УДК 620.168.34

МАКОВСЬКИЙ В. Р., ЧЕМЕРИС А. О.*
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ МІЦНОСТІ ЗЧЕПЛЕННЯ МІЖ ШАРАМИ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

В сучасному світі елементи конструкцій з композиційних полімерних матеріалів (КПМ) набули всебічного застосування в різних галузях машинобудування. Одним із інноваційних напрямів використання КПМ є створення композиційних мембран на основі різного набору полімерів та тканини. За результатами аналізу літературних джерел обрано напрям дослідження міцності зчеплення шарів банерної тканини.
Метою даної роботи є побудова розрахункової моделі та числовий аналіз міцності зчеплення шарів КПМ, що може спонукати до розробки нових матеріалів з покращеними механічними та фізичними властивостями. Це забезпечить їх більш широке застосування в різних галузях промисловості, науки та технологій.
Розроблені методи дозволяють достеменно оцінити міцність зчеплення між шарами КПМ і можуть бути використані як під час виробництва КПМ, так і під час створення нових конструкцій на основі композиційних полімерних матеріалів.

Ключові слова: *композиційні полімерні матеріали, дефекти, міцність зчеплення, еквівалентні напруження, клейовий шар, метод скінченних елементів, текстильні структури.*

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2023.276445

*Corresponding author: chao73@gmail.com
Received 19 February 2023; Accepted 23 March 2023

Постановка проблеми. Міцність зчеплення між шарами композиційних полімерних матеріалів є критичним фактором, що визначає експлуатаційні характеристики та довговічність композитної конструкції. Однак дослідження підвищення міцності пов'язані з низкою викликів і проблем, що потребують вирішення. Однією з основних проблем є відсутність стандартних методів вимірювання міцності зчеплення шарів, що призводить до використання різними дослідниками різних методів та обладнання, а це, в свою чергу, призводить до відсутності порівнянності результатів. Крім того, складна структура композитних матеріалів, з різними шарами різного складу, може ускладнювати отримання точних і надійних вимірювань міцності. Тому виникає потреба розроблювати універсальну методику на базі числових методів, що і буде реалізовано в статті.

Аналіз попередніх досліджень. Текстильні композити мають низку переваг для створення ефективних легких конструкцій. Хвилястість тканинної або плетеної структури забезпечує притаманне їй позаплощинне армування. Ці властивості можуть бути дуже корисними, особливо в застосуванні для поглинання енергії удару. Однак підвищена мікроструктурна складність, порівняно з традиційними односпрямованими композитами, також створює проблему характеризації та аналізу.

Ефективний підхід до прогнозування руйнування текстильних композитів повинен включати кілька ключових моментів: він повинен базуватися на унікальних характеристиках текстильних композитів і відображати відповідні механічні наслідки; він має бути надійним у застосуванні при різних навантаженнях.

Масштаб мікрорівня текстильного композиту фізично більший і геометрично складніший, ніж односпрямований композит. Таким чином, багато поширених припущень і традиційні методи аналізу порушуються [1]. Напружений стан і властивості матеріалу неоднорідні, тобто не існує одношарового напруження, як у класичній теорії багатошарових матеріалів.

У дослідженні [2] авторами було представлено розробку квадратичних критеріїв руйнування для ефективного прогнозування руйнування текстильних композитів, з врахуванням градієнтів напружень на мікрорівні.

Оцінка сучасних текстильних композитних конструкцій часто базуються на добре відомих феноменологічних критеріях руйнування, переважно на критерії максимального напруження, максимальної деформації та критерії квадратичної взаємодії, які були використані авторами Цай-Хілла та Цай-Ву [4].

© The Author(s) 2023. Published by Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. This is an Open Access article distributed under the terms of the license CC BY 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits re-use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Початкове і прогресуюче руйнування композитного матеріалу полотняного переплетення з використанням скінченно-елементного аналізу дало змогу отримати уявлення про режими руйнування в умовах осьового навантаження [5, 6]. Точний розподіл напружень для композитних матеріалів полотняного переплетення при згині, а також ефективну жорсткість для багатошарових зразків досліджено в [7]. Бінарна модель [9, 10] використовує одномірні лінійні елементи для представлення волоконної стрічки, вбудованої в об'ємну матрицю. Це дозволяє проводити швидкий і ефективний аналіз будь-якого текстильного переплетення. Деякі деталі поля напружень на мікрорівні втрачаються, зберігаючи при цьому точне представлення на макрорівні.

