

133 ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 620

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336272

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ ВІТЧИЗНЯНИХ
КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПОЛІУРЕТАНОВІЙ ОСНОВІ**

Іщенко А.О.	<i>д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6189-7830, e-mail: ischenko50@ukr.net;</i>
Девін Л.М.	<i>д-р техн. наук, професор, директор навчального центру НТУУ «КПІ» – ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, зав. лабораторією надійності інструментів з надтвердих матеріалів, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1452-9904, e-mail: ldevin350@gmail.com;</i>
Рассохін Д.О.	<i>канд. техн. наук, доцент, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, м. Лейпциг, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3479-9485, e-mail: Dmytro.rassokhin@htwk-leipzig.de;</i>
Носовська О.В.	<i>канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1313-4767, e-mail: nosovska_o_v@pstu.edu;</i>
Капустін С.В.	<i>аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4204-8449, e-mail: stanislav.kapustin.engineer@gmail.com;</i>
Бем Р.	<i>д-р техн. наук, професор, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, м. Лейпциг, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7768-4592, e-mail: robert.boehm.1@htwk-leipzig.de</i>

У статті представлено результати порівняльного аналізу фізико-механічних властивостей двох вітчизняних композитних матеріалів на поліуретановій основі – ДК2 (розробка Приазовського державного технічного університету) та АК.UR-03 (виробництво компанії «Капітел», м. Дніпро). Дослідження спрямоване на визначення граничної міцності матеріалів при стисканні та оцінку їхньої деформованості, що є критично важливим фактором при виборі матеріалів для захисту обладнання, яке працює в умовах високих навантажень. Особливу увагу приділено також аналізу пористості матеріалів як одного з ключових параметрів, що впливає на їх довговічність та експлуатаційні характеристики. Експериментальні випробування проводилися на гідропресі потужністю 10 тонн із поетапним збільшенням навантаження. Було виміряно зміну товщини зразків на кожному етапі для обчислення ступеня деформації та напружень. Результати показали, що матеріал ДК2 демонструє вищу міцність (209 МПа проти 170 МПа для АК.UR-03) та значно меншу відносну деформацію (12,5% проти 43% відповідно). Це вказує на доцільність його використання в конструкціях, де критично важливими є міцність і стабільність розмірів під навантаженням. Крім механічного аналізу, у роботі було проведено дослідження пористості матеріалів за допомогою 3D-макроскопу після їх руйнування в охолодженому стані. Для матеріалу ДК2 виявлено 977 пор, які займали близько 9,79% площі дослідженої поверхні. Причиною пороутворення визначено хімічну реакцію між ізоціанатами та вологістю, внаслідок чого виділяється вуглекислий газ, що створює мікропухирці в структурі полімеру. Запропоновано методи зменшення пористості, зокрема введення дисперсних наповнювачів (графіт, оксид міді), які можуть зв'язувати CO₂, покращуючи однорідність структури та міцність композиту. Практичне значення результатів полягає в можливості ефективного застосування матеріалу ДК2 у гірничо-металургійній, машинобудівній та енергетичній галузях для відновлення та захисту обладнання, що експлуатується в умовах значних навантажень і агресивних середовищ. Робота також відкриває перспективи для подальших досліджень щодо підвищення експлуатаційних характеристик полімерних композитів шляхом модифікації їх структури та складу.

Ключові слова: поліуретанові композити, міцність на стиск, пористість, деформація, дисперсні наповнювачі, матеріалознавство, полімерна матриця.

Постановка проблеми

Однією з важливих задач сучасного машинобудування є пошук, розробка та впровадження нових матеріалів, які здатні забезпечити надійну експлуатацію

обладнання в умовах інтенсивних механічних, термічних та корозійних навантажень. Особливо актуальним це завдання є для таких галузей промисловості, як металургія, енергетика та транспорт, де обладнання

зазнає постійних та значних навантажень, що призводить до його передчасного зносу та руйнування.

Серед перспективних рішень цієї проблеми виділяється використання композитних матеріалів на поліуретановій основі, які поєднують високу міцність із достатньою гнучкістю та стійкістю до агресивних факторів експлуатації. Однак поширеним недоліком таких матеріалів є утворення пористості у процесі їх виготовлення, що негативно впливає на експлуатаційні характеристики, знижуючи міцність та довговічність виробів.

З огляду на це, існує важлива науково-технічна проблема вибору оптимальних композиційних матеріалів із мінімальною пористістю та максимальними механічними характеристиками для відновлення та захисту технологічного обладнання, яке експлуатується в екстремальних умовах.

У зв'язку з цим у даній роботі проведено порівняльний аналіз двох вітчизняних поліуретанових композитів (ДК2 та АК.UR-03), що широко використовуються для ремонту і зміцнення деталей промислового обладнання. Вибір цих матеріалів зумовлено їх високим потенціалом для практичного застосування у таких конструкціях, як деталі прокатного обладнання, гірничо-металургійні вузли, насоси та засувки, де особливо важлива стабільність механічних властивостей та стійкість до деформації.

Результати цього дослідження дозволять вирішити важливе практичне завдання – забезпечити вибір найкращого матеріалу для конкретних інженерних застосувань, підвищити ефективність відновлення та захисту технологічних конструкцій і обладнання, а також зменшити витрати підприємств на ремонт та обслуговування. Крім того, результати дослідження дозволяють поглибити розуміння механізмів утворення пористості та запропонувати методи її ефективного усунення, що є актуальним науковим завданням сучасного матеріалознавства.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У сучасній науці та промисловості поліуретанові композити займають важливе місце, завдяки поєднанню легкості, високої міцності та стійкості до динамічних навантажень. Останні дослідження та розробки в цій галузі спрямовані на покращення механічних властивостей, довговічності та функціональності цих матеріалів [1, 2]. Одним із перспективних напрямків є створення нанокомпозитів на основі поліуретану [3, 4]. Зокрема, дослідження показали, що додавання вуглецевих нанотрубок і графенових нанопластинок до поліуретанової матриці сприяє значному підвищенню міцності та жорсткості матеріалу. Використання графену з розміром пластинок близько 1,5 мкм та високою питомою площею поверхні (750 м²/г) у поєднанні з вуглецевими нанотрубками забезпечує синергетичний ефект, покращуючи механічні характеристики композиту на 43% порівняно з чистим поліуретаном [5].

Іншим важливим напрямком є інтеграція матеріалів з фазовим переходом (PCM) у поліуретанові піни для підвищення теплоізоляційних властивостей. Використання багатомасштабного моделювання з використанням фізично-інформованих нейронних мереж дозволяє точно прогнозувати теплопровідність таких композитів, що сприяє оптимізації їх дизайну та застосуванню в енергоефективних будівлях [6]. Практичне застосування поліуретанових композитів охоплює різні галузі промисловості. Зокрема, поліуретанові гарячі клеї широко використовуються в одноразовому виробництві, взуттєвій, автомобільній та пакувальній промисловості, забезпечуючи високу продуктивність та екологічну безпеку. Крім того, поліуретанові матеріали знаходять застосування в приладобудуванні, електроніці, архітектурі, будівництві, меблевій промисловості, рекламі та сільському господарстві, що підкреслює їх універсальність та ефективність [7, 8].

В Україні також активно ведуться дослідження в галузі полімерних композиційних матеріалів. Зокрема, розробка та вивчення полімерних композитів з антибактеріальними властивостями на основі поліуретану є актуальним напрямком, що має значний потенціал для застосування в медицині та фармацевтиці [9, 10]. Сучасна інженерія висуває високі вимоги до матеріалів, що використовуються в конструкціях, які забезпечують захист обладнання від різних видів механічних впливів. Композитні матеріали на поліуретановій основі займають важливе місце завдяки своїм унікальним властивостям: поєднанню легкості, високої міцності та стійкості до динамічних навантажень. Однак під час вибору матеріалу для конкретних інженерних завдань критично важливо враховувати не тільки механічну міцність, а й здатність матеріалу до деформації (зім'яття), що безпосередньо впливає на його експлуатаційні характеристики за екстремальних умов [11, 12]. У даному дослідженні обрано для порівняння два вітчизняні композитні матеріали – ДК2, розроблений у ДВНЗ «ПДТУ», та АК.UR-03, вироблений фірмою «Капітел» (м. Дніпро). Вибір цих матеріалів зумовлений їх активним застосуванням у промисловості для відновлення та захисту металевих поверхонь. Зокрема, вони використовуються для ремонту та захисту насосів, засувок та інших металоконструкцій, що піддаються корозійному та ерозійному зносу. Важливим є те, що ці матеріали можуть ефективно захищати обладнання навіть в агресивних середовищах, подовжуючи термін його експлуатації та знижуючи витрати на ремонт та обслуговування.

Мета статті

Мета дослідження полягає у визначенні характеристик міцності матеріалів під час стискання, а саме у вимірюванні граничної міцності та ступеня зминання зразків, що дасть змогу зробити обґрунтований вибір матеріалу для використання в захисних конструкціях. Наукова новизна даної роботи полягає у проведенні

порівняльного аналізу міцнісних характеристик зазначених композитів при стисканні, що дозволяє оцінити їхню ефективність у реальних умовах експлуатації. Практична значущість дослідження полягає у наданні рекомендацій щодо вибору оптимального матеріалу для конкретних інженерних задач, що сприятиме підвищенню надійності та довговічності захисних покриттів у різних галузях промисловості.

Обладнання та методика випробувань

Навантаження виконували через кожні 0,5 тонни з виміром після кожного навантаження товщини зразка. Температура приміщення: $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Для проведення випробувань було підготовлено зразки у вигляді шайб із заданими геометричними параметрами: діаметр: 12 мм, товщина: 2,1 та 1,61 мм. Різниця у розмірах пов'язана з усадкою матеріалу під час затвердження.

Випробовувані матеріали:

- ДК2: вітчизняний композитний матеріал, розроблений у ДВНЗ «ПДТУ»;
- АК.UR-03: композитний матеріал на поліуретановій основі, вироблений фірмою «Капітел» (м. Дніпро).

Випробування проводилися на експериментальній установці Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля. Основне обладнання включало гідропрес потужністю 10 тонн – для створення необхідного стискаючого навантаження та еталонного силоміра ДС 5 – для точного вимірювання прикладеної сили.

Навантаження на зразки збільшували покроково згідно з таким набором значень сили (F, кН): 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 кН. При кожному прирості навантаження проводилося вимірювання поточної товщини зразка, що давало змогу визначити ступінь зминання (відносна деформація) матеріалу. Такий поетапний метод дозволив не тільки оцінити граничну міцність матеріалу, а й проаналізувати його деформованість під дією екстремальних навантажень.

Аналіз макроструктури і дослідження поверхні зламу проводили з використанням 3D-макроскопа Keyence, оснащеного вбудованою системою аналізу, що дає змогу точно вимірювати геометричні характеристики пор (HTWK Leipzig).

Виклад основного матеріалу

У ході експериментальних досліджень було проведено порівняльний аналіз двох композитних матеріалів на поліуретановій основі – ДК2 (розроблений у ДВНЗ «ПДТУ») та АК.UR-03 (виробництво компанії «Капітел», м. Дніпро). Результати досліджень подано у вигляді графічних залежностей та табличних даних (таблиця 1).

Аналіз отриманих результатів демонструє, що матеріал ДК2 проявляє суттєво вищу стійкість до стискаючих навантажень порівняно з матеріалом АК.UR-03. При максимальному навантаженні у 30 кН матеріал ДК2 досягає напруження 209,69 МПа з відносною деформацією близько 20,95%. Для порівняння, матеріал АК.UR-03 в аналогічних умовах демонструє меншу міцність – лише 169,85 МПа, а також значно більшу відносну деформацію, яка досягає 49,07%. Отримані результати підтверджують, що матеріал ДК2 має кращі механічні властивості, зокрема вищу міцність і нижчу деформативність, що робить його більш ефективним для використання у вузлах та елементах конструкцій, які працюють за умов високих навантажень і потребують стабільності форми та розмірів. Значні розбіжності в показниках міцності та деформації між двома композитами можна пояснити відмінностями у їх складі, технології виготовлення, а також різним ступенем пористості матеріалів.

