

УДК 539.3

О. А. Мікуліч

д.т.н., професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-596X>

Кафедра прикладної математики та механіки

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Т. В. Фурс*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4786-9980>

Кафедра прикладної математики та механіки

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

І. М. Войтюк

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4686-3573>

Кафедра прикладної математики та механіки

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

*автор-кореспондент, e-mail: t.furs@lntu.edu.ua

Дослідження зміни механічних характеристик під впливом ультрафіолету у жорстких пінополіуретанах

Цитувати як:

Мікуліч, О. А., Фурс, Т. В., Войтюк, І. М. (2025). Дослідження зміни механічних характеристик під впливом ультрафіолету у жорстких пінополіуретанах. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 171-181. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-16](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-16)

© 2025, Мікуліч О. А., Фурс Т. В., Войтюк І. М.

Анотація. У статті досліджено вплив ультрафіолету (сонячного світла), як деградуючого фактору, на зміну механічних характеристик жорстких пінополіуретанів (ППУ). Експериментальні дослідження проводилися для зразків, отриманих у лабораторних умовах. Пінополіуретан одержували способом заливки двокомпонентної суміші поліол-поліізоціанат з ваговими частками компонентів 1:2. Описано зовнішній вигляд ППУ.

Механічні характеристики визначали за результатами випробувань дослідних зразків на стиснення методом статичного навантаження. За діаграмами навантаження при статичному стиску визначено модуль Юнга, границю пропорційності, границю пластичності та відносну залишкову деформацію через 5 хвилин після розвантаження зразка. Дослідження проведені для двох серій зразків, одна з яких була свіжовиготовленою та без впливу ультрафіолетового випромінювання, а друга серія зразків піддавалася впливу ультрафіолетового випромінювання протягом трьох місяців. За результатами порівняння двох серій зразків встановлено зміни механічних характеристик жорстких поліуретанових пін, спричинені впливом УФ-випромінювання.

Оцінено стан поверхні поперечного перерізу зразка, опроміненого УФ-випромінюванням, і виявлено, що внутрішня частина зразків, опромінених УФ-випромінюванням, на відміну від зовнішньої поверхні, не зазнала пошкодження матеріалу, що може свідчити про збереження хімічної структури пінополіуретану

та його компонентів у внутрішніх шарах матеріалу. Визначено товщину деградованого поверхневого шару піни внаслідок впливу ультрафіолетового випромінювання протягом 3 місяців.

Встановлено, що вплив УФ-випромінювання (тривалість впливу 3 місяці) викликає незначну, але не критичну зміну механічних характеристик жорстких пінополіуретанів. Однак рекомендується захищати елементи ППУ від тривалого впливу ультрафіолетового світла, щоб запобігти його деградації, зберегти функціональні властивості та запобігти передчасному старінню.

Ключові слова: піна, поліуретан, УФ-деградація, модуль Юнга, міцнісні та деформаційні характеристики.

Вступ

У сучасному будівництві велика увага приділяється енергоефективності, що пов'язано з використанням інноваційних матеріалів. Одним із ключових аспектів у цьому питанні є правильна ізоляція будівельних конструкцій, яка залежить, передусім, від фізико-механічних властивостей матеріалу. Пінополіуретан є прикладом високоефективного ізоляційного матеріалу, який відповідає екологічним стандартам і є безпечним для здоров'я, що робить його ідеальним для використання у будівництві.

Проте, на пінополіуретани здійснює деградуючий вплив багато факторів, зокрема, і ультрафіолетове випромінювання. Оскільки не усі будівельні роботи можуть бути виконані в однакові терміни, актуальним є питання дослідження періоду допустимих термінів, при яких не відбуватиметься значна деградація матеріалу.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Пінополіуретан (ППУ) – це тепло-, гідро- й звукоізоляційний матеріал, що характеризується низькою вагою, хорошою міцністю, оптимальними механічними властивостями, хімічною стійкістю, своєрідною пористою структурою, завдяки якій має найменший коефіцієнт теплопровідності у порівнянні з іншими теплоізоляційними матеріалами [1-2]. З огляду на зазначені особливості, цей матеріал успішно використовується у будівельній галузі для різного роду практичних рішень [3-5].

Пінополіуретан є синтетичним полімером, який отримують шляхом хімічної реакції при змішуванні двох основних компонентів: поліолу й ізоціанату. Поліольний компонент у своєму складі містить також каталізатори, спінювачі й стабілізатори для забезпечення активної хімічної реакції між компонентами й утворення пористої структури.

