

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра комп'ютерної механіки імені Володимира Марцинковського

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

**Оцінка міцності багатошарових композиційних матеріалів, складених із
різноорієнтованих шарів односпрямованих матеріалів**

Виконав: студент групи КМ.м-21
спеціальності 131 Прикладна механіка
ОПП «Комп'ютерна механіка»
Артем ПОНОМАРЕНКО
Керівник: Дмитро ЖИГИЛІЙ
Рецензент: Дмитро ЛЕЙКИХ

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 53 с., 41 рис., 3 табл., 32 джерел

ШАРУВАТИЙ КОМПОЗИТ, ВУГЛЕПЛАСТИК,
МІКРОСТРУКТУРНИЙ ПІДХІД, МОДЕЛЬ ЗОНИ КОГЕЗІЇ, МЕТОД
СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ЧИСЛОВИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ, ГРАНИЦЯ
МІЦНОСТІ, ПРИВЕДЕНІ ПРУЖНІ ВЛАСТИВОСТІ.

Об'єкт дослідження – пласкоармований шаруватий вуглепластик.

Предмет дослідження – вплив моделі інтерфейсної взаємодії наповнювача та сполучника у вуглепластиковому композиті на його механічні властивості.

Мета роботи – визначення міцності багатошарових композиційних матеріалів, складених із різноорієнтованих шарів односпрямованих матеріалів, на основі симуляції простого деформованого стану розтягання з застосуванням просунутих моделей взаємодії складових композиційного матеріалу.

Методи досліджень – метод скінчених елементів, дискретна теорія шаруватих композитів, модель зон когезії.

В роботі досліджено простий деформований стан ротягання зразків з шаруватого вуглепластика з застосуванням просунутої моделі зон когезії для симуляції руйнації поверхонь взаємодії матеріалів-складових композиційного матеріалу з отриманням нелінійних фізичних властивостей результуючого композиту за мікромодельованням дискретною теорією шаруватих композитів. На основі моделювання фізичних експериментів, регламентованих нормативною документацією, створено симуляційні моделі одношарового зразка та зразка пакету шарів методом скінчених елементів. Це дозволило спрогнозувати фізично нелінійні властивості вуглепластика при розтяганні і зробити висновки про його механічні властивості.

ВСТУП

Актуальність теми: Зважаючи на швидкий розвиток технологій у виробництві та інженерії матеріалів, в світі з'являються багато нових матеріалів, більшість з самих перспективних матеріалів є композити, відповідно їх застосовують в одних зі найскладніших приладів, що потребує точного передбачення поведінки цих матеріалів.

Мета дослідження. Виходячи з актуальності й ступеня наукової розробки проблеми, метою дослідження є визначення міцності багат шарових композиційних матеріалів, складених із різноорієнтованих шарів односпрямованих матеріалів, на основі симуляції простого деформованого стану розтягання з застосуванням просунутих моделей взаємодії складових композиційного матеріалу.

Для досягнення поставленої мети були встановлені наступні **завдання дослідження.**

1. Дослідити нормативну базу і визначити порядок механічних досліджень при розтяганні багат шарових композиційних матеріалів, складених із різноорієнтованих шарів односпрямованих матеріалів.
2. Побудувати скінчено елементу модель шаруватого композиту при розтяганні з підмоделюванням взаємодії сполучника та наповнювача композиційного матеріалу.
3. Виконати числове дослідження напружено-деформованого стану шаруватого композиту при розтяганні з отриманням діаграми розтягання.
4. Визначити вплив просунутих моделей взаємодії складових композиційного матеріалу на приведені механічні властивості та показати відмінність від стандартної моделі.

Наукова новизна. На основі числового експерименту для симуляції скінченними елементами зразків при механічних дослідженнях на розтягання багатошарових композиційних матеріалів отримані нелінійні механічні властивості на основі просунутих моделей взаємодії складових композиційного матеріалу і показана їх відмінність від стандартної моделі.

Практичне значення. Запропонована робота з оцінки міцності багатошарових композиційних матеріалів, складених із різноорієнтованих шарів односпрямованих матеріалів, дозволяє на основі створеної симуляційної моделі отримати нелінійні механічні властивості композиційних матеріалів.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дослідження, що відносяться на захист, одержані автором самостійно або за його активної участі.

Апробація роботи. Основні положення наукової роботи відображені в тезах збірника тез за матеріалами 29-ої міжнародної науково-практичної конференції «ТЕХНОЛОГІЇ ХХІ СТОРІЧЧЯ» [3].

ЗМІСТ

Розділ 1. Міцність та її визначення для багатошарових композиційних матеріалах, складених із різноорієнтованих шарів односпрямованих матеріалів.....	8
1.1 Визначення	8
1.1.1 Міцність	8
1.1.2 Композити	9
1.2 Мікромоделювання	10
1.2.1 Аналіз кінцевих елементів.....	11
Розділ 2. Моделювання розтягування одного односпрямованого шару.....	13
2.1 Експериментальні методи дослідження односпрямованого композиту на розтягання...13	13
2.1.1 D638 – 14 Стандартний метод випробування властивостей пластмас на розтяг	13
2.1.1.1 Зразки для випробувань.....	13
2.1.1.2 Процедура	13
2.2.1 Геометричне твердотільне моделювання.....	15
2.2.2 Властивості зон когезії	18
2.2.3 Розбиття на скінчені елементи.....	20
2.2.4 Граничні умови та кінематичне навантаження розтяганням	23
2.3 Діаграма розтягання пластини з односпрямованого композиту.....	25
2.4 Висновок до розділу 2	25
Розділ 3. Моделювання розтягування пакету односпрямованих шарів.....	29
3.1 «D 3039 - D 3039M – 14 Стандартний метод випробування властивостей на розтяг композиційних матеріалів з полімерною матрицею».....	29
3.1.1 Моделі	29
3.1.1.1 Загальні вимоги.....	30
3.1.1.2 Конкретні рекомендації:	31
3.1.1.3 Використання фіксуєчих елементів/вкладок.	31
3.1.2 Процедура	33
3.1.2.1 Швидкість.....	33
3.1.2.2 Клімат.....	33
3.1.2.3 Встановлення зразка/датчиків.....	34
3.1.2.4 Перевірка перед тестом	34
3.1.2.5 Навантаження.....	35
3.1.2.6 Запис даних.....	35
3.1.2.6 Руйнація зразка.....	35
3.2 Геометрична модель пакету односпрямованих шарів за схемою укладки	36
3.3 Скінчено елементна модель пакету односпрямованих шарів	39
3.4 Граничні умови для пакету шарів.....	41
3.5 Висновок до розділу 3	42

4 Механічні властивості	44
4.1 Приведені пружні властивості для багат шарового композиту	44
4.2 Вплив на міцність шаруватих композиційних матеріалів порядку укладення шарів	46
4.3 утворення залишкових деформацій при застосуванні моделювання зон когезії	47
4.4 Висновки за розділом 4	48
ВИСНОВКИ	49
Література	50

Розділ 1. Міцність та її визначення для багатошарових композиційних матеріалів, складених із різноорієнтованих шарів односпрямованих матеріалів

1.1 Визначення

1.1.1 Міцність

Міцність матеріалу означає його здатність протистояти прикладеній силі, не руйнуючись і не деформуючись. Це фундаментальна властивість, яка визначає, яку напругу або навантаження може витримати матеріал до того, як він вийде з ладу або зазнає постійних змін у формі чи структурі.

Існують різні види міцності, пов'язані з матеріалами:

1. Міцність на розрив: це максимальна напруга, яку може витримати матеріал під час розтягування або розтягування перед тим, як розірватися. Це має вирішальне значення в програмах, де матеріали зазнають тягових зусиль.
2. Міцність на стиск: це максимальне навантаження, яке може витримати матеріал під час штовхання або стиснення, перш ніж руйнуватися. Це важливо для конструкцій або матеріалів, на які діють сили стиснення.
3. Міцність на зсув: вимірює здатність матеріалу протистояти силам, які викликають ковзання або викривлення паралельно напрямку дії сили. Міцність на зсув має важливе значення для матеріалів, які використовуються для різання або опори конструкції.
4. Міцність на вигин: також відома як міцність на вигин, це стосується здатності матеріалу протистояти деформації під дією сил згину.
5. Ударна міцність: вимірює здатність матеріалу поглинати енергію під час раптових ударів без руйнування.

Різні матеріали мають різну міцність залежно від їх складу, структури та процесу виробництва. Розуміння міцності матеріалу має вирішальне значення в інженерії, будівництві, виробництві та інших галузях, щоб забезпечити правильний вибір і використання матеріалів для конкретних застосувань. Для

визначення цих характеристик матеріалів використовують спеціальні регламентовані тести.

1.1.2 Композити

Композитні матеріали, такі як армовані волокнами полімери (Fiber-Reinforced Polymers, FRP), — це технічні матеріали, виготовлені з двох або більше складових матеріалів із значно різними фізичними або хімічними властивостями. Вони поєднуються для створення кінцевого продукту, який має покращені характеристики порівняно з його окремими компонентами.

Композити складаються з двох основних компонентів: матриці та армуючого матеріалу.

Матричний матеріал – цей компонент схожий на клей або сполучну речовину, яка утримує армуючий матеріал разом. Зазвичай це полімерна смола, така як епоксидна смола, поліефір, вініловий ефір або термопласт, поліетилен або нейлон. Матричний матеріал оточує та підтримує армуючий матеріал, розподіляючи навантаження та забезпечуючи захист від факторів навколишнього середовища, таких як волога та хімічні речовини.

Армуючий матеріал – забезпечує міцність, жорсткість та інші бажані властивості композиту. Зазвичай вони представляють собою волокна або частинки. Волокнисті матеріали включають: скляними, вуглецевими або арамідними волокнами.

Композитні матеріали, такі як FRP, мають ряд переваг перед традиційними матеріалами, такими як метали чи пластики. Вони часто мають високе співвідношення міцності до ваги, тобто вони можуть бути міцними, залишаючись легкими. Вони також, як правило, стійкі до корозії, мають чудові властивості втоми та можуть бути адаптовані відповідно до конкретних вимог до продуктивності шляхом зміни типу, орієнтації та об'єму волокон у матриці.

Ці матеріали знаходять застосування в різних галузях промисловості, включаючи аерокосмічну, автомобільну, будівельну, морську, спортивне обладнання та інфраструктуру, де їхні унікальні властивості можна використовувати для створення міцніших, легших і довговічніших продуктів.

У випадку цієї роботи для армованого матеріалу доцільно використати міжнародні тести:

«D638 – 14 Стандартний метод випробування властивостей пластмас на розтяг»;

«D 3039 - D 3039M – 14 Стандартний метод випробування властивостей на розтяг композиційних матеріалів з полімерною матрицею».

1.2 Мікромоделювання

Мікромоделювання в композитних матеріалах передбачає аналіз поведінки цих матеріалів на мікроскопічному рівні, враховуючи взаємодію між окремими складовими, такими як волокна або частинки, і навколишньою матрицею. Цей підхід допомагає зрозуміти, як властивості на мікромасштабі впливають на загальні механічні, термічні та інші характеристики матеріалу.

Кілька мікромеханічних моделей використовуються для прогнозування властивостей композитних матеріалів. Деякі видатні з них включають:

1. **Модель Халпіна-Цая:** Ця модель оцінює модуль пружності композитного матеріалу, враховуючи властивості складових і їх об'ємні частки.
2. **Метод Морі-Танака:** Ця модель враховує взаємодію між складовими і є корисною для прогнозування властивостей композиту за різних умов навантаження. Він виражається рівнянням, що містить пружні константи та об'ємні частки.
3. **Моделі Фойгта та Ройсса:** Ці моделі використовуються для прогнозування верхньої та нижньої меж властивостей композиту відповідно. Вони припускають ідеальний зв'язок (Фойгт) і відсутність зв'язку (Ройсс) між складовими.
4. **Аналіз кінцевих елементів (FEA):** Цей чисельний метод розбиває композитний матеріал на більш дрібні елементи, що дозволяє детально проаналізувати напругу, деформацію та інші механічні характеристики мікроструктури.

Мікромодельовання має вирішальне значення для розробки композитних матеріалів із певними властивостями, оптимізації використання матеріалів і розуміння механізмів руйнування. Однак важливо відзначити, що складність композитних матеріалів часто вимагає поєднання мікромодельовання та експериментальної перевірки, щоб точно передбачити їх поведінку в різних умовах.

1.2.1 Аналіз кінцевих елементів

Аналіз кінцевих елементів (FEA) — Це обчислювальний метод, який широко використовується в інженерії для моделювання та імітації складних структур і матеріалів. У контексті композитних матеріалів FEA використовується для аналізу та прогнозування їхньої механічної поведінки на мікромасштабі.

FEA передбачає наступні ключові етапи:

1. **Дискретизація:** Композитний матеріал ділиться на менші, простіші форми, які називаються кінцевими елементами. Ці елементи з'єднані між собою в певних точках, які називаються вузлами. Геометрія, властивості матеріалу та граничні умови визначені для кожного елемента.
2. **Формулювання основних рівнянь:** Поведінка кожного скінченного елемента описується за допомогою математичних рівнянь, заснованих на принципах механіки (таких як співвідношення напруги та деформації, рівняння рівноваги та складові рівняння матеріалу). Для композитних матеріалів використовуються спеціалізовані конститутивні моделі, що враховують анізотропну поведінку через наявність різних фаз (волокна/матриця).
3. **Збірка системних рівнянь:** Рівняння, що описують поведінку окремих елементів, поєднуються, щоб створити систему рівнянь, яка представляє всю структуру. Ця система включає взаємозв'язки між елементами та вузлами та враховує взаємодії та обмеження всередині матеріалу.

4. Розв’язання та аналіз: Для розв’язування системи рівнянь використовуються чисельні методи, як правило, з використанням ітераційних алгоритмів. Ці обчислення дають інформацію про розподіл напруги, деформації, переміщення та інших механічних властивостей у композиційному матеріалі. Ці дані допомагають зрозуміти, як матеріал реагує на різні умови навантаження.

Хоча FEA сам по собі не має єдиної формули, цей метод передбачає розв’язування систем рівнянь, виведених із керівних принципів механіки та поведінки матеріалів. Ці рівняння можуть включати основні рівняння для композитного матеріалу, рівняння рівноваги, умови сумісності та геометричні співвідношення. Конкретні рівняння, що використовуються в FEA, залежать від характеру проблеми, типу використовуваних елементів (таких як балка, оболонка або тверді елементи) і властивостей матеріалу, що моделюється.

Точність FEA залежить від різних факторів, включаючи щільність сітки (тонкість елементів), моделі матеріалу, граничні умови та обґрунтованість припущень, зроблених під час аналізу. Перевірка експериментальних даних має вирішальне значення для забезпечення надійності та точності прогнозів, зроблених за допомогою FEA у моделюванні композитних матеріалів.

1.3 Висновок до розділу 1

В цьому розділі було оглянуто основні визначення такі за тамами композитів, напружень мікромоделювання. Методи розрахунку їх та підходи до мікро моделювання.

Розділ 2. Моделювання розтягування одного односпрямованого шару

2.1 Експериментальні методи дослідження односпрямованого композиту на розтягання

2.1.1 D638 – 14 Стандартний метод випробування властивостей пластмас на розтяг

Цей метод випробування охоплює визначення властивостей розтягування неармованих і армованих пластмас у формі стандартних зразків у формі гантелі під час випробування за певних умов попередньої обробки, температури, вологості та швидкості випробувальної машини. Також за цим методом можливо визначити коефіцієнт Пуассона за кімнатної температури.

2.1.1.1 Зразки для випробувань

Відповідно до методу, зразків повинно бути:

Для ізотропних матеріалів - не менше п'яти зразків на кожен тип.

У випадку анізотропних матеріалів - якщо можливо, по п'ять зразків, перпендикулярних до основної осі анізотропії та п'ять паралельних їй.

Для Армованих пластмас потрібно використовувати форму I, з рисунку .

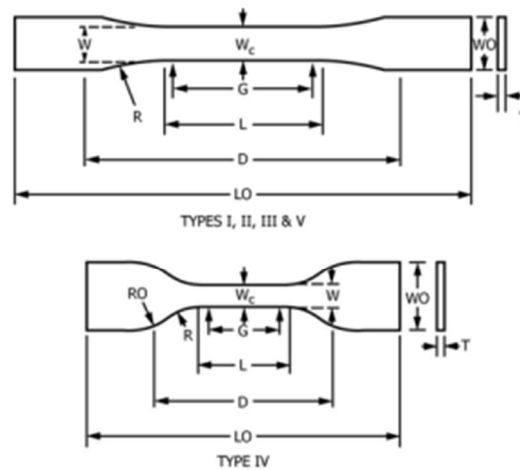
Якщо зразки ламаються через конкретний дефект або за межами певного розміру випробувальної секції з вузьким поперечним перерізом (рис. 1, де «L» - розмір) потрібно відкинути їх, і повторно тестуйте, якщо такі дефекти не є системними для вивчення.

Швидкість випробування вибирається з таблиці. За нею, для армованих пластмас є 5 мм/хв $\pm 25\%$. Початкова швидкість початку деформації повинна становити 0,1 мм/хв.

2.1.1.2 Процедура

1. Потрібно здійснити вимірювання ширини та товщини кожного зразка з точністю до 0,025 мм (0,001 дюйма), використовуючи методи, описані у D5947.

2. Виміряти ширину та товщину плоских зразків у центрі та в межах 5 мм від кожного кінця вимірювальної довжини.
3. Установити зразок у захвати випробувальної машини так, щоб довга вісь зразка була вирівняна з захватами, утворюючи уявну лінію між точками кріплення захватів до машини. Розміщення поверхонь захоплення (для плоских зразків) повинно відповідати рисунку 1. Затягніть захвати рівномірно та стійко до такого рівня, щоб уникнути ковзання зразка під час тестування, не перетискаючи його.
4. Приєднати індикатор розширення. Якщо потрібно визначити модуль приєднати екстензометр класу В-2 або краще.
5. Встановити швидкість тестування згідно вимог.
6. Записувати криву навантаження-розтягнення зразка.
7. Фіксувати значення навантаження та розтягнення в межах текучості (якщо вона є) та в момент розриву.

Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.)⁴

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl		4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}		
W —Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	± 0.5 (± 0.02) ^{B,C}	
L —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	± 0.5 (± 0.02) ^C	
WO —Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)	
WO —Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO —Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)	
G —Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	± 0.25 (± 0.010) ^C	
G —Gage length ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	± 0.13 (± 0.005)
D —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	± 5 (± 0.2)	
R —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	± 1 (± 0.04) ^C	
RO —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	± 1 (± 0.04)

Рисунок 1 – Зразки для випробування на розтяг для листів, пластин і формованих пластмас.

2.2.1 Геометричне твердотільне моделювання

Геометричне твердотільне моделювання - це процес створення математичних моделей об'єктів або систем, які мають твердотільну структуру, таких як машини, будівлі, електронні компоненти та інші об'єкти. Це методика, яка використовується в різних галузях, таких як інженерія, архітектура, комп'ютерна графіка, виробництво та інші, для створення віртуальних моделей для аналізу, проектування, тестування і виробництва реальних об'єктів.

Цей процес базується на використанні геометричних об'єктів, таких як точки, лінії, криві та поверхні, для створення тривимірних моделей. Використання спеціалізованих програмних засобів, таких як CAD (Computer-Aided Design - комп'ютерне проектування), дозволяє інженерам, дизайнерам і архітекторам створювати складні моделі, використовуючи різноманітні інструменти для маніпулювання об'єктами та їх властивостями.

Геометричне твердотільне моделювання дозволяє вирішувати різноманітні завдання, такі як аналіз міцності конструкцій, візуалізація проектів, розробка прототипів, моделювання процесів виробництва та багато іншого. Воно є невід'ємною частиною сучасних технологій і грає важливу роль у різних сферах промисловості та дизайну.

В даній роботі для тестування моделей потрібно створити ці моделі, для цього використовувалась програма для моделювання «Autodesk Inventor».

2.1.1.1 Створення моделі

Спочатку було створено 3 моделі: матрицю, трубку матриці(потрібна для створення сітки з моделі) та армуючі волокна, побудовані вони всі в площині XY, та видовжені в Z:

Для матриці було створено брус з отворами для волокон, розмір бруса 125x250x750 (нм), а отвори діаметром 122,5 (нм).

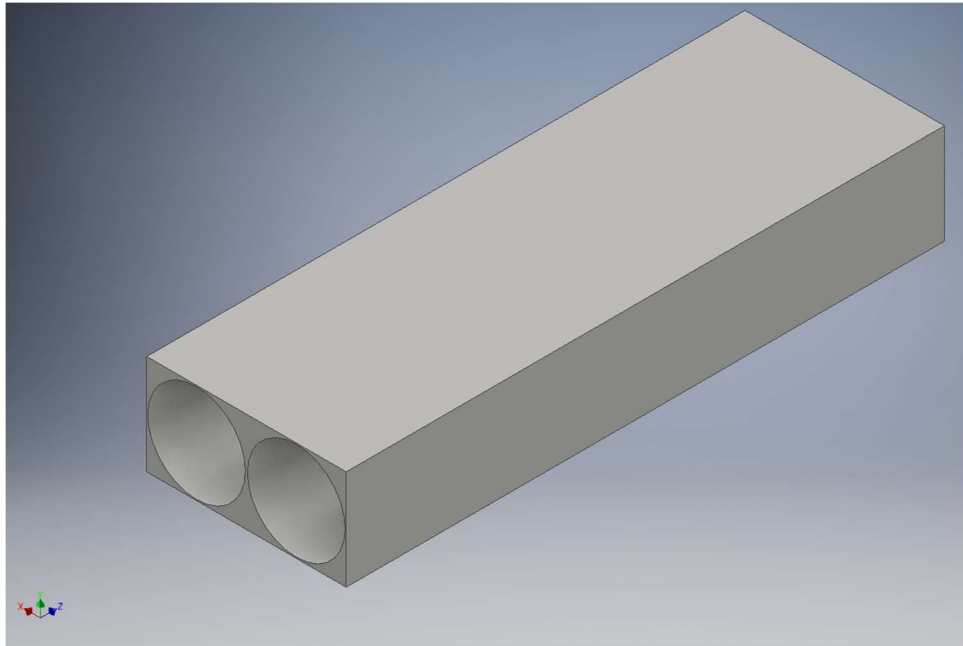


Рисунок 2 – Модель матриці.

Далі було створено модель матриці виді трубки, зовнішній діаметр 122,5 а внутрішній 120, довжиною 750 (нм).

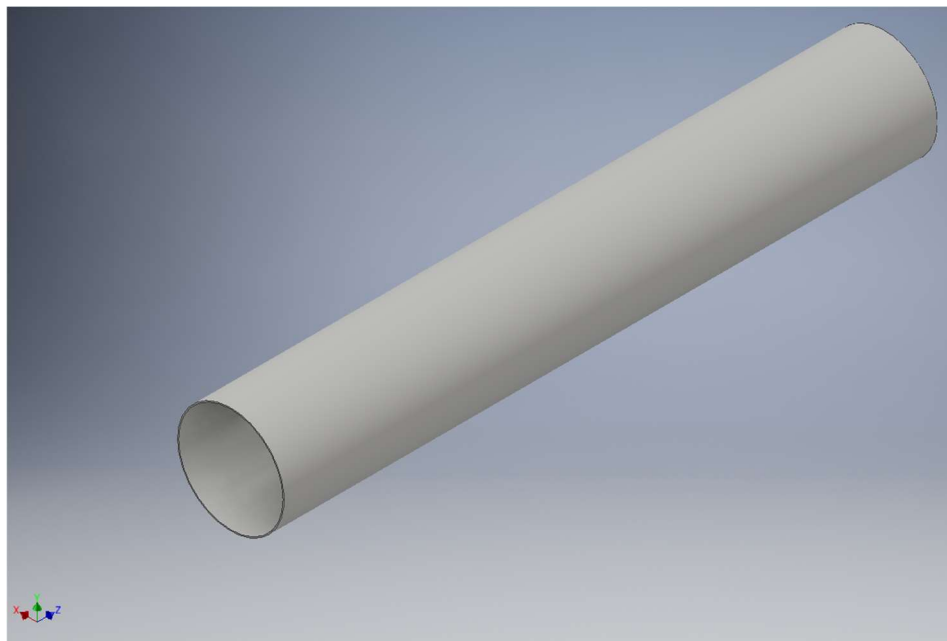


Рисунок 3 – Модель трубкової матриці.

І остання модель це модель волокна діаметром 120 та довжиною також 750 (нм).

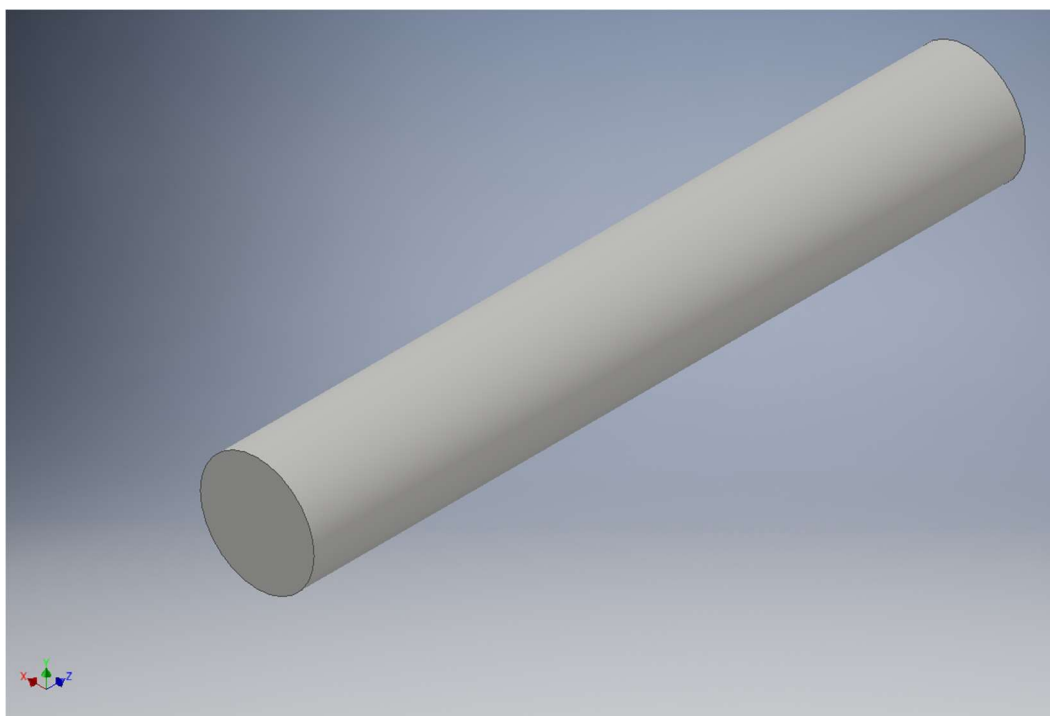


Рисунок 4 – Модель волокна.

Далі було створено збірку з цих моделей

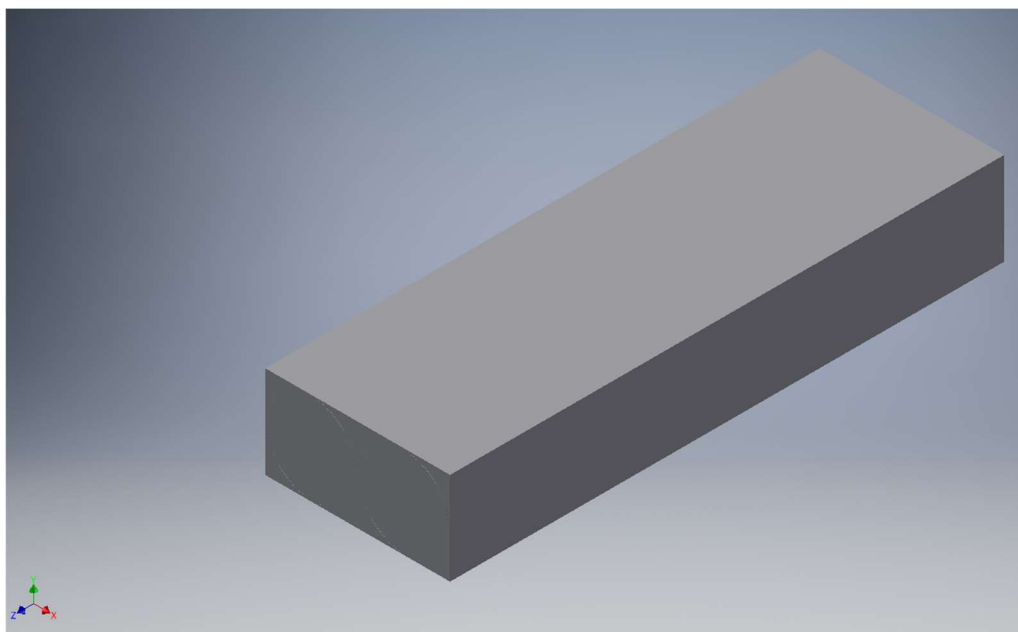


Рисунок 5 – Готова збірка.

Після створення моделі композита його було імпортовано в файл типу «.stp», для подальшого використання.

2.2.2 Властивості зон когезії

Моделі зони когезії (Cohesive Zone Models, CZM) - це математичні моделі, які використовуються для дослідження механічної поведінки матеріалів, особливо в контексті руйнування і розриву.

Метод CZM базується на припущенні про наявність зони зм'якшення перед гострим краєм тріщини у матеріалі. У цій зоні відкриття тріщини утримується когезійними тягами, а не лише механічним навантаженням.

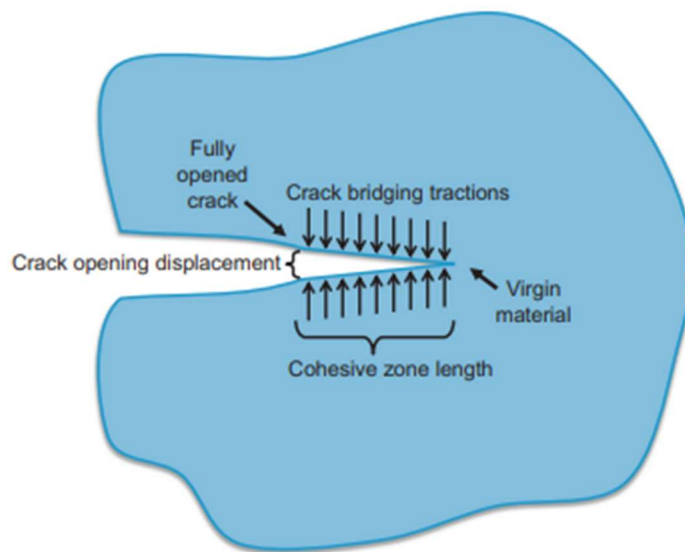


Рисунок 6 – Схема, що показує зчеплення з перекриттям тріщин у когезивній зоні.

Початково ця концепція була описана Дагдейлом (1960), який виявив невелику зону пластичності перед розривами у сталевих пластинах під час статичного навантаження на розтяг. Передбачалося, що в цій області напруга є постійною і дорівнює межі текучості матеріалу. Одночасно Барренблатт (1962) запропонував, що рівні напруги в цій зоні зм'якшення є змінними. Незважаючи на ці відмінності, Дагдейл та Барренблатт спільно вважаються творцями методу когезійної зони, який потім широко застосовувався в аналізах методом скінченних елементів для різноманітних завдань.

Перший застосунок цього методу був проведений Хіллерборгом та ін. (1976), коли вони застосували його для дослідження тріщин у бетонній балці під дією згину. Їх припущення були подібні до поточних формулювань - матеріал залишається лінійно-еластичним до досягнення межі міцності на

розтяг, після чого він починає деградувати лінійно до нуля при скінченному переміщенні. Це найпростіша і числово найзручніша крива тяги-переміщення для реалізації, оскільки вона монотонна і не має розривів, але були розглянуті й інші форми, що були впроваджені іншими авторами.

Однією з найважливіших характеристик кривої тяги-переміщення є поглинена енергія, яка обчислюється як площа під кривою. Це дозволяє передбачити як початок, так і подальше поширення тріщини.

$$\int_0^{\delta_f} \sigma * du \quad (1)$$

де

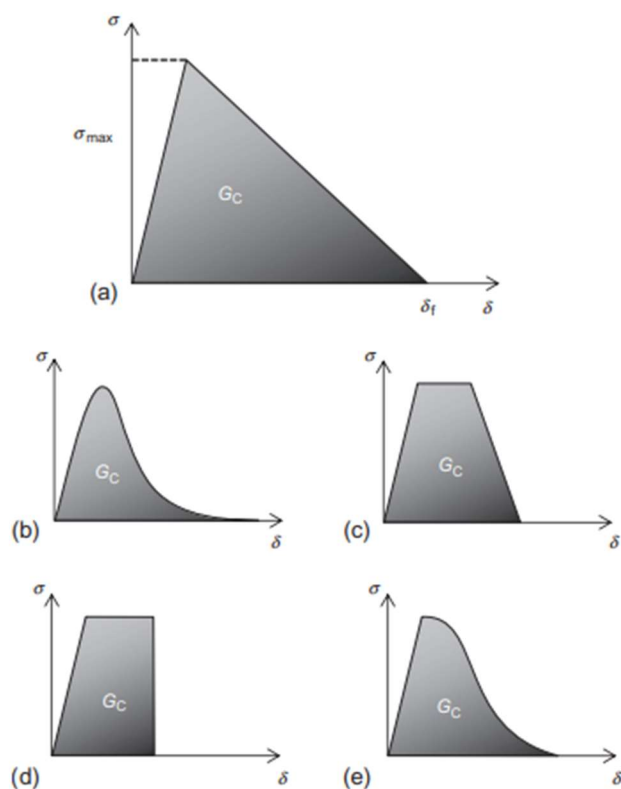
σ — міжфазне напруження,

u — зміщення розкриття тріщини,

δ_f — зміщення при руйнуванні.

Для передбачуваної форми кривої напруга на початку, σ_{max} і зміщення при руйнуванні можуть бути встановлені таким чином, щоб енергія, поглинена одиницею тріщини, дорівнювала критичній енергії руйнування матеріалу, G_C , таким чином зберігаючи енергетичний баланс Гріффіта. Таким чином, тріщина виникає після перевищення критеріїв максимального напруження та повністю поширюється, коли напруга повертається до нуля. CZM має перевагу над іншими методами механіки руйнування, такими як VCCT, оскільки він може передбачати як початок, так і поширення тріщини.

Хоча існує експериментальна довідка про наявність когезійної або процесуальної зони перед краєм тріщини в полімерних і композитних матеріалах, реальний розмір цієї області виявився меншим, ніж передбачено аналітичними розв'язками або спостережено у числових аналізах. Однак це свідчить про те, що використання CZM для відшарування композитів ґрунтується на фізичній реальності. Важливою є також ефект "з'єднання" тріщини, який може ефективно збільшувати довжину когезійної зони під час великомасштабного поширення тріщини, що враховується в аналізах.



Малюнок 7 – Варіації когезійних кривих тяги-переміщення, що використовуються в літературі. (a) трикутна, (b) експоненціальна, (c) трапецієподібна, (d) ідеально пластична та (e) лінійна/поліноміальна.

2.2.3 Розбиття на скінчені елементи

Розрахунок буде проводитися в програмному комплексі «Ansys», а саме в модулю «Static Structural»

Створення проекту та загрузки в нього геометрії було загружено відповідні налаштування матеріалів (рис. 8–10)

Properties of Outline Row 3: CZM			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Bilinear for Interface Delamination		
3	Maximum Normal Traction	5,7E+07	Pa
4	Normal Displacement Jump at Completion of Debonding	2,8E-06	m
5	Maximum Tangential Traction	7,5E+07	Pa
6	Tangential Displacement Jump at Completion of Debonding	2,28E-05	m
7	Ratio	0,1111	
8	Non-Dimensional Weighting Parameter	1E-05	

Рисунок 8 – налаштування CZM

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Isotropic Elasticity		
3	Derive from	Young's Modulus and...	
4	Young's Modulus	3,5E+11	Pa
5	Poisson's Ratio	0,27	
6	Bulk Modulus	2,5362E+11	Pa
7	Shear Modulus	1,378E+11	Pa

Рисунок 9 – налаштування матеріалу волокна

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Isotropic Elasticity		
3	Derive from	Young's Modulus and...	
4	Young's Modulus	3,29E+09	Pa
5	Poisson's Ratio	0,321	
6	Bulk Modulus	3,0633E+09	Pa
7	Shear Modulus	1,2453E+09	Pa

Рисунок 10 – Налаштування матеріалу матриці.

Далі було методом проб було виявлено що для побудови сітки та розрахунку з CZM, потрібно матрицю розділити на 2 частини (матриця та трубка, що до цього робили), так як для того щоби рахувало, на площині контакту CZM обов'язково потрібна гексо сітка, і так щоби грані елементів співпадали. Після ряду налаштувань а саме на всіх гранях моделей що контактують було виставлене кількість елементів (32)(рис.11), та налаштовано «Face mashing» с кількість елементів в довжину (40) (рис.12). Після налаштування було згенеровано сітку (рис. 2-4).

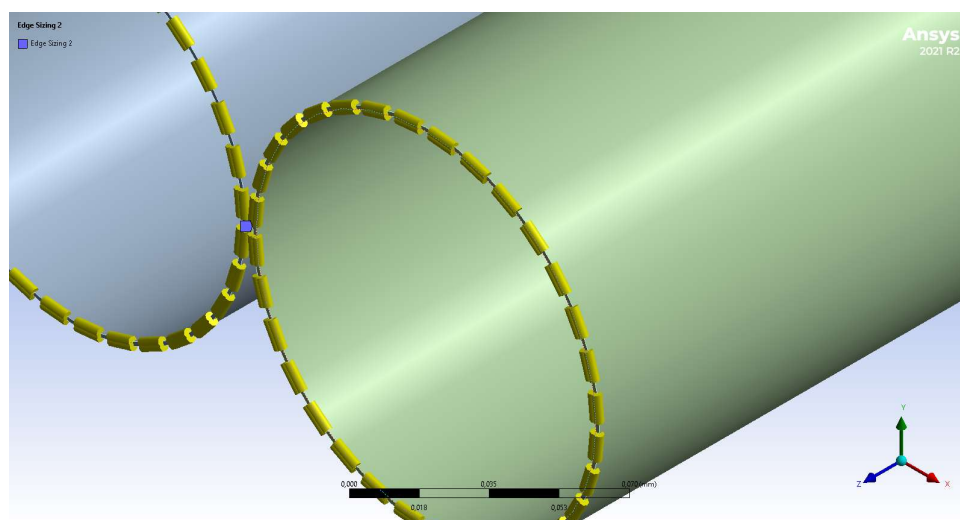


Рисунок 11 – Приклад вибору граней елемента матриці.

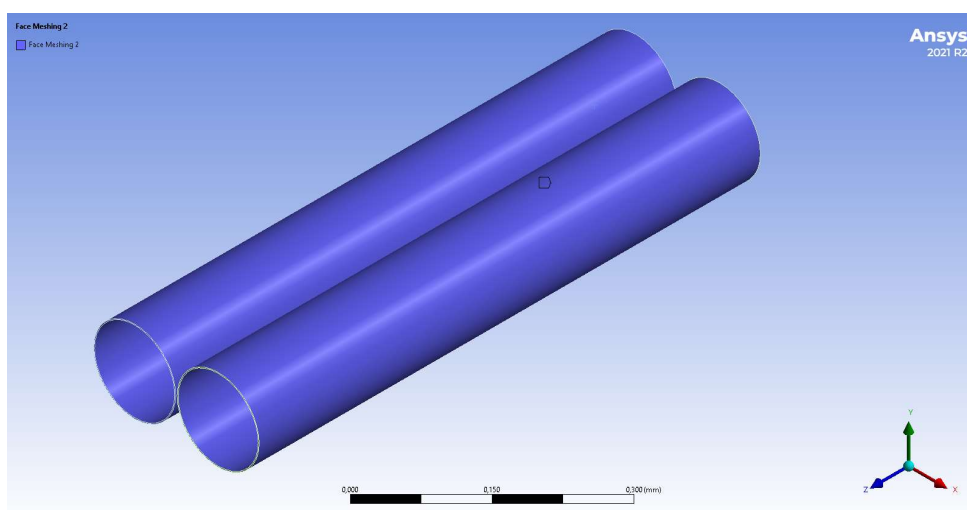


Рисунок 12 – Приклад вибору грані «Face mashing».

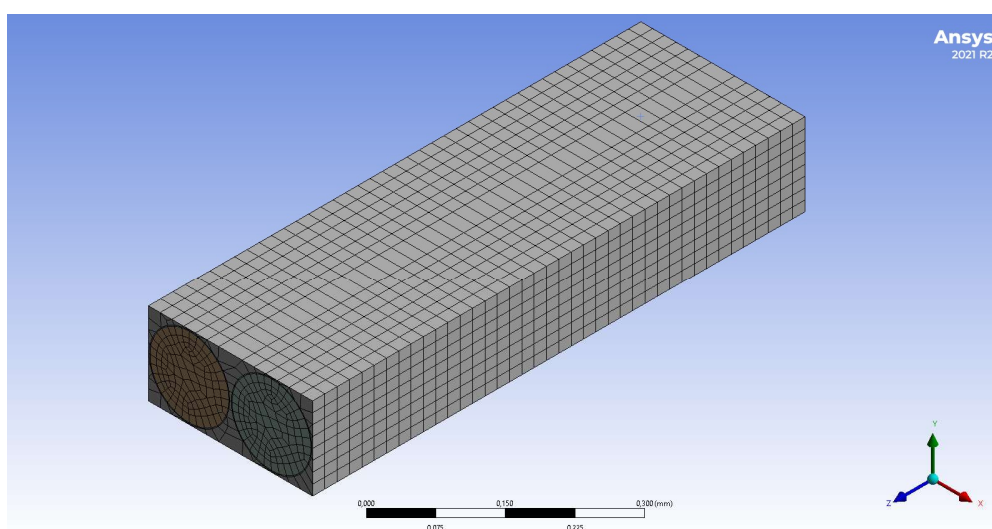


Рисунок 13 – Побудована сітка.

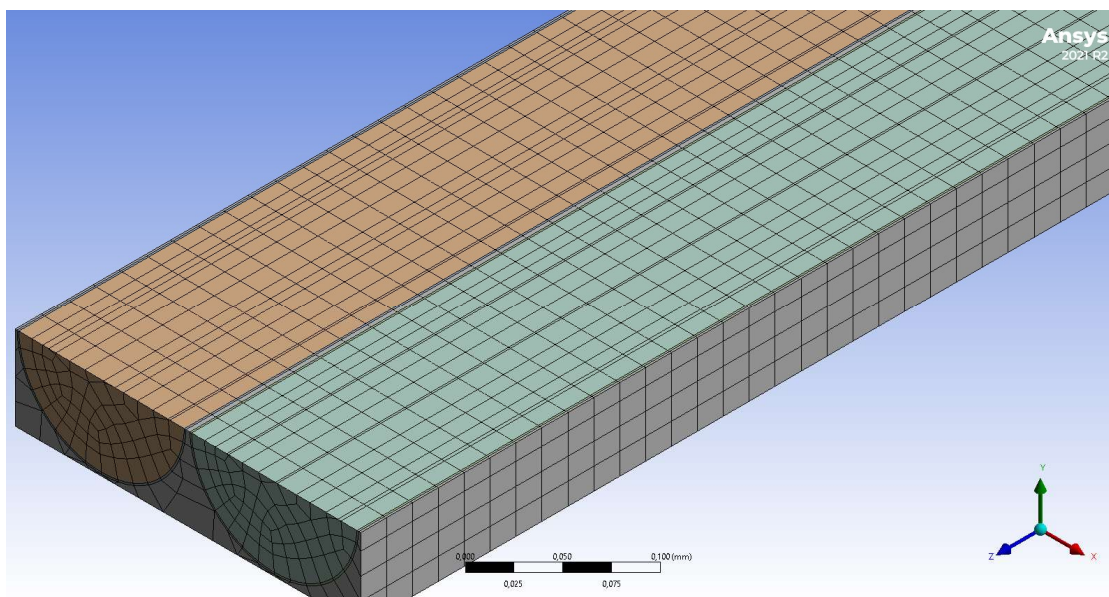


Рисунок 14 – Сітка в розрізі.

2.2.4 Граничні умови та кінематичне навантаження розтяганням

Після генерації сітки потрібно було додати налаштування CZM, для цього додали «Interface Delamination», для кожної грані, в ньому потрібно вибрати метод CZM, взяти налаштований матеріал, та вибрати грані контакту.

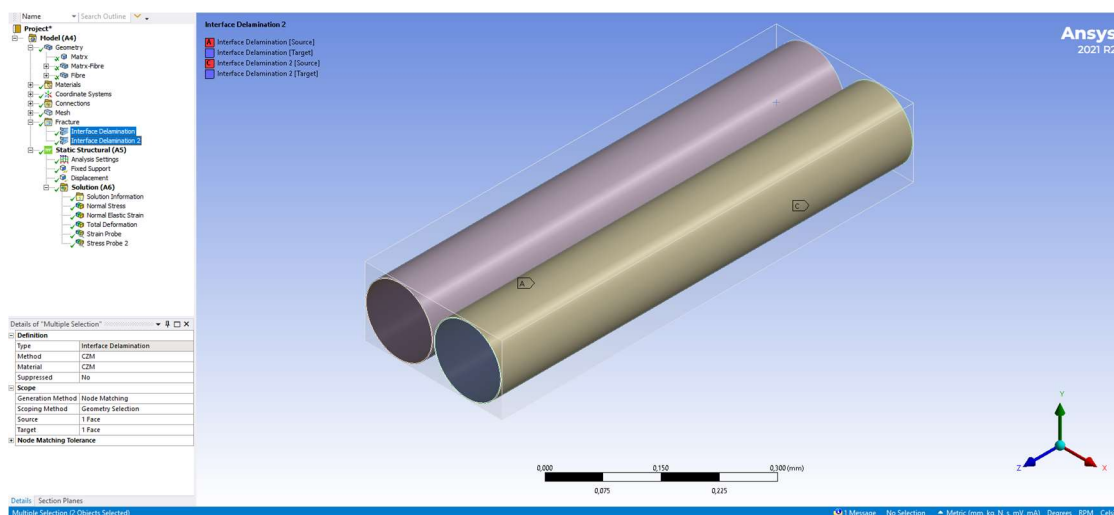


Рисунок 15 – Налаштування CZM.

Окрім цього вимкнули лишні контакти, залишивши тільки контакт трубки матриці з матрицею, до цього їх не вимикали для побудови сітки (вони учитуються при побудові).

Після налаштування потрібно закріпити та завантажити деталь. Навантажували композит в діль площини Z , тягнули за грань волокна, а закріплювали з іншої сторони за грані матриці. Витягували на 1% від загальної довжини моделі композиту (75 нм), кількість шагів було вибрано 40, на витягування було розподілене плавно між ними.

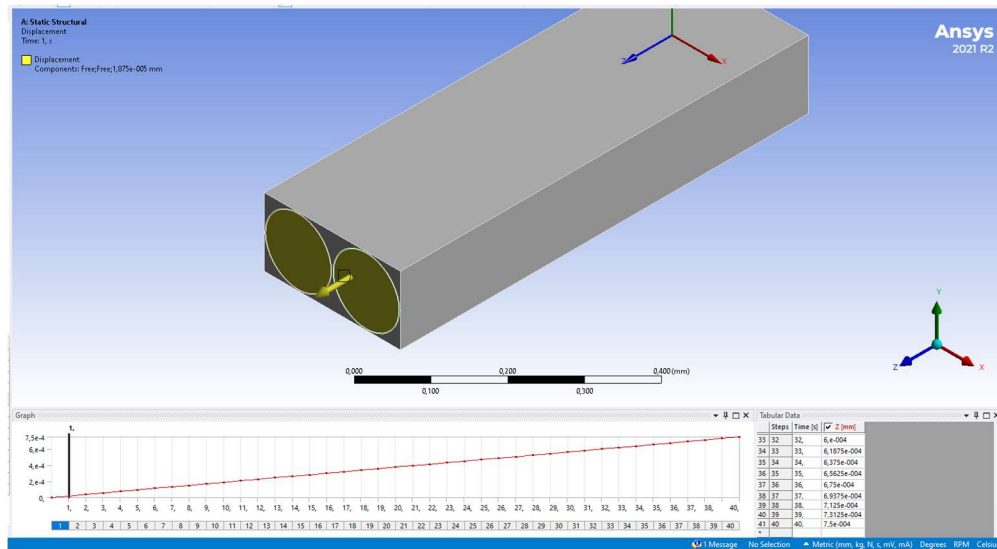


Рисунок 16 – Налаштування витягування.

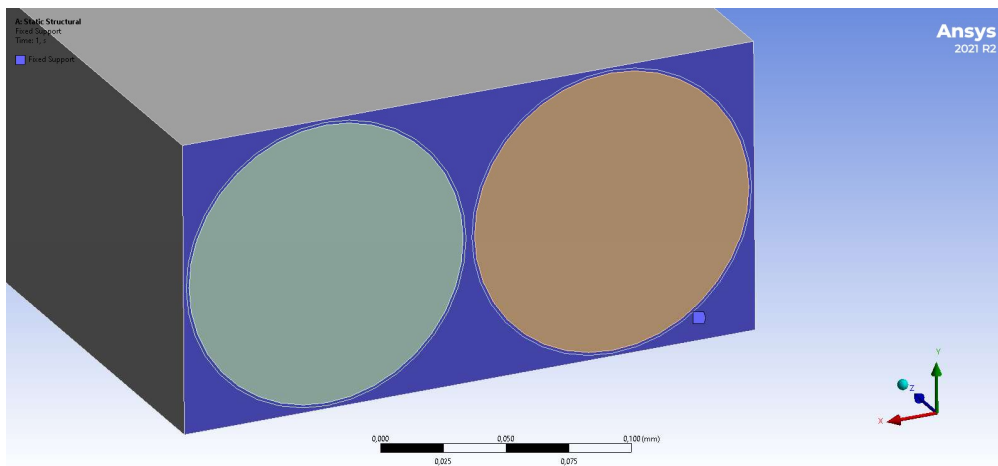


Рисунок 17 – Налаштування закріплення.

2.3 Діаграма розтягання пластини з односпрямованого композиту

Після розрахунку, було знято показники напруження з граней за які тягнули, за допомогою Force Reaction, після кожне число було поділене на площину за яку тягнули.

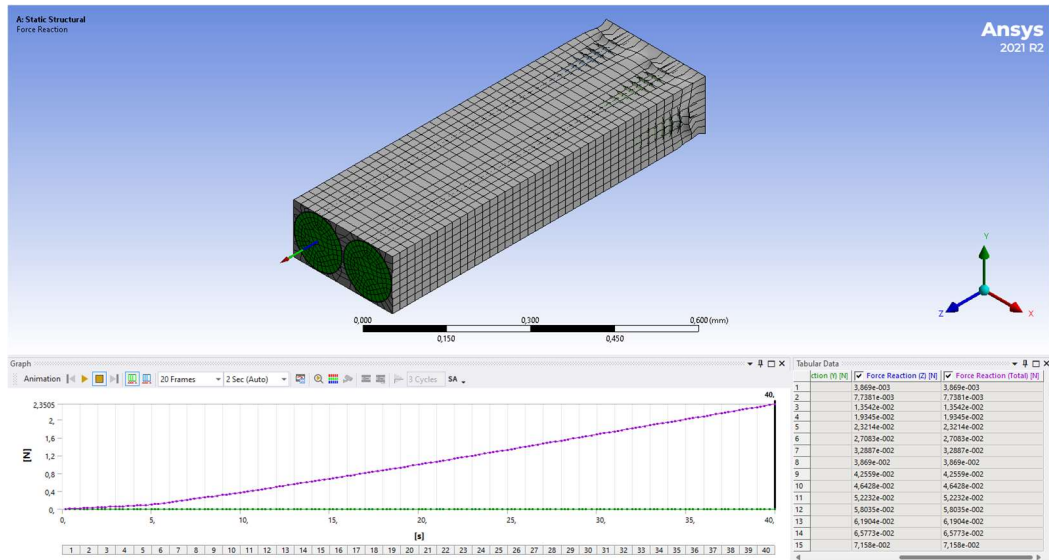


Рисунок 18 – Зняття показників.

Така сама процедура була зроблена для тієї ж моделі тільки без CZM, відповідно повернуто і контакти.

Отриманні дані було занесено до Excel таблиці.

2.4 Висновок до розділу 2

В цьому розділі було розглянуто побудову моделі односпрямованого шару композиту, розтягування цієї моделі.

Судячи з графіку, можливо зробити висновок, що з початку витягування, і до відносної лінійної осьової деформації $1,10E-04$ не повністю залучається весь об'єм зв'язуючого, це може виникати через те що на початку напруження є не достатньо великим щоб їх збурення на поверхні волокон сягало до бічних сторін наповнювача. При розвиненому процесі видно що жорсткість структури втрачена через наявність витягування волокон більше ніж в двічі, це вочевидь явище витягування волокно є значно небезпечнішим ніж конвекційний спосіб навантаження.

Цілю роботи було розрізнити звичайний спосіб навантаження, коли в насильовий фактор прикладається по всій границі зразка, тепер же наявність витягування волокон призводить до того що несуча здатність при розтяганні знижена практично в двічі.

Апроксимувавши рівні частини графіків було знайдено рівня графіків, з них було знайдено що, несуча здатність впала на 52,77%, порівняно з розрахунком без CZM.

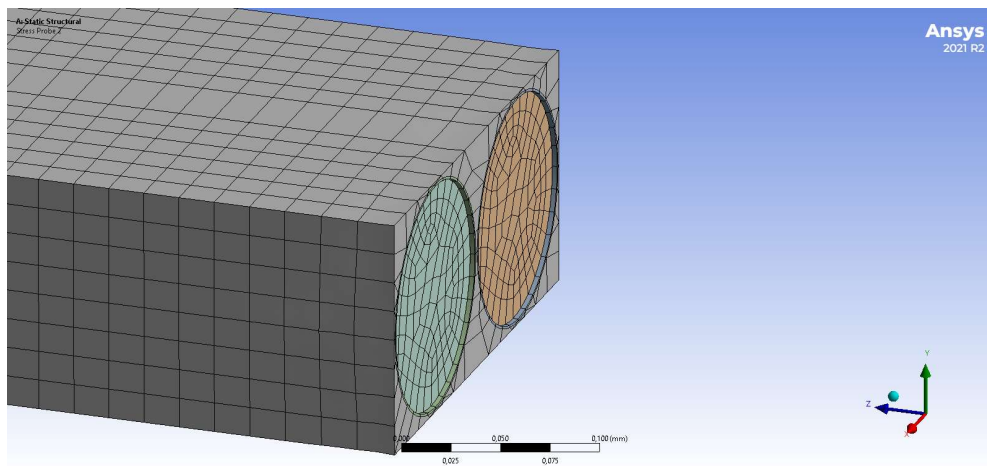


Рисунок 19 – Деформації в результаті витягування, збільшено в 4,7 разів.

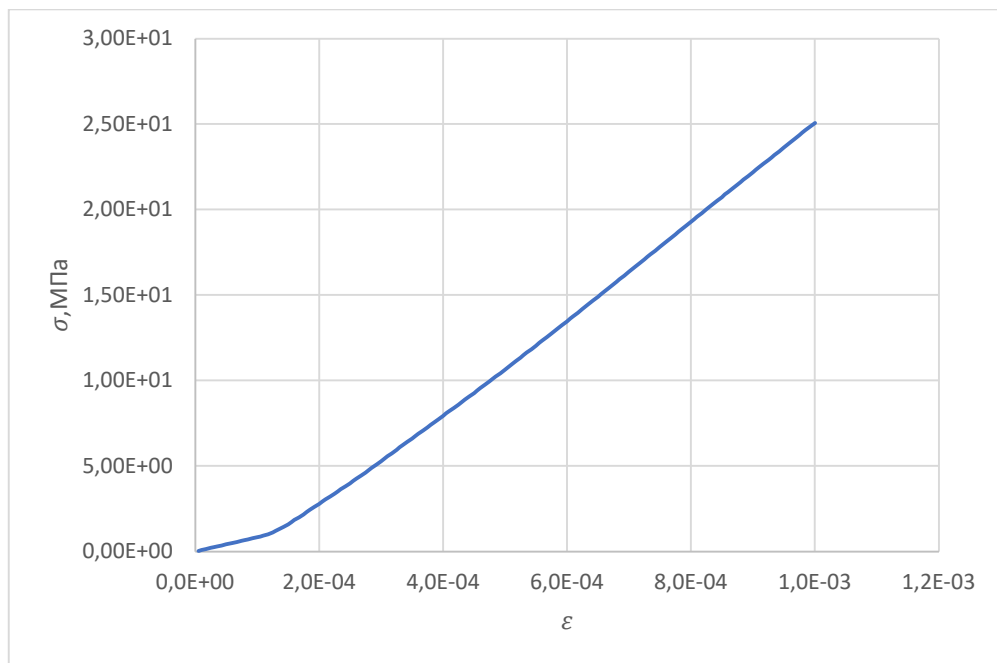


Рисунок 20 – Сила реакції рухомого краю від відносного повздовжнього подовження, для задачі з CZM.

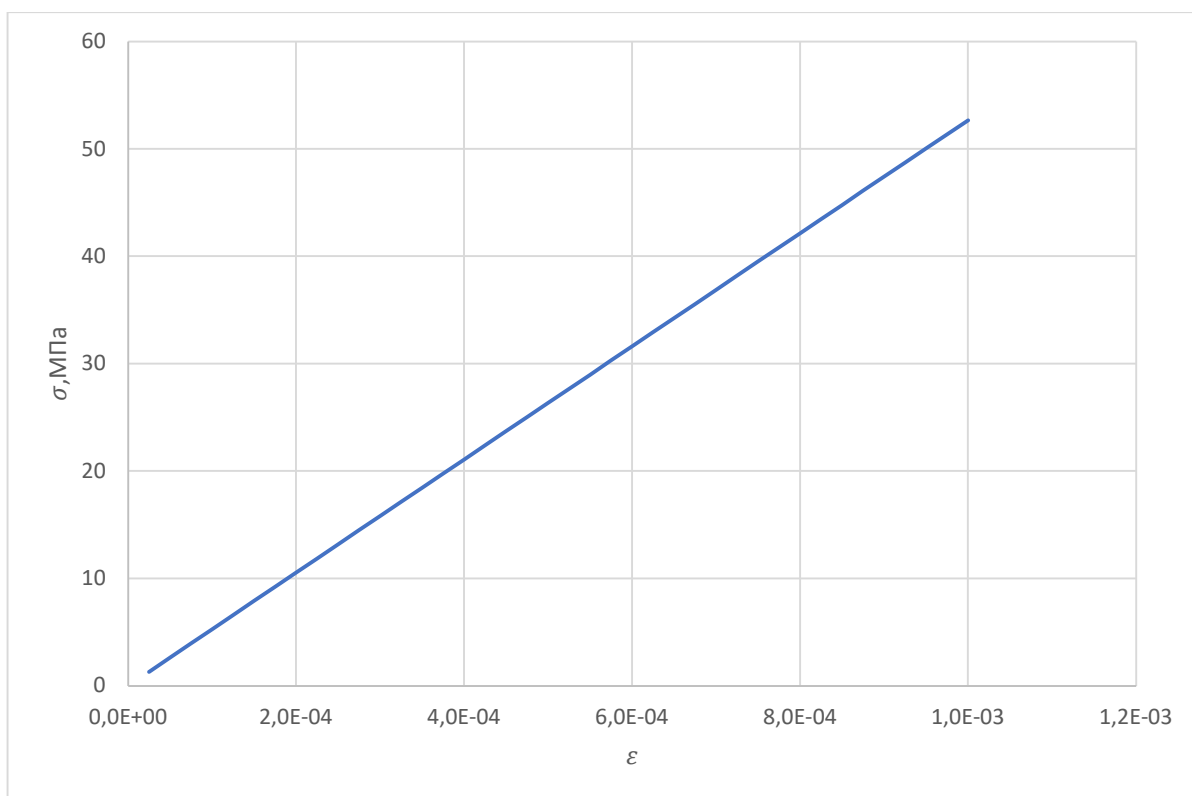


Рисунок 21 – Сила реакції рухомого краю відносного повздовжнього подовження, для задачі без CZM.

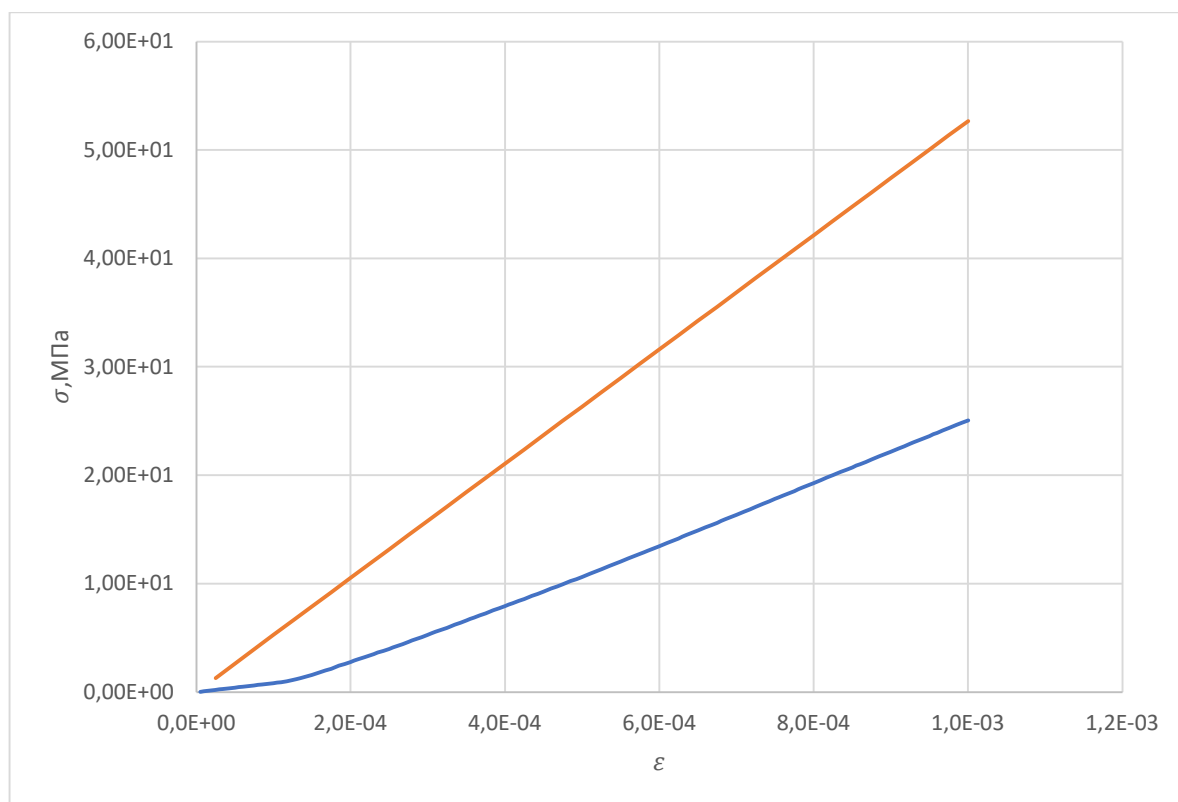


Рисунок 21 – Порівняння сил реакції рухомого краю від подовження.

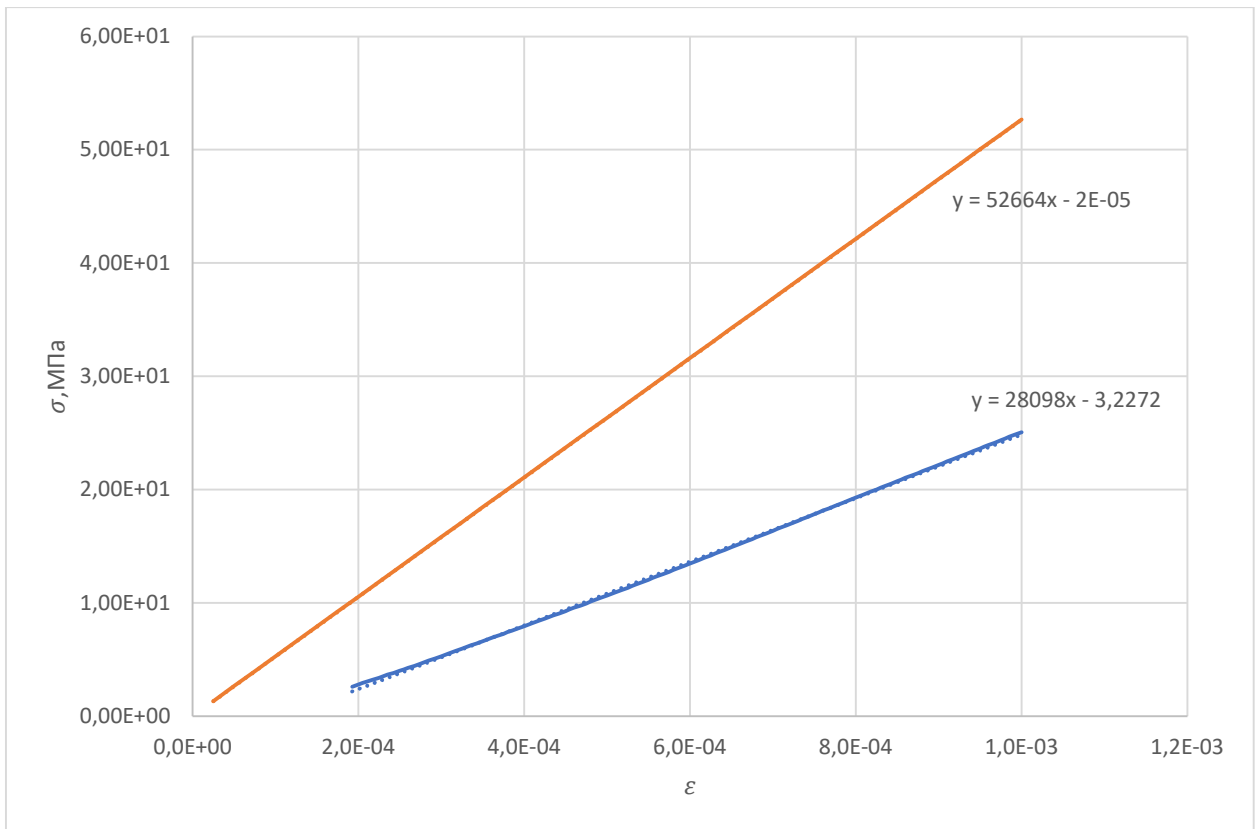


Рисунок 21 – Формули апроксімацій графіків

Розділ 3. Моделювання розтягування пакету односпрямованих шарів.

В наступній частині розрахунку буде проведено дослідження пакету, односпрямованих волокон. Якби ми проводили фізичне дослідження, пакету односпрямованих шарів композиту, то використали тест «D 3039 - D 3039M – 14».

3.1 «D 3039 - D 3039M – 14 Стандартний метод випробування властивостей на розтяг композиційних матеріалів з полімерною матрицею».

Цей метод випробувань описує процес оцінки властивостей на розтягування композиційних матеріалів з полімерною матрицею, армованих високо модульними волокнами. Він особливо зосереджений на властивостях розтягування в площині цих матеріалів і охоплює деталі щодо підготовки зразків, процедур випробувань і розрахунків для таких властивостей, як межа міцності на розтяг, модуль пружності, коефіцієнт Пуассона та перехідна деформація.

3.1.1 Моделі

Для цього методу потрібно щонайменше 5 зразків. В зв'язку з тим що в кожній лабораторії свій метод для створення композиту, тому формування моделі було розбито на 3 рівні

Таблиця 1 – Рівні розбиття моделі.

Призначення	Ступінь визначення геометрії
Загальні вимоги	Обов'язкова форма та допуски
Конкретні рекомендації	Необов'язкові запропоновані розміри
Докладні приклади	Необов'язкові типові практики

3.1.1.1 Загальні вимоги.

Таблиця 2 – Загальні вимоги.

Параметри	Вимога
Вимоги до зразка:	
Форма	Постійного прямокутного перетину
Мінімальна довжина	контактна поверхня + 2 ширини + довжина калібру
ширина зразка	За потреби
допуск на ширину зразка	± 1 % ширини
товщина зразка	За потреби
допуск на товщину зразка	± 4 % товщини
площинність зразка	
Вимоги до вкладки, для закріплення зразка (якщо використовується):	
матеріал	За потреби
орієнтація волокон (композитні вкладки)	За потреби
товщина вкладки	За потреби
зміна товщини вкладки між	± 1 % товщина вкладки
Скос закріплення	
кут скосу закріплення	від 5 до 90° включно
крок виступу на скосі до зразка	

Використання вкладок може бути зайвим, якщо успішне захоплення зразка та запобігання передчасному руйнуванню вже досягнуті шляхом ефективного введення сили і уникнення значного розриву. Тому потрібно визначити необхідність використання вкладок і встановити ключові параметри їх конструкції відповідно до потрібного результату: типу прийнятної відмови та місця, де вона може відбутися. Якщо прийнятні режими відмови стаються з

прийнятною частотою, то немає підстав для зміни поточного методу захоплення.

3.1.1.2 Конкретні рекомендації:

Підберіть ширину та товщину зразка таким чином, щоб сприяти руйнуванню калібрувального перетину та переконатися, що в зразку достатня кількість волокон у поперечному перерізі, що робить його статистично репрезентативним для сипучого матеріалу. Щодо довжини зразка, краще обирати значно більшу за мінімально вимагану, це допомагає уникнути напруги згину, що виникає внаслідок незначних ексцентриситетів захоплення. Постарайтеся тримати секцію вимірювального приладу якомога далі від ручок, забезпечте значну кількість матеріалу під напругою для отримання більш статистично значущого результату. Мінімальні вимоги щодо конструкції зразка, представлені в таблиці 1, не є достатніми для створення показника з відповідними розмірами та допусками. Тому рекомендації щодо інших важливих розмірів подаються для типових конфігурацій матеріалів у таблиці 2. Декілька випробувальних лабораторій виявили, що ці геометрії сприяють прийнятним режимам відмов у різних системах матеріалів, однак їх використання не гарантує успіху для всіх існуючих або майбутніх матеріальних систем.

3.1.1.3 Використання фіксуючих елементів/вкладок.

Існує ряд конфігурацій матеріалів, таких як різноорієнтовані ламінати, матеріали на тканинній основі або довільно армовані листові формовкові суміші, які можна успішно перевірити без фіксуючих елементів. Однак при випробуванні однорівневих матеріалів (або ламінатів з вираженою однорівневою домінацією) на руйнування в напрямку волокон настійно рекомендується використовувати фіксуючі елементи. Також зубці можуть бути корисними під час тестування однорівневих матеріалів в напрямку матриці, щоб запобігти пошкодженню під час фіксації.