На наведеному графіку (рис. 1) залежності напруження від відносної деформації чітко видно різницю у механічній поведінці досліджуваних матеріалів ДК2 та АК.UR-03 під навантаженням.

Крива для матеріалу ДК2 характеризується стрімкішим зростанням напруження із меншою деформацією. Це вказує на вищу жорсткість, міцність та стійкість до стискувальних навантажень порівняно з матеріалом АК.UR-03. ДК2 демонструє крихко-пружний характер поведінки, що підтверджується різким наростанням напруження при незначних деформаціях. Матеріал АК.UR-03 має більш пологі криву, що свідчить про виражену пластичну поведінку, тобто вищу здатність до деформування під навантаженням, але меншу міцність. Це свідчить про його підвищену пластичність і, як наслідок, меншу опірність високим механічним навантаженням порівняно з ДК2.

Таблиця 1

Результати навантаження композитних матеріалів

Навантаження, кН	ДК2					АК.UR-03				
	Товщина зразка, мм	Деформація, мм	Діаметр зразка, мм	Напруження ДК2	Відносна деформація ДК2	Товщина зразка, мм	Деформація, мм	Діаметр зразка, мм	Напруження АК.UR	Відносна деформація АК.UR
0	2,10	0,00	12,0	0,00	0,00	1,61	0,00	10,5	0,00	0,00
5	1,95	0,15	12,5	40,76	7,14	1,42	0,19	11,00	52,64	11,80
10	1,87	0,23	12,7	78,98	10,95	1,20	0,41	12,00	88,46	25,47
15	1,80	0,30	13,0	113,07	14,29	1,05	0,56	12,80	116,63	34,78
20	1,75	0,35	13,2	146,22	16,67	0,93	0,68	14,00	129,99	42,24
25	1,71	0,39	13,3	180,04	18,57	0,86	0,75	14,50	151,47	46,58
30	1,66	0,44	13,5	209,69	20,95	0,82	0,79	15,00	169,85	49,07

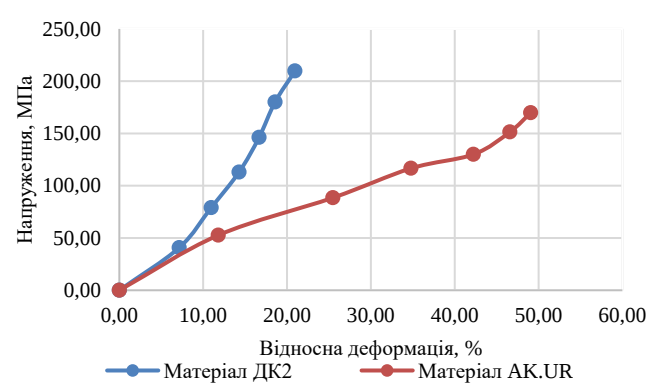


Рис. 1 – Графік залежності напруження-відносної деформації матеріалів ДК2 і АК.УР-03