Аналітичний метод мозаїчної моделі [12, 13] представляє текстильний композит, як сукупність гомогенізованих блоків, для яких класична теорія багатошарових пластин може бути використана для визначення глобальної матриці жорсткості. Метод може бути легко застосований для визначення жорсткості в площині багатошарових зразків, але ефективність в умовах згину може бути обмежена.

Ефективне прогнозування міцності на стиск плетених текстильних композитів з використанням детальної мікромеханічної моделі та експериментальної перевірки було виконано в роботах [14, 15]. Проведено аналіз зминання та показано вплив хвилястості та мікроархітектури на міцність на стиск.

Роботи авторів [1,3] розширили метод, відомий як метод прямої мікромеханіки [17] (DMM), для побудови огинаючих руйнувань та квадратичного градієнту напружень теорії руйнування для текстильного композиту полотняного переплетення.

При наявності декількох шарів, властивості матеріалу шарів залишаються незмінними, але жорсткість і міцність композитного ламінату в цілому зміняться. Щоб розробити повністю загальну теорію руйнування, результати одношарових аналізів [1, 3] повинні бути адаптовані для врахування текстильного композиту з довільною кількістю шарів.

У зв'язку з цим запропоновано три методи аналізу:

- багатошарова пряма мікромеханіка (MDMM), пряме моделювання багатошарового композиту;
- адаптована пряма мікромеханіка (ADMM), оцінка макродеформацій в шарі, що цікавить, і застосування одношарового DMM [1];
- теорія руйнування з квадратичним градієнтом напружень (QSFT), реалізація феноменологічної квадратичної теорії руйнування за градієнтом напружень [2] до шару, що нас цікавить (без необхідності визначення нового набору коефіцієнтів руйнування, як це було зроблено для одного шару).

Також в цій роботі представлено огляд методів, розроблених для визначення жорсткості та міцності одношарового текстильного полотняного переплетення композиту, а також розвиток квадратичної теорії градієнта напружень градієнтної теорії руйнування на основі цих результатів.

Перший метод (багатошарова пряма мікромеханіка (MDMM)) є обчислювально інтенсивним, але може вважатись більш точним, ніж будь-який з інших методів.

В другому методі (адаптована пряма мікромеханіка (ADMM)) аналізується один шар, що становить інтерес, за допомогою мікромеханіки. Результуючі сили і моменти в цьому шарі отримують зі структурного аналізу.

Третій метод є найпростішим, в ньому квадратичний градієнт руйнування (QSFT) застосовується до шару, що нас цікавить.

Виявлено, що ADMM і QSFT добре порівнюються з детальним і дорогим MDMM. Обидві теорії передбачають руйнівні навантаження в межах 6% порівняно з MDMM. ADMM все ще дорогий через використання мікромеханіки. Однак, QSFT є феноменологічною моделлю і дуже добре піддається для аналізу відмов текстильних композитних пластин.

Традиційна теорія не може врахувати ефекти градієнта напружень, і отже, не підходить для текстильних композитів. Методи багатошарового прогнозування руйнування є достатньо точними та показують важливість врахування градієнтів напружень у загальній розрахунковій системі.

Мета дослідження полягає в практичному застосуванні розглянутих методів для оцінки міцності зчеплення шарів банерної тканини.

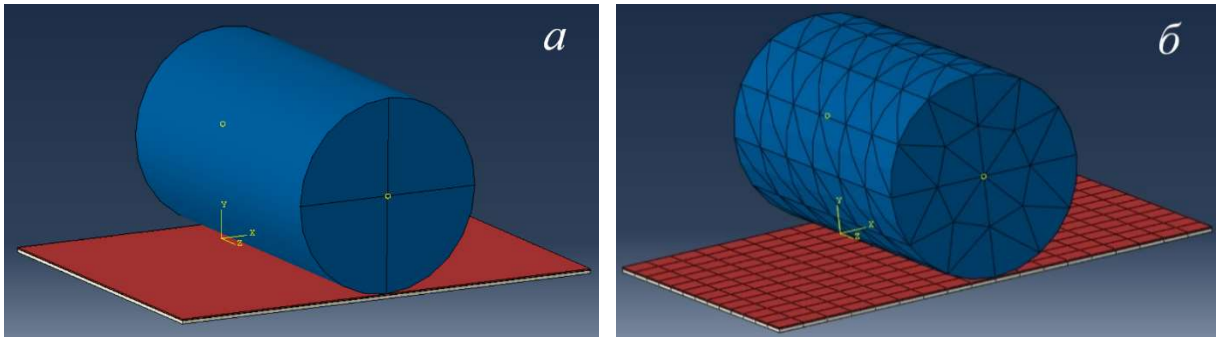
Наукова новизна. Це дослідження може включати аналіз факторів, що впливають на міцність зчеплення, таких як підготовка поверхні, тип клею, умови затвердіння та вплив навколишнього середовища. Результати дослідження можуть допомогти вдосконалити процеси проектування та виробництва композиційних матеріалів, а також підвищити їхню загальну продуктивність та надійність.