D3039/D3039M – 14

DRAWING NOTES:

- INTERPRET DRAWING IN ACCORDANCE WITH ANSI Y14.5M-1982, SUBJECT TO THE FOLLOWING:
- ALL DIMENSIONS IN MILLIMETRES WITH DECIMAL TOLERANCES AS FOLLOWS:
NO DECIMAL X .XX
 ± 3 ± 1 ± .3
- ALL ANGLES HAVE TOLERANCE OF $\pm .5^\circ$.
- PLY ORIENTATION DIRECTION TOLERANCE RELATIVE TO [A] WITHIN $\pm .5^\circ$.
- FINISH ON MACHINED EDGES NOT TO EXCEED $1.6\sqrt{\text{ }}$ (SYMBOLY IN ACCORDANCE WITH ASA B46.1, WITH ROUGHNESS HEIGHT IN MICROMETRES.)
- VALUES TO BE PROVIDED FOR THE FOLLOWING, SUBJECT TO ANY RANGES SHOWN ON THE FIELD OF DRAWING: MATERIAL, LAY-UP, PLY ORIENTATION REFERENCE RELATIVE TO [A], OVERALL LENGTH, GAGE LENGTH, COUPON THICKNESS, TAB MATERIAL, TAB THICKNESS, TAB LENGTH, TAB BEVEL ANGLE, TAB ADHESIVE.
- NO ADHESIVE BUILDUP ALLOWED IN THIS AREA.

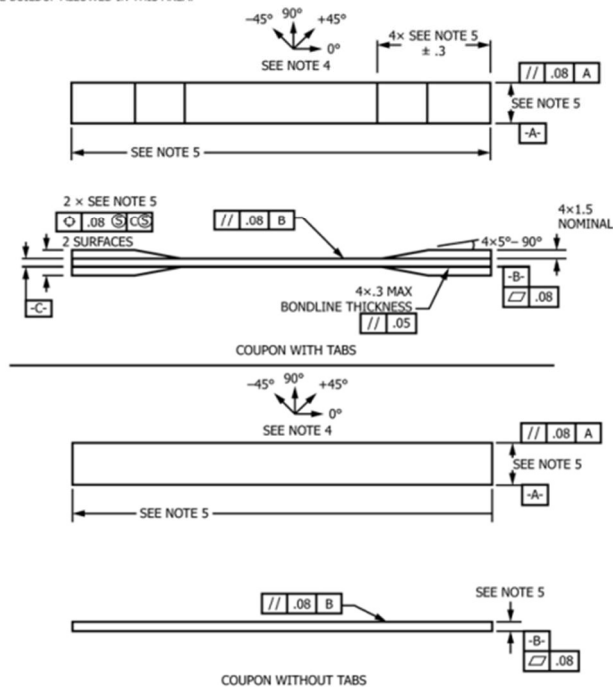


Рисунок 22 – Креслення зразка для випробувань на розтяг (SI)

Таблиця 3 – Рекомендації щодо геометрії зразка на розтяг.

Орієнтація волокон	ширина, мм [дюйм]	Загальна довжина, мм [дюйм]	Товщина, мм [дюйм]	Довжина вкладки, мм [дюйм]	Товщина вкладки, мм [дюйм]	Кут фаски вкладки, °
0° в одному напрямку	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 чи 90
90° в одному напрямку	25 [1.0]	250 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
збалансований і симетричний	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	наждачна шкурка	—	—
випадково-розривний	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	наждачна шкурка	—	—

*Розміри в цій таблиці та допуски на рис. є лише рекомендаціями та можуть бути змінені за умови дотримання вимог таблиці 1

3.1.2 Процедура

3.1.2.1 Швидкість

Коли встановлюєте швидкість випробування, потрібно забезпечити майже постійну швидкість деформації в калібру. Якщо немає можливості контролювати деформацію на випробувальній машині, її можна приблизно оцінити через моніторинг та регулювання швидкості прикладання сили. Це допоможе підтримувати майже постійну швидкість деформації, яку можна виміряти за реакцією датчика деформації з часом. Швидкість деформації має бути вибрана так, щоб спричинити руйнування протягом 1-10 хвилин. Якщо граничну деформацію матеріалу неможливо обґрунтовано оцінити, рекомендується початкові випробування проводити з використанням стандартних швидкостей, доки не будуть відомі гранична деформація матеріалу та відповідність системи, а швидкість деформації можна буде відрегулювати. Зокрема, рекомендовані стандартні швидкості такі:

1. Випробування з контролем деформації — стандартна швидкість деформації 0,01 хв⁻¹.
2. Випробування постійної швидкості головки — стандартна швидкість зміщення головки 2 мм/хв [0,05 дюйма/хв].

3.1.2.2 Клімат

Процедура випробування полягає у створенні необхідного середовища для зразка шляхом налагодження вологості згідно з потрібним профілем. Випробування проводять із застосуванням відповідної кондиціонуючої рідини, якщо це можливо. Однак деякі сценарії, наприклад, тести з вологою пробою за підвищених температур, вимагають від камер для випробувань можливостей, які зазвичай не передбачені. У таких випадках умови механічних тестів можуть зазнати змін, наприклад, шляхом проведення випробувань за підвищених температур без контролю рідини, але з чітко встановленим обмеженням часу до моменту відмови після вилучення з камери кондиціонування. Будь-які зміни

у середовищі тестування мають бути документовані. Якщо немає можливості контролювати вплив рідини, втрату вологості з зразка до завершення випробувань можна оцінити, використовуючи кондиціонований пробний зразок з відомою вагою, який розміщується одночасно з основним зразком у випробувальній камері. Після завершення тестів зразок виймають з камери, зважують і розраховують втрату ваги у відсотках для подальшого повідомлення.

3.1.2.3 Встановлення зразка/датчиків

Зразок спочатку вставляється у ручки випробувальної машини, де вирівнюється його довга вісь з напрямком випробування. Після цього рукоятки затягуються, фіксуючи тиск на них, який може бути регульованим (гідравлічним або пневматичним). Для вимірювання реакції на деформацію, датчики індикатора деформації прикріплюються до зразка симетрично відносно його середини прольоту та ширини. Потім прилад для реєстрації деформації під'єднується до цих датчиків на зразку.

3.1.2.4 Перевірка перед тестом

Під час визначення модуля пружності, рекомендується провести оцінку принаймні одного зразка, аналогічного за розміром, за допомогою пари аксіальних перетворювачів, розташованих поруч один з одним. Це дозволить визначити відсоток вигину за допомогою рівняння, використовуючи середнє значення контрольної точки осьової деформації (це середнє значення в межах діапазону деформації, який відповідає хорді модуля), яке вказано у таблиці 3. Якщо вигин становить менше 3%, можна використовувати лише один перетворювач. У випадку, якщо вигин перевищує 3%, рекомендується використання середніх значень напруг з датчиків, що розташовані поруч.

$$B_y = \frac{|\varepsilon_f - \varepsilon_b|}{|\varepsilon_f + \varepsilon_b|} \quad (2)$$

де:

ε_f = вказана деформація від переднього перетворювача, $\mu\varepsilon$;

ε_b = вказана деформація від заднього перетворювача, $\mu\epsilon$; і

B_y = відсоток вигину зразка.

3.1.2.5 Навантаження

Після всіх підготовок та перевірок можливо починати тест під час якого потрібно прикладати силу до зразка з указаною швидкістю до руйнування, записуючи дані.

3.1.2.6 Запис даних

Під час процесу тестування важливо безперервно або періодично записувати дані про залежність сили від переміщення траверси. Рекомендовано збирати інформацію з частотою від 2 до 3 записів на секунду і набрати мінімум 100 точок даних на кожен тест. Якщо виявляється перехідна область або виникають початкові ознаки пошкодження, варто зафіксувати параметри, такі як сила, деформація та тип пошкодження в цих точках. Також важливо зафіксувати метод, який використовується для визначення початкових ознак проблеми (наприклад, візуальний огляд, акустична емісія тощо). У випадку руйнування зразка варто зафіксувати максимальну силу, силу руйнування та деформацію (або переміщення датчика) у момент розриву або якомога ближче до цього моменту.

3.1.2.6 Руйнація зразка

В випадку руйнації потрібно записувати спосіб і місце поломки зразка. Якщо можливо, потрібно вибрати один зі стандартних способів руйнації (показані на рисунку 23).

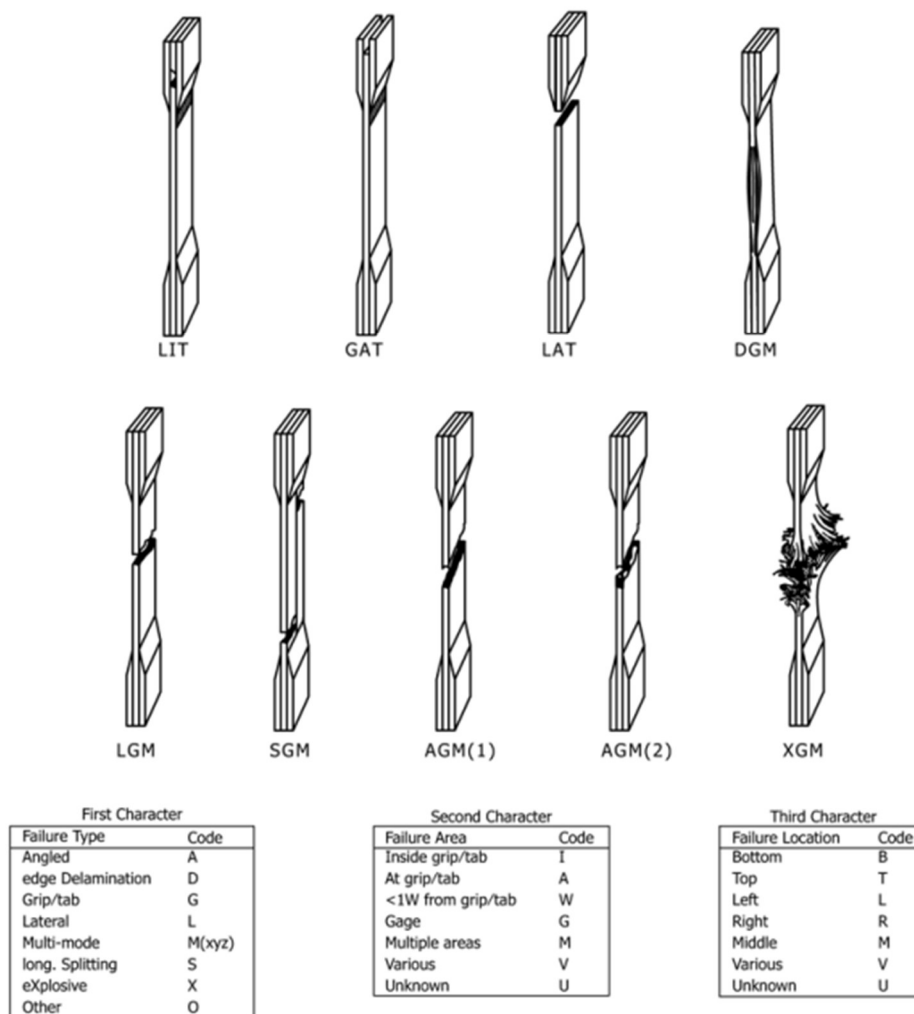


Рисунок 23 – Коди помилок випробувань на розтягування/типові руйнування.

3.2 Геометрична модель пакету односпрямованих шарів за схемою укладки

Так само як і для односпрямованого шару, створили модель композиту одного шару(матриця, трубка матриці та волокно), тільки на цей раз кількість волокон було збільшено з 2 до 10, тому відповідно зросли розміри матриці до 125x1250x1250.

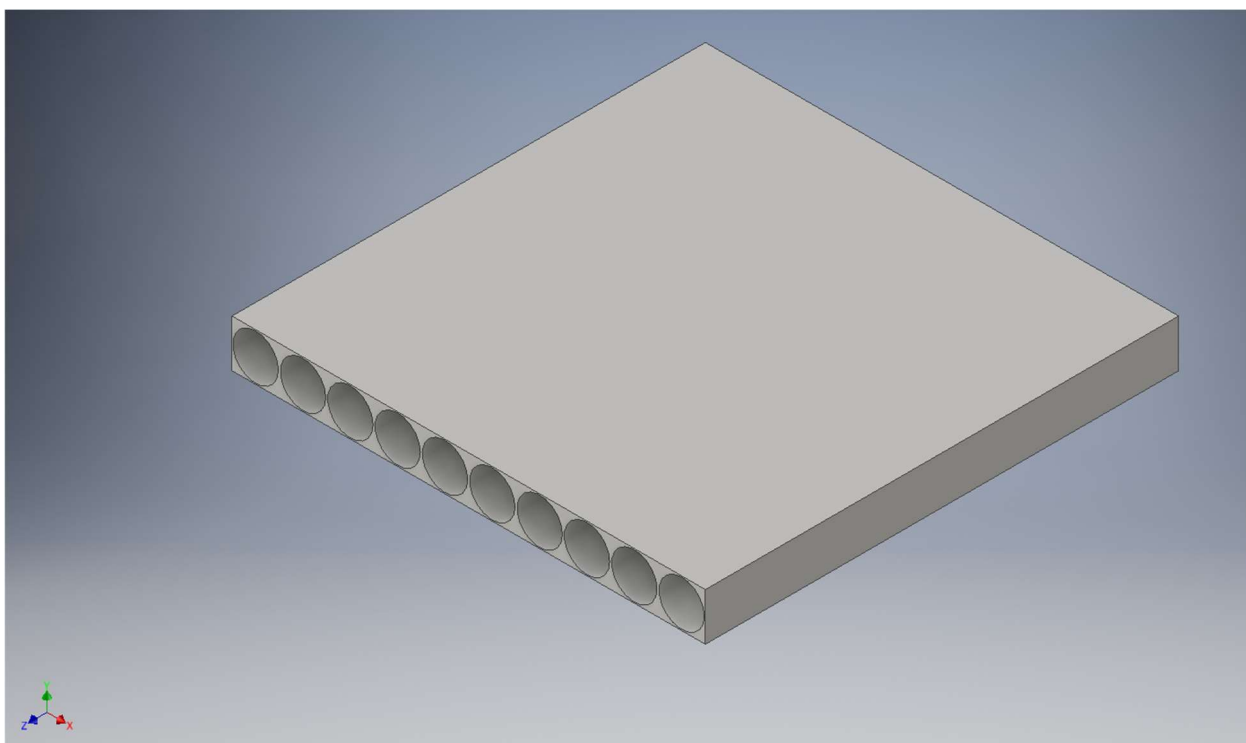


Рисунок 24 – Модель матриці.

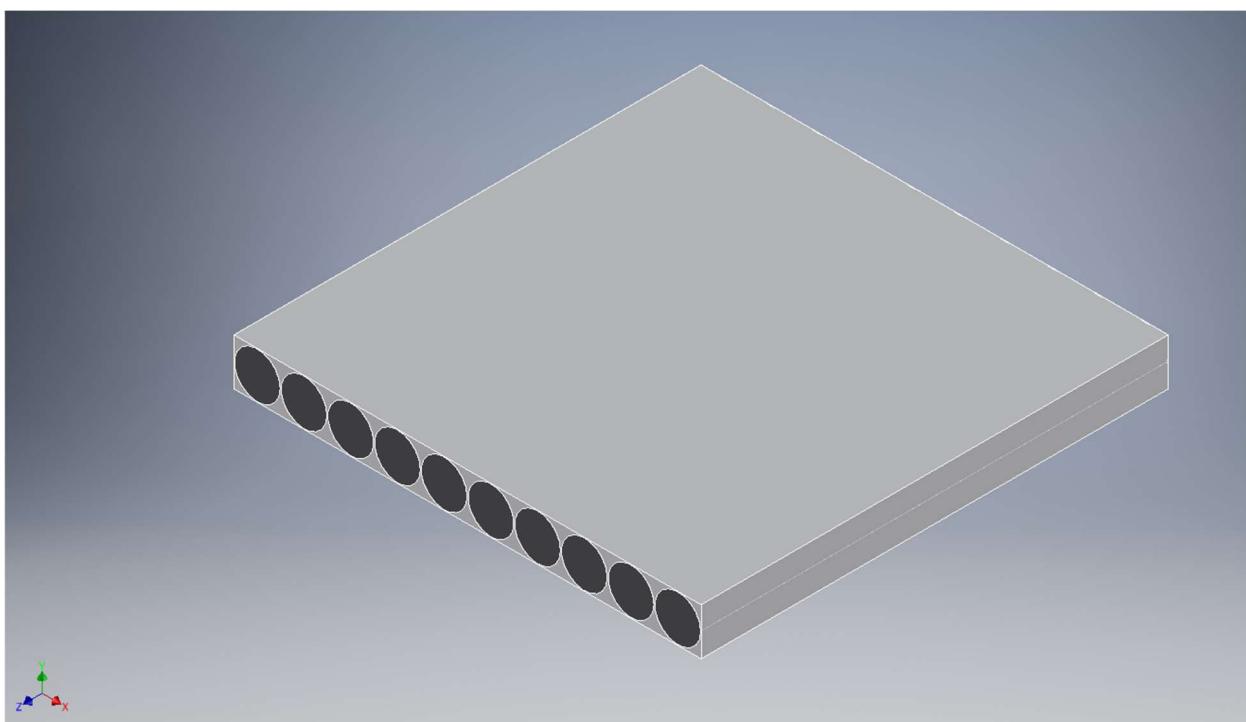


Рисунок 25 – Пакет композита.

Після вирізано, з нього квадрат, так щоби волокна були повернуті на 55° , проте в зв'язку зі складністю побудови сітки було допущено такі зміни, країні

волокна, що обрізаються та стать загостреними будуть обрізатися по іншому так щоби не порушати форму граней виді кільця, в противному випадку не буде можливості побудувати елементи з контактом CZM за допомогою гексо сітки.