Додаючи інші добавки можна модифікувати властивості матеріалу залежно від призначення [6]. Власне завдяки технологічності поліуретанові піни можуть мати різні склад, густину і пористість, що визначає їх властивості. Внаслідок цього ППУ може бути як м'яким та еластичним, так

і жорстким і твердим [7]. Для певного практичного рішення у будівництві використовують пінополіуретан, властивості якого відповідають призначенню й умовам експлуатації.

Основне призначення пінополіуретанів – поглинання кінетичної енергії. Вивчення поведінки цих матеріалів в умовах експлуатації базується, переважно, на експериментальних дослідженнях [7]. Зокрема, у роботі [8] наводяться результати випробувань на стиснення з метою визначення кривих навантаження-розвантаження для пінополіуретанових матеріалів. Експериментальні дослідження на стиснення дозволяють вивчати в'язкопружні властивості пін. Так, у роботі [9] представлені результати експериментальних вимірювань для визначення залежності в'язкості пінополіуретану від дисипації енергії.

За результатами механічних випробувань вивчають ударну поведінку поліуретанових пін при різних швидкостях деформації з метою оцінки поглинання енергії [10]. Такі експериментальні дослідження були використані також в роботі [11] для вивчення механічної поведінки та здатності пінополіуретану поглинати енергію.

Результати досліджень щодо зміни реакцій на удар твердих пінополіуретанів з різними швидкостями деформації, які були визначені при одноосовому стисканні при квазістатичних та динамічних швидкостях навантаження, представлені в роботі [12]. У роботі [13] на основі експериментальних досліджень досліджувалася зміна механічних характеристик пінополіуретанів шляхом модифікації їх компонентного складу.

Втім, пінополіуретани в процесі експлуатації можуть піддаватися не лише механічним навантаженням, а й впливу зовнішніх факторів середовища. Одним з таких факторів є дія ультрафіолету (сонячного світла), що може негативно впливати на властивості ППУ, змінюючи структуру, викликаючи деградацію матеріалу, змінюючи і скорочуючи термін його експлуатації, зменшуючи надійність й енергоефективність конструкції. І власне, схильність до впливу ультрафіолету називають одним з недоліків пінополіуретану, що й є тематикою даного дослідження.

Метою даної роботи є дослідження впливу ультрафіолету (сонячного світла) на механічні характеристики жорстких пінополіуретанів.

Методика експериментальних досліджень

Жорсткі поліуретанові піни отримували способом заливки у форми [14]. Для цього механічним способом ретельно змішували необхідні розраховані кількості (вагові) вихідних компонентів поліолу та поліізоціанату (1 : 2) до утворення однорідної суміші. Після змішування суміш, яка швидко починала пінитися, виливали у пластикові форми для подальшого спінювання і тверднення. Всі піни витримували при кімнатній температурі протягом трьох діб для забезпечення стабілізації матеріалу. У

такий спосіб отримували жорсткі поліуретанові композиції пористої структури і заданої форми (рис. 1). З отриманих композицій вирізали дослідні зразки кубічної форми розміром $30 \times 30 \times 30$ мм³.

Механічні характеристики матеріалу ППУ визначали за результатами випробування дослідних зразків на стиснення методом статичного навантаження. Експерименти виконували з використанням випробувальної машини марки МІ-40КУ, яка має програмне забезпечення в поєднанні з ПК.



Рис. 1. Зовнішній вигляд композицій жорсткого ППУ

Першу серію зразків досліджували відразу після виготовлення і не піддавали дії ультрафіолетового випромінювання, а другу – після тривалого витримування (3 місяці) при впливі УФ-випромінювання (сонячного світла) для вивчення ступеня впливу ультрафіолету на механічні характеристики ППУ.

Результати та обговорення

У результаті проведених досліджень встановлено, що жорсткий пінополіуретан змінює свої властивості внаслідок впливу ультрафіолету. Очевидно, ймовірним є те, під дією УФ-випромінювання руйнуються хімічні зв'язки в полімерах з утворення нових функціональних груп, що є продуктами фотоокиснення. Цей стан відомий як фотодеградація і для ППУ проглядається (виражається) у зміні кольору (пожовтінні) поверхні зразків (рис. 2).

