

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-46>

УДК 004.005.591.6+001.8]:685.34

ЗЛОТЕНКО БОРИС

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0002-0870-8535>e-mail: zlotenko.bm@knuutd.com.ua**ВОЛЯНИК ОЛЕКСІЙ**

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0002-7278-0910>e-mail: volyanyk.oy@knuutd.edu.ua**РУБАНКА МИКОЛА**

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0003-2367-0333>e-mail: rubanka.mm@knuutd.edu.ua**СТАЦЕНКО ДМИТРО**

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0002-3064-3109>e-mail: statsenko.dy@knuutd.com.ua**МЕЛЬНИК ГЕННАДІЙ**

Київський національний університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0002-0002-7663>e-mail: melnik.gv@knuutd.com.ua

ВИКОРИСТАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ ЗАСОБІВ І МЕТОДІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У ВЗУТТЄВІЙ ГАЛУЗІ

На базі персонального комп'ютера і мікроконтролера ArduinoUno розроблено експериментальну установку для вимірювання та реєстрації тиску взуття на стопу людини під час стояння і ходьби. Визначено комфортні величини тиску взуття на стопу, які лежать в межах від 10,5 кПа до 11,0 кПа. Запропоновано інноваційний метод проектування внутрішньої форми взуття на основі результатів 3D-сканування стопи споживача і подальшої модифікації колодки накладками, виготовленими за технологією 3D-друку, відповідно до анатомічних особливостей людини. Розроблено технологію 3D-друку підшов підвищеної гнучкості для жіночого спортивного взуття. Проведені дослідження фізико-механічних властивостей зразків з поліетилентерефталат-гліколю (PETG), отриманих за технологією 3D-друку з різною густиною об'ємного наповнення, визначені величини розривного напруження і відносного подовження друкованих зразків. Отримані значення параметрів степеневого закону, що відображає залежність напружень від деформації при розтяганні друкованих зразків. Для апроксимації експериментальних кривих розтягання використано степеневий закон Людвіка, зокрема розраховано значення параметрів K і n для різної щільності друку. Показано, що зі збільшенням густини заповнення розривне напруження зростає, а відносна деформація зменшується, що свідчить про зміцнення структури матеріалу. Побудовано графічні залежності напруження-деформація для зразків з PETG при 60–100% щільності друку. Отримані результати дозволяють прогнозувати поведінку матеріалу під навантаженням і можуть бути використані при проектуванні полімерних виробів, створених методом адитивного виробництва, для забезпечення їх надійності, функціональності, безпеки експлуатації та довговічності, а також адаптації до індивідуальних умов використання в різних сферах промисловості.

Ключові слова: методи і засоби, комп'ютерні науки, взуттєве виробництво, 3D сканування, 3D друк, фізико-механічні властивості, розривне напруження, деформація.

ZLOTENKO BORYS, VOLIANYK OLEKSII, RUBANKA MYKOLA,**STATSENKO DMYTRO, MELNYK HENNADI**

Kyiv National University of Technologies and Design

USE OF INNOVATIVE COMPUTER TOOLS AND SCIENTIFIC RESEARCH METHODS IN THE FOOTWEAR INDUSTRY

An experimental setup based on a personal computer and an Arduino Uno microcontroller was developed to measure and record footwear pressure on the human foot during standing and walking. Comfortable pressure values exerted by footwear on the foot were determined to be within the range of 10.5 to 11.0 kPa. An innovative method for designing the internal shape of footwear was proposed, based on the results of 3D foot scanning and subsequent modification of the shoe last using 3D-printed pads tailored to the individual anatomical features of the user. A 3D printing technology was developed to create flexible soles for women's sports shoes. Research was conducted on the physico-mechanical properties of polyethylene terephthalate glycol (PETG) specimens produced by 3D printing with varying infill densities. The values of tensile strength and relative elongation of the printed specimens were determined. The obtained data were used to calculate the parameters of a power law equation that describes the stress-strain relationship during tensile testing of the printed samples. To approximate the experimental tensile curves, the Ludwik power law was used, and the parameters K and n were calculated for different print densities. It was shown that with increasing infill density, the tensile strength increases while the relative elongation decreases, indicating strengthening of the internal structure of the material. Stress-strain diagrams were constructed for PETG samples with 60–100% infill density. The obtained results make it possible to predict the material's behaviour under load and can be used in the design of polymer products manufactured by additive technologies to ensure their reliability, functionality, operational safety, and durability, as well as adaptation to individual usage conditions in various industrial applications.