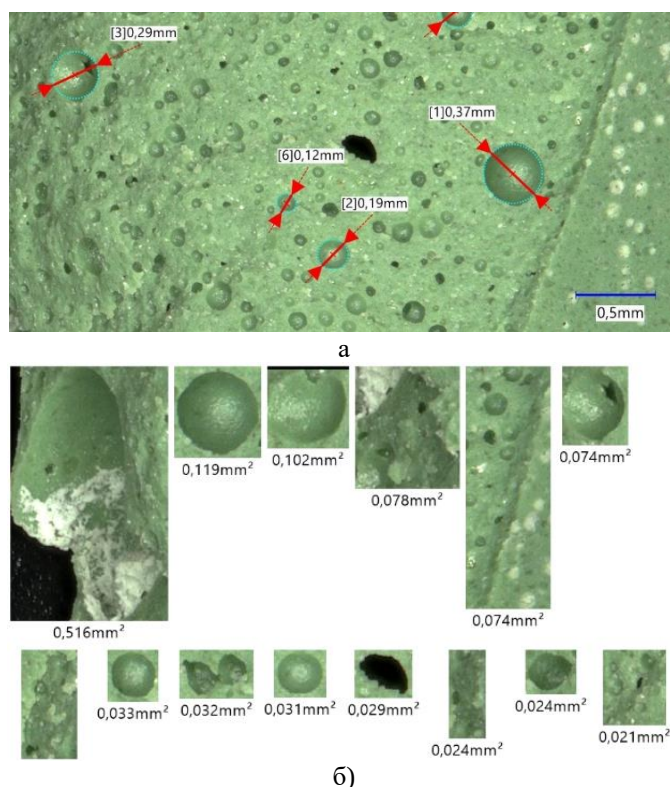


Рис. 2 – Розподіл пір на поверхні зламу зразка ДК2: а – поверхня зламу з діаметрами пір, б – основні типи пір, із зазначенням їхніх площ, виявлені в зразку ДК2

Утворення пористості, як правило, призводить до погіршення фізико-механічних властивостей матеріалів, таких як міцність, пружність і пластичність. Зменшення пористості дає змогу підвищити ці властивості. Пори можуть виникати внаслідок різних чинників, включно з усадкою матеріалу під час затвердіння, виділенням газів у процесі кристалізації та іншими технологічними особливостями. Слід зазначити, що зразки АК.УР-03 у процесі затвердіння мають усадку 12,5%, що відбилося на зміні початкового діаметра зразка (10,5 проти 12 мм для ДК2). Усадка об'єму створює внутрішні напруження і сприяє формуванню мікропор та тріщин. Це особливо характерно для матеріалів з високим ступенем зшивання полімерних ланцюгів.

Причиною утворення пор у нашому випадку є виділення вуглекислого газу (CO_2) у процесі реакції між ізоціанатом і поліолом [13]. Внаслідок цього процесу утворюються бульбашки в тілі затверділого полімеру. Ці бульбашки діють як концентратори напружень, підвищуючи ризик руйнування матеріалу. Авторами статті було проведено макроаналіз матеріалу ДК2 на наявність пір у тілі та їх відсотковий вміст (рисунки 2).

У цій роботі представлено аналіз пористості поверхні зразка ДК2, підданого попередньому охолодженню в рідкому азоті за температури -60°C протягом 5 хвилин, з подальшим механічним руйнуванням (таблиця 2).

Таблиця 2

Значення пористості поверхні зразка ДК2

Параметри	Площа, мм ²	Окружність, мм	Максимальний діаметр, мм	Мінімальний діаметр, мм
Середнє значення	0,003	0,168	0,056	0,033
Стандартне відхилення	0,018	0,272	0,082	0,043
Максимальне значення	0,516	4,284	1,262	0,637
Мінімальне значення	0	0	0	0
Загальна сума виміряних значень	3,01	163,953	55,086	32,537

У результаті проведеного дослідження було виявлено 977 пор, загальна площа яких склала 3,010 мм². Пори займають 9,79 % від загальної дослідженої площі поверхні зразка, що дорівнює 30,749 мм². Не дивлячись на значно вищі значення міцності полімерного матеріалу ДК2, порівняно з АК.УР-03, проте питання зниження пористості залишається відкритим. Одним з ефективних методів зниження пористості є введення дисперсних наповнювачів. Додавання порошкових дисперсних наповнювачів (наприклад, доломітового порошку) в кількості 0,001-5,0 % від маси суміші сприяє хімічному зв'язуванню вуглекислого газу, перетворюючи його на воду і мінеральні речовини. Це призводить до зменшення розмірів пор і зниження ризику руйнування матеріалу. Важливо визначити оптимальну кількість наповнювача, оскільки надмірне його введення може призвести до агломерації частинок та збільшення пористості. Забезпечення рівномірного розподілу наповнювача в полімерній матриці є ключовим для зниження пористості та покращення механічних властивостей композиту. Ще одним ефективним методом є функціоналізація поверхні наповнювачів. Це може покращити сумісність з полімерною матрицею та сприяти зменшенню пористості.