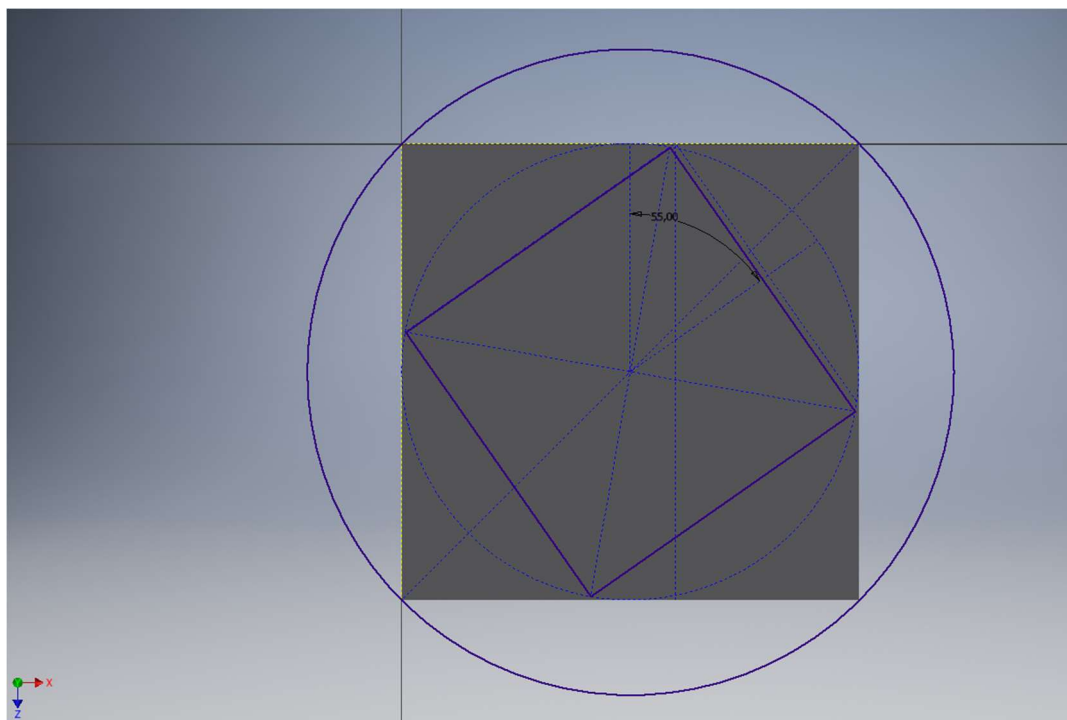


Рисунок 26 – Обрізка композиту.

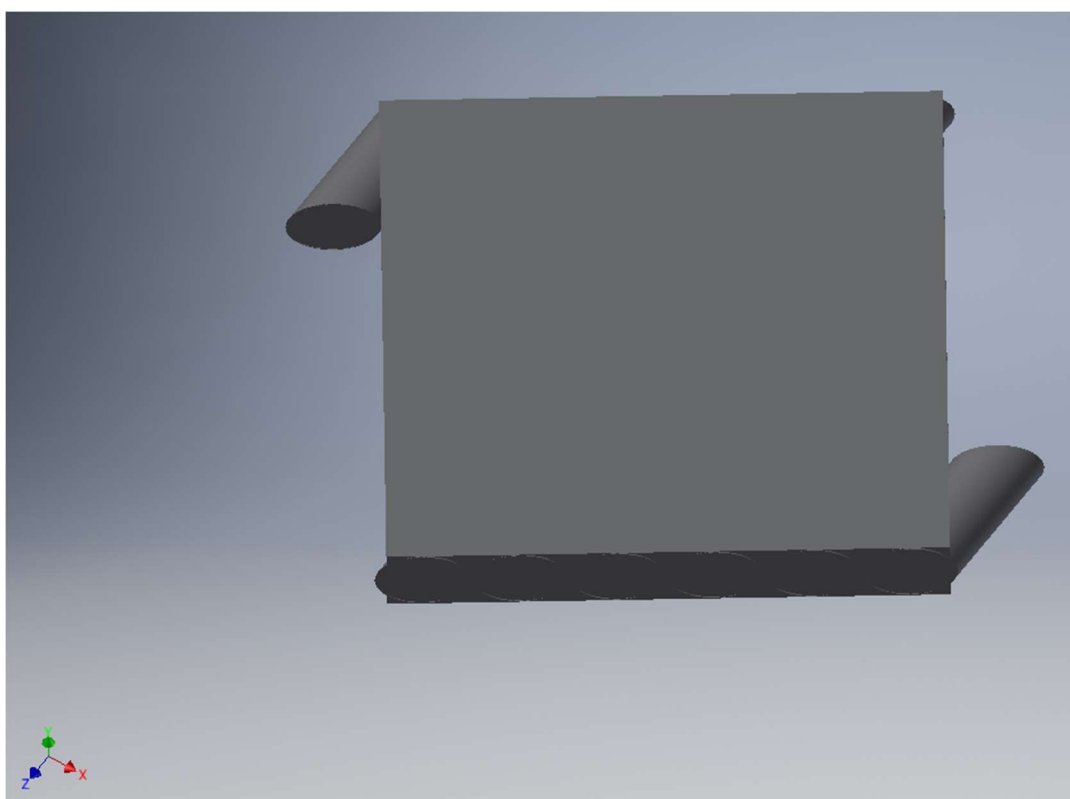


Рисунок 27 – Готовий шар композиту.

Після створення шару композиту, було продубльовано цей шар, перевернуто на прикріплено до минулого, так щоби між волокнами верхнього та нижнього шару було 70° , та було прив'язано одну з рівних граней до площини XY, задля того щоби загрузати модель по вісь Z.

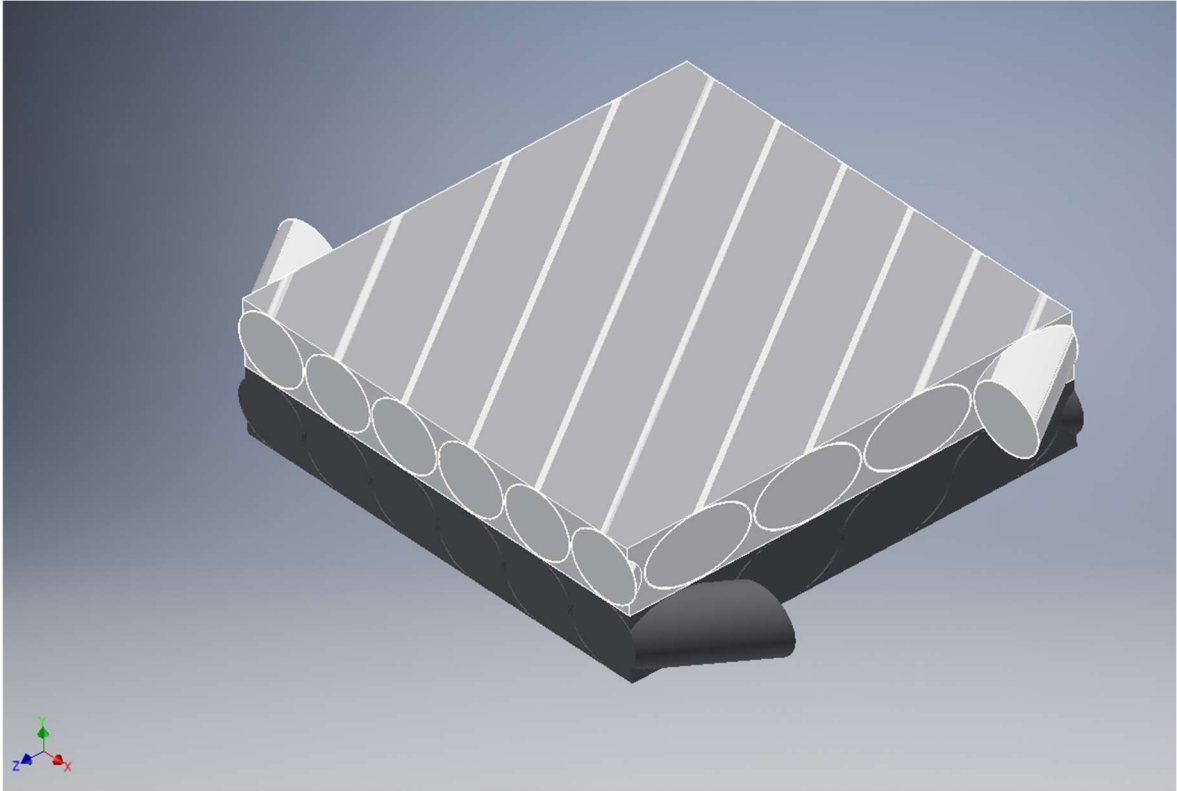


Рисунок 28 – Готова модель композиту.

3.3 Скінчено елементна модель пакету односпрямованих шарів

Для побудови сітки в цій моделі було прийнято тіж методи що й для побудови її в одному шару композиту. З тією відмінністю що для кожного волокна було вибрано різна кількість елементів в довжину. Після налаштувань було згенерована сітка.

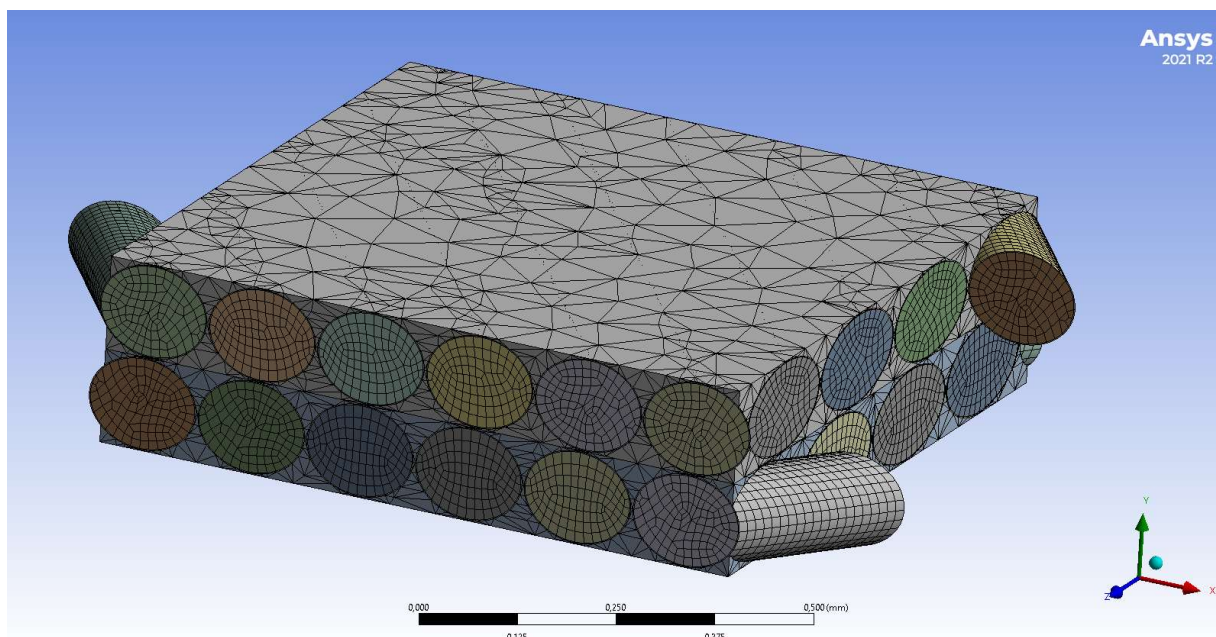


Рисунок 29 – Згенерована сітка.

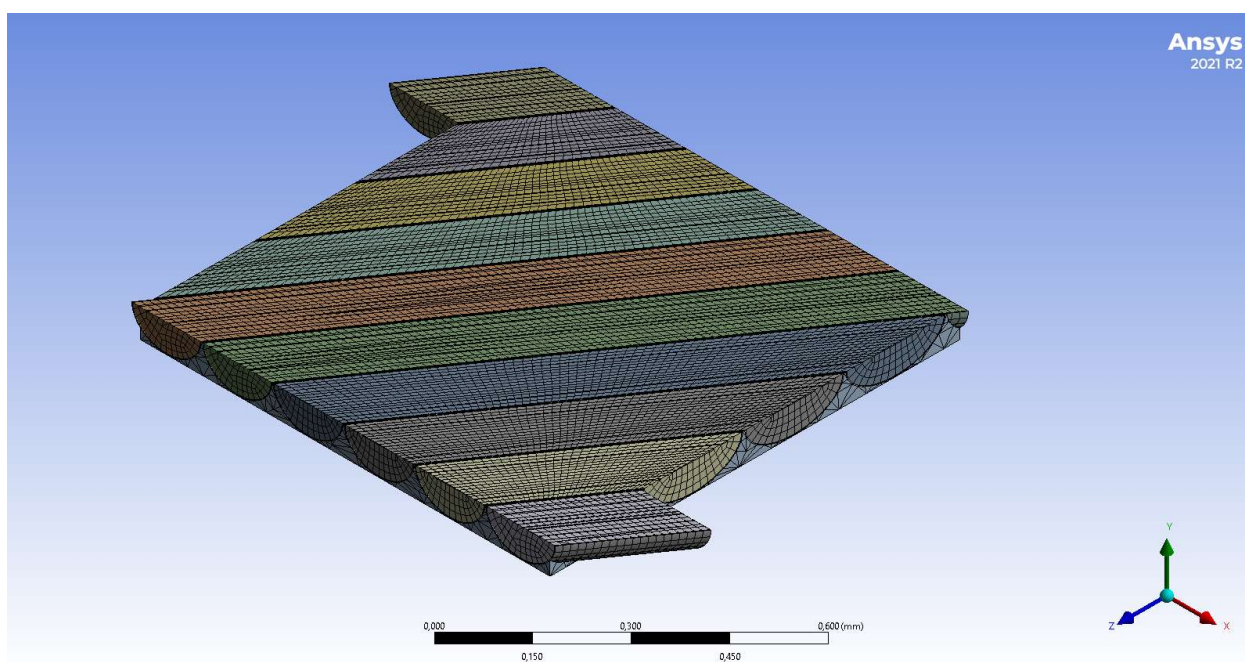


Рисунок 30 – Сітка в розрізі (нижні волокна).

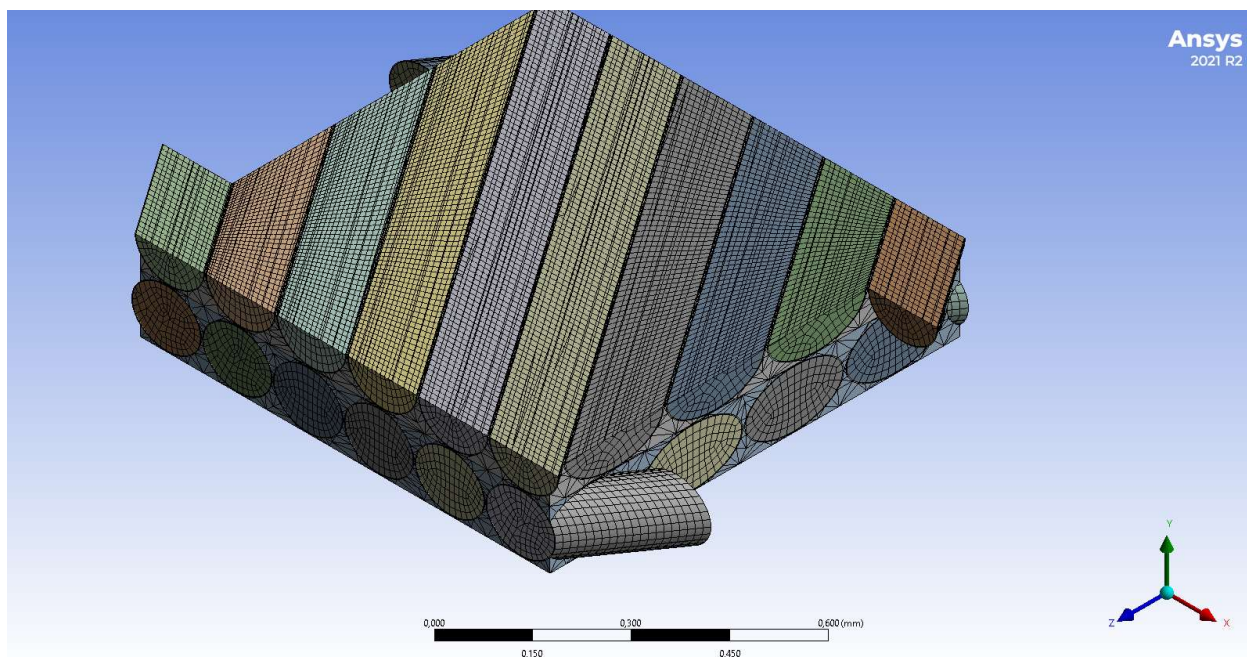


Рисунок 31 – Сітка в розрізі (верхні волокна).

3.4 Граничні умови для пакету шарів

Так само як і в 2-му розділі, було навантажено і цю модель, з вибором граней матриці з одного боку для закріплення, та тягнули за волокна з протилежної(рис.4-5), витягували на 1% від загальної довжини, що ставила приблизно 875 нм. Також варто відзначити що було зменшено кількість кроків, з 40 до 20 зв'язку з довгим розрахунком, навіть при розрахунку на доволі гарному комп'ютері ця задача рахувалась 114 годин.

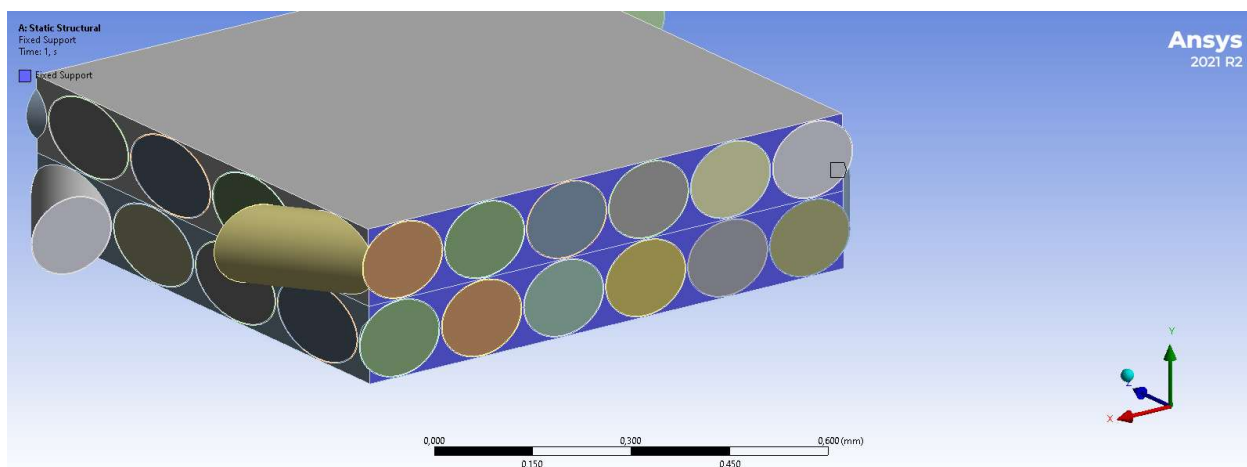


Рисунок 32 – Налаштування закріплення.

