

УДК 620

<https://doi.org/10.34185/tpm.2.2024.09>

Білодєденко С.В., Іщенко А.О., Рассохін Д.О., Бєм Р.

## Теоретичне визначення міцності композитного матеріалу в умовах всебічного стиснення

Bilodedenko S.V., Ischenko A.O., Rassokhin D.O., Böhm R.

## Theoretical determination of the strength of composite material under conditions of comprehensive compression

**Мета.** Метою дослідження є теоретичне обґрунтування міцності вітчизняного композитного матеріалу в умовах всебічного стиснення та створення моделі, яка дозволяє передбачити поведінку матеріалу під навантаженнями.

**Методика.** У дослідженні використано метод кінцевих елементів (МКЕ) для моделювання напружено-деформованого стану композитного матеріалу. Експериментальна частина включала підготовку багат шарових зразків з полімерними композитними матеріалами, їхнє механічне навантаження в умовах всебічного стискування та порівняння результатів з розрахунковими даними. Додатково застосовано параметричне моделювання в середовищі Ansys Workbench для вивчення впливу змінних, таких як товщина шару та прикладена сила.

**Результати.** Отримано залежності між товщиною композитного шару, величиною навантаження та деформаційними характеристиками матеріалу. Найкращі механічні властивості виявлено у зразків з товщиною шару 2 мм, які демонструють оптимальний баланс між міцністю та здатністю до поглинання енергії. Моделювання показало, що найбільші напруження виникають на межі контакту полімерного шару з металевією основою, що вказує на необхідність поліпшення адгезійних властивостей.

**Наукова новизна.** Запропоновано параметричну модель для аналізу напружено-деформованого стану полімерних композитних матеріалів. Удосконалено методику оцінки міцності багат шарових композитів в умовах всебічного стиснення, що дозволяє враховувати взаємодію шарів та їхніх геометричних параметрів.

**Практична значущість.** Результати дослідження можуть бути використані для розробки нових композиційних матеріалів з поліпшеними механічними властивостями для застосування в авіаційній, автомобільній та енергетичній промисловостях. Рекомендації щодо оптимізації товщини шарів і технології виготовлення дозволять підвищити довговічність і ефективність композитних конструкцій.

**Ключові слова.** Композитні матеріали, всебічне стиснення, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан, міцність, адгезійні властивості.

**Purpose.** The aim of the study is to theoretically substantiate the strength of domestic composite material under conditions of comprehensive compression and to create a model that allows predicting the behavior of the material under loads.

**Methodology.** The study used the finite element method (FEM) to model the stress-strain state of the composite material. The experimental part included the preparation of multilayer specimens with polymer composite materials, their mechanical loading under conditions of comprehensive compression, and comparison of the results with the calculated data. Additionally, parametric modeling in the Ansys Workbench environment was used to study the effect of variables such as layer thickness and applied force.

**Findings.** The dependencies between the thickness of the composite layer, the load, and the deformation characteristics of the material were obtained. The best mechanical properties were found in samples with a layer thickness of 2 mm, which demonstrate an optimal balance between strength and energy absorption. Modeling has shown that the highest stresses occur at the interface between the polymer layer and the metal substrate, indicating the need to improve the adhesive properties.

**Originality.** A parametric model for analyzing the stress-strain state of polymeric composite materials is proposed. The methodology for assessing the strength of multilayer composites under conditions of comprehensive compression has been improved, which allows taking into account the interaction of layers and their geometric parameters.

**Practical value.** The results of the study can be used to develop new composite materials with improved mechanical properties for use in the aviation, automotive, and energy industries. Recommendations for optimizing the thickness of layers and manufacturing technology will increase the durability and efficiency of composite structures.

**Keywords.** Composite materials, comprehensive compression, finite element method, stress-strain state, strength, adhesive properties.

**Вступ.** Застосування полімерних композитних матеріалів у конструкціях пов'язане з певними ризиками, пов'язаними з їхньою чутливістю до дефектів, що виникають за значних механічних і термічних навантажень. Використання таких матеріалів у відповідальних конструкціях, наприклад, газотурбінних установках, авіаційних і автомобільних компонентах, хімічному та енергетичному обладнанні, обмежується необхідністю підвищеної

міцності та стійкості до пошкоджень. Тому актуальним залишається завдання розроблення композитних матеріалів із високою стійкістю до пошкоджень, які б зберігали ключові властивості, такі як термостійкість, міцність і стійкість до впливу агресивних середовищ.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Полімерні композити з підвищеною стійкістю до пошкоджень часто мають