Необхідно провести подальші дослідження для глибшого розуміння механізмів утворення пір і розроблення ефективних методів їх запобігання.

Висновки

Проведене дослідження порівняльного аналізу міцнісних характеристик вітчизняних композитних матеріалів на поліуретановій основі продемонструвало значні переваги матеріалу ДК2 порівняно з АК.УР-03. Під час стискання ДК2 показав максимальну міцність 209 МПа та відносну деформацію 12,5% при навантаженні 30 кН, тоді як АК.УР-03 продемонстрував міцність 170 МПа та відносну деформацію 43%. Такі результати вказують на доцільність використання матеріалу ДК2 в конструкціях, що вимагають високої міцності та мінімальної деформації під навантаженням. Для подальшого покращення експлуатаційних характеристик матеріалу ДК2 рекомендується впровадження дисперсних наповнювачів, що дозволить значно знизити пористість і збільшити термін експлуатації композиту в реальних умовах. Подальші дослідження, спрямовані на

вивчення інших експлуатаційних характеристик матеріалу ДК2, дадуть змогу оптимізувати його застосування в інженерних системах і підвищити надійність захищених конструкцій.

Acknowledgements

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.

Перелік використаних джерел

- [1] Flexible polyurethane foam. I. FTIR analysis on residual isocyanate / Cole K.C., Gheluwe P. Van, Hébrard M.J., Leroux J. *Journal of Applied Polymer Science*. 1987. Vol. 34. No. 1. Pp. 395-407. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.1987.070340131>.
- [2] Mechanism of the stabilization of flexible polyether polyurethane foams by silicone-based surfactants / G.R. Rossmly et al. *Journal of Cellular Plastics*. 1981. Vol. 17. No. 6. Pp. 319-327. DOI: <https://doi.org/10.1177/0021955X8101700602>.
- [3] Enhanced mechanical and thermal properties of rigid polyurethane foam composites containing graphene nanosheets and carbon nanotubes / D. Yan et al. *Polymer International*. 2012. Vol. 61. No. 7. Pp. 1107-1114. DOI: <https://doi.org/10.1002/pi.4188>.
- [4] A Study on Polyurethane Hybrid Nanocomposite Foams Reinforced with Multiwalled Carbon Nanotubes and Silica Nanoparticles / Navidfar A., Sancak A., Yildirim K.B., Trabzon L. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2018. Vol. 57. No. 14. Pp. 1463-1473. DOI: <https://doi.org/10.1080/03602559.2017.1410834>.
- [5] Navidfar A., Trabzon L. Graphene type dependence of carbon nanotubes/graphene nanoplatelets polyurethane hybrid nanocomposites: Micromechanical modeling and mechanical properties. *Composites Part B*:

- Engineering*. 2019. Vol. 176. 107337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107337>.
- [6] Multi-scale modeling in thermal conductivity of Polyurethane incorporated with Phase Change Materials using Physics-Informed Neural Networks / B. Liu et al. *Renewable Energy*. 2024. Vol. 220. Article 119565. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119565>.
- [7] Woods G. The ICI polyurethanes handbook. 2-nd ed. New York: John Wiley&Sons, 1990. 362 p.
- [8] Fiore V., Bella G. Di, Valenza A. The effect of alkaline treatment on mechanical properties of kenaf fibers and their epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*. 2015. Vol. 68. Pp. 14-21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.025>.
- [9] Марчук Р., Мнацаканов Р. Аналіз полімерних композиційних матеріалів для підшипників ковзання. *Problems of Friction and Wear*. 2023. С. 55-62. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(98\).17359](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(98).17359).
- [10] Аналіз стану досліджень полімерних композитних матеріалів в Україні та світі / С.А. Федосов та ін. *Наукові нотатки*. 2021. № 72. С. 23-29. DOI: <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2021.72.4>.
- [11] Іщенко А., Підплетний В. Ремонт прокатного обладнання металополімерних матеріалів. *Прокатне виробництво*. 2000. № 6. С. 25-27.
- [12] Іщенко А., Рассохін Д., Носовська О. Відновлення прокатного обладнання за допомогою композитних матеріалів. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія : Технічні науки*. 2023. № 46. С. 55-61. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288125>.
- [13] Exploitation of Arundo donax L. hydrolysis residue for the green synthesis of flexible polyurethane foams / J. Bernardini et al. *BioResources*. 2017. Vol. 12, no. 2. Pp. 3630-3655. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3630-3655>.