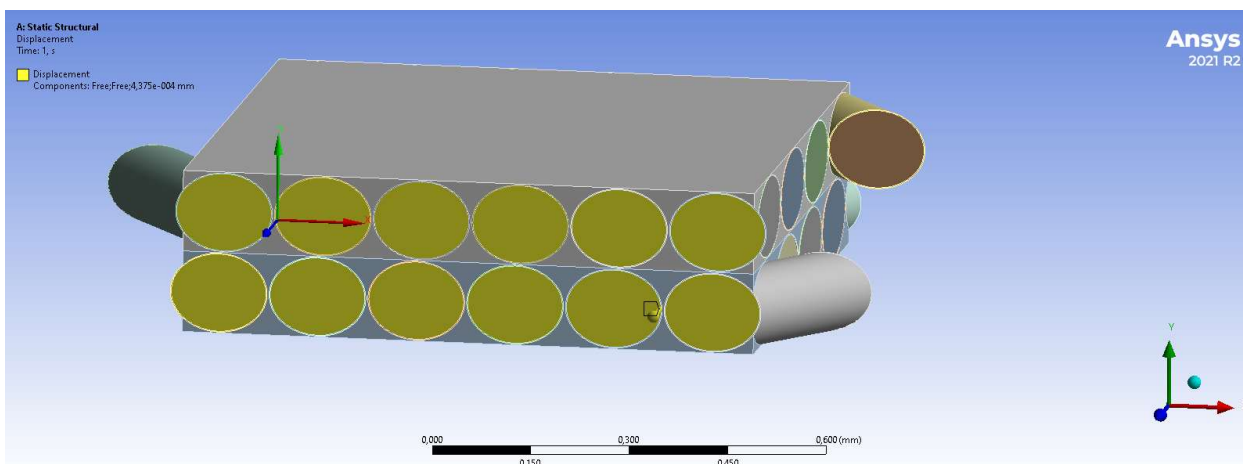


Рисунок 33 – Налаштування витягування.

3.5 Висновок до розділу 3

В цьому розділі було виконано числове дослідження напружено деформованого стану шаруватого композиту при розтяганні з отриманням діаграми розтягання.

Після розрахунку, було знято показники напруження з граней за які тягнули, за допомогою Force Reaction, після кожне число було поділене на площину за яку тягнули. Як і в пролому розділі було зроблено 2 розрахунки для моделі з CZM та моделі без CZM. Отримані данні було занесено до таблиці, з якої було отримано графіки сил реакції рухомого краю відносного повздовжнього подовження.

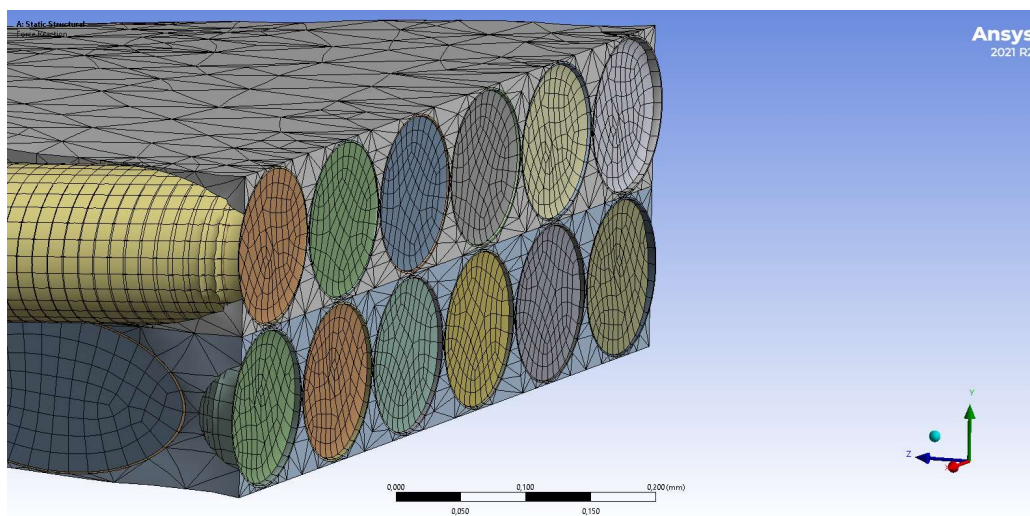


Рисунок 33 – Деформації в зв'язку з витягуванням.

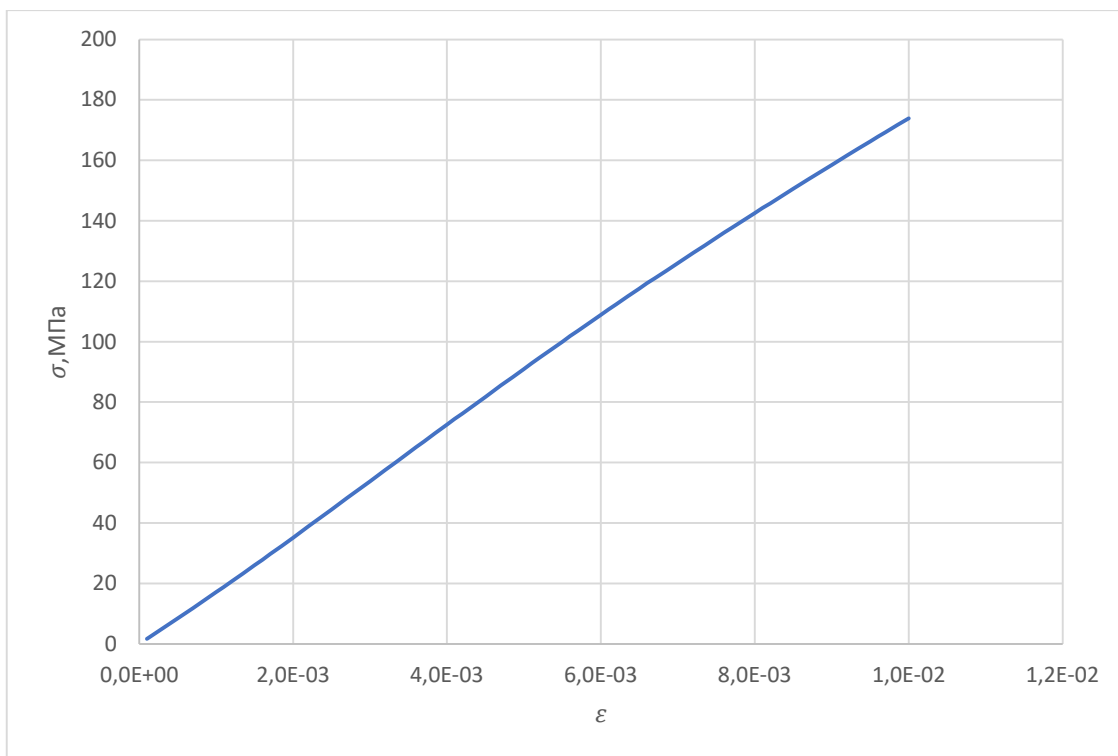


Рисунок 34 – Графік сили реакції рухомого краю від подовження, розрахунку з CZM.

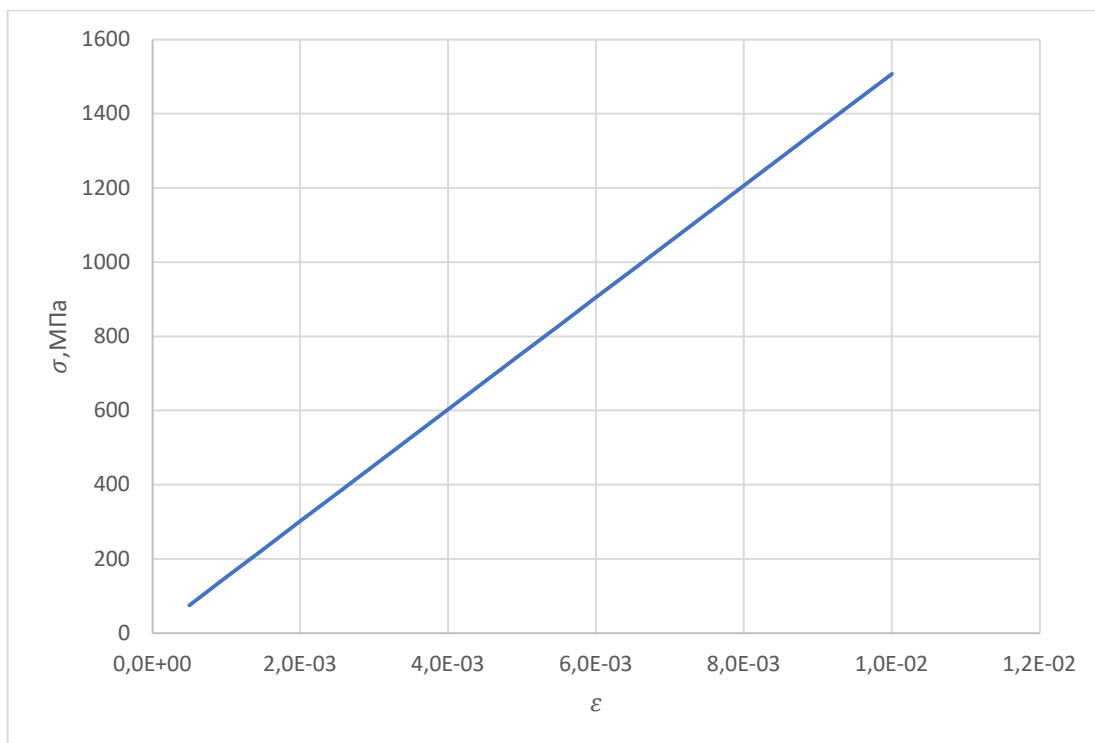


Рисунок 35 – Графік сили реакції рухомого краю від подовження, розрахунку без CZM.

4 Механічні властивості

4.1 Приведені пружні властивості для багатошарового композиту

Відповідно з отриманих даних було побудовано графіки. Провівши рівну лінію від початку та до кінця, його можливо умовно розділити на три зони (рис 36)

З першої частини можливо зробити висновок, що модель с початку не довантажена, причиною знову ж вважаємо через те що на початку напруження є не достатньо великим щоб їх збурення на поверхні волокон сягало до бічних сторін наповнювача, це відбувається до $1,50E-03$.

В другій частині області які зазнають відносного переміщення починають збільшуватися, відповідно і ріст напружень, після досягання максимуму, починається спад, що відповідає початку руйнуванню зон когезії. Маючи графік було отримано для кожної зони повздовжні модулі E , що відповідають формулам ліній тренду:

$$\langle E_I \rangle = 17358\varepsilon - 0,1901$$

$$\langle E_{II} \rangle = 18445\varepsilon - 1,4868$$

$$\langle E_{III} \rangle = 16109\varepsilon + 13,378$$

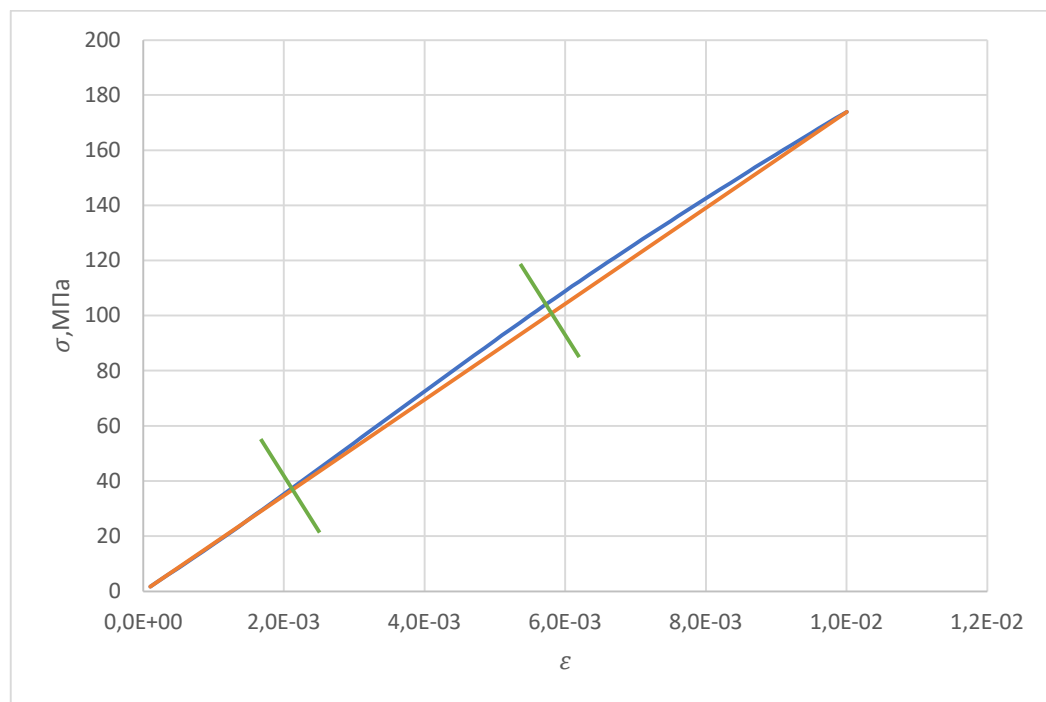


Рисунок 36 – Графік зон.

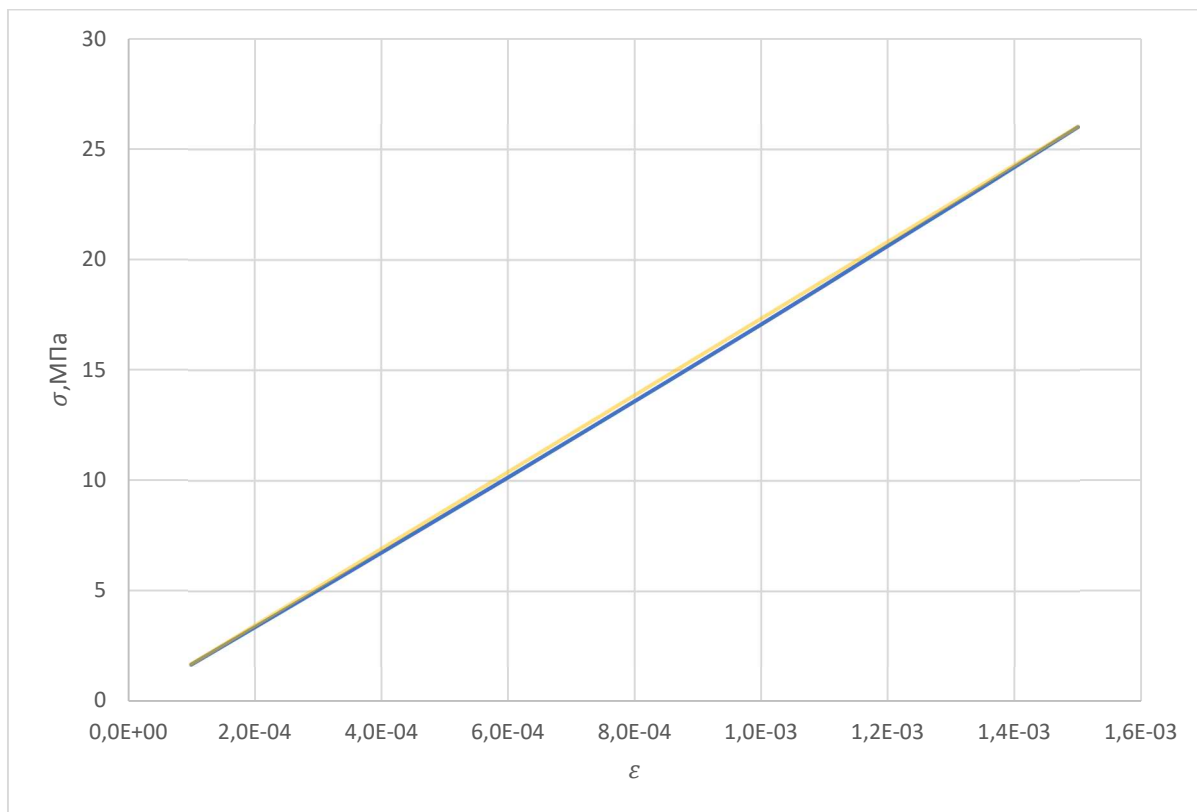


Рисунок 37 – Графік першої зон.