Keywords: methods and tools, computer science, footwear production, 3D scanning, 3D printing, physical and mechanical properties, tensile stress, deformation.

Стаття надійшла до редакції / Received 01.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 16.05.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В сучасних умовах для забезпечення виробництва виробів легкої промисловості високої якості таких, як одяг і взуття необхідно оперувати великими даними стосовно розмірів і анатомічних особливостей людського тіла [1]. Вимір просторових характеристик стопи важливий для розробки форми взуття, оскільки за наявності взуття, що не відповідає індивідуальним характеристикам стопи, зростає ризик виникнення проблем із опорно-руховим апаратом, біль у ногах та деформація стопи. Незважаючи на те, що 3D-сканування поверхні використовувалося для вимірювання форми стопи з середини 1990-х років, лише нещодавно було використано статистичне моделювання форми стоп з використанням складних методів морфологічного та багатовимірного статистичного аналізу для ідентифікації окремих типів стопи з даних 3D-форми [2]. Отже, удосконалення методів досліджень форми стопи є актуальним завданням в процесі створення високоякісного, комфортного взуття.

Ще однією інноваційною технологією, яка знайшла широке використання у взуттєвому виробництві є 3D-друк виробів з полімерних матеріалів. Застосування адитивних технологій у взуттєвому виробництві дає змогу створити складну просторову форму підшов, забезпечити решітчасту структуру їх матеріалу, що розширює технологічність конструкції взуття, не обмежуючи креативність при створенні дизайну, а також відкриває можливості для підвищення комфортності взуття за рахунок покращення фізико-механічних характеристик низу. Існуюча технологія і обладнання дозволяють здійснювати 3D-друк з різною щільністю наповнення полімерним матеріалом, що зумовлює відмінності фізико-механічних властивостей виробів [3]. Для успішного проектування виробів, отриманих за технологією 3D-друку необхідно мати інформацію про такі важливі показники полімерного матеріалу, як розривні напруження, відносно видовження при розриві, а також характер і параметри кривої напруження – деформація.

Аналіз досліджень та публікацій

Метод 3D сканування розроблено з використанням передових оптоелектронних технологій для збирання антропометричних даних. Згідно з методом 3D сканування можна отримати дані про поверхню та об'єм людського тіла, а також розглянути його в поперечному розрізі. Переваги застосування 3D сканування полягають у можливості дослідити за короткий проміжок часу велику кількість людей і отримати великі дані, які дозволяють побудувати цифровий образ з великою точністю [4]. Зображення, отримані під час 3D-сканування, зокрема використовуються для отримання цифрових образів стопи людини під час індивідуального виготовлення взуття [5].

3D-друк у виробництві взуття дозволяє зменшити відходи матеріалу, підвищити формостійкість конструкції і рівень комфорту для задоволення потреб індивідуальних споживачів, пов'язаних з порушеннями роботи опорно-рухового апарату [6]. Таким чином, технологія 3D-друку стала значним досягненням у порівнянні з традиційними взуттєвими методами, матеріалами та конструкціями, пропонуючи більш індивідуальні рішення для окремих користувачів. Дослідження [7] показали, що надруковані на 3D-принтері підшовиз решітчастою структурою підвищують комфортність кросівок, адаптуючи їх форму до структури стопи користувача. Провідні виробники спортивного взуття уже конкурують між собою у якнайшвидшому впровадженні 3D-друку в масове виробництво, пропонуючи споживачам нові конструкції кросівок з решітчастим низом. Проте, незважаючи на успішне використання інноваційних технологій у взуттєвому виробництві, пов'язаних з методами та засобами комп'ютерних наук, покращення ефективності і підвищення якості взуттєвої продукції потребують проведення подальших досліджень в галузі 3D-сканування і 3D-друку.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: розширення можливостей використання методів і засобів комп'ютерних наук в дослідженнях взуттєвого виробництва.

Виклад основного матеріалу

Для виготовлення взуття за індивідуальним замовленням було здійснено 3D сканування стопи клієнта, після чого розроблені і виготовлені методом 3D друку спеціальні накладки для колодок. Такі модифіковані колодки були використані для затягування верху взуття підвищеної комфортності, яке відповідало анатомічним особливостям стопи замовника. При цьому тиск, який здійснює верх взуття на стопу, визначався і реєструвався за допомогою спеціально розробленої експериментальної установки на основі використання персонального комп'ютера і мікроконтролера ArduinoUno з системою датчиків (рис.1) [8]. Використання блютус модуля зв'язку дозволило визначати тиск в системі стопа – взуття як під час стояння людини, так і в процесі ходьби. Проведені дослідження дозволили забезпечити комфортні величини тиску взуття на стопу в межах, які знаходяться в межах від 10,5 кПа до 11,0 кПа.

3D сканування і 3D друк були використані при проектуванні і виготовленні жіночого спортивного взуття з підшвою складної геометричної форми для забезпечення підвищеної гнучкості. В результаті 3D сканування стопи споживача були отримані антропометричні дані, які дозволили спроектувати верх взуття, а також розробити і виготовити підшву методом 3D друку з матеріалу еластан [9].

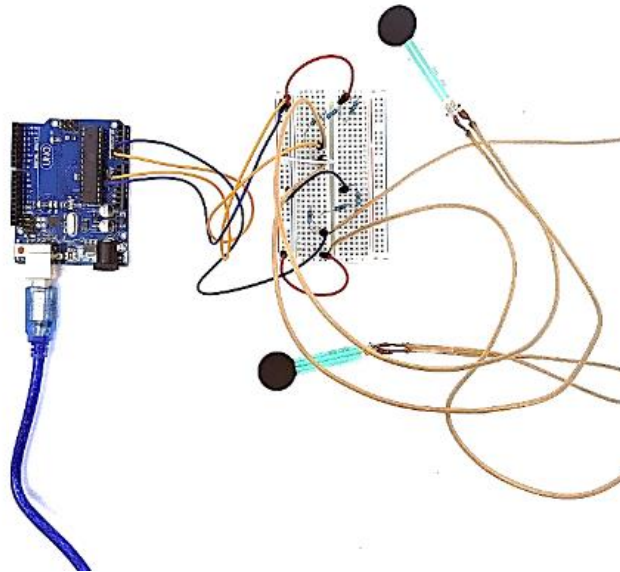


Рис. 1. Пристрій на базі мікроконтролера ArduinoUno для вимірювання тиску взуття на стопу

Для більш широкого застосування методу 3D друку у виробництві деталей взуття, а також елементів взуттєвого обладнання необхідно визначити їх фізико-механічні властивості. Коли матеріал не є пружним, використовують різні емпіричні формули, які базуються на степеневих функціях. В роботі [10] здійснювався підбір степеневих функцій для аналізу пластичних властивостей паперу. Степеневі закони використані також в роботі [11] для апроксимації кривої напруження – деформація під час проведення аналізу методом скінчених елементів процесу розтягання литих полімерних зразків.

Для визначення фізико-механічних властивостей полімерного матеріалу друківаних деталей були проведені дослід з розтягування друківаних зразків з поліетилентерефталату PETG. Розтягання здійснювали на експериментальній установці. Зв'язок між абсолютною деформацією і зусиллям розтягання встановлений за допомогою розривної машини з використанням синхронного відеозапису показань індикатора переміщення вільного затискача і динамометра.

Відносна деформація розраховувалась за формулою: $\varepsilon = \Delta l / l$, де Δl – абсолютна деформація, мм; $l = 85$ мм – довжина зразка. Величина напружень розраховувалась за формулою: $\sigma = F / S$, де F – сила, прикладена до зразка, Н; $S = 4 \times 10^{-3} \times 10 \times 10^{-3} = 40 \times 10^{-6}$ м – площа поперечного перетину зразка. В результаті експериментів встановлено, що розривне напруження для зразків з PETG при 60% щільності друку становить $\sigma_r = 12,3 \times 10^6$ Па, відносна деформація при розриві становить $\varepsilon_r = 0,076$.

Для апроксимації отриманих експериментальних даних використаємо степеневий закон Людвіка:

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (1)$$

де K – постійне напруження, а n – показник степені.

Для визначення параметрів рівняння (1), прологарифмуємо його ліву і праву частини:

$$\lg \sigma = \lg(K \varepsilon^n) \quad (2)$$

Перетворимо (2) до вигляду:

$$\lg \sigma = \lg K + n \lg \varepsilon \quad (3)$$

З експериментальної залежності (3), можна визначити параметри K і n . З метою визначення параметрів K і n за результатами досліджень побудована залежність десятичного логарифма напружень від десятичного логарифма відносної деформації при розтяганні зразків з PETG при 60% щільності друку, яка була апроксимована лінійним рівнянням регресії у вигляді:

$$\lg \sigma = \lg 7,686 + 0,425 \lg \varepsilon \quad (4)$$

З рівняння (4) випливає, що для зразків з PETG при 60% щільності друку $n = 0,425$. Також $\lg K = 8,279$, з чого слідує $K = 480,57 \times 10^6$ Па. На рис. 2 представлено графічну залежність для зразків з PETG при 60% щільності друку, розраховану за рівнянням (4).

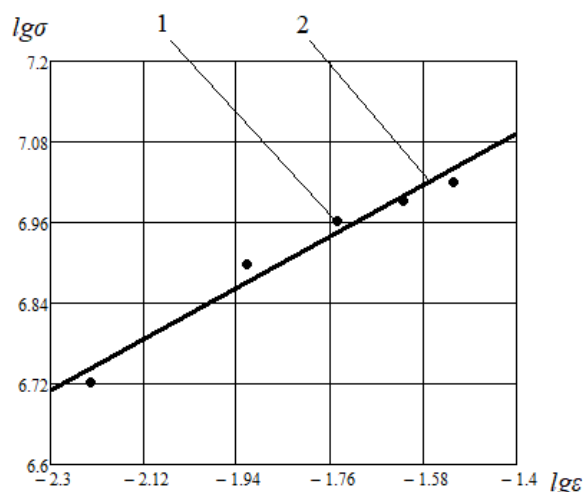


Рис. 2. Залежність десятичного логарифма напружень від десятичного логарифма відносної деформації при розтяганні зразків з PETG при 60% щільності друку: 1 – експеримент; 2 – апроксимація

На рис. 3 представлені результати експериментів і розрахунків за рівнянням (1) в результаті підстановки числових значень параметрів K і n .

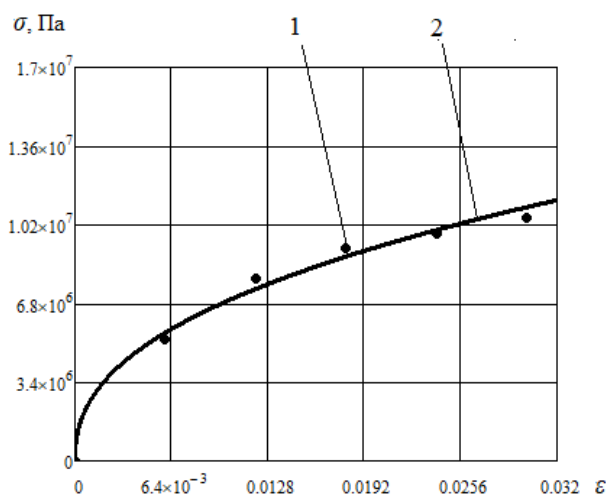


Рис. 3. Експериментальна і теоретична залежності напружень від відносної деформації при розтяганні зразків з PETG при 60% щільності друку: 1 – експеримент; 2 – результати розрахунок

Як видно з рис. 3, криву напруження-деформація на початковому етапі розтягання друкованих зразків з PETG при 60% щільності друку можна задовільно апроксимувати степеневим законом Людвіка (1).

Для визначення впливу наповнення друкованих виробів полімерним матеріалом проведені експериментальні дослідження процесу розтягання зразків з PETG, отриманих при щільності друку 70%, 80%, 90% і 100%. В результаті обробки результатів досліджень отримані значення розривних напружень σ_r , відносної деформації при розриві ε_r , а також параметрів K і n , які наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри кривих розтягання друкованих зразків

Щільність друку ρ , %	σ_r , Па	ε_r	K , Па	n
60	$12,3 \times 10^6$	0,076	$6,21 \times 10^7$	0,471
70	$14,5 \times 10^6$	0,071	$7,32 \times 10^7$	0,468
80	$16,3 \times 10^6$	0,068	$7,80 \times 10^7$	0,445
90	$18,1 \times 10^6$	0,065	$7,92 \times 10^7$	0,418
100	$19,6 \times 10^6$	0,062	$8,38 \times 10^7$	0,407

З представленої таблиці видно, що із збільшенням щільності друку параметр K збільшується, а параметр n зменшується, що свідчить про більш стрімке зростання напружень в початковий період деформації.

На рис. 4 і 5 представлені залежності розривної міцності і розривної відносної деформації від щільності друку.

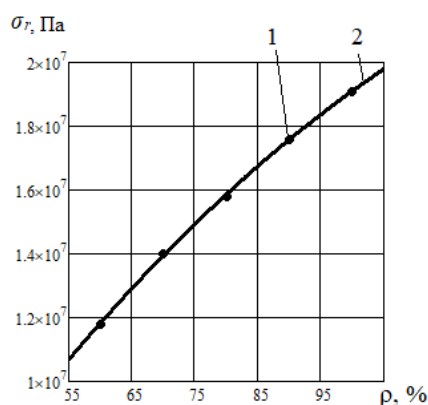


Рис. 4. Залежність розривної міцності зразків з PETG від щільності друку: 1 – експеримент; 2 – апроксимація

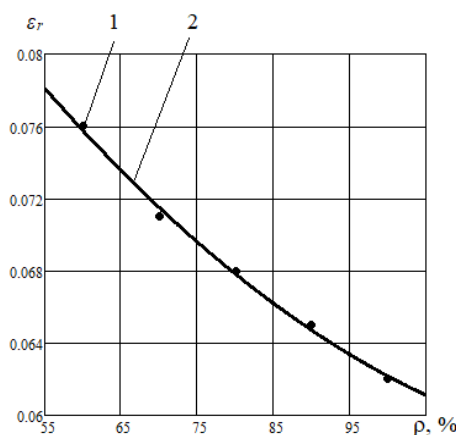


Рис. 5. Залежність відносної деформації зразків з PETG від щільності друку: 1 – експеримент; 2 – апроксимація

На рис. 4 і 5 видно, що із збільшенням щільності друку розривне напруження збільшується, а розривна відносна деформація зменшується.

На рис. 6 представлені теоретичні залежності напружень від відносної деформації при розтяганні зразків з PETG при щільності друку 60%, 70%, 80%, 90% і 100%.

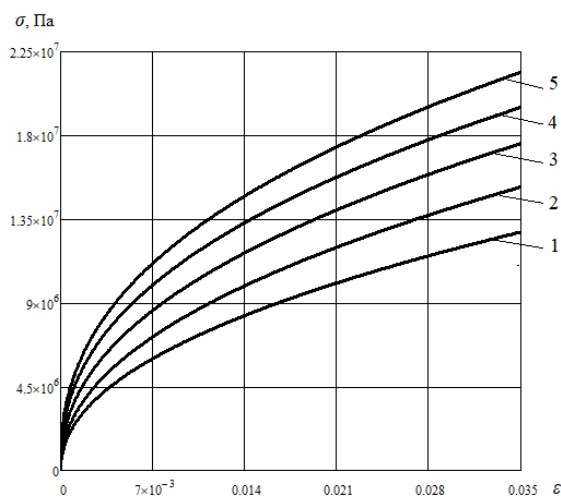


Рис. 6. Теоретичні залежності напружень від відносної деформації при розтяганні зразків з PETG при щільності друку: 1 – $\rho=60\%$; 2 – $\rho=70\%$; 3 – $\rho=80\%$; 4 – $\rho=90\%$; 5 – $\rho=100\%$.

З рис. 6 слідує, напруження зростають інтенсивніше при деформації зразків з більшою щільністю друку.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Методи і засоби комп'ютерних наук знаходять все більш широке використання при виконанні наукових досліджень різних галузях промисловості, зокрема у взуттєвому виробництві, що створює можливості для підвищення точності, збільшення діапазонів і обсягів інформації, а також її перетворення для удосконалення технологічних процесів і покращення якості продукції. Вимірювальні прилади на основі мікроконтролерів дозволяють визначити величини тиску взуття на стопу не лише

при стоянні людини, а й під час ходьби, що сприяє пошуку раціональної внутрішньої форми взуття для комфортного носіння.

Технології 3D-сканування і 3D-друку зазнають подальшого розвитку у виробництві взуття зі складною формою елементів підошви для забезпечення підвищеної гнучкості і створюють умови до креативного пошуку нових естетичних образів продукції, що виготовляється.

Для подальшого поширення технології 3D друку у виробництві різноманітних деталей, в тому числі відповідальних деталей машин, необхідно володіти інформацією про комплекс фізико-механічних властивостей друкованих зразків, яку можна отримати в процесі іспитів на розтягання. Як слідує з отриманих кривих розтягання, характер деформації друкованих зразків відповідає поведінці пружно-пластичних матеріалів. Проте, розвиток значних деформацій при збереженні максимальних напружень і відсутність утворення так званої шийки в місці руйнування зразків, свідчать про почергове руйнування елементів структури матеріалу друкованих зразків під дією прикладеного навантаження. Тому, найбільший інтерес представляє початкова ділянка кривої розтягання, яка відповідає стану зразка, в якому ще не почалось руйнування внутрішньої друкованої структури.

Початкова ділянка кривої розтягання полімерних зразків, отриманих методом 3D-друку, задовільно апроксимується степеневим законом Людвіка, параметри якого залежать від щільності друку. Розривні напруження розривна відносна деформація значною мірою залежать від щільності друку. При цьому розривні напруження суттєво зменшуються із зменшенням щільності друку, що необхідно враховувати при проектуванні і експлуатації полімерних виробів, отриманих методом 3D-друку.

Література

1. Shang, X., Shen, Z., Xiong, G., Wang, F.-Y., Liu, S., Nyberg, T. R., Wu, H., & Guo, C. (2019). Moving from mass customization to social manufacturing: A footwear industry case study. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(2), 194–205. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1550675>
2. Allan, J. J., Munteanu, S. E., Bonanno, D. R., & others. (2023). Methodological and statistical approaches for the assessment of foot shape using three-dimensional foot scanning: A scoping review. *Journal of Foot and Ankle Research*, 16, 24. <https://doi.org/10.1186/s13047-023-00617-z>
3. Zhang, J., & others. (2024). Efficacy of auxetic lattice structured shoe sole in advancing footwear comfort—From the perspective of plantar pressure and contact area. *Frontiers in Public Health*, 12, 1412518. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1412518>
4. Telfer, S., & Woodburn, J. (2010). The use of 3D surface scanning for the measurement and assessment of the human foot. *Journal of Foot and Ankle Research*, 3, 19. <https://doi.org/10.1186/1757-1146-3-19>
5. Papuga, M. O., & Burke, J. R. (2011). The reliability of the Associate Platinum digital foot scanner in measuring previously developed footprint characteristics: A technical note. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, 34(2), 114–118. <https://doi.org/10.1016/j.jmpt.2010.12.008>
6. Li, J., Jung, I., & Lee, S. (2025). Analysis of midsole gait in running shoes with various 3D printed biomimetic structure. *Scientific Reports*, 15, 8399. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92235-x>
7. Fadeel, A., Abdulhadi, H., Newaz, G., Srinivasan, R., & Mian, A. (2022). Computational investigation of the post-yielding behavior of 3D-printed polymer lattice structures. *Journal of Computational Design and Engineering*, 9(1), 263–277. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwac001>
8. Leshchyshyn, M., Zlotenko, B., Synyuk, O., Kuleshova, S., Onofriichuk, V., & Mykhailovskyi, Y. (2023). 3D printing of pads on lasts utilized in the production of custom-made comfortable footwear. *Leather and Footwear Journal*, 23(4), 231–240. https://www.revistapielarieincaltaminte.ro/vol23_4.html
9. Наранович, А. І., Кулік, Т. І., & Злотенко, Б. М. (2018). Удосконалення технологій виготовлення взуття з використанням 3D друку. *Технології та дизайн*, (2). http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2018_2_9
10. Erkkilä, A.-L., Leppänen, T., & Hämäläinen, J. (2013). Empirical plasticity models applied for paper sheets having different anisotropy and dry solids content levels. *International Journal of Solids and Structures*, 50(14–15), 2151–2179. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.03.013>
11. Kurkin, E., Spirina, M., Espinosa Barcenas, O. U., & Kurkina, E. (2022). Calibration of the PA6 short-fiber reinforced material model for 10% to 30% carbon mass fraction mechanical characteristic prediction. *Polymers*, 14(1781). <https://doi.org/10.3390/polym14091781>