Проте, за аналізом перерізу фотодегерованого зразка (рис. 2, крайнє фото справа) встановлено, що внутрішня частина УФ-опромінених зразків, на відміну від зовнішньої поверхні, не зазнала пожовтіння матеріалу, що може свідчити про збереження хімічної структури пінополіуретану та його

компонентів у внутрішніх шарах матеріалу. Товщина деградованого шару поверхні внаслідок впливу ультрафіолету коливається у межах 0,5-0,8 мм.



Рис. 2. Зовнішній вигляд зразків ППУ внаслідок впливу ультрафіолету

Отримані результати аргументуються тими даними, що жорсткі пінополіуретани більш щільні за структурою (мають більшу густину) у порівнянні з м'якими еластичними ППУ і мають високий відсоток закритих пор. Тому такі піни із закритими осередками не дозволяють газам легко виходити з неї та перешкоджають повітрю й сонячному випромінюванню проникати у товщу матеріалу (крім тонкого поверхневого шару) і хімічно взаємодіяти з його внутрішньою частиною.

Типові діаграми деформування ППУ при статичному стиску двох зразків із співвідношення компонентів 1:2 (поліол-ізоціанат), один з яких піддавався дії природного УФ-випромінювання протягом 3 місяців, представлені на рис. 3, 4.

Характер ходу отриманих експериментальних кривих обох серій зразків подібний, однак, величини їх механічних характеристик (модуль Юнга, границя пропорційності, границя плинності і відносна залишкова деформація через 5 хв після розвантаження зразка) дещо відрізняються.

Проведено порівняння результатів досліджень двох серій зразків та встановлено зміни механічних характеристик жорстких поліуретанових пін, спричинені впливом УФ-випромінювання протягом проміжку часу з місяці.

Зокрема, зафіксовано підвищення величини модуля Юнга на 53%, зростання границі пропорційності на 2,6 % й границі плинності на 14 %. Водночас відновлення фотодegradованих зразків ППУ (відносна залишкова деформація через 5 хв після розвантаження зразків) відбувається повільніше на 38 %.

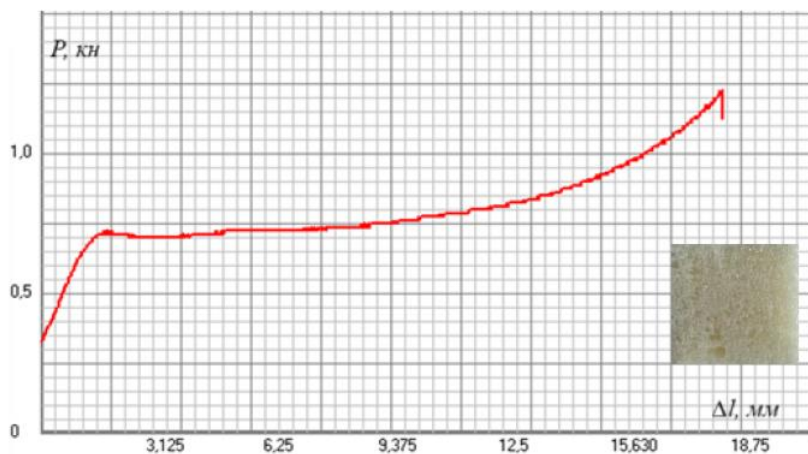


Рис. 3. Діаграма навантаження для без впливу ультрафіолету

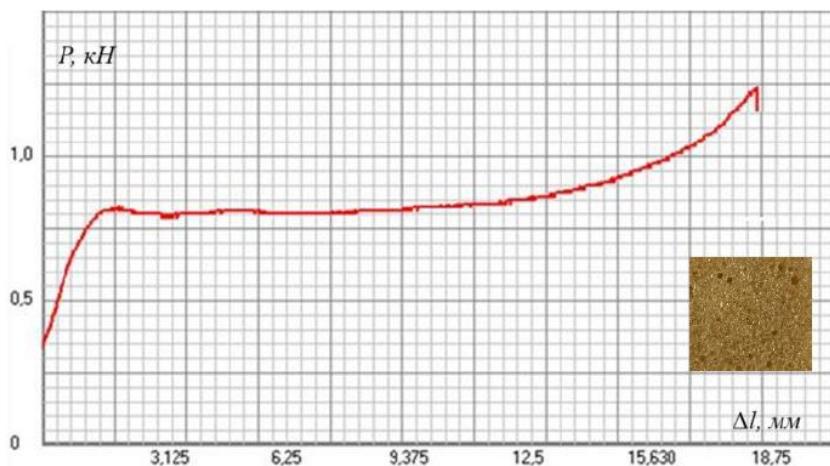


Рис. 4. Діаграма навантаження для УФ-опроміненого ППУ

Значення механічних характеристик, визначені за експериментальними даними досліджень механічних характеристик двох серій зразків ППУ, представлені у порівняльному вигляді на рис. 5.

