідей**