

УДК 539.3

**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

**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

**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](mailto:t.furs@lntu.edu.ua)

## Дослідження впливу перлітової добавки на структуру та механічні властивості жорсткого пінополіуретану

Цитувати як:

Фурс, Т. В., Мікуліч, О. А. Войтюк І. М. (2025). Дослідження впливу перлітової добавки на структуру та механічні властивості жорсткого пінополіуретану. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 24, 599-608. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-51](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-51)

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

*У роботі досліджено вплив перлітової добавки (спучений гранульований перліт) на структурні характеристики та механічні властивості жорсткого пінополіуретану (ППУ). На основі двокомпонентної суміші поліолу та поліізоціанату (у ваговому співвідношенні 20 : 40) способом заливки синтезовано шість груп ППУ з різним кількісним вмістом спученого перліту в межах 0...10 мас.ч.*

*Встановлено, що перлітова добавка входить у поліуретанову матрицю гетерогенно в якості наповнювача, формуючи композитний пінистий матеріал.*

*Проведено морфологічні дослідження структури на оцінювання пористості піни та визначено густину зразків модифікованої піни. Виявлено кореляцію між пористістю і густиною ППУ при додаванні перлітової гранульованої добавки.*

*Дослідження механічних властивостей модифікованих перлітовою добавкою жорстких ППУ здійснено на основі випробувань на стиск методом статичного осьового навантаження. За діаграмами стиску визначено величини механічних характеристик (модуль Юнга, межа плинності, відносна пластична деформація) залежно від вмісту добавки перліту. Встановлено, що при кількості перліту 4...6 мас.ч. відбувається зниження модуля пружності і границі плинності унаслідок підвищення пористості ППУ. За концентрації понад 6 мас.ч. цієї добавки спостерігається зворотна тенденція через ущільнення структури та агрегацію перлітових гранул.*

*Результати дослідження вказують на кореляцію між структурними змінами та механічною поведінкою ППУ-композитів. Зазначено, що кількісний вміст гранульованого перліту впливає на неоднорідність зміни і варіювання механічних характеристик, зокрема, модуля Юнга, межі плинності та відносної пластичної деформації.*

*Зроблено висновок щодо актуальності проведених досліджень й отриманих результатів в напрямку прикладних аспектів використання ППУ у будівництві та інших галузях інженерної діяльності в якості теплоізоляційних та конструкційних матеріалів з регульованими властивостями.*

*Ключові слова: пінополіуретан, модифікування, пористість, густина, механічні характеристики, деформація*

## **Вступ**

Пінополіуретани (ППУ) є класом полімерів з надзвичайно широким спектром застосування. Завдяки своїй універсальності й доступності вони є одними з найпоширеніших матеріалів у сучасному світі. Ці матеріали виконують функції утеплювача і звукоізолятора у будівництві (ізоляція фундаменту, стін, обшивка, міжповерхові перекриття), у меблевій промисловості, автомобілебудуванні та у багатьох інших сферах використовуються як функціональні елементи виробів (матраци, сидіння, взуття тощо) [1-2].

Проте, для оптимізації їх властивостей, необхідних в умовах експлуатації, а також розширення їх функціональних можливостей у різних сферах, потрібно вдаватися до модифікування.

### **Аналіз літературних джерел та постановка проблеми.**

Дослідження останніх років демонструють, що введення добавок до ППУ дозволяє покращити теплоізоляційні та вогнестійкі характеристики цього матеріалу, водночас зберігаючи або змінюючи механічні властивості. Зокрема, для стабілізації пінополіуретану в процесі спінування використовуються силіконові поверхнево-активні речовини. Показано, що силікон як поверхнево-активна речовина має важливий вплив на пороутворення і пористість піни [3]. У роботах [3-5] досліджено вплив силіконової поверхнево-активної речовини на механічні, термічні та акустичні властивості гнучких пінополіуретанів.

Альтернативним методом отримання пін із специфічними властивостями є використання функціональних наповнювачів. Зокрема, досліджено використання волокон на основі целюлози як армуючого наповнювача у виготовленні поліуретанових пін [6].

Для високопродуктивних застосувань розробляються удосконалені поліуретанові піни з підвищеною вогнестійкістю й хорошими механічними властивостями [7-9].

Поліуретанові піни можуть мати різну пористість, густина, структуру та властивості залежно від добавок і технології. Тому напрямком

модифікування ППУ нині розвивається. Серед таких досліджень особливу увагу привертає модифікування добавкою перліту, характеристики якого можуть бути ефективними для оптимізації властивостей ППУ й розширення їх функціональних можливостей у різних галузях, зокрема, в будівництві у якості тепло- і звукоізоляційного матеріалу.

**Мета і завдання дослідження.** Метою даної роботи є дослідження впливу перлітової добавки на структуру та механічні властивості жорсткого пінополіуретану.

**Завдання дослідження:** способом заливки синтезувати серію жорстких ППУ з різним вмістом добавки гранульованого спученого перліту; методом оптичної мікроскопії дослідити структуру та експериментально дослідити поведінку модифікованих пін за дії статичного осьового навантаження (стиску) й визначити їх механічні характеристики; зробити висновок на основі одержаних результатів.

### Матеріали та методи

Сировиною для одержання поліуретанової піни були основні компоненти поліол марки Elastopor H 1701/9 та поліізоціанат марки ISO PMDI 92140, виробник BASF Polyurethanes GmbH, Germany (рис. 1). Склад поліолу містив суміш полієфіру, стабілізаторів, каталізаторів, антипірену, води (спінювач). Для виготовлення жорсткого пінополіуретану компоненти поліол і поліізоціанат брали у співвідношенні 20:40 мас.ч.



Рис. 1. Зовнішній вигляд вихідних компонентів

Модифікуючою добавкою слугував природний спучений перліт (агроперліт) гранульований з розміром фракцій 0,2 ... 2 мм (рис. 1). Такий вид перліту є легким пористим матеріалом. Вид модифікуючої добавки був вибраний на основі аналізу характеристик перліту: здатність до світловідбивання та низький коефіцієнт теплопровідності (нижчий порівняно з ППУ), що є доцільно для оптимізації властивостей ППУ, особливо для використання у будівельній галузі.

Поліол змішували з перлітовою добавкою до однорідного стану, після чого додавали ізоціанатну складову при інтенсивному механічному перемішуванні аж до початку спінювання. Отриману реакційну суміш заливали у відкриті пластикові форми й залишали для формування піни і

подальшого затвердіння, та витримували її при кімнатній температурі протягом 24 годин для стабілізації. Виготовляли шість груп ППУ-композицій з вмістом перліту 0, 2, 4, 6, 8 і 10 мас.ч. відносно поліол-полізоціанатної суміші (співвідношення мас.ч. 20:40). З отриманих композицій вирізали дослідні зразки кубічної форми розміром близько  $30 \times 30 \times 30 \text{ мм}^3$  (рис. 2 – зовнішній вигляд серії дослідних зразків).



Рис. 2. Серія дослідних зразків ППУ

Дослідження поведінки ППУ під дією механічних навантажень визначали за результатами випробувань дослідних зразків на стиснення методом статичного осьового навантаження з використанням випробувальної машини марки МІ-40КУ, оснащеної програмним забезпеченням. За отриманими діаграмами навантажень визначали величини механічних характеристик залежно від вмісту добавки перліту.

### Результати та обговорення

У результаті модифікування ППУ перлітовою добавкою формується композит, матрицею якого є поліуретанова піна, а наповнювачем – перліт. Таке модифікування призводить до зміни структури матеріалу. Спостерігається зміна пористості як за морфологією, так і за величиною. Спучений перліт – це пористий матеріал. Його включення у структуру ППУ створює додаткові пори до вже існуючої матриці полімеру, тому відбувається збільшення загального об'єму пор, тобто пористості матеріалу.

Водночас змінюється і морфологія (структура) пор (рис. 3), що посилюється зі збільшенням вмісту перлітової добавки. Гранули перліту у поліуретановій матриці створюють макропори, які відрізняються від власних мікропор ППУ. З підвищенням вмісту перлітової добавки кількість і розміри макропор зростають, а мікропористість поліуретанової піни знижується. Таким чином, ППУ-композит має гетерогенну (неоднорідну) структуру матеріалу (перлітові включення в середовищі ППУ) і гетерогенну



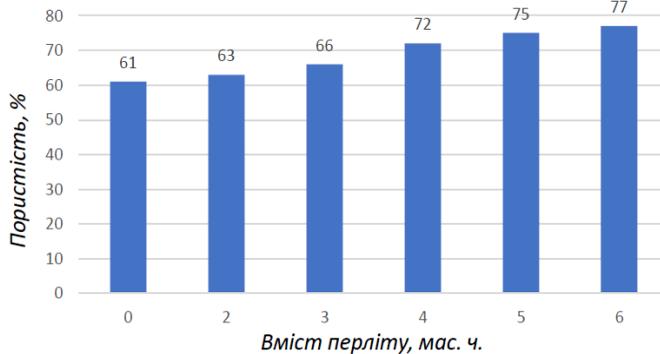


Рис. 4. Пористість жорстких ППУ, модифікованих перлітовою добавкою

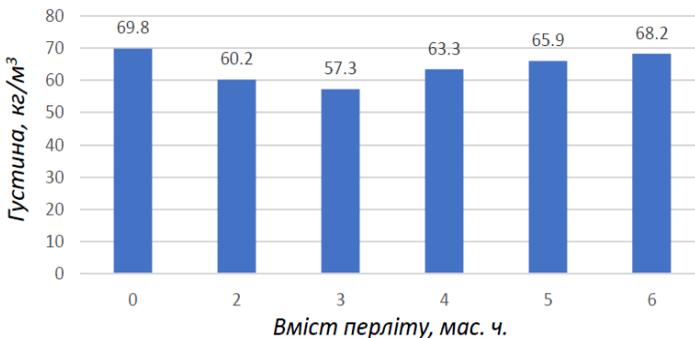


Рис. 5. Густина жорстких ППУ, модифікованих перлітовою добавкою

У результаті проведених експериментальних випробувань на стиск було отримано діаграми навантажень (за стиску) для кожної серії шести груп зразків ППУ з вмістом перлітової добавки від 0 до 10 мас.ч. Типові діаграми навантаження-деформація представлені на рис. 6. Значення механічних характеристик ППУ, модифікованих перлітовою добавкою (спучений перліт) різного вагового вмісту, представлені у таблиці 1.

Як показали результати дослідження кожної групи зразків, збільшення вмісту перлітової добавки від 0 до 6 мас.ч. викликає зниження величини модуля Юнга на 40 % ППУ і зниження межі плинності на 31% (табл. 1); пружність і жорсткість піни знижується. Такі зміни механічних властивостей можливі, оскільки відбулося підвищення пористості матеріалу водночас зі зменшенням його густини.

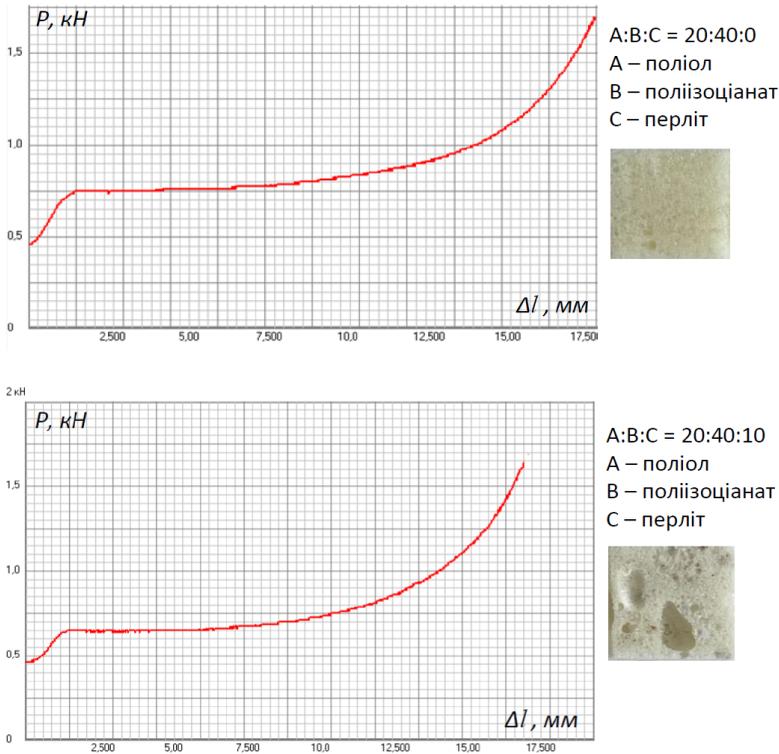


Рис. 6. Діаграми стиску зразків ППУ

Таблиця 1. Дані дослідження механічних характеристик зразків ППУ

Компонентний склад зразків, мас.ч. A : B : C*	Модуль Юнга, E, МПа	Межа плинності, $\sigma_{пл}$ , МПа	Відносна пластична деформація, $\delta_{пл}$ , %
20 : 40 : 0	13.18	1.59	32.6
20 : 40 : 2	11.25	1.63	39.6
20 : 40 : 4	8.43	1.25	37.4
20 : 40 : 6	7.88	1.09	33.1
20 : 40 : 8	9.95	1.32	34.4
20 : 40 : 10	11.31	1.49	38.5

\* A – поліол, B – поліізоціанат, C – перліт

Втім, для зразків ППУ з вмістом перліту більше 6 мас.ч. спостерігається підвищення величини модуля пружності та межі плинності.

На цьому проміжку модифікування величина відносної пластичної деформації змінюється варіативно від кількісного вмісту модифікуючої добавки. Виявлені особливості механічної поведінки модифікованої перлітом піни показують кореляцію між структурними характеристиками (пористість, густина, морфологія), механічними характеристиками і кількісним вмістом перлітової добавки.

### **Висновки**

Встановлено, що перлітова добавка входить у поліуретанову матрицю гетерогенно в якості наповнювача, формуючи композитний пінистий матеріал. Виявлено, що перлітові вclusions в середовищі ППУ неоднорідно розподілені, формуючи неоднорідну структуру. Така особливість посилюється й проявляється більш виражено у міру збільшення вмісту перлітової добавки.

Пористість носить неоднорідний характер, зростає зі збільшенням вмісту перліту. Густина модифікованих ППУ корелюється і варіюється з кількісним вмістом гранульованого перліту.

Особливість природи і властивостей гранульованого спученого перліту та його кількісний вміст впливає на неоднорідність зміни і на варіювання механічних характеристик, зокрема, модуля Юнга, межі плинності та відносної пластичної деформації.

Додавання гранульованого перліту у поліуретанову матрицю дає змогу одночасно змінювати морфологію піни, її пористість та механічні властивості.

Отримані результати мають новизну, є актуальними в напрямку прикладних аспектів використання ППУ у будівництві та інших галузях інженерної діяльності, однак потребують подальших досліджень щодо способу оптимізації процесу модифікування з отриманням однорідного за структурою матеріалу з покращеними властивостями.

### **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. Ates, M., Karadag, S., Eker, A.A. and Eker, B. (2022), Polyurethane foam materials and their industrial applications. *Polym Int*, 71: 1157-1163. <https://doi.org/10.1002/pi.6441>
2. Gama, N. V., Ferreira, A., & Barros-Timmons, A. (2018). Polyurethane Foams: Past, Present, and Future. *Materials*, 11(10), 1841. <https://doi.org/10.3390/ma11101841>
3. Olena Mikulich, Olga Hulay, Tetiana Furs, Vasylyna Shemet. (January 2024), Strength and mechanical characteristics of modified polyurethane foams. *Procedia Structural Integrity* 59(21):460-465 <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.065>
4. Baferani, A.H., Keshavarz, R., Asadi, M. and Ohadi, A.R. (2018), Effects of Silicone Surfactant on the Properties of Open-Cell Flexible Polyurethane Foams. *Adv. Polym. Technol.*, 37: 71-83. <https://doi.org/10.1002/adv.21643>
5. Mantha, S., Chao, H., Ylitalo, A., Fitzgibbons, T., Zhou, W., Ginzburg, V., & Wang, Z. G. (2021). Effect of silicone surfactant on the CO<sub>2</sub> bubble nucleation in polyol. In APS March Meeting Abstracts (Vol. 2021, pp. R04-012).
6. Stanzione, M., Oliviero, M., Cocca, M., et al. Tuning of polyurethane foam mechanical and thermal properties using ball-milled cellulose, Carbohydrate Polymers, 231, 2020, 115772, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115772>.
7. Lubczak R., Dominik Broda D., Agata W., Renata Kus M. (2018), Preparation and characterization of boron-containing polyurethane foams with carbazole. *Polym. Test*. 70:403–412. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.07.027>
8. Chai H., Duan Q., Jiang L., Sun J. (2019), Effect of inorganic additive flame retardant on fire hazard of polyurethane exterior insulation material. *J. Therm. Anal. Calorim.* 135:2857–2868. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7797-3>
9. Obiechefu Z., Chibuzor O., Naidoo D., Hendrica M., Selby M. (2024), Comparison of biowaste fillers extracted from fish scales and collagen on the mechanical properties of high-density polyurethane foams. *Polymers*. 16:2825. <https://doi.org/10.3390/polym16192825>

### Література

1. Ates, M., Karadag, S., Eker, A.A. and Eker, B. (2022), Polyurethane foam materials and their industrial applications. *Polym Int*, 71: 1157-1163. <https://doi.org/10.1002/pi.6441>
2. Gama, N. V., Ferreira, A., & Barros-Timmons, A. (2018). Polyurethane Foams: Past, Present, and Future. *Materials*, 11(10), 1841. <https://doi.org/10.3390/ma11101841>
3. Olena Mikulich, Olga Hulay, Tetiana Furs, Vasylyna Shemet. (January 2024), Strength and mechanical characteristics of modified polyurethane foams. *Procedia Structural Integrity* 59(21):460-465 <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.065>
4. Baferani, A.H., Keshavarz, R., Asadi, M. and Ohadi, A.R. (2018), Effects of Silicone Surfactant on the Properties of Open-Cell Flexible Polyurethane Foams. *Adv. Polym. Technol.*, 37: 71-83. <https://doi.org/10.1002/adv.21643>
5. Mantha, S., Chao, H., Ylitalo, A., Fitzgibbons, T., Zhou, W., Ginzburg, V., & Wang, Z. G. (2021). Effect of silicone surfactant on the CO<sub>2</sub> bubble nucleation in polyol. In APS March Meeting Abstracts (Vol. 2021, pp. R04-012).

6. Stanzione, M., Oliviero, M., Cocca, M., et al. Tuning of polyurethane foam mechanical and thermal properties using ball-milled cellulose, Carbohydrate Polymers, 231, 2020, 115772, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115772>.

7. Lubczak R., Dominik Broda D., Agata W., Renata Kus M. (2018), Preparation and characterization of boron-containing polyurethane foams with carbazole. *Polym. Test.* 70:403–412. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.07.027>

8. Chai H., Duan Q., Jiang L., Sun J. (2019), Effect of inorganic additive flame retardant on fire hazard of polyurethane exterior insulation material. *J. Therm. Anal. Calorim.* 135:2857–2868. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7797-3>

9. Obiechefu Z., Chibuzor O., Naidoo D., Hendrica M., Selby M. (2024), Comparison of biowaste fillers extracted from fish scales and collagen on the mechanical properties of high-density polyurethane foams. *Polymers.* 16:2825. <https://doi.org/10.3390/polym16192825>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 12.11.2025	Received 12.11.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 13.11.2025	Received in revised form 13.11.2025
Прийнято 25.11.2025	Accepted 25.11.2025
Опубліковано 25.12.2025	Published 25.12.2025

### 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

### 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

### 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](mailto:t.furs@lntu.edu.ua)

## Investigation of the effect of perlite additive on the structure and mechanical properties of rigid polyurethane foam

How to Cite:

Furs, T. V., Mikulich, O. A., Voitiuk, I. M. (2025). Investigation of the effect of perlite additive on the structure and mechanical properties of rigid polyurethane foam. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 24, 599-608. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-51](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-51)

*Abstract.* This work investigates the influence of a perlite additive (expanded granulated perlite) on the structural characteristics and mechanical properties of rigid polyurethane foam (RPUF). Based on a two-component mixture of polyol and polyisocyanate (in a weight ratio of 20:40), six groups of RPUF were synthesized by the

casting method with different quantitative contents of expanded perlite in the range of 0–10 parts by weight (pbw).

The study focused on determining the patterns of change in the structural and mechanical characteristics of PPU depending on the quantitative content of the modifying additive. It was established that the perlite additive is incorporated into the polyurethane matrix heterogeneously as a filler, forming a composite foam material.

Morphological studies of the structure were carried out to evaluate the foam porosity, and the density of the modified foam samples was determined. A correlation was found between the porosity and density of RPUF with the addition of the granulated perlite additive.

The investigation of the mechanical properties of rigid RPUF modified with the perlite additive was carried out based on compression tests using the static axial loading method. From the compression diagrams, the values of mechanical characteristics (Young's modulus, yield strength, relative plastic deformation) were determined depending on the perlite additive content. It was found that at a perlite content of 4–6 pbw, a decrease in the modulus of elasticity and yield strength occurs due to an increase in the RPUF porosity. At concentrations of this additive above 6 pbw, an opposite trend is observed due to the densification of the structure and the aggregation of perlite granules.

The research results indicate a correlation between structural changes and the mechanical behavior of RPUF composites. It is noted that the quantitative content of granulated perlite influences the non-uniformity of change and variation of mechanical characteristics, in particular, Young's modulus, yield strength, and relative plastic deformation.

A conclusion is drawn regarding the relevance of the conducted research and the obtained results in the context of applied aspects of using RPUF in construction and other engineering fields as thermal insulation and structural materials with adjustable properties.

*Keywords:* polyurethane foam, modification, porosity, density, mechanical characteristics, deformation.