COMPARATIVE ANALYSIS OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF DOMESTIC COMPOSITE MATERIALS BASED ON POLYURETHANE

Ishchenko A.O.	D.Sc. (Engineering), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6189-7830 , e-mail: ishchenko50@ukr.net ;
Devin L.M.	D.Sc. (Engineering), professor, director of the Educational center of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute – V.M. Bakul Institute for superhard materials of the National academy of sciences of Ukraine, head of the laboratory for tool reliability of superhard materials, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1452-9904 , e-mail: ldevin350@gmail.com ;
Rassokhin D.O.	PhD (Engineering), associate professor, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Leipzig, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3479-9485 , e-mail: Dmytro.rassokhin@htwk-leipzig.de ;
Nosovska O.V.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1313-4767 , e-mail: nosovska_o_v@pstu.edu ;
Kapustin S.V.	postgraduate student, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4204-8449 , e-mail: stanislav.kapustin.engineer@gmail.com ;
Böhm R.	D.Sc. (Engineering), professor, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Leipzig, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7768-4592 , e-mail: robert.boehm.1@htwk-leipzig.de

The article presents the results of a comparative analysis of the physical and mechanical properties of two domestic composite materials based on polyurethane - DK2 (developed by Priazovsky State Technical University) and AK.UR-03 (manufactured by Kapitel, Dnipro). The study is aimed at determining the ultimate compressive strength of materials and assessing their deformability, which is a critical factor in the selection of materials for the protection of equipment operating under high loads. Particular attention is also paid to the analysis of the porosity of materials as one of the key parameters affecting their durability and performance. Experimental tests were conducted on a 10-ton hydraulic press with a gradual increase in load. The change in the thickness of the samples at each stage was measured to calculate the degree of deformation and stresses. The results showed that the DK2 material demonstrates higher strength (209 MPa vs. 170 MPa for AK.UR-03) and significantly lower relative strain (12.5 % vs. 43 %, respectively). This indicates the feasibility of its use in structures where strength and dimensional stability under load are critical. In addition to the mechanical analysis, the porosity of the materials was studied using a 3D macroscope after their destruction in the cooled state. For the DK2 material, 977 pores were found, which occupied about 9.79 % of the surface area of the studied surface. The cause of pore formation was determined to be a chemical reaction between isocyanates and humidity, which results in the release of carbon dioxide, creating microbubbles in the polymer structure. Methods of reducing porosity, including the introduction of dispersed fillers (graphite,

copper oxide), which can bind CO_2 , improving the homogeneity of the structure and strength of the composite, have been proposed. The practical significance of the results lies in the possibility of effective use of the DK2 material in the mining, metallurgical, mechanical engineering, and energy industries to restore and protect equipment operating under heavy loads and aggressive environments. The work also opens up prospects for further research to improve the performance of polymer composites by modifying their structure and composition.

Keywords: polyurethane composites, compressive strength, porosity, deformation, dispersed fillers, materials science, polymer matrix.