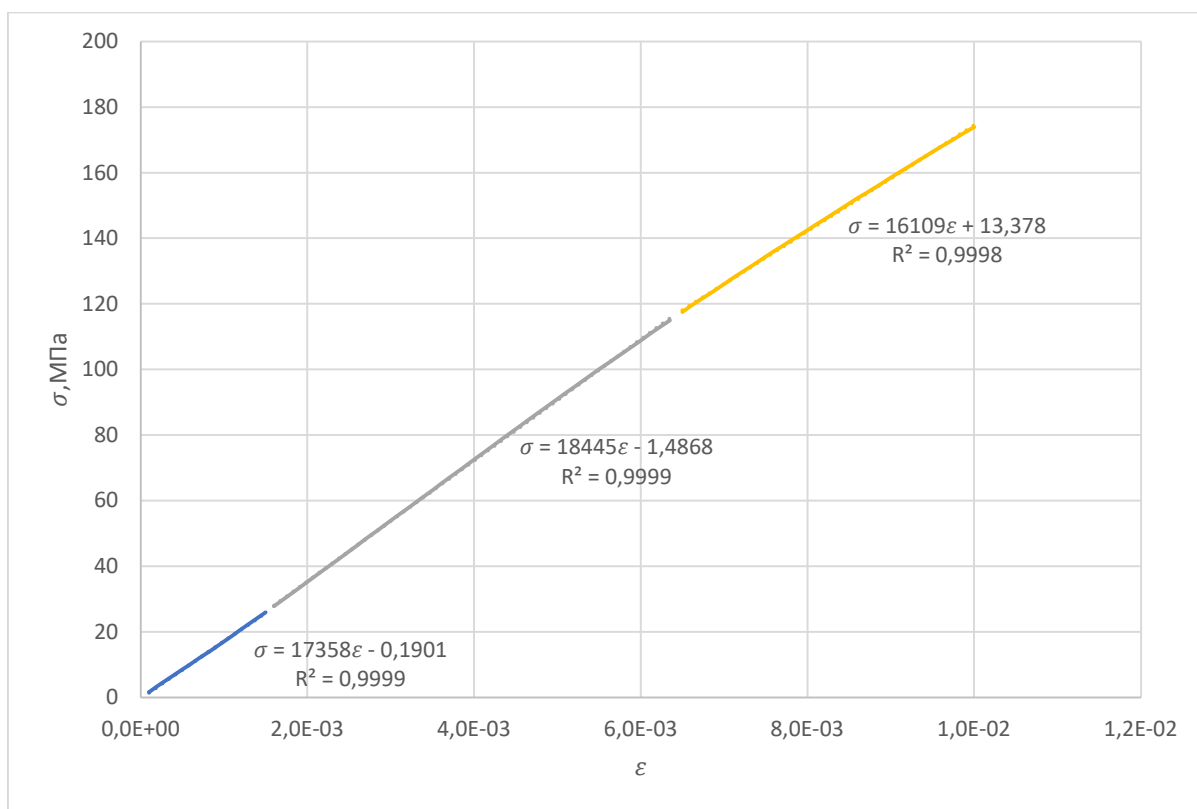


Рисунок 38 – Формули зон.

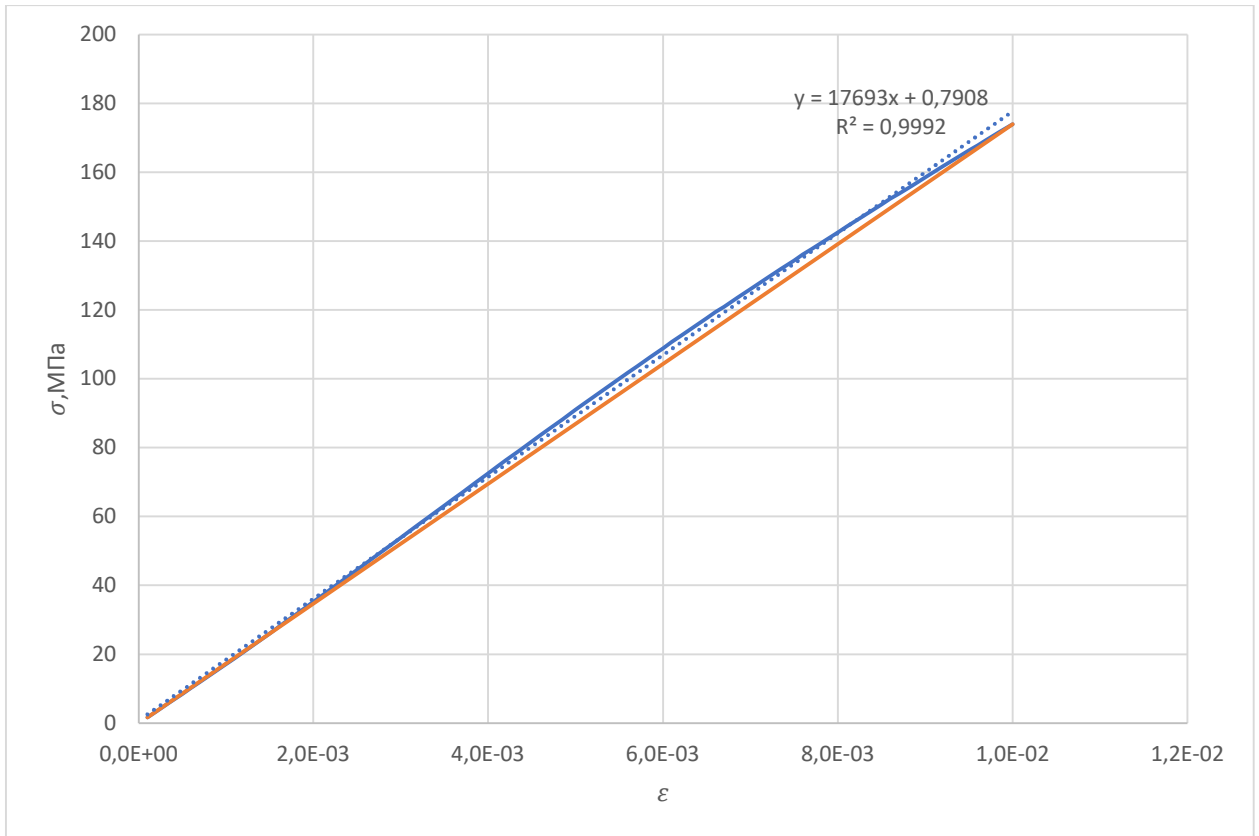


Рисунок 39 – Загальна формула для графіку.

4.2 Вплив на міцність шаруватих композиційних матеріалів порядку укладення шарів

З отриманих даних можливо побудувати графік для пакету односпрямованих волокон, завдяки зняттю даних за допомогою «Stress Probe».

З даних виробника цього матеріалу, максимальна напруження що може витримати цей композит зіставляє 1961 МПа, відповідно можемо знайти, наскільки впливає наявність CZM для міцності.

З рівнянь:

- $\sigma = 2E+06\varepsilon + 0,1971$
- $\sigma = 543351\varepsilon + 96,388$

Для $\sigma = 1961$ буде знайдено що для ідеальної моделі це напруження з'явиться при $9,8E-04$, а для моделі з CZM це значення появиться при $3,4E-03$, відповідно 2,47 рази

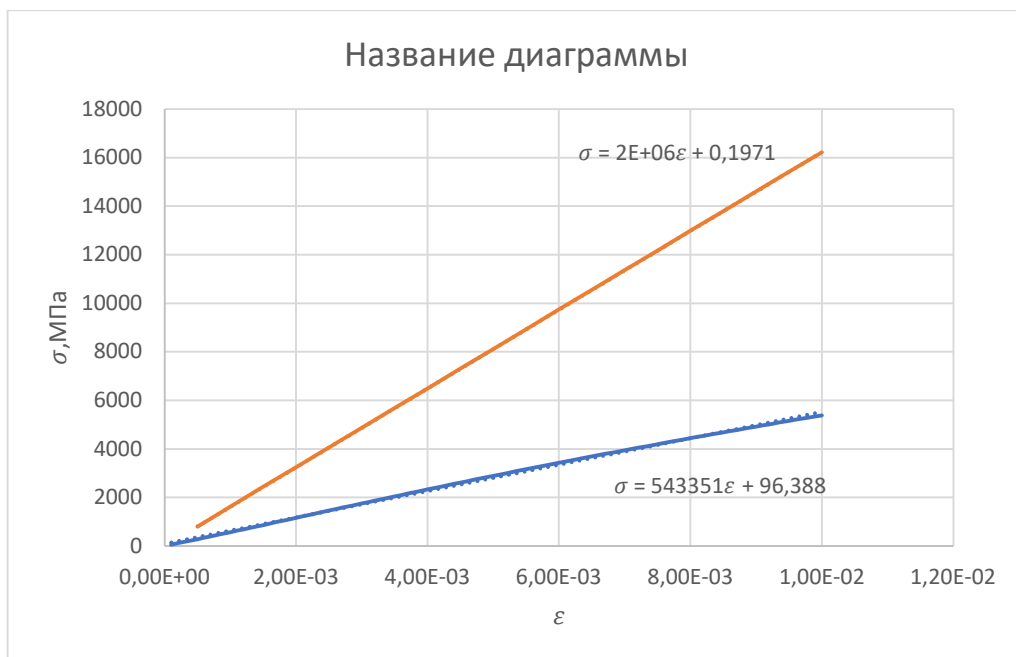


Рисунок 40 – Формули графіків ідеального контакту та CZM для багато шарового композиту..

4.3 утворення залишкових деформацій при застосуванні моделювання зон когезії

При відніманні графіка було отримано графік залишкових деформацій. Відповідно до нього було знайдено що значення ε відповідає $2E-03$, що в свою чергу відповідає 20% максимальним залишковим деформаціям при руйнуванні.

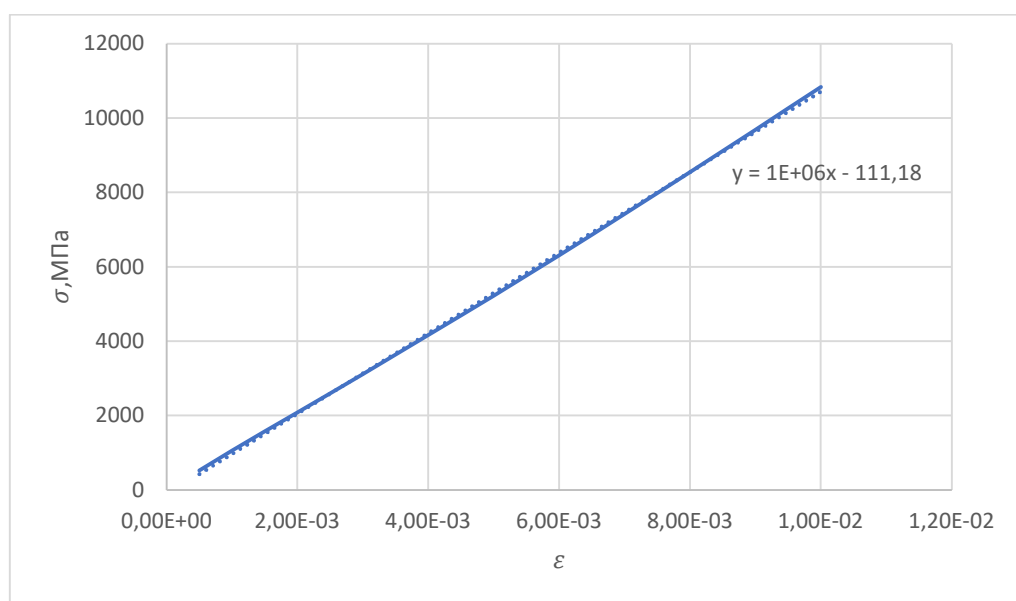


Рисунок 41 – Графік залишкових деформацій.

4.4 Висновки за розділом 4

В цьому розділі було проведено дослідження механічних властивостей. Приведені пружні властивості для багатошарового композиту, знайдено 3 зони в шаровому композиті, відповідно для кожної зони було знайдено повздовжні модулі E . Досліджено вплив на міцність шаруватих композиційних матеріалів, а також було знайдено максимальні залишкові деформації.

ВИСНОВКИ

В цій роботі було проведено дослідження впливу CZM на композити. Було проаналізовано основні визначення, методи розрахунків та підходи до мікро-моделювання. Після було детально проаналізовано модель односпрямованого шару композиту та його розтягування. Виявлено, що початкові напруження не завжди досягають бічних сторін наповнювача, що призводить до втрати жорсткості структури. Також виявлено, що витягування волокон з методом CZM в два рази більше погіршує несучу здатність порівняно з конвекційним способом навантаження.

Проведене числове дослідження напружено-деформованого стану шаруватого композиту під розтягуванням, отримавши діаграму цього розтягання. Результати розрахунків показали зниження несучої здатності на 52,77% при використанні CZM.

У останньому розділі було проведено дослідження механічних властивостей, включаючи пружність та модулі шарового композиту. Виявлено вплив на міцність композитних матеріалів та визначено максимальні залишкові деформації.

Узагальнюючи, робота виявила ключові аспекти поведінки шарових композитів під навантаженням, вказуючи на важливість розгляду явищ витягування волокон та використання CZM для точніших розрахунків.

Література

1. R. Higuchi, R. Aoki, T. Yokozeki & T. Okabe (2020) Evaluation of the in-situ damage and strength properties of thin-ply CFRP laminates by micro-scale finite element analysis, *Advanced Composite Materials*, 29:5, 475-493, DOI: 10.1080/09243046.2020.1740867
2. ISO 527-1 Plastics — Determination of tensile properties —
3. ISO 604 Plastics — Determination of compressive properties —
4. ANDRZEJ MILENIN, DOROTA JOANNA BYRSKA, OLEXANDR GRYDIN, MIRKO SHAPER. THE EXPERIMENTAL RESEARCH AND THE NUMERICAL MODELING OF THE FRACTURE PHENOMENA IN MICRO SCALE Vol. 10, 2010, No. 2.
5. D883 – 17 Standard Terminology Relating to Plastics
6. D3878 – 16 Standard Terminology for Composite Materials
7. A. A. TSENG AND J. Zou, H. P. WANG, S. R. H. HOOLE, Numerical Modeling of Macro and Micro Behaviors of Materials in Processing" A Review, *JOURNAL OF COMPUTATIONAL PHYSICS* 102, 1--17 (1992),
8. D638 – 14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
9. *Advanced Composite Materials*, 2020 Vol. 29, No. 5, 475–493, <https://doi.org/10.1080/09243046.2020.1740867>
10. S.R. Hallett, P.W. Harper, Modelling delamination with cohesive interface elements (2015) Vol. 18, No. 2
11. Panos Papanastasiou and Ernestos Sarris, Cohesive zone models (2017) Vol. 26, No. 6
12. A. PIRONDI and F. MORONI, Simulating fatigue failure in bonded composite joints using a modified cohesive zone model (2011) Vol. 36, No. 12
13. Kawabe K, Tomoda S, Matsuo T. A pneumatic process for spreading reinforcing fiber tow. Proceedings of the 42nd international SAMPE symposium & exhibition; 1997 May 4–8; Anaheim (CA): SAMPE; 1997. p. 65–76.
14. Yamamoto G, Onodera M, Koizumi K, et al. Considering the stress concentration of fiber surfaces in the prediction of the tensile strength of

- unidirectional carbon fiber-reinforced plastic composites. *Compos Part A Appl S.* 2019;121:499–509.
15. Takahashi T, Ueda M, Iizuka K, et al. Simulation on kink-band formation during axial compression of a unidirectional carbon fiber-reinforced plastic constructed by X-ray computed tomography images. *Adv Compos Mater.* 2019;28(4):347–363.
 16. Jagannathan N, Gururaja S, Manjunatha CM. Matrix crack evolution in multi-directional composite laminates considering thickness effects. *Adv Compos Mater.* 2018;27(6):541–560.
 17. Higuchi R, Yokozeki T, Nagashima T, et al. Evaluation of mechanical properties of noncircular carbon fiber reinforced plastics by using XFEM-based computational micromechanics. *Compos Part A Appl S.* 2019;126:105556.
 18. Onodera S, Okabe T. Three-dimensional analytical model for effective elastic constants of transversely isotropic plates with multiple cracks: application to stiffness reduction and steady-state cracking of composite laminates. *Eng Fract Mech.* 2019;219:106595.
 19. Okabe T, Onodera S, Kumagai Y, et al. Continuum damage mechanics modeling of composite laminates including transverse cracks. *Int J Damage Mech.* 2018;27(6):877–895
 20. Yoshimura A, Nagakura K, Okabe T, et al. Damage simulation of high velocity impact of CFRP laminates. *Proceedings of American society of composite 27th annual technical conference; Oct 1–3; Arlington (TX). Red Hook (NY): Curran; 2012.*
 21. Yoshioka K, Kumagai Y, Higuchi R, et al. Multiscale modeling of failure strain in off-axis tensile testing of UD-CFRP. *Mater Syst.* 2016;34:7–13. Japanese.
 22. Herráez M, Mora D, Naya F, et al. Transverse cracking of cross-ply laminates: a computational micromechanics perspective. *Compos Sci Technol.* 2015;110:196–204.
 23. R. Kiran and K. Khandelwal. A triaxiality and lode parameter dependent ductile fracture criterion. *Engineering Fracture Mechanics*, 128:121–138, 2014.

24. Watanabe J, Tanaka F, Higuchi R, et al. A study of stress concentrations around fiber breaks in unidirectional CF/epoxy composites using double-fiber fragmentation tests. *Adv Compos Mater.* 2018;27(6):575–587.
25. Papanastasiou, P., Papamichos, E., Atkinson, C., 2016. On the risk of hydraulic fracturing in CO₂ geological storage. *Int. J. Numerical Analyt. Meth. Geomech.* Available from: <http://dx.doi.org/10.1002/nag.2502>.
26. Chen, Z., 2012. Finite element modeling of viscosity-dominated hydraulic fractures. *J. Petrol. Sci. Eng.* Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2011.12.021>.
27. Milenin, A., Kustra, P., 2008, The multiscale FEM simulation of wire fracture phenomena during drawing of Mg alloy, *Steel Research International*, 79, 717–722.
28. Pironi, A. and Moroni, F. (2009) An investigation of fatigue failure prediction of adhesively bonded metal/metal joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives* Vol. 29, pp. 796–805.
29. Maiti, S. and Geubelle, PH. (2005) A cohesive model for fatigue failure of polymers. *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 72, pp. 691–708.
30. Turon, A. Dávila, C.G, Camanho, P.P. and Costa, J. (2007) An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models. *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 74, pp. 1665–1682.
31. Muñoz, J.J., Galvanetto, U. and Robinson, P. (2006) On the numerical simulation of fatigue driven delamination with interface element. *International Journal of Fatigue* Vol. 28, pp. 1136–1146.
32. Pardoën, T., Ferracin, T., Landis, C.M. and Delannay, F. (2005) Constraint effects in adhesive joint fracture. *Journal of Mechanics and Physics of Solids* Vol. 53, pp. 1951– 1983.