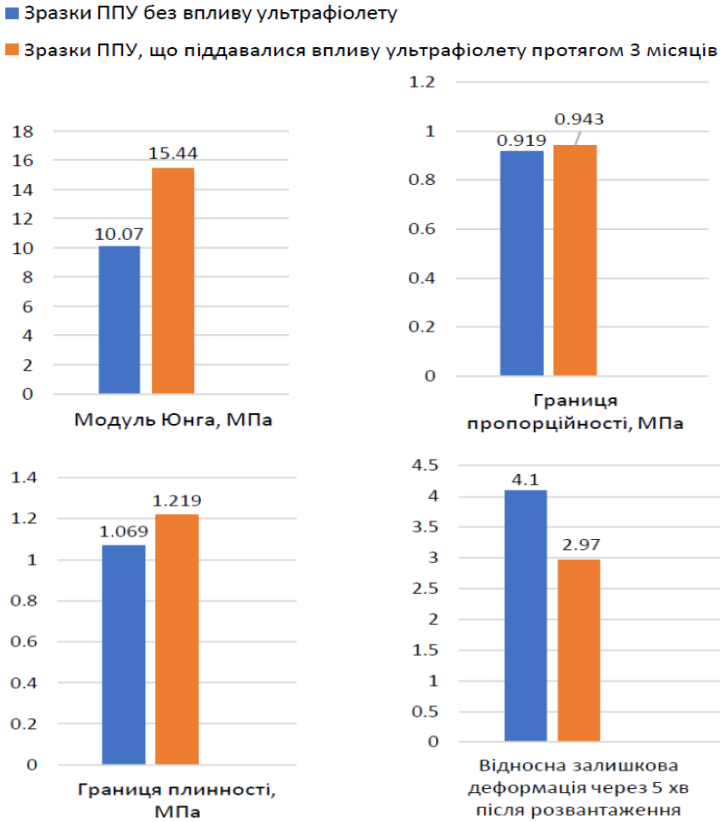


Рис. 5. Механічні характеристики зразків ППУ

Висновки

1. Внаслідок впливу ультрафіолету протягом 3 місяців відбулися зміни механічних характеристик жорстких поліуретанових піन: модуль Юнга збільшився на 53%, підвищилися границя пропорційності на 2,6% та границя текучості на 14%, а відновлення фотодegradованих зразків ППУ (відносна залишкова деформація через 5 хв після розвантаження зразків) відбувається повільніше на 38 % порівняно із матеріалом, що не піддавався впливу ультрафіолету. Це означає, що ультрафіолет викликає зниження еластичності матеріалу.

2. Встановлено, що ультрафіолетове випромінювання (сонячне світло) викликає фотоокислення зовнішньої поверхні жорстких ППУ з утворенням продуктів деградації, що проявляється візуально у вигляді

пожовтіння поверхні, але без видимих змін внутрішньої частини матеріалу. Товщина деградованого поверхневого шару піни внаслідок впливу ультрафіолету протягом 3 місяців становить 0,5 – 0,8 мм. Зміни механічних характеристик обумовлені, найімовірніше, більшою мірою внеском поверхневого фотоокисненого шару матеріалу, ніж поведінкою внутрішньої частини зразка.

3. При експлуатації вироби з ППУ доцільно захищати від тривалого впливу ультрафіолету, щоб запобігти його деградації, зберегти функціональні властивості та запобігти передчасному старінню.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Das, A.; Mahanwar, P. A brief discussion on advances in polyurethane applications. *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* 2020, 3, 93–101.
2. Wang Z., Wang C., Gao Y., Li Z., Shang Y, Li H. Porous Thermal Insulation Polyurethane Foam Materials. *Polymers.* 2023, 15(18):3818. <https://doi.org/10.3390/polym15183818>
3. Tychanicz-Kwiecień, M., Wilk, J., & Gil, P. (2019). Review of High-Temperature Thermal Insulation Materials. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 33(1), 271–284. <https://doi.org/10.2514/1.T5420>
4. Pan, L. A review of research on the performance of building insulation materials. *Urban Constr. Theory Res. Electron. Ed.* 2015, 1776–1777. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
5. S. Abu Dabous, T. Ibrahim, S. Shareef, E. Mushtaha, I. Alsyouf: Sustainable façade cladding selection for buildings in hot climates based on thermal performance and energy consumption. *Results in Engineering*, 16, 100643 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100643>