© Білодєденко С.В. – д.т.н., проф. УДУНТ  
Іщенко А.О. – д.т.н., проф. ПДТУ  
Рассохін Д.О. – к.т.н., доц. м.Лейпциг, Німеччина  
Бєм Р. – проф. м.Лейпциг, Німеччина

Bilodedenko S. – d.t.s., profssor, USUST  
Ischenko A. – d.t.s., profssor,  
Rassokhin D. – c.t.s., docent  
Böhm R. – professor

багат шарову структуру, де кожен шар виконує специфічну функцію, що дає змогу застосовувати різні механізми, які уповільнюють розвиток тріщин. Наприклад, шари можуть сприяти відхиленню і розсіюванню енергії, що знижує ризик поширення дефектів і збільшує термін служби матеріалу. Особливо перспективним є створення багат шарових композитів з чергуванням полімерних і армованих шарів, оскільки вони можуть забезпечити меншу щільність порівняно з традиційними металевими сплавами, зберігаючи при цьому високі характеристики міцності. У дослідженні [1] використовували метод скінченних елементів (МСЕ) для аналізу міцності багат шарових композитних матеріалів під дією різних навантажень, включно з одноосовим і двоосовим стисненням. Основною перевагою методу є можливість точного моделювання напружено-деформованого стану та прогнозування зон концентрації напружень, що критично важливо для оцінки надійності матеріалів. Результати показали, що напруження руйнування істотно залежать від типу навантаження і конфігурації шарів. Для композитів, армованих волокнами (наприклад, E-glass і T300), основне руйнування спостерігалось за подовжнього стиснення волокон, а також за міжшарових пошкоджень. Аналіз граничних діаграм міцності виявив області, де матеріали демонструють високу стійкість, і ділянки, які потребують поліпшення адгезійних властивостей між шарами. У статті [2] представлено універсальний критерій міцності для анізотропних матеріалів, що ґрунтується на використанні двох тензорів міцності (2-го і 4-го рангу). Цей критерій дає змогу враховувати складні взаємодії між компонентами напружень, а також відмінності в поведінці матеріалу за позитивних і негативних навантажень. Метод адаптовано для різних симетрій матеріалів, таких як ізотропні, ортотропні та трансверсально ізотропні конфігурації.

Результати дослідження показали, що застосований метод успішно пророкує характеристики міцності матеріалів за одновісних і багатовісних навантажень, включно зі зрушенням і стисненням.

Дослідження, спрямоване на аналіз руйнування композитних матеріалів, армованих волокнами, з використанням феноменологічних моделей на фізичній основі було розглянуто [3]. Моделі враховують нелінійні залежності напружень і деформацій, що дає змогу більш точно передбачати механічну поведінку ламінованих матеріалів. Дослідження показало, що найнебезпечнішою є зона, де стиснення спричиняє похилі тріщини, що провокують "вибуховий" ефект і деламінацію. Проте після утворення тріщин матеріали зберігають здатність сприймати навантаження, що відображено в поступовій деградації параметрів жорсткості. Результати дослідження дають змогу прогнозувати зони ризику руйнування для різних композитних структур, що особливо важливо під час проєктування елементів, які зазнають складних комбінованих навантажень.

Для дослідження механізмів руйнування застосовується безліч методів. Одним із таких є дослідження мікробуклінгу (мікрозатиску) волокон у композитах [4]. Мікробуклінг є основним механізмом руйнування під час поздовжнього стискання. Аналіз показує, що початкова кривизна волокон і пластичність матриці відіграють ключову роль у формуванні смуг зламу.

Моделювання структурної стійкості було розглянуто [5]. Розроблено дворівневу модель, яка враховує початкову кривизну волокон і нелінійну поведінку матриці. Показано, що такі параметри, як послідовність укладання шарів і товщина шарів, значно впливають на міцність під час стискання. Мікромеханічне моделювання руйнувань було розглянуто [6]. Використовувався метод кінцевих елементів для створення "діаграм граничних станів" у вуглепластикових ламінатах. Аналіз дав змогу виявити два основні механізми руйнування: зсувне руйнування волокон і їхній вигин (kinking). Ці дані дають змогу прогнозувати поведінку матеріалів під складними навантаженнями. Вплив товщини ламінатів на міцність, було розглянуто [7]. Автори дослідження дійшли висновку, що збільшення товщини ламінатів знижує міцність через дефекти, такі як викривлення волокон і пористість. Питання впливу геометричних параметрів на міцність є основоположними при дослідженні стійкості полімерних матеріалів. Проведено експериментальне дослідження впливу геометричних параметрів на міцність [8]. Показано, що дефекти виробництва відіграють ключову роль у зниженні міцності. Ці дослідження підкреслюють ключові фактори, що впливають на міцність композитних матеріалів під час стиснення, такі як дефекти структури, початкова кривизна волокон, послідовність укладання і нелінійна поведінка матриці. Застосування теоретичних моделей і чисельних методів (МСЕ) дає змогу точніше прогнозувати руйнування й оптимізувати дизайн матеріалів. Застосування МСЕ, у поєднанні з мікромеханічними моделями, дало змогу створити інструменти для точного прогнозування поведінки композитів і розроблення нових структур із поліпшеними характеристиками міцності та довговічності. При цьому численні дослідження підтверджують необхідність вивчення геометричних параметрів на міцність. Однак у науково-технічній літературі недостатньо розрахункових моделей, що описують напружено-деформований стан багат шарових полімерних композитів, які дають змогу прогнозувати їхні властивості залежно від характеристик і товщини кожного шару.