Виклад основного матеріалу. В роботі розглядається важлива і дуже розповсюджена проблема міцності зчеплення шарів банерної тканини під час проходження через зазор між валками на стадії формування. Для дослідження цієї проблеми було обрано шлях послідовних числових експериментів, які визначають

максимально допустимі напруження між шарами. Це реалізовано шляхом моделювання процесу проходження банерної тканини через зазор між валками, що представлено на рис. 1.

Для побудови 3D моделі було використано геометричні параметри складових банерної тканини:

- Полівінілхлорид, товщина шару 0,4 мм;
- Клей, товщина шару 0,1 мм;
- Поліестер, товщина шару 1 мм.



а - геометрії моделі; б – сітка скінченних елементів

Рис. 1 – Візуальне відображення моделі для подальшого проведення дослідження

Фізико-механічні характеристики матеріалів наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Фізико-механічні характеристики складових банерної тканини

Матеріал	Модуль Юнга, МПа	Коефіцієнт Пуассона	Густина, кг/м^3
Полівінілхлорид	2410	0,38	1,3
Клей	1000	0,4	0,9
Поліестер	1900	0,33	1,35

До валка прикладалось об’ємне навантаження, що притискало його до матеріалу. До самої стрічки матеріалу прикладались переміщення, що моделювали проходження матеріалу в міжвалковому зазорі за певний період часу.

Чисельне моделювання процесів контакту шарів матеріалу здійснено на основі покрокового ітераційного алгоритму послідовного навантаження на основі модифікованої Кулонівської моделі тертя:

$$F_C = \begin{matrix} \mu N \cdot \operatorname{sign} v \text{ if} |v| > 0 \\ \min\left|F_{app}\right|, \mu N \cdot \operatorname{sign} F_{app} \text{ if } v = 0 \end{matrix} \quad (1)$$

де F_C - кулонівська сила тертя, v = x - швидкість ковзання, μ - коефіцієнт тертя, N - нормальна сила контакту, F_{app} - сила, прикладена на тіло.

Для врахування розшарування композиційних матеріалів, було обрано математичну модель когезійної зони (CZM). Експоненціальна модель когезійної зони, часто використовується для моделювання росту тріщин в композиційних матеріалах. Модель має зручну для обчислень експоненціальну форму:

$$\sigma = \sigma_c \frac{\delta}{\delta_0} \exp 1 - \frac{\delta}{\delta_0} \quad (2)$$

де δ_0 – зміщення розшарування, при якому $\sigma = \sigma_c$ (пікове когезійне зчеплення).

Густина когезійної енергії в моделі рівняння (2) має вигляд:

$$\Gamma_c = \int_0^\infty \sigma d\delta = e\sigma_c\delta_0 \quad (3)$$

де e = exp(1).

Теоретично ця когезійна енергія може повністю розсіятися лише тоді, коли зміщення розшарування стає необмеженим. На практиці вважається, що повне розділення відбувається тоді, коли зміщення розшарування стає значно більшим за δ_0, скажімо, $6\delta_0$. У цей момент розсіяна енергія когезії перевищує 95% від Γ_c, а когезійне зчеплення становить менше 5% від пікового значення σ_c.

Для того, щоб врахувати початок пошкодження композиційного полімерного матеріалу через задані межі напруження/деформації було використано критерії максимального напруження і руйнування Цай-Ву. Не існує деградації властивостей матеріалу в залежності від величини ефективного напруження або параметра Цай-Ву, тому ці критерії корисні для того, щоб вказати, чи є структура пошкодженою, і потенційний ступінь пошкодження по всьому матеріалу.

Початковий розрахунок було проведено, при мінімальному навантаженні $5 \cdot 10^{-4}$ Н/мм^3. Розподіл еквівалентних напружень при цьому навантаженні наведено на рис. 2.