6. Mikulich O.A., Furs T.V., Shemet V.Ia., Voitiuk I.M. Vplyv modyfikatoriv na strukturno-fizychni kharakterystyky zhorstkykh pinopoliiuretaniv. Zbirnyk naukovykh prats «Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi». Lutsk, LNTU. 2024, Vyp. 22. S. 126-135. Šebenik, U.; Krajnc, M. Influence of the soft segment length and content on the synthesis and properties of isocyanate-terminated urethane prepolymers. *Int. J. Adhes. Adhes.* 2007, 153, 527–535. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-12)
1. Šebenik, U.; Krajnc, M. Influence of the soft segment length and content on the synthesis and properties of isocyanate-terminated urethane prepolymers. *Int. J. Adhes. Adhes.* 2007, 153, 527–535. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2006.10.001>
7. Bělík, R. & Fusek, M. (2019). Loading and Unloading Curve of Foam Material Based on Compression Test. *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering*, 69(3), 2019. 3-8. <https://doi.org/10.2478/scjme-2019-0023>
8. M. Abdullah, S. Ramtani, N. Yagoubi, Mechanical properties of polyurethane foam for potential application in the prevention and treatment of pressure ulcers. *Results in Engineering* 19 (2023) 101237. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101237>
9. P. Viot, Hydrostatic compression on polypropylene foam. *International Journal of Impact Engineering*. 36 (7) (2008) 975-989.
10. W. Ju, L. Jifeng, L. Lei, Research on Static Compression Test of Polyurethane Foam/Honeycomb Paperboard Composite Material. *The Open Materials Science Journal*. 9 (2015) 64-70.
11. J. V. Mane, S. Chandra, S. Sharma, H. Ali, V. M. Chavan, B. S. Manjunath, R. J. Patel, Mechanical Property Evaluation of Polyurethane Foam under Quasi-static and Dynamic Strain Rates - An Experimental Study. *Procedia Engineering*. 173 (2017) 726 – 731. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.160>
12. Mikulich, O.; Hulay, O.; Furs, T.; Shemet, V. Strength and mechanical characteristics of modified polyurethane foams. *Procedia Struct. Integr.* 2024, 59, 460–465. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.065>
13. T.V. Furs, O.V. Sad, O.A. Mikulich, O.I. Hulai, V.Ia. Shemet. Tekhnolohichni aspekty oderzhannia pinopoliiuretanu sposobom zalyvky. Mizhvuzivskyi zbirnyk «Naukovi notatky». Lutsk, 2024, № 78. S. 37-42. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2024.78.5>

Література

1. Das, A.; Mahanwar, P. A brief discussion on advances in polyurethane applications. *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* 2020, 3, 93–101.
2. Wang Z., Wang C., Gao Y., Li Z., Shang Y, Li H. Porous Thermal Insulation Polyurethane Foam Materials. *Polymers*. 2023, 15(18):3818. <https://doi.org/10.3390/polym15183818>
3. Tychanicz-Kwiecień, M., Wilk, J., & Gil, P. (2019). Review of High-Temperature Thermal Insulation Materials. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 33(1), 271–284. <https://doi.org/10.2514/1.T5420>
4. Pan, L. A review of research on the performance of building insulation materials. *Urban Constr. Theory Res. Electron. Ed.* 2015, 1776–1777. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
5. S. Abu Dabous, T. Ibrahim, S. Shareef, E. Mushtaha, I. Alsyouf: Sustainable façade cladding selection for buildings in hot climates based on thermal performance and

energy consumption. Results in Engineering, 16, 100643 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100643>

6. Мікуліч О.А., Фурс Т.В., Шемет В.Я., Войтюк І.М. Вплив модифікаторів на структурно-фізичні характеристики жорстких пінополіуретанів. *Збірник наукових праць «Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві»*. Луцьк, ЛНТУ. 2024, Вип. 22. С. 126-135. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-12)