#### **Мета і завдання дослідження.**

Для виконання підготовки до випробувань було розроблено схеми створення композитних зразків. Основним завданням розроблення таких схем є забезпечення надійності з'єднання композитного шару з металевою основою, а також створення оптимальних умов для дослідження механічних характеристик матеріалу в процесі випробувань.

Зразок включає такі ключові елементи:

Сталевий зразок, що являє собою металеву основу, яка має високу міцність і стабільність форми. Він служить базою для нанесення композитного шару. Композитний шар, нанесений на металеву основу. Цей шар має задалегідь задані фізико-

механічні характеристики, такі як міцність, еластичність і стійкість до зовнішніх впливів. Шар виконано з двокомпонентного матеріалу ДК-2, розробленого в ДВНЗ "ПДТУ". Технічні характеристики представлені в таблиці 1.

**Таблиця 1 – Технічні характеристики матеріалу ДК-2**

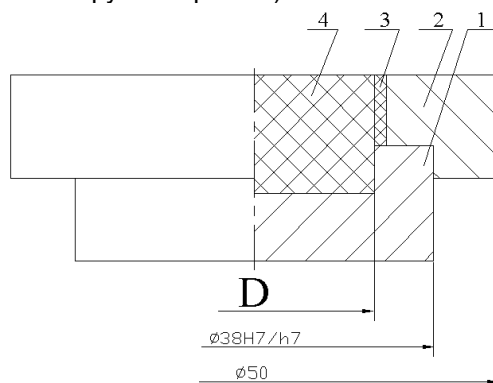
Консистенція		Рідкий
Співвідношення компонентів суміші	вага	4:1
Смола/Затверджувач		
Питома вага (суміші)	г/см <sup>3</sup>	1,6
Час обробки	20°С/хв.	60
Час затвердіння	20°С/ч.	24
Повне затвердіння / повне хімічне навантаження	20°С/діб	7
Температурна стійкість	°С	-20/+90
Колір		зелений
Кількість для 1 м <sup>2</sup> за товщини шару в 0,35 мм	г	500
Мінімальна температура застосування	°С	+15
Мінімальна товщина шару	мм	0,35
Максимальна вологість повітря	%	75
Зберігання	місяці	36

Схема включає кілька геометричних параметрів, які мають важливе значення для подальших випробувань:

- Діаметр (D) зразка - ключовий параметр, що визначає загальну площу випробуваної поверхні. Значення діаметра становило 12 мм.
- Товщина заглиблення в металевому корпусі (h), яка задає глибину, на яку композитний матеріал може бути інтегрований в основу, забезпечуючи надійне зчеплення. Для всіх зразків заглиблення становило 3 мм.
- Надлишок матеріалу (δ), що утворюється в результаті накладення композитного шару поверх

металевої основи. Цей параметр враховується для аналізу надлишкового об'єму і можливих змін у геометрії шару, а також впливу на його несучу стійкість. Надлишок матеріалу був прийнятий 1, 2 і 3 мм.

Зразки з полімерного композитного матеріалу були сформовані шляхом заповнення попередньо підготовлених металевих основ полімерною композицією. Висоту полімерного шару суворо контролювали, використовуючи знімні пластикові кришки, товщина яких була розрахована і відповідала заданій товщині майбутнього полімерного шару (рис. 1).



**Рисунок 1. Форма для виготовлення зразків: 1 - корпус; 2 - кришка; 3 - пластмасове кільце; 4 - металополімер**

Для моделювання механізмів руйнування полімерного матеріалу, укладеного в обмеженому об'ємі, застосовували метод скінченних елементів (МСЕ). Цей метод передбачає дискретизацію поверхні та об'єму матеріалу на безліч малих одиничних елементів, кожен з яких характеризується власним тензором напружень і деформацій. Цей підхід дає змогу точно описувати розподіл напружень і деформацій у кожному елементі, що критично важливо для прогнозування локальних зон напружень, схильних до руйнування. МСЕ також враховує

взаємний вплив елементів, що робить його ефективним інструментом для аналізу складних навантажувальних умов і моделювання процесу руйнування матеріалу в умовах стиснення. Для глибшого розуміння механічних характеристик полімерного композитного матеріалу, а також для прогнозу його поведінки під навантаженнями, важливо доповнити експериментальні дослідження аналітичними розрахунками. Такий підхід дає змогу з високою точністю моделювати процес

руйнування матеріалу й оцінювати його стійкість в умовах стиснення.

Для цих цілей використовують метод скінченних елементів (МСЕ), який дає змогу деталізовано описати напружено-деформований стан матеріалу. У рамках цього методу об'єкт розрахунку розбивають на безліч малих елементів, для кожного з яких формують систему рівнянь, що враховує зв'язки із сусідніми елементами. Ця система описується основними рівняннями, що зв'язують параметри, як от напруження, деформації та переміщення. Таким чином, МСЕ дає змогу створити комплексну математичну модель, що відображає розподіл внутрішніх напружень і зону критичних навантажень у матеріалі.

Для моделювання механізмів руйнування полімерного матеріалу, укладеного в обмеженому об'ємі, застосовується метод скінченних елементів (МСЕ). Нижче наведено основні формули, що

використовуються в цьому методі для розрахунку напружень і деформацій.

Основне рівняння рівноваги

Ключове завдання МСЕ - розв'язання рівнянь рівноваги, що описуються глобальною матрицею жорсткості системи, яка враховує взаємодію всіх елементів. Для будь-якого вузла скінченної елементної сітки рівняння рівноваги описується матрицею жорсткості, що зв'язує вузлові переміщення із зовнішніми силами:

$$F = K \cdot u \quad (1)$$

де:

$K$  - глобальна матриця жорсткості системи, що залежить від механічних властивостей матеріалу і геометрії елементів,

$u$  - вектор вузлових переміщень,

$F$  - вектор зовнішніх сил, прикладених до вузлів.

Представимо вираз (1) у матричному вигляді.

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1m} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

де

$k_{nm}$  - жорсткість за ступенями свободи  $mn$ ,

$u_n$  - невідоме переміщення за ступенем свободи  $n$ ,

$F_n$  - навантаження за  $n$ -м ступенем свободи.

Для кожного кінцевого елемента матриця жорсткості формується на основі його геометрії та механічних властивостей:

$$K_e = \int_V B^T D B dV \quad (3)$$

де:  $K_e$  - локальна матриця жорсткості елемента,  $B$  - матриця градієнтів форми (залежить від форми елемента),  $D$  - матриця пружних констант, що залежить від властивостей матеріалу, наприклад, для ізотропних матеріалів - модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона),  $V$  - об'єм елемента.

Таким чином рівняння для кінцевого елемента матиме вигляд:

$$K_e^{(i)} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{12}{h^2} G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12}{h^2} G_{23} \end{bmatrix} \quad (4)$$

де

$E_i$  - модулі пружності,

$\nu_{ij}$  - коефіцієнти Пуассона,

$G_{ij}$  - модулі зсуву.

Деформація визначається за формулою:

$$\varepsilon = D \cdot u \quad (5)$$

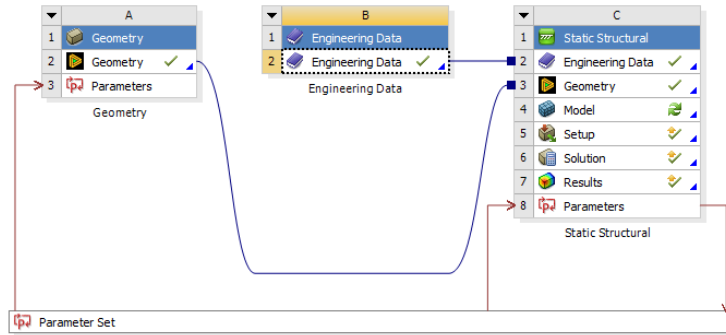
де  $\varepsilon$  - тензор деформацій,

$D$  - тензор операторів диференціювання.

**Результати дослідження.**

Для виконання моделювання процесу стиснення полімерного матеріалу використовували розрахункове середовище Ansys Workbench, що надає широкі можливості для аналізу складних механічних процесів. З огляду на те, що геометрія досліджуваного об'єкта містить змінні, такі як висота полімерного шару і крок навантаження, було

ухвалено рішення використовувати параметричну модель розрахунку. Такий підхід дозволив провести серію розрахунків із різними значеннями параметрів, забезпечуючи можливість вивчення впливу зміни геометричних і навантажувальних характеристик на напружено-деформований стан матеріалу (рис. 2, 3).



**Рисунок 2. Схема розрахунку в середовищі Ansys Workbench**

Properties of Outline Row 3: DK-2			
A	B	C	
Property	Value	Unit	
1	Material Field Variables	Table	
2	Density	950	kg m <sup>-3</sup>
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
4	Coefficient of Thermal Expansion	0,00023	C <sup>-1</sup>
5	Isotropic Elasticity		
6	Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
7	Young's Modulus	650	MPa
8	Poisson's Ratio	0,42	
9	Bulk Modulus	1,3542E+09	Pa
10	Shear Modulus	2,2807E+08	Pa
11	Tensile Yield Strength	2,5E+07	Pa
12	Compressive Yield Strength	0	Pa
13	Tensile Ultimate Strength	3,3E+07	Pa
14	Compressive Ultimate Strength	0	Pa
15	Isotropic Thermal Conductivity	0,28	W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
16	Specific Heat Constant Pressure, C <sub>p</sub>	2300	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>

**Рисунок 3. Міцнісні властивості полімерного матеріалу ДК2**

Результати навантаження показали картину, аналогічну реальному випробуванню полімеру на стиск, рис. 4.

Table of Design Points						
A	B	C	D	E	F	G
Name	P1 - Extrude3,FD4	P2 - Force Magnitude	P3 - Directional Deformation Maximum	Retain	Retained Data	Note
1	Units	mm	N	mm		
2	DP 0 (Current)	3,2	10000	0,90063	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	DP 6	3,2	20000	1,8013	<input type="checkbox"/>	
4	DP 7	3,2	30000	2,7019	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	DP 8	2,16	10000	0,65929	<input type="checkbox"/>	
6	DP 9	2,16	20000	1,3186	<input type="checkbox"/>	
7	DP 10	2,16	30000	1,9779	<input type="checkbox"/>	
8	DP 11	1,17	10000	0,50948	<input type="checkbox"/>	
9	DP 12	1,17	20000	1,019	<input type="checkbox"/>	
10	DP 13	1,17	30000	1,5285	<input type="checkbox"/>	

**Рисунок 4. Таблиця змінних значень висоти полімеру, кроку навантаження і деформації**

**Аналіз таблиці змінних значень висоти полімеру, кроку навантаження і деформації**

У таблиці представлено результати параметричного розрахунку процесу стиснення полімерного шару з використанням Ansys Workbench. Модель враховувала такі змінні: висота полімерного шару (P1), прикладене навантаження (P2) і максимальна спрямована деформація (P3). Ці параметри дали змогу оцінити вплив товщини полімерного шару і величини навантаження на деформаційні характеристики матеріалу.

**Структура таблиці**

**P1 - Висота полімерного шару (мм):** Значення: 3,2 мм, 2,16 мм і 1,17 мм. Змінна P1 визначає

початкову висоту полімерного шару перед застосуванням навантаження. Різні значення висоти використовувалися для аналізу впливу товщини шару на його стійкість до деформацій.

**P2 - Прикладена сила (N):** Значення: 10 000 Н, 20 000 Н і 30 000 Н. Величина навантаження варіювалася ступінчасто для визначення залежності деформації матеріалу від прикладеної сили.

**P3 - Максимальна спрямована деформація (мм):** Значення деформації варіюються в діапазоні від 0,50948 мм до 2,7019 мм залежно від комбінації висоти шару та величини навантаження (рис.20). Ця змінна дає змогу оцінити ступінь деформації полімерного шару за заданих умов (Рис.5).

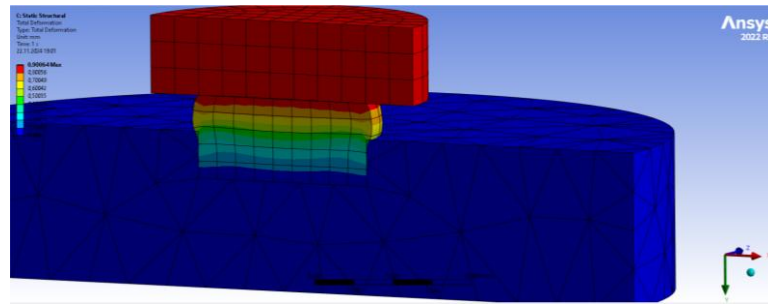


Рисунок 5. Процес аналізу деформації полімерного зразка

**Висота шару 3,2 мм:** При навантаженні 10 000 Н деформація становить 0,90063 мм, що вказує на початкову стадію пружної поведінки матеріалу. При навантаженні 20 000 Н деформація збільшується до 1,8013 мм, а при 30 000 Н досягає 2,7019 мм. Деформація зростає майже лінійно зі збільшенням навантаження, що свідчить про збереження пружних властивостей матеріалу, незважаючи на збільшення товщини.

**Висота шару 2,16 мм:** При навантаженні 10 000 Н деформація становить 0,65929 мм, що менше, ніж у шару завтовшки 3,2 мм при тому ж навантаженні. Це пов'язано з меншою податливістю більш тонкого шару. При навантаженні 20 000 Н деформація зростає до 1,3186 мм, а при 30 000 Н - до 1,9779 мм. Полімерний шар товщиною 2,16 мм демонструє кращу стійкість до деформацій за середніх і високих навантажень, що робить його

оптимальним для умов, де потрібен баланс між міцністю і гнучкістю.

**Висота шару 1,17 мм:** При навантаженні 10 000 Н деформація становить лише 0,50948 мм, що підтверджує найбільшу жорсткість і стійкість найтоншого шару. При навантаженні 20 000 Н деформація збільшується до 1,019 мм, а при 30 000 Н - до 1,5285 мм. Тут деформація перевищила висоту полімеру, це свідчить про повне стиснення зразка при навантаженні в 30кН. Отже, такий рівень навантаження для зразка з висотою шару 1,17 мм не може бути застосовним. Тонкий шар демонструє мінімальні деформації, проте його малий обсяг може обмежувати здатність поглинати енергію.

#### Порівняльний аналіз

Більш товсті шари (3,2 мм) схильні до більших деформацій за однакових навантажень через їхню більшу податливість (рис. 6).

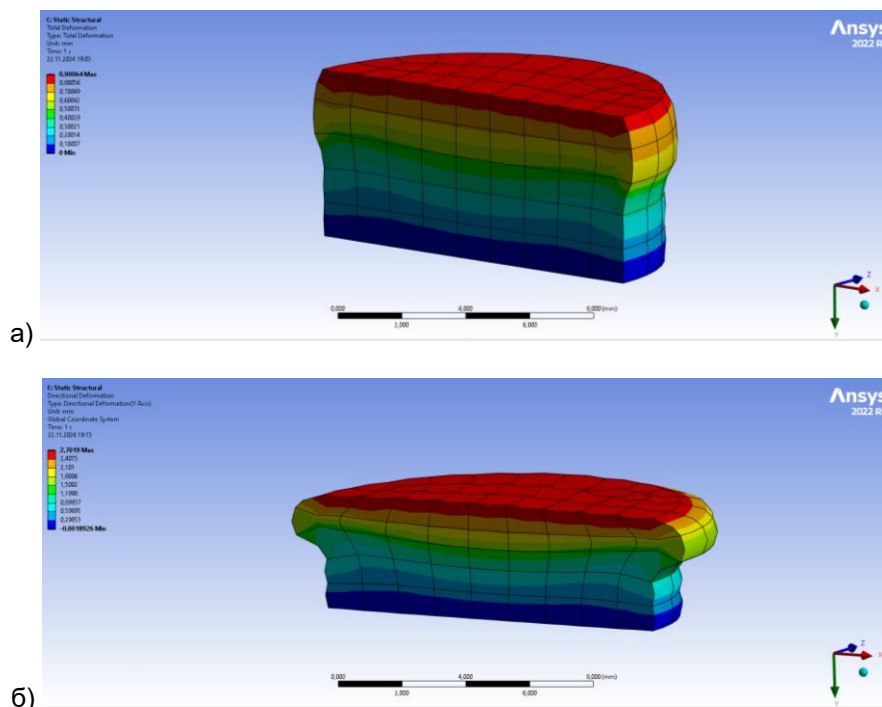


Рисунок 6. Розподіл деформацій під час навантаження полімерного зразка ДК2 заввишки 3 мм а) за 10кН, б) 30кН

Тонкі шари (1,17 мм) демонструють мінімальну деформацію, що свідчить про високу жорсткість, проте їхнє застосування може бути обмежене

через низьку здатність поглинати енергію. У всіх випадках деформація зростає зі збільшенням навантаження, причому швидкість зростання

деформації вища для більш товстих шарів. Шар завтовшки 2,16 мм показує збалансовані характеристики: помірну деформацію за високого навантаження і достатню жорсткість, що робить його найбільш підходящим для умов, де потрібне поєднання міцності та гнучкості. Ці результати узгоджуються з експериментальними даними,

підтверджуючи можливість використання параметричної моделі для прогнозування механічних характеристик полімерного шару.

Розрахункова система дала змогу також проаналізувати розподіл напружень у перерізі полімерного зразка (рис. 7).

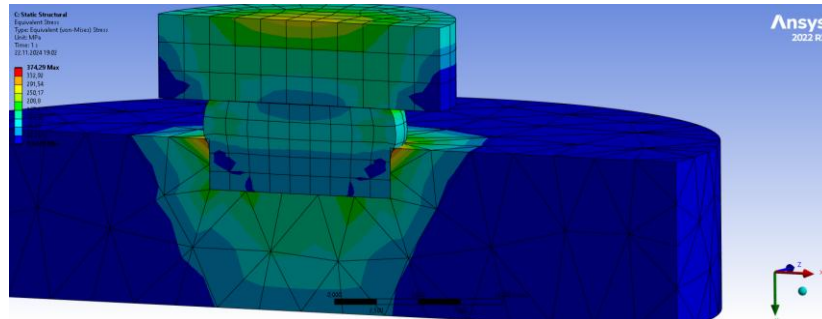


Рисунок 7. Розподіл напружень у перерізі полімерного зразка.

На рис.7 представлено результат моделювання розподілу еквівалентних напружень (напружень за Мізесом) у полімерному зразку під час стиснення, виконане в розрахунковому середовищі Ansys Workbench. Цей аналіз дає змогу оцінити зони концентрації напружень, розподіл навантаження і механічну поведінку матеріалу під стискаючим навантаженням.

Розподіл напружень

Максимальні еквівалентні напруження становлять 312 МПа, що позначено червоним кольором у ділянці контакту між полімерним шаром і

металевою основою. Високі напруження в цій зоні вказують на те, що саме тут відбувається найбільший механічний вплив, пов'язаний з передачею навантаження від верхньої частини зразка до металевої основи.

Мінімальні напруження становлять 1,587 МПа і зосереджені в центральних областях полімерного шару далеко від країв. Це зони, де напруження перерозподіляються і не досягають критичних значень.

Найбільше значення напружень зосереджене на кромці полімерного зразка (рис. 8).

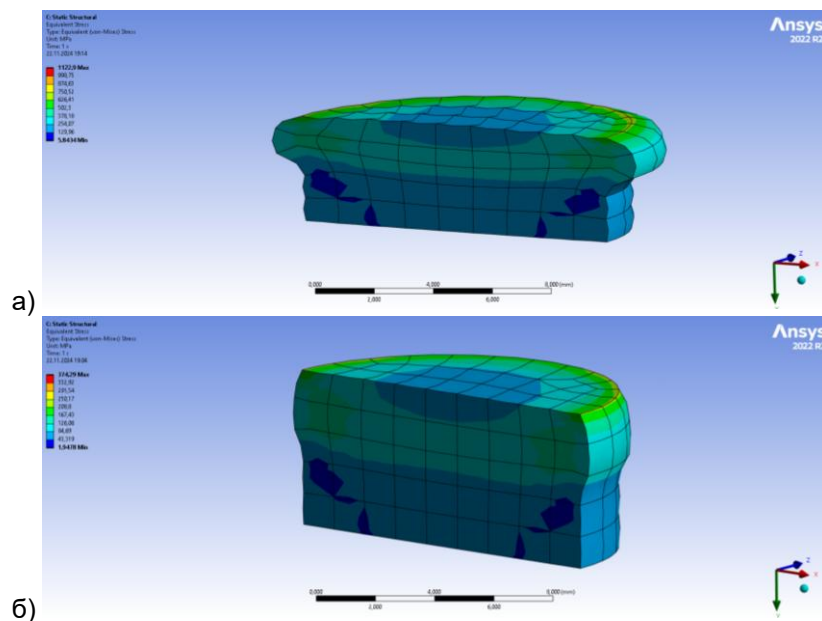


Рисунок 8. Розподіл напружень під час навантаження полімерного зразка ДК2 заввишки 3 мм а) за 10кН, б) 30кН

Основні зони концентрації знаходяться:

- На межі контакту полімерного шару з металевою основою.

- У перехідній зоні, де структура матеріалу змінюється, що підтверджується збільшенням напружень у цих областях.

- Концентрація напружень у зоні контакту вказує на необхідність вивчення адгезійних властивостей між полімером і металом, оскільки можливі відшарування або мікротріщини за високих навантажень.

#### Обговорення результатів.

Основне навантаження передається через контактні області між полімерним шаром і металевою основою. Це підтверджується наявністю максимальних напружень у зоні контакту. Полімерний шар розподіляє навантаження по своїй товщині, що сприяє зменшенню концентрації напружень у центральній частині. Полімерний шар демонструє пружнопластичну поведінку, що підтверджується плавним розподілом напружень за обсягом шару. Товщина полімерного шару впливає на розподіл напружень: більш товсті шари краще поглинають навантаження, але створюють зони концентрації напружень на кордонах контакту. Зони з максимальними напруженнями (на межі контакту) схильні до найбільшого ризику руйнування. Це може призвести до відшарування полімеру від металевої основи або до локального пошкодження матеріалу.