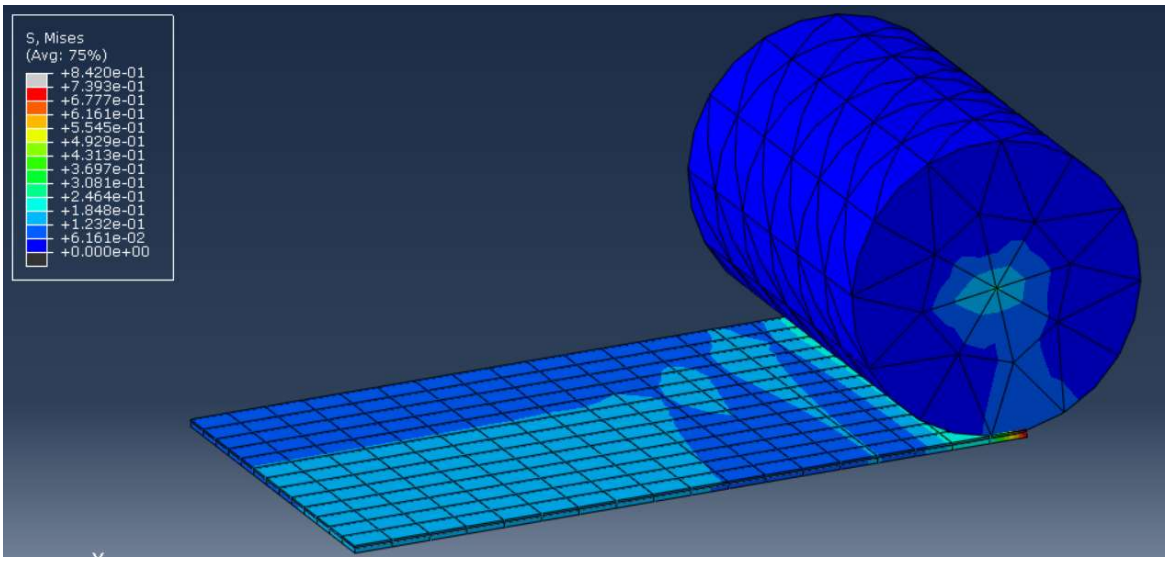


Рис. 2 – Еквівалентні напруження при проходженні матеріалу через зазор між валками при навантаженні $5 \cdot 10^{-4}$ Н/мм^3

На основі початкового розрахунку замірюємо максимальне значення еквівалентного напруження в шарі клею для подальшого порівняння (рис. 3) та відстань, на яку клейовий шар перемістився від основи (рис. 4).