7. Šebenik, U.; Krajnc, M. Influence of the soft segment length and content on the synthesis and properties of isocyanate-terminated urethane prepolymers. *Int. J. Adhes. Adhes.* 2007, 153, 527–535. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2006.10.001>

8. Bělík, R. & Fusek, M. (2019). Loading and Unloading Curve of Foam Material Based on Compression Test. *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering*, 69(3), 2019. 3-8. <https://doi.org/10.2478/scjme-2019-0023>

9. M. Abdullah, S. Ramtani, N. Yagoubi, Mechanical properties of polyurethane foam for potential application in the prevention and treatment of pressure ulcers. *Results in Engineering* 19 (2023) 101237. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101237>

10. P. Viot, Hydrostatic compression on polypropylene foam. *International Journal of Impact Engineering*. 36 (7) (2008) 975-989.

11. W. Ju, L. Jifeng, L. Lei, Research on Static Compression Test of Polyurethane Foam/Honeycomb Paperboard Composite Material. *The Open Materials Science Journal*. 9 (2015) 64-70.

12. J. V. Mane, S. Chandra, S. Sharma, H. Ali, V. M. Chavan, B. S. Manjunath, R. J. Patel, Mechanical Property Evaluation of Polyurethane Foam under Quasi-static and Dynamic Strain Rates - An Experimental Study. *Procedia Engineering*. 173 (2017) 726 – 731. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.160>

13. Mikulich, O.; Hulay, O.; Furs, T.; Shemet, V. Strength and mechanical characteristics of modified polyurethane foams. *Procedia Struct. Integr.* 2024, 59, 460–465. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.065>

14. Т.В. Фурс, О.В. Сад, О.А. Мікуліч, О.І. Гулай, В.Я. Шемет. Технологічні аспекти одержання пінополіуретаніу способом заливки. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2024, № 78. С. 37-42. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2024.78.5>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 13.05.2025	Received 13.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 14.05.2025	Received in revised form 14.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

O. A. Mikulich

D.Sc. in Engineering, Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-596X>
 Department of Applied Mathematics and Mechanics
 Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

T. V. Furs*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4786-9980>
 Department of Applied Mathematics and Mechanics
 Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

I. M. Voitiuk

Ph.D. Student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4686-3573>

Department of Applied Mathematics and Mechanics

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

*corresponding author, e-mail: t.furs@lntu.edu.ua

Research on the change of mechanical characteristics under the influence of ultraviolet in rigid polyurethane foams

How to Cite:

Mikulich, O. A., Furs, T. V., Voitiuk I. M. (2025). Research on the change of mechanical characteristics under the influence of ultraviolet in rigid polyurethane foams. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 171-181. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-16](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-16)

Abstract. The paper investigated the influence of ultraviolet (sunlight) as a degrading factor on the change in the mechanical characteristics of rigid polyurethane foams (PPU). Experimental studies were performed for groups of samples obtained in laboratory conditions. Mechanical characteristics were determined based on the results of tests of experimental samples under the action of a compressive load simulating static deformation. Polyurethane foam was obtained by pouring a two-component polyol-polyisocyanate mixture with weight fractions of components 1:2. The appearance of PPU compositions is described.

Mechanical characteristics were determined based on the results of tests of experimental samples under the action of a compressive load simulating static deformation. According to the load diagrams under static compression, Young's modulus, proportional limit, plastic limit, and relative residual deformation were determined 5 min after unloading the sample. The studies were conducted for two series of samples, one of which was freshly manufactured and without exposure to ultraviolet light, and the second series of samples was exposed to ultraviolet light for three months. The results of the studies of two series of samples were compared, and changes in the mechanical characteristics of rigid polyurethane foams caused by the influence of UV radiation were established.

The state of the surface of the cross-section of the UV-irradiated sample was assessed and it was found that the inner part of the UV-irradiated samples, unlike the outer surface, did not undergo yellowing of the material, which may indicate the preservation of the chemical structure of the polyurethane foam and its components in the inner layers of the material. The thickness of the degraded surface layer of the foam due to the influence of ultraviolet light for 3 months was determined.

It was established that the effect of UV radiation (exposure duration 3 months) causes a slight but not critical change in the mechanical characteristics of rigid polyurethane foams. However, it is recommended to protect PPU elements from prolonged exposure to ultraviolet light to prevent their degradation, preserve functional properties, and prevent premature aging.

Keywords: foam, polyurethane, UV-degradation, Young's modulus, strength, and deformation characteristics.