References

- [1] K.C. Cole, P. Van Gheluwe, M.J. Hébrard, and J. Leroux, «Flexible polyurethane foam. I. FTIR analysis on residual isocyanate», *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 34, no. 1, pp. 395-407, 1987. doi: [10.1002/app.1987.070340131](https://doi.org/10.1002/app.1987.070340131).
- [2] G. R. Rossmly, H. J. Kollmeier, W. Lidy, H. Schator, and M. Wiemann, «Mechanism of the stabilization of flexible polyether polyurethane foams by silicone-based surfactants», *Journal of Cellular Plastics*, vol. 17, no. 6, pp. 319-327, 1981. doi: [10.1177/0021955X8101700602](https://doi.org/10.1177/0021955X8101700602).
- [3] D. Yan, L. Xu, C. Chen, J. Tang, X. Ji, and Z. Li, «Enhanced mechanical and thermal properties of rigid polyurethane foam composites containing graphene nanosheets and carbon nanotubes», *Polymer International*, vol. 61, no. 7, pp. 1107-1114, 2012. doi: [10.1002/pi.4188](https://doi.org/10.1002/pi.4188).
- [4] A. Navidfar, A. Sancak, K. B. Yildirim, and L. Trabzon, «A study on polyurethane hybrid nanocomposite foams reinforced with multiwalled carbon nanotubes and silica nanoparticles», *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 57, no. 14, pp. 1463-1473, 2018. doi: [10.1080/03602559.2017.1410834](https://doi.org/10.1080/03602559.2017.1410834).
- [5] A. Navidfar and L. Trabzon, «Graphene type dependence of carbon nanotubes/graphene nanoplatelets polyurethane hybrid nanocomposites: Micromechanical modeling and mechanical properties», *Composites Part B: Engineering*, vol. 176, pp. 107337, 2019. doi: [10.1016/j.compositesb.2019.107337](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107337).
- [6] B. Liu, Y. Wang, T. Rabczuk, T. Olofsson, and W. Lu, «Multi-scale modeling in thermal conductivity of polyurethane incorporated with phase change materials using physics-informed neural networks», *Renewable Energy*, vol. 220, article 119565, 2024. doi: [10.1016/j.renene.2023.119565](https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119565).
- [7] G. Woods, *The ICI Polyurethanes Handbook*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1990.
- [8] V. Fiore, G. Di Bella, and A. Valenza, «The effect of alkaline treatment on mechanical properties of kenaf fibers and their epoxy composites», *Composites Part B: Engineering*, vol. 68, pp. 14-21, 2015. doi: [10.1016/j.compositesb.2014.08.025](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.025).
- [9] R. Marchuk, and R. Mnatsakanov, «Analiz polimernykh kompozytsiynykh materialiv dlia pidshypnykh kovzannia» [«Analysis of polymer composite materials for sliding bearings»], *Problems of Friction and Wear*, pp. 55-62, 2023. doi: [10.18372/0370-2197.1\(98\).17359](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(98).17359). (Ukr.)
- [10] S.A. Fedosov, Yu.O. Odarchuk, V.Ye. Sakhniuk, D.A. Zakharchuk, and O. M. Vilihurskyi, «Analiz stanu doslidzhen polimernykh kompozytnykh materialiv v Ukraini ta sviti» [«Analysis of the state of research of polymeric composite materials in Ukraine and the world»], *Naukovi Notatky*, no. 72, pp. 23-29, 2021. doi: [10.36910/775.24153966.2021.72.4](https://doi.org/10.36910/775.24153966.2021.72.4). (Ukr.)
- [11] A. Ishchenko, and V. Pidpletnyi, «Remont prokatnoho obladnannia metalopolimernykh materialiv» [«Remont prokatnoho obladnannia metalopolimernykh materialiv»], *Prokatne vyrobnytstvo – Rolling Production*, no. 6, pp. 25-27, 2000. (Ukr.)
- [12] A. Ishchenko, D. Rassokhin, and O. Nosovska, «Vidnovlennia prokatnoho obladnannia za dopomohoiu kompozytnykh materialiv» [«Restoration of rolled equipment using composite materials»], *Visnyk Pryazov'skoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni Nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, no. 46, pp. 55–61, 2023. doi: [10.31498/2225-6733.46.2023.288125](https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288125). (Ukr.)
- [13] J. Bernardini et al., «Exploitation of Arundo donax L. hydrolysis residue for the green synthesis of flexible polyurethane foams», *BioResources*, vol. 12, no. 2, pp. 3630-3655, 2017. doi: [10.15376/biores.12.2.3630-3655](https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3630-3655).

Стаття надійшла 14.04.2025

Стаття прийнята 03.05.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Порівняльний аналіз характеристик міцності вітчизняних композитних матеріалів на поліуретановій основі / А.О. Іщенко та ін. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 50. С. 96-102. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336272>.