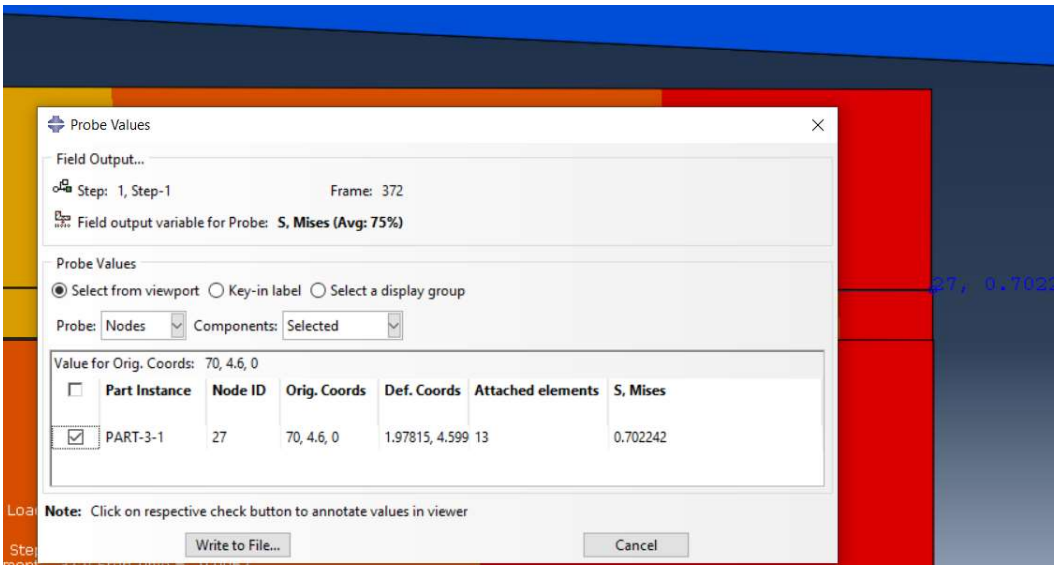


Рис. 3 – Максимальні еквівалентні напруження в клейовому шарі

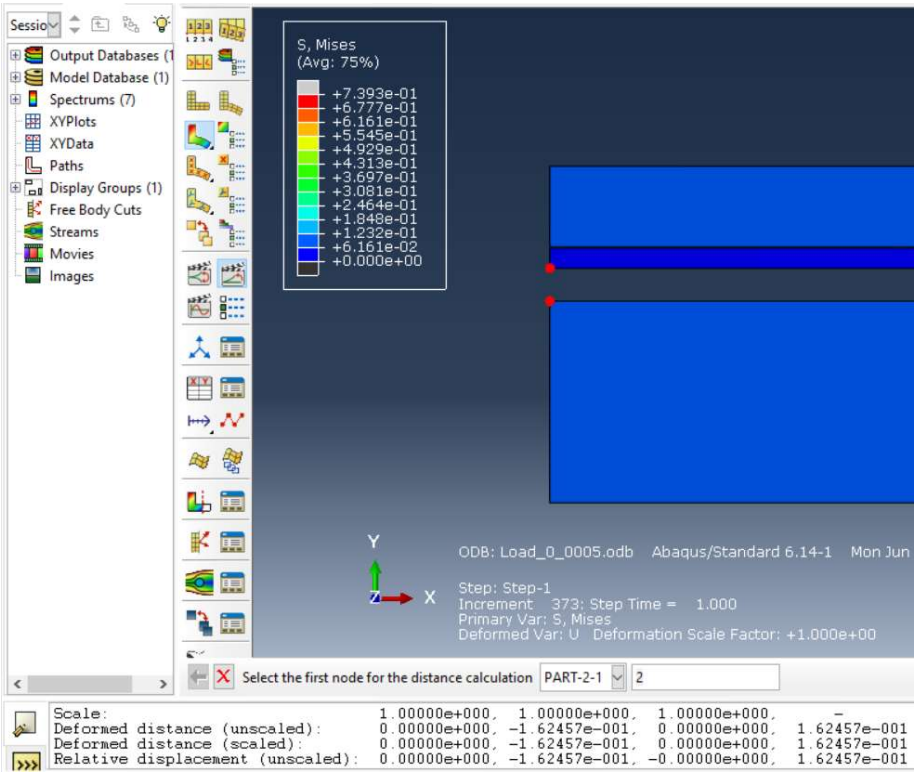


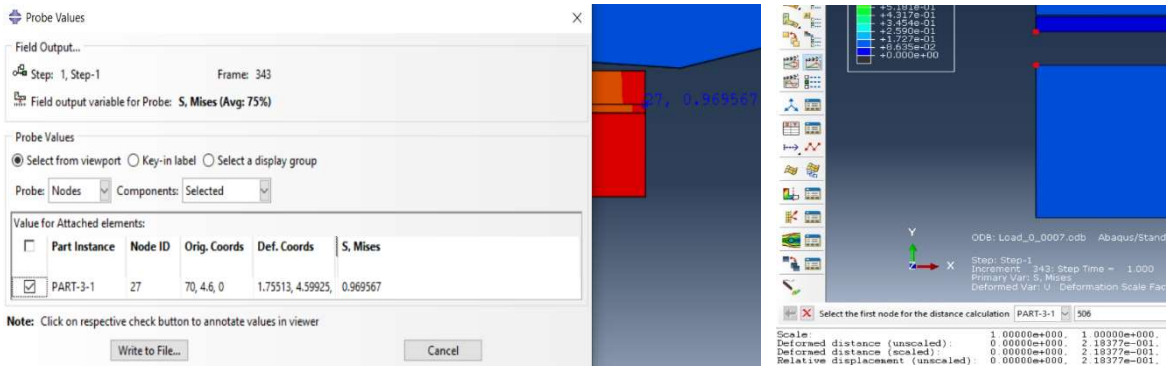
Рис. 4 – Відстань, на яку клейовий шар перемістився від основи при навантаженні $5 \cdot 10^{-4}$ Н/мм^3

Було виявлено, що при таких умовах навантаження в клейовому шарі матеріалу виникнуть переміщення, які не призведуть до розшарування матеріалу.

В такій постановці задачі було проведено серію послідовних розрахунків для визначення навантаження при якому напруження в клейовому шарі досягнуть максимально допустимих значень.

Для цього покроково збільшуємо навантаження на $5 \cdot 10^{-5}$ Н/мм^3 та проводимо розрахунки до тих пір, поки не визначимо максимальне значення навантаження. В ході проведення числових досліджень було виявлено, що при навантаженні $7 \cdot 10^{-4}$ Н/мм^3 в клеї виникають еквівалентні напруження 0,969 МПа, що не перевищують допустимих напружень в 1 МПа (рис. 5).

