

УДК 004.94:678.027.3

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ТАКТИЛЬНИХ СТРУКТУР ПРИ 3D-ДРУЦІ ЗІ ЗМІННИМИ ТЕКСТУРАМИ

Н. Д. Лотошинська, В. І. Манько

*Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. Ст. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна*

Розроблено узагальнену модель процесу формування тактильних структур методом адитивного виробництва із застосуванням змінних текстур, призначених для створення навчально-дидактичних матеріалів для людей з порушеннями зору. Запропоновано концепцію побудови параметричних поверхонь на основі синусоїдальних функцій, гармонічних коливань та параметричних кривих, що дає змогу генерувати тривимірні тактильні елементи різної морфології та складності. Реалізовано алгоритми автоматизованої генерації геометричних моделей, які забезпечують варіювання періодичності, амплітуди й напрямку рельєфу залежно від призначення тактильного зразка. Проведено чисельне моделювання поведінки розплаву полімеру під час екструзії за допомогою методу скінченних елементів, що дозволило оцінити вплив температурних і швидкісних параметрів на формування мікрорельєфу поверхні.

Експериментальна частина дослідження включала серію тестових друків із варіюванням технологічних параметрів. Встановлено кореляційні залежності між зазначеними параметрами та геометричними характеристиками сформованих тактильних структур. Оптимальні режими друку забезпечують чітке формування елементів висотою 0,8–1,5 мм із періодом структури 2–3 мм, що гарантує надійне тактильне сприйняття користувачами з повною або частковою втратою зору.

Створено програмні засоби для автоматизованого проектування та оптимізації параметрів друку з урахуванням фізико-технологічних властивостей матеріалу. Верифікація запропонованої математичної моделі засвідчила відхилення розрахункових даних від експериментальних результатів не більше ніж на 7 %, що підтверджує її адекватність і практичну придатність для прогнозування процесів формування тактильних поверхонь. Розроблена модель може бути використана для удосконалення технологій виготовлення навчальних і навігаційних матеріалів для осіб з порушеннями зору, а також у сфері 3D-дизайну спеціальних поліграфічних виробів із рельєфно-графічними елементами.

Ключові слова: 3D-друк, параметри тактильних структур, моделювання, теплофізичні та реологічні процеси, адитивне виробництво

Постановка проблеми. Створення якісних тактильних навчальних матеріалів для людей з вадами зору методом 3D-друку вимагає розробки спеціалізованих

математичних моделей, які адекватно описують процеси формування рельєфних структур із заданими геометричними та фізико-механічними характеристиками. Існуючі підходи до проектування тактильних об'єктів базуються переважно на емпіричних методах підбору параметрів друку, що не забезпечує оптимального співвідношення між технологічними режимами процесу та функціональними властивостями виготовлених виробів. Відсутність узагальненої математичної моделі, що описує взаємозв'язок між параметрами екструзії, реологічними властивостями полімерів і морфологією тактильних структур, ускладнює прогнозування їх геометрії та знижує ефективність проектування навчальних матеріалів для людей з вадами зору.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження застосування 3D-друку для створення тактильних матеріалів активно розвивається останнє десятиліття. Т. Браун і Дж. Хьорст представили систему VizTouch для автоматичної генерації тактильних візуалізацій, однак без математичного моделювання процесу формування текстур [1]. Дж. Бюлер та ін. вивчали використання 3D-друку в спеціальній освіті, зосередившись на педагогічних аспектах [2-4]. А. Карбовські представила проект See3D, спрямований на створення доступних тактильних моделей для незрячих, але робота обмежувалася описом практичних кейсів без теоретичного обґрунтування [5]. М. Келер та співавтори досліджували застосування 3D-друку для навчання геологічним концепціям студентів з вадами зору, приділяючи основну увагу педагогічним аспектам, а не технологічним параметрам виготовлення моделей. Отже, нині відсутній комплексний математичний підхід до моделювання процесів формування тактильних структур у 3D-друці, що зумовлює потребу в роботі відповідних теоретичних і алгоритмічних основ.

Мета статті. Метою дослідження є розробка моделі процесу формування тактильних структур методом 3D-друку зі змінними текстурами та створення програмного забезпечення для автоматизованого проектування тактильних навчальних матеріалів з оптимізованими параметрами.