Моделювання в Ansys Workbench показало, що найбільші напруги зосереджені в зонах контакту між полімерним шаром і металевою основою. Ці області потребують особливої уваги для запобігання руйнуванню та збільшення довговічності матеріалу. Оптимізація конструкції та застосування модифікуючих добавок дадуть змогу поліпшити механічні характеристики матеріалу та його стійкість до руйнування.

#### Рекомендації до подальшого дослідження.

Необхідно провести аналіз технології виготовлення для зменшення кількості та розмірів пор у центральній частині. Розробити методи, що запобігають утворенню великих дефектів, таких як пори і тріщини. Вивчити методи підвищення зчеплення між матрицею і армувальними волокнами, щоб мінімізувати ризик відшарувань і тріщин на периферії.

Провести циклічні навантаження, щоб оцінити поведінку матеріалу при повторюваних деформаціях. Вивчити поведінку зразків за різних

швидкостей деформації для аналізу їхніх в'язкопружних властивостей.

Виконати детальний мікроструктурний аналіз зон з дефектами (центральна частина, периферія) для виявлення причин їх появи. Провести фрактографічний аналіз тріщин для визначення механізмів руйнування.

Розглянути можливість додавання модифікуючих компонентів для поліпшення характеристик міцності, наприклад наповнювачів для зменшення пористості або пластифікаторів для підвищення стійкості до руйнування.

#### Висновки.

Зразки з товщиною полімерного шару 1 мм показали високу стійкість до руйнування завдяки мінімальній пористості та рівномірній структурі. Однак через малу товщину такі зразки можуть не забезпечити достатній захист в умовах інтенсивних навантажень.

У зразків із товщиною полімерного шару 2 мм спостерігається оптимальне поєднання механічної міцності та здатності до поглинання енергії. Вони мають помірну пористість, що вимагає додаткової оптимізації технології виготовлення. Для їхнього ефективного застосування як захисного шару необхідне додаткове зміцнення матеріалу та оптимізація технології виготовлення.

Зразки з товщиною 3 мм продемонстрували найбільшу гнучкість і піддатливість, але наявність великих пір знижує їхні характеристики міцності, а перевитрата матеріалу обмежує застосування такої товщини шару.

*This research was carried out within the framework of the joint project «Development of technology for the protection and restoration of hydropower equipment with the latest domestic composite materials» under grant number 01DK24021, funded by the Ministry of Education and Science of Ukraine and the Federal Ministry of Education and Research of Germany (BMBF). The project is being implemented as part of a measure to support joint Ukrainian-German research projects for implementation in 2024-2025.*

#### Бібліографічний опис.

1. Soden P. A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates / P. Soden, M. Hinton, A. Kaddour // *Compos. Sci. Technol.* – 58(7). – 1998. – P. 1225–1254.
2. Tsai S.W. A general theory of strength for anisotropic materials / S.W. Tsai, E.M. Wu // *J. Compos. Mater.* – 5(1). – 1971. – P. 58–80.
3. Puck A. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models / A. Puck, H. Schurmann // *Compos. Sci. Technol.* – 58(7). – 1998. – P. 1045–1067.
4. Budiansky B. Compressive failure of fibre composites / B. Budiansky, N.A. Fleck // *J. Mech. Phys. Solids.* – 41(1). – 1993. – P. 183–211.
5. Drapier S. Towards a numerical model of the compressive strength for long fibre composites / S. Drapier, J.-C. Grandidier, M. Potier-Ferry // *Eur. J. Mech. A Solids.* – 18(1). – 1999. – P. 69–92.
6. Gutkin R. Micro-mechanical modelling of shear-driven fibre compressive failure and of fibre kinking for failure envelope generation in CFRP laminates / R. Gutkin, S. Pinho, P. Robinson, P. Curtis // *Compos. Sci. Technol.* – 70(8). – 2010. – P. 1214–1222.
7. Lee J. Thickness effect on the compressive strength of T800/924C carbon fibre/epoxy laminates / J. Lee, C. Soutis // *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.* – 36(2). – 2005. – P. 213–227.
8. Lee J. A study on the compressive strength of thick carbon fibre/epoxy laminates / J. Lee, C. Soutis // *Compos. Sci. Technol.* – 67(10). – 2007. – P. 2015–2026.
9. Soutis C. Size effect on compressive strength of T300/924C carbon fibre-epoxy laminates / C. Soutis, J. Lee, C. Kong // *Plast. Rubb. Compos.* – 31(8). – 2002. – P. 364–370.

*Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 01.09.2024*

*Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.09.2024*