Подальше збільшення навантаження на $5 \cdot 10^{-5}$ Н/мм^3 призводить до виникнення напружень 1,05 МПа, що більше допустимого значення.



а *б*

а - максимальні еквівалентні напруження в клейовому шарі; б - відстань відшарування шарів

Рис. 5 – Процес проходження матеріалу через валки каландру при навантаженні $7 \cdot 10^{-4}$ Н/мм^3

Таким чином, можна зробити висновок, що для даної геометрії матеріалу максимально допустиме притискне зусилля становить $7 \cdot 10^{-4}$ Н/мм^3 з точністю $5 \cdot 10^{-5}$ Н/мм^3.

Графік залежності максимальних еквівалентних напружень в клейовому шарі від притискного навантаження наведено на рис. 6.

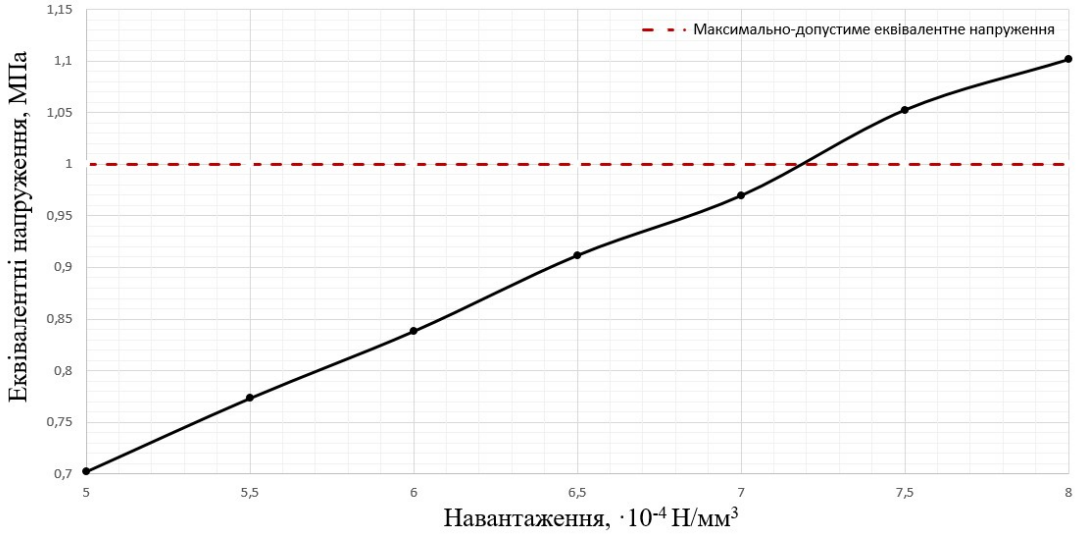


Рис. 6 – Графік залежності еквівалентних напружень від навантаження в діапазоні навантажень від $5 \cdot 10^{-4}$ Н/мм^3 до $8 \cdot 10^{-4}$ Н/мм^3

На графіку (рис. 7) показано залежність максимальних переміщень в клейовому шарі від навантаження.

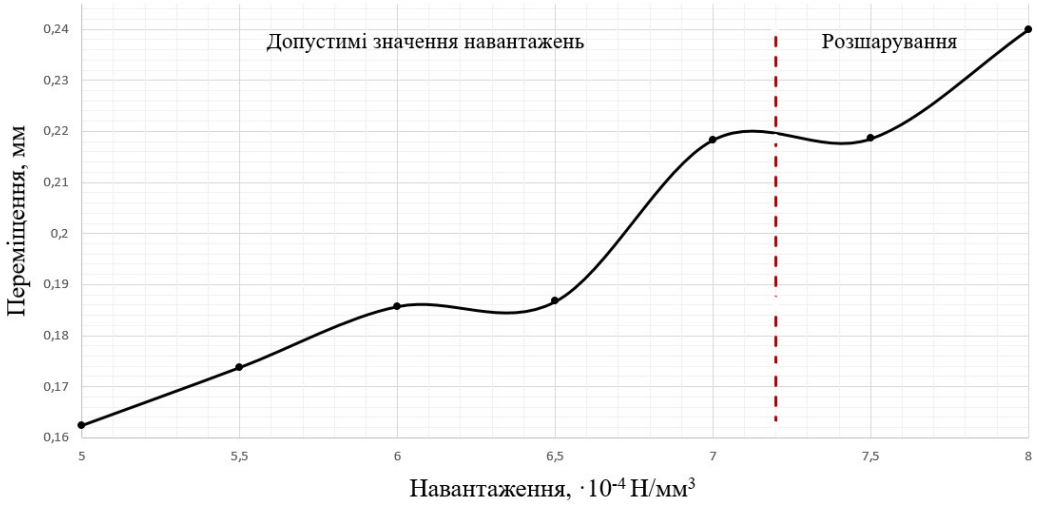


Рис. 7 – Графік залежності переміщень від навантаження в діапазоні навантажень від $5 \cdot 10^{-4}$ Н/мм^3 до $8 \cdot 10^{-4}$ Н/мм^3

Висновки. Аналізуючи наведені вище графіки можемо зробити висновок, що максимальним значенням навантаження на валок, при якому максимальні еквівалентному напруженні досягнуть значення в 1 МПа, є $7{,}2 \cdot 10^{-4}$ Н/мм^3. При такій умові зберігається міцність зчеплення між шарами банерної тканини і не утворюється дефект розшарування. При цьому максимальні значення переміщення в клейовому шарі дорівняю 0,22 мм. При таких переміщеннях композиційний матеріал після проходження через зазор між валками каландру буде зберігати свої міцнісні характеристики, в тому числі і міцність зчеплення між шарами.

При використанні методу дослідження, який був розроблений в статті, можна досягти покращення міцності зчеплення між шарами композитних матеріалів на етапі проектування обладнання, а це може призвести до створення більш міцних, надійних та економічно ефективних виробів, з покращеними експлуатаційними характеристиками та довговічністю.

Перспективи подальших досліджень. Розроблена в цій статті модель буде використана для дослідження міцності зчеплення шарів композитної мембрани на основі полімерів та тканини.

Список використаної літератури

1. Karkkainen RL, Sankar BV. A direct micromechanics method for failure initiation of plain weave textile composites. Compos Sci Technol 2006;66:137–50.
2. Karkkainen RL, Sankar BV. A direct micromechanical failure analysis of textile composites. In: American Society for Composites, 20th Annual Technical Conference. Philadelphia, PA; September 2005.
3. Jones RM. Mechanics of composite materials. Washington D.C: Scripta Book Company, 1975.
4. Tsai SW, Hahn HT. Introduction to composite materials. Lancaster, PA: Technomic Publishing Co; 1980.
5. Whitcomb JK, Srirengan K. Effect of various approximations on predicted progressive failure in plain weave composites. Compos Struct 1996;34:13–20.
6. Woo K, Whitcomb JD. A post processor approach for stress analysis of woven textile composites. Compos Sci Technol 2000;60:693–704.
7. Whitcomb JD, Chapman CD, Srirengan K. Analysis of plain-weave composites subjected to flexure. Mech Compos Mater Struct 1998;5: 41–53.
8. Carvelli V, Poggi C. A homogenization procedure for the numerical analysis of woven fabric composites. Compos Part A: Appl Sci Manuf 2001;32:1425–32.
9. Cox BN, Dadkhah MS. A binary model of textile composites: I – formulation. Acta Metall Mater 1994;42(10):3463.
10. Yang Q, Cox BN. Predicting local strains in textile composites using the binary model formulation. In: Proceedings of the ICCM 2003, San Diego, CA; July 2003.
11. Sankar BV, Marrey RV. Analytical method for micromechanics of textile composites. Compos Sci Technol 1997;57(6):703–13.
12. Bogdanovich AE, Pastore CM. Material-smart analysis of textilereinforced structures. Compos Sci Technol 1996;56:291–309.
13. Bogdanovich AE. Multiscale predictive analysis of 3-D woven composites. In: SAMPE 35th International Technical Conference, CD ROM Proceedings, Dayton, OH; September 2003.
14. Quek SC, Waas A, et al. Compressive response and failure of braided textile composites: Part 2 – computations. Int J Nonlinear Mech 2004;39:649–63.
15. Quek SC, Waas A, et al. Compressive response and failure of braided textile composites: Part 1– Experiments. Int J Nonlinear Mech 2004; 39:635–48.
16. Marrey RV, Sankar BV. A micromechanical model for textile composite plates. J Compos Mater 1997;31(12):1187–213.
17. Zhu H, Sankar BV, Marrey RV. Evaluation of failure criteria for fiber composites using finite element micromechanics. J Compos Mater 1998;32(8):766–82.
18. Gibson RF. Principles of composite material mechanics. New York: McGraw-Hill, Inc; 1994.