Виклад основного матеріалу дослідження. Моделювання процесу формування тактильних структур при 3D-друці базується на комплексному аналізі теплофізичних та реологічних процесів, що відбуваються при екструзії полімерного матеріалу. Розроблена модель враховує нестационарний теплообмін у системі «екструдер — розплав полімеру — навколишнє середовище», в'язкопружну поведінку розплаву при течії через сопло та динаміку формування окремих шарів матеріалу.

Процес теплопереносу в екструдері описується рівнянням теплопровідності з урахуванням конвективного переносу тепла рухомим розплавом полімеру

Реологічна поведінка розплаву полімеру моделюється з використанням степеневого закону, що враховує неньютонівський характер течії:

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1},$$

де η — динамічна в'язкість, K — консистентність розплаву, $\dot{\gamma}$ — швидкість зсуву, n — індекс течії.

Для полілактиду при температурі 200–215°C експериментально встановлено $K = 2500 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$, $n = 0,35$.

Профіль швидкості розплаву в циліндричному каналі сопла визначається розв'язанням рівняння Нав'є-Стокса для неньютонівської рідини (рис. 1).

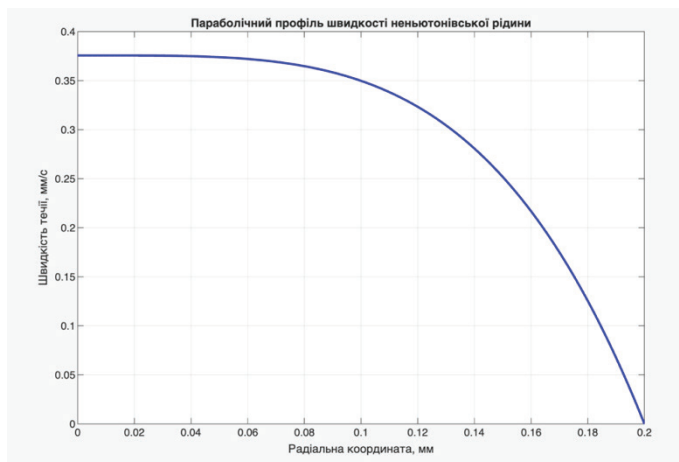


Рис. 1. Профіль швидкості розплаву в циліндричному каналі сопла

Формування геометрії тактильних (рис. 2) елементів описується параметричними рівняннями, що дозволяють генерувати різні типи текстур. Для хвилястих структур використовується синусоїдальна модуляція висоти:

$$z(x, y) = A \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{x}{\lambda_x}\right) \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{y}{\lambda_y}\right) + h_0,$$

де A — амплітуда модуляції, λ_x , λ_y — періоди структури вздовж відповідних осей, h_0 — базова висота елемента.

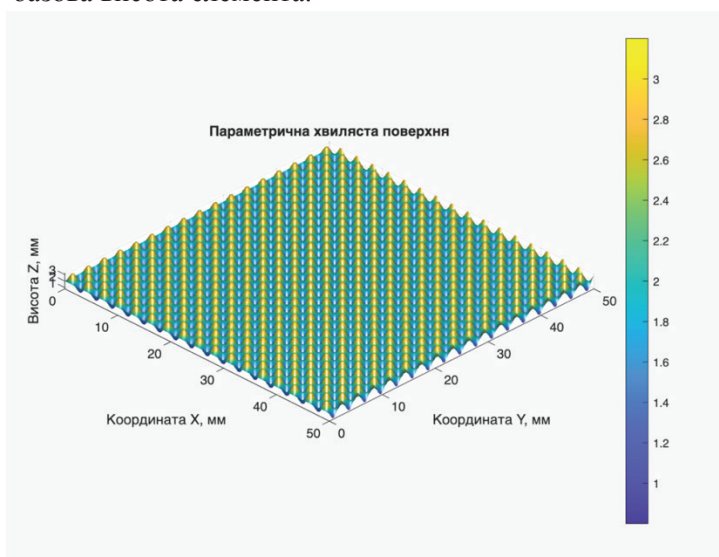


Рис. 2. Формування геометрії тактильних елементів

Моделювання процесу нанесення шарів (рис. 3) враховує усадку матеріалу при охолодженні та деформацію попередніх шарів під вагою наступних. Температурне поле в надрукованому шарі визначається