References

1. Shang, X., Shen, Z., Xiong, G., Wang, F.-Y., Liu, S., Nyberg, T. R., Wu, H., & Guo, C. (2019). Moving from mass customization to social manufacturing: A footwear industry case study. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(2), 194–205. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1550675>
2. Allan, J. J., Munteanu, S. E., Bonanno, D. R., & others. (2023). Methodological and statistical approaches for the assessment of foot shape using three-dimensional foot scanning: A scoping review. *Journal of Foot and Ankle Research*, 16, 24. <https://doi.org/10.1186/s13047-023-00617-z>

3. Zhang, J., & others. (2024). Efficacy of auxetic lattice structured shoe sole in advancing footwear comfort—From the perspective of plantar pressure and contact area. *Frontiers in Public Health*, 12, 1412518. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1412518>
4. Telfer, S., & Woodburn, J. (2010). The use of 3D surface scanning for the measurement and assessment of the human foot. *Journal of Foot and Ankle Research*, 3, 19. <https://doi.org/10.1186/1757-1146-3-19>
5. Papuga, M. O., & Burke, J. R. (2011). The reliability of the Associate Platinum digital foot scanner in measuring previously developed footprint characteristics: A technical note. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, 34(2), 114–118. <https://doi.org/10.1016/j.jmpt.2010.12.008>
6. Li, J., Jung, I., & Lee, S. (2025). Analysis of midsole gait in running shoes with various 3D printed biomimetic structure. *Scientific Reports*, 15, 8399. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92235-x>
7. Fadeel, A., Abdulhadi, H., Newaz, G., Srinivasan, R., & Mian, A. (2022). Computational investigation of the post-yielding behavior of 3D-printed polymer lattice structures. *Journal of Computational Design and Engineering*, 9(1), 263–277. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwac001>
8. Leshchyshyn, M., Zlotenko, B., Synyuk, O., Kuleshova, S., Onofriichuk, V., & Mykhailovskyi, Y. (2023). 3D printing of pads on lasts utilized in the production of custom-made comfortable footwear. *Leather and Footwear Journal*, 23(4), 231–240. https://www.revistapielarieincaltaminte.ro/vol23_4.html
9. Naranovych, A. I., Kulik, T. I., & Zlotenko, B. M. (2018). Udokonalennia tekhnolohii vyhotovlennia vztutia z vykorystanniam 3D druku. *Tekhnolohii ta dyzain*, (2). http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2018_2_9
10. Erkkilä, A.-L., Leppänen, T., & Hämäläinen, J. (2013). Empirical plasticity models applied for paper sheets having different anisotropy and dry solids content levels. *International Journal of Solids and Structures*, 50(14–15), 2151–2179. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.03.013>
11. Kurkin, E., Spirina, M., Espinosa Barcenás, O. U., & Kurkina, E. (2022). Calibration of the PA6 short-fiber reinforced material model for 10% to 30% carbon mass fraction mechanical characteristic prediction. *Polymers*, 14(1781). <https://doi.org/10.3390/polym14091781>