

І.М. Войтюк

Луцький національний технічний університет

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ МІКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛІЗУ ПРИ ОЦІНЦІ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІНОПОЛІУРЕТАНІВ

У роботі представлено комплексний підхід до оцінки міцнісних характеристик пінополіуретанів на основі поєднання макроскопічних випробувань та мікроструктурного аналізу. Дослідження базується на варіації вагового співвідношення основних компонентів — поліолу та ізоціанату, що дозволило сформувати дослідні зразки з різними топологічними параметрами пористої матриці. Числова та графічна інтерпретація результатів стиску здійснювалася із застосуванням стискувального навантаження в зоні пластичних деформацій для ідентифікації стадій руйнування комірок. Проведено дослідження впливу рецептурного складу на стабільність плато текучості та характер накопичення залишкових деформацій у стінках і ребрах піни. Виконано порівняльний аналіз механічного відгуку для традиційних та модифікованих складів ППУ при варіації енергоємності структури. За допомогою геометричного моделювання гексагональної мережі встановлено взаємозв'язок між зміною кутів нахилу граней комірок та макроскопічною межею міцності матеріалу. Встановлено ефекти локальної концентрації напружень у вузлах мікроструктури, що визначають момент втрати стійкості пористого каркаса. Продемонстровано універсальність розробленого підходу для предиктивного проектування полімерних композицій із наперед заданими експлуатаційними властивостями для відповідальних інженерних конструкцій.

Ключові слова: напруження, мікроструктурний аналіз, пінополіуретани, діаграма деформування, випробування на стиск, цифрові двійники.

I.M. Voitiuk

EFFICIENCY OF MICROSTRUCTURE ANALYSIS IN EVALUATING THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF POLYURETHANE FOAMS

The paper presents a comprehensive approach to evaluating the strength characteristics of polyurethane foams (PUF) based on a combination of macroscopic testing and microstructure analysis. The study is founded on varying the weight ratios of the primary components—polyol and isocyanate—enabling the formation of test specimens with diverse topological parameters of the porous matrix. Numerical and graphical interpretation of the compression results was conducted using cyclic loading within the plastic deformation zone to identify the stages of cell failure. The influence of the formulation on the stability of the plateau stress and the nature of residual deformation accumulation in the cell walls and struts was investigated. A comparative analysis of the mechanical response for both traditional and modified PUF compositions was performed across variations in structural energy absorption. Through geometric modeling of a hexagonal network, the relationship between changes in cell face tilt angles and the macroscopic yield strength of the material was established. Effects of local stress concentration at microstructure nodes, which dictate the onset of stability loss in the porous framework, were identified. The study demonstrates the versatility of the developed approach for the predictive design of polymer compositions with predetermined performance properties for critical engineering structures.

Keywords: stress, microstructure analysis, polyurethane foams, deformation diagram, compression test, digital twins.

Аналіз актуальності дослідження. Аналіз існуючих публікацій свідчить, що більшість досліджень фізико-механічних властивостей пінополіуретанів, наведених у літературі, обмежені вивченням конкретних типів піноматеріалів без урахування універсальних структурних закономірностей. Найбільш розповсюдженим представником цього класу матеріалів є пінополіуретани (ППУ), функціональна надійність яких визначається складним поєднанням хімічного складу та пористої структури. Традиційні методи оцінки міцності, що розглядають піноматеріал як суцільне ізотропне середовище, часто не враховують локальні механізми деформації, які стають критичними при екстремальних навантаженнях або тривалій експлуатації. Реальна будова ППУ характеризується полідисперсністю комірок, наявністю анізотропії в напрямку спінення та нерівномірним розподілом полімеру між стінками та ребрами, що робить прогнозування механічного відгуку матеріалу без урахування його топології недостатньо точним.

Ефективним підходом до вирішення цієї задачі є перехід від макроскопічних випробувань до детального мікроструктурного аналізу, який дозволяє інтерпретувати ППУ як складну просторову структуру. Такий підхід базується на тому, що жорсткість та енергоємність піни безпосередньо залежать від геометричних параметрів окремої комірки та цілісності її перетинків. Мікроструктурне моделювання дає змогу виявити роль "критичних дефектів" — розірваних мембран або потовщених вузлів, які виступають концентраторами напружень. Це дозволяє встановити кількісний зв'язок між морфологією пористого простору та макроскопічною межею текучості, трансформуючи емпіричні спостереження у чітко верифіковані фізико-математичні закономірності.