Vladyslav Makovskyi, Andrii Chemerys

NUMERICAL ANALYSIS OF THE ADHESION STRENGTH BETWEEN LAYERS OF COMPOSITE POLYMERIC MATERIALS

In today's world, structural elements made of composite polymeric materials (CPMs) are widely used in various engineering fields. One of the innovative directions of using CPMs is the creation of composite membranes based on a different set of polymers and fabrics. Based on the results of the literature analysis, the direction of studying the adhesion strength of banner fabric layers was chosen.

The purpose of this work is to build a computational model and numerically analyze the adhesion strength of the layers of the banner fabric, which may lead to the development of new materials with improved mechanical and physical properties. This will ensure their wider application in various industries, science, and technology.
The developed methods make it possible to accurately assess the adhesion strength between the layers of the CPM and can be used both in the production of CPM and in the creation of new structures based on composite polymeric materials.

***Keywords**: composite polymeric materials, defects, adhesion strength, equivalent stresses, adhesive layer, finite element method, textile structures*.

References

1. Karkkainen R.L., Sankar B.V. A direct micromechanics method for failure initiation of plain weave textile composites. Compos Sci Technol 2006;66:137–50. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.018
2. Karkkainen R.L., Sankar B.V. A direct micromechanical failure analysis of textile composites. In: American Society for Composites, 20th Annual Technical Conference. Philadelphia, PA; September 2005. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.018
3. Jones R.M. Mechanics of composite materials. Washington D.C: Scripta Book Company, 1975.
4. Tsai S.W., Hahn H.T. Introduction to composite materials. Lancaster, PA: Technomic Publishing Co; 1980. https://doi.org/10.1201/9780203750148
5. Whitcomb J.K., Srirengan K. Effect of various approximations on predicted progressive failure in plain weave composites. Compos Struct 1996;34:13–20. https://doi.org/10.1016/0263-8223(95)00125-5
6. Woo K., Whitcomb J.D. A post processor approach for stress analysis of woven textile composites. Compos Sci Technol 2000;60:693–704. https://doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00165-7
7. Whitcomb J.D., Chapman C.D., Srirengan K. Analysis of plain-weave composites subjected to flexure. Mech Compos Mater Struct 1998;5: 41–53.
8. Carvelli V., Poggi C. A homogenization procedure for the numerical analysis of woven fabric composites. Compos Part A: Appl Sci Manuf 2001;32:1425–32. https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00041-0
9. Cox B.N., Dadkhah M.S. A binary model of textile composites: I – formulation. Acta Metall Mater 1994;42(10):3463. https://doi.org/10.1016/0956-7151(94)90479-0
10. Yang Q, Cox B.N. Predicting local strains in textile composites using the binary model formulation. In: Proceedings of the ICCM 2003, San Diego, CA; July 2003.
11. Sankar B.V., Marrey R.V. Analytical method for micromechanics of textile composites. Compos Sci Technol 1997;57(6):703–13. https://doi.org/10.1016/S0266-3538(97)00030-4
12. Bogdanovich A.E., Pastore C.M. Material-smart analysis of textilereinforced structures. Compos Sci Technol 1996;56:291–309. https://doi.org/10.1016/0266-3538(95)00109-3
13. Bogdanovich A.E. Multiscale predictive analysis of 3-D woven composites. In: SAMPE 35th International Technical Conference, CD ROM Proceedings, Dayton, OH; September 2003.
14. Quek S.C., Waas A. Compressive response and failure of braided textile composites: Part 2 – computations. Int J Nonlinear Mech 2004;39:649–63. https://doi.org/10.1016/S0020-7462(03)00019-2
15. Quek S.C., Waas A. Compressive response and failure of braided textile composites: Part 1– Experiments. Int J Nonlinear Mech 2004; 39:635–48. https://doi.org/10.1016/S0020-7462(03)00018-0
16. Marrey R.V., Sankar B.V. A micromechanical model for textile composite plates. J Compos Mater 1997;31(12):1187–213. https://doi.org/10.1177/002199839703101202
17. Zhu H., Sankar B.V., Marrey R.V. Evaluation of failure criteria for fiber composites using finite element micromechanics. J Compos Mater 1998;32(8):766–82. https://doi.org/10.1177/002199839803200804
18. Gibson R.F. Principles of composite material mechanics. New York: McGraw-Hill, Inc; 1994.