Особливо важливим є дослідження мікроструктурних змін під впливом динамічних навантажень та температурних коливань, оскільки внутрішня геометрія комірок визначає стабільність газової фази всередині матеріалу. Симуляційний аналіз деформації окремих комірок

© І.М. Войтюк

дозволяє зафіксувати моменти втрати стійкості стінок, які передують загальному руйнуванню структури. Використання мікроструктурних параметрів як вхідних даних для чисельного моделювання дає змогу створювати віртуальні прототипи – цифрові двійники, матеріалів із заданою анізотропією властивостей, що мінімізує потребу у дорогих натурних випробуваннях.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена необхідністю переходу до предиктивного проектування полімерних піноматеріалів із наперед заданими характеристиками міцності. Результати мікроструктурного аналізу можуть бути використані для теоретичного обґрунтування оптимізації рецептур ППУ з метою підвищення їхньої стійкості до деструкції. Розуміння механізмів розподілу напружень на рівні окремої комірки дозволить значно підвищити надійність теплоізоляційних систем у відповідальних інженерних конструкціях, забезпечуючи їх тривалу безпечну експлуатацію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формування фізико-механічних властивостей пінополіуретанів (ППУ) є результатом складних фізико-хімічних процесів, що відбуваються під час реакції ізоціанатів з поліолами. Структурна організація цих матеріалів базується на розподілі сегментів жорсткого та м'якого ланцюгів, де поліоли забезпечують еластичність, а ізоціанати — необхідну жорсткість конструкційної матриці [6, 7]. Сучасні дослідження підкреслюють, що механічний відгук ППУ на навантаження безпосередньо залежить від співвідношення цих компонентів, що дозволяє варіювати характеристики матеріалу від м'яких гнучких піни до твердих високоміцних систем [6].

Ключовим фактором, що визначає міцнісні характеристики ППУ, є його комірчаста структура, яка формується під впливом типу сипнувача та обраної технології виробництва. Традиційні методи, такі як лиття [8, 9], розпилення [11, 12] та реакційне лиття під тиском [13, 14], забезпечують різні умови формування мікроструктури. Зокрема, метод лиття дозволяє отримати прогнозовані параметри щільності та пористості шляхом точного контролю умов затвердіння [10]. У свою чергу, реакційне лиття під тиском забезпечує можливість створення складних виробів, де розмір комірок і механічні характеристики суттєво залежать від термодинамічних параметрів процесу упорскування [13, 14].

Попри значну кількість робіт, присвячених макроскопічним випробуванням ППУ, все більшої актуальності набуває вивчення мікроструктурних особливостей як фундаментального чинника міцності. Мікроструктурний аналіз дозволяє оцінити морфологію комірок, що є критичним для розуміння процесів концентрації напружень. Встановлено, що використання модифікуючих добавок, зокрема целюлози або силіконових сурфактантів, дозволяє тонко регулювати архітектуру пористого простору, змінюючи розмір комірок та товщину їхніх ребер, що безпосередньо впливає на межу текучості та енергопоглинання матеріалу [4, 5, 15].

Окремим напрямком досліджень є оцінка ефективності використання мікроструктурних моделей для прогнозування довговічності ППУ в умовах експлуатації. Аналіз взаємозв'язку між параметрами "рецептура — структура — властивість" дає змогу не лише констатувати досягнуті механічні показники, але й теоретично обґрунтувати шляхи їх оптимізації [3, 15].

Таким чином, мікроструктурний аналіз виступає як ефективний інструмент верифікації аналітичних моделей, що дозволяє мінімізувати ризики крихкого руйнування та підвищити експлуатаційну надійність пінополіуретанових елементів у критичних інженерних конструкціях [1, 15].

Постановка завдання. Аналіз існуючих публікацій свідчить, що у вивченні загальних фізико-механічних властивостей пінополіуретанів у літературі наведено для певних типів піни. Питання прямого взаємозв'язку між топологічними параметрами мікроструктури та локальною міцністю матеріалу залишається розв'язаним лише частково. Більшість класичних підходів розглядають ППУ як гомогенне середовище з усередненими характеристиками, що не дозволяє повною мірою врахувати специфіку розподілу навантажень у стінках та ребрах комірок, особливо при наявності структурних аномалій або модифікуючих включень. Це обмежує можливості предиктивного моделювання поведінки пінопластів при складних видах деформації, де критичну роль відіграє втрата стійкості окремих елементів пористої матриці.

Тому метою даної роботи є обґрунтування ефективності використання мікроструктурного аналізу як базового інструменту для оцінки міцнісних характеристик пінополіуретанів. Це передбачає перехід від макроскопічного опису до представлення піни як дискретної системи взаємопов'язаних структурних елементів: стратів та мембран. Такий підхід дозволяє не лише

ідентифікувати зони концентрації напружень на мікрорівні, а й детально дослідити вплив морфології комірок на загальну несучу здатність матеріалу.

Використання даних мікроструктурної візуалізації забезпечує високу точність чисельних симуляцій, створюючи теоретичне підґрунтя для оптимізації мікроструктури ППУ з метою підвищення їхньої експлуатаційної надійності та запобігання передчасному руйнуванню у відповідальних конструкціях.

Викладення основного матеріалу. Для вивчення впливу ефективності аналізу мікроструктури пінополіуретанів на оцінку їх механічних характеристик при статичному стискуючому навантаженні, що викликає пластичні деформації матеріалу, було проведено відповідні випробування дослідних зразків з різною часткою основних компонент піни: поліолу та поліізоціанату.

Дослідні зразки піноматеріалів були отримані у лабораторних умовах з поліолу та поліізоціанату шляхом їх змішування при різних частках цих компонент. Поліол, як суміш полієфіру, стабілізаторів та каталізаторів, є малотоксичний та невибухонебезпечний. Його густина при температурі 20 °С у рідкому стані становить 1,09 г/см³. В'язкість поліолу 1300 мПа·с. Поліізоціанат, незаймиста рідина зі специфічним запахом, легко реагує з водою. За температури 20 °С його густина становить 1,25 г/см³, а в'язкість 300 мПа·с.

Механічні випробування проводили для трьох груп зразків пінополіуретану з різним ваговим співвідношенням складових компонент поліолу та ізоціанату: 1:1, 1:1,2 та 1,2:1. Для механічних випробувань використовувалися лише зразки з дрібно комірковою структурою, що вирізалися з пінополіуретанових композицій у формі кубів з лінійними розмірами 35×35×35 мм³ (рис. 1).



Рис. 1. Дослідні зразки ППУ

Механічні характеристики пінополіуретанів випробувалися на стиск на дослідній машині МИ-40КУ. Для кожного типу випробувань виконували по дві серії досліджень для усіх трьох груп зразків різного співвідношення компонентів. Для вивчення механічної поведінки піноматеріалів отримано залежності між навантаженням і абсолютною деформацією зразків в процесі статичного стискувального навантажування. Діаграми навантажень при стиску наведені на рис. 2.

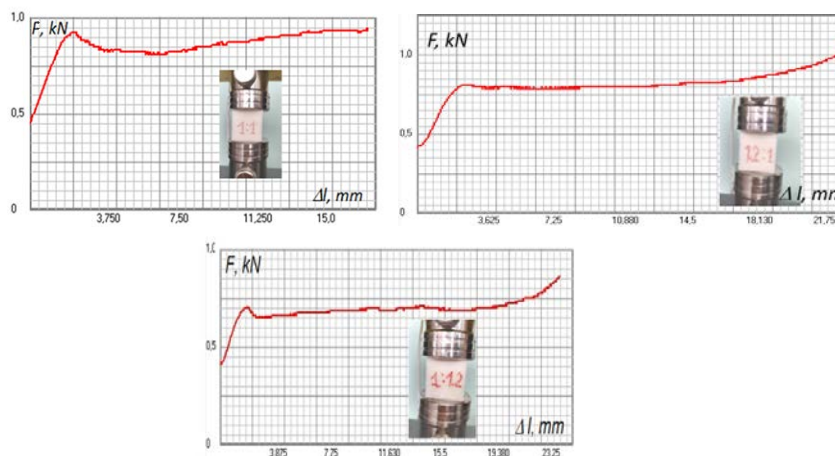


Рис. 2. Діаграми навантажень пінополіуретанових зразків з різним відношенням компонент

Експериментальні дослідження механічної поведінки пінополіуретанів із різним співвідношенням компонентів дозволили встановити чітку залежність між рецептурою матеріалу та його здатністю до поглинання енергії деформації. Отримані діаграми стиску (рис. 2) відображають стадійність руйнування пористої структури, що є ключовим аспектом при використанні мікроструктурного аналізу. На початковому етапі навантаження всі досліджувані зразки виявляють лінійну пружну залежність, яка зумовлена пружним вигином стінок та ребер комірок.

Для зразків складу 1:1 зафіксовано найбільш збалансований перехід від пружної зони до плато текучості, що свідчить про гомогенність сформованої мікроструктури. У цій групі критичне навантаження досягає значень близько 0,9 кН, після чого спостерігається колективна втрата стійкості системи комірок. Перехід до зони пластичних деформацій супроводжується характерним «зубом» текучості на графіку, що візуалізує момент початку колапсу першого шару пористої матриці. Мікроструктурний аналіз дозволяє ідентифікувати цей процес як послідовне зминання найменш жорстких елементів каркаса.

Дослідження зразків із співвідношенням компонентів 1,2:1 (надлишок поліолу) виявило суттєве зниження модуля пружності та розмиття межі текучості. На діаграмі (рис. 2) спостерігається найбільш тривала стадія плато, що пояснюється підвищеною піддатливістю полімерних мембран у складі комірок. Така структура здатна до значних об'ємних деформацій без раптового руйнування зв'язків між вузлами сітки. Це підтверджує ефективність використання мікроструктурних моделей для проектування енергопоглинаючих елементів, де важливо забезпечити стабільне навантаження при великих значеннях Δl .

Навпаки, зразки з надлишком ізоціанату (1:1,2) демонструють підвищену початкову жорсткість, проте їхня поведінка в зоні пластичності має виражений осцилюючий характер. Коливання сили на графіку (рис. 2) корелюють із дискретними актами руйнування крихких ребер, що супроводжується локальним перерозподілом напружень. Такий характер деформування вказує на високу концентрацію напружень у вузлах мікроструктури, що може призвести до передчасного виходу з ладу відповідальних конструкцій.

Для вивчення впливу мікроструктури матеріалу під час процесу деформування на зразках було виділено області, що помічені червоним кольором (рис. 3). Дослідження на стиск проходилися на дослідній машині МІ-40КУ при зміні швидкості деформування 2 мм/хв. Використовуючи цифровий мікроскоп (рис. 3) було досліджено зміну геометрії досліджуваних областей до деформування та у процесі деформування (рис. 4).

Для верифікації макроскопічних випробувань було проведено візуалізацію зміни мікроструктури зразків до та після навантаження. Проведений аналіз дозволив встановити безпосередній зв'язок між механічними діаграмами та фізичною деформацією комірок піноматеріалу. На отриманих мікрофотографіях (рис. 4) чітко спостерігається комірчаста архітектура ППУ, яка характеризується наявністю багатограничних пор, розділених тонкими полімерними стінками. Детальний огляд зони пластичної деформації виявив формування специфічних структурних аномалій, позначених на зразках кольоровим маркером для локалізації ділянок аналізу. При навантаженні, що відповідає плато текучості, спостерігається масовий колапс комірок, який на мікрорівні проявляється як втрата стійкості (зминання) стінок. Для еластичних зразків (група 1,2:1) характерним є оборотне видовження пор, тоді як для жорстких композицій (група 1:1,2) зафіксовано численні розриви мембран та руйнування ребер, що підтверджує «зубчастий» характер отриманих діаграм стиску (рис. 2).

Для теоретичного обґрунтування отриманих даних було розроблено геометричну модель ідеалізованої мікроструктури ППУ (рис. 5). Базова модель представляє піну як сукупність правильних гексагональних комірок з характерними параметрами: висотою h та довжиною грані a . Такий підхід дозволяє математично описати зміну вільного об'єму пористого простору в процесі стиску.

Початковий стан (рис. 5, а) характеризується рівноважним розподілом напружень у недеформованій сітці, де геометричні параметри відповідають вихідній густині матеріалу. Стадія пластичного зсуву (рис. 5, б) демонструє зміну кутів нахилу граней, що візуально нагадує процес «схлопування» пор. Це відповідає переходу матеріалу в зону плато на діаграмах навантаження (рис. 2). Стадія ущільнення (рис. 5, в), де при досягненні критичних значень деформації відбувається повне змикання протилежних стінок комірок, що призводить до різкого зростання жорсткості структури.

Порівняння результатів експериментальної візуалізації та розрахункових схем підтверджує адекватність обраної моделі. Схематичне представлення деформованих комірок (рис. 5) повністю корелює з морфологією, зафіксованою на мікрофотографіях (рис. 4), де спостерігається анізотропне сплющення пор у напрямку прикладеного вектора сили. Використання таких моделей дозволяє розрахувати локальні концентрації напружень у вузлах з'єднання ребер, які виступають ініціаторами загального руйнування матеріалу.

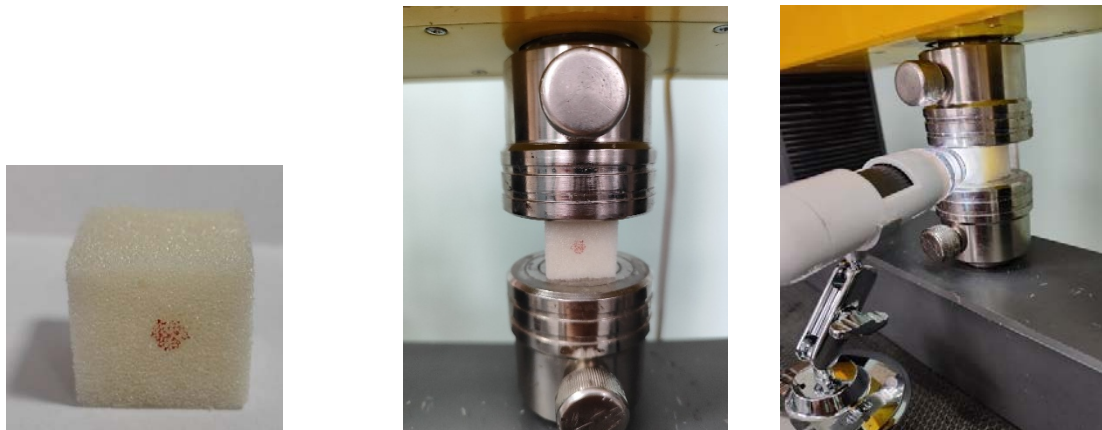


Рис. 3. Мікроструктурний аналіз пінополіуретанових зразків

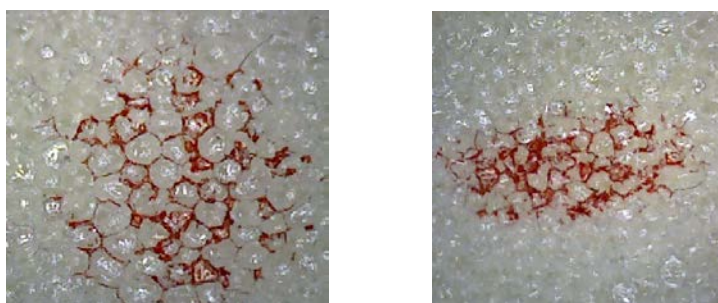


Рис. 4. Зрізи мікроструктурні пінополіуретанових зразків до та після випробування

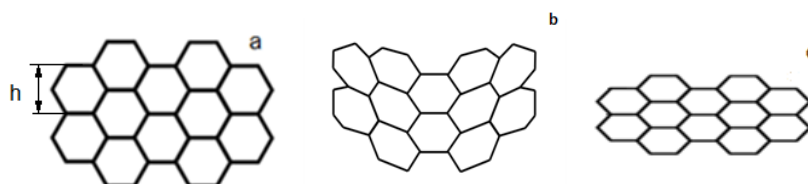


Рис. 5. Моделювання деформацій у пінополіуретанових зразках

Таким чином, поєднання мікрофотографічного аналізу та геометричного моделювання доводить, що міцність ППУ визначається не лише хімічною природою полімеру, а й топологічною стабільністю його пористого каркаса. Моделювання переходу від правильної гексагональної форми до деформованого стану дозволяє встановити кількісні межі безпечної експлуатації матеріалу. Впровадження такого підходу в інженерну практику дає змогу створювати оптимізовані структури з наперед заданою стійкістю до пластичних деформацій, що є критично важливим для енергоефективного будівництва та аерокосмічної галузі.

Висновки

Обґрунтована методика дозволяє не лише констатувати факт руйнування, а й теоретично моделювати зони майбутньої деструкції на рівні окремих елементів піни. Отримані дані створюють підґрунтя для розробки цифрових двійників пінополіуретанів із заданою анізотропією властивостей. Оптимізація мікроструктури комірок, виходячи з результатів мікроструктурного аналізу, забезпечує підвищення експлуатаційної надійності систем теплоізоляції та криогенної техніки. У підсумку,

інтеграція експериментальних діаграм стиску з мікроструктурним моделюванням дозволяє трансформувати емпіричний підхід у предиктивну інженерну методику.

Список використаних джерел

1. Tychanicz-Kwiecien, M., Wilk, J., Gil, P. (2019) Review of High-Temperature Thermal Insulation Materials. *J. Thermophys. Heat Transf.*, 33, 271–284.
2. Pan, L. (2015) A Review of Research on the Performance of Building Insulation Materials. *Urban Constr. Theory Res. Electron. Ed.*, 1776–1777.
3. Ates, M., Karadag, S., Eker, A.A., Eker, B. (2022) Polyurethane Foam Materials and Their Industrial Applications. *Polym Int*, 71, 1157-1163.
4. Stanzione, M., Oliviero, M., Cocca, M., et al. (2020) Tuning of Polyurethane Foam Mechanical and Thermal Properties Using Ball-Milled Cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 231, 115772.
5. Baferani, A.H., Keshavarz, R., Asadi, M., Ohadi, A.R. (2018) Effects of Silicone Surfactant on the Properties of Open-Cell Flexible Polyurethane Foams. *Adv. Polym. Technol.*, 37, 71-83.
6. Wang, Z., Wang, C., Gao, Y., Li, Z., Shang, Y., Li, H. (2023) Porous Thermal Insulation Polyurethane Foam Materials. *Polymers*, 15(18), 3818.
7. Šebenik, U., Krajnc, M. (2007) Influence of the Soft Segment Length and Content on the Synthesis and Properties of Isocyanate-Terminated Urethane Prepolymers. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 153, 527–535.
8. Smith, J.R., Johnson, E.M. (2018) Polyurethane Foam Preparation Techniques: A Comprehensive Review. *J. Mater. Sci.*, 45, 2897–2910.
9. Brown, A.B., White, C.D. (2020) Casting Method for Tailored Polyurethane Foams. *Polym. Eng. Sci.*, 60, 1800–1812.
10. Garcia, F.A., Lee, K.Y. (2019) Influence of Additives on Casting Polyurethane Foam Properties. *J. Cell. Plast.*, 56, 329–344.
11. Johnson, A.B., Smith, C.D. (2019) Spray-Foaming Techniques for Tailored Polyurethane Foams. *J. Appl. Polym. Sci.*, 136, 47512.
12. Garcia, E.F., Lee, K.Y. (2021) Advances in Polyurethane Spray Foaming: From Fundamentals to Applications. *Polym. Rev.*, 61, 284–301.
13. Smith, A.B., Johnson, C.D. (2020) Reaction Injection Moulding of Polyurethane Foam: Process Advancements. *Polym. Process.*, 25, 215–230.
14. Garcia, E.F., Lee, K.Y. (2022) Polyurethane Foam via RIM: Mechanical and Thermal Properties. *J. Cell. Plast.*, 58, 412–425.
15. Mikulich, O., Hulay, O., Furs, T., Shemet, V. (2024) Strength and Mechanical Characteristics of Modified Polyurethane Foams. *Procedia Structural Integrity*, 59(21), 460-465.

Дата надходження статті до видання: 27.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата оприлюднення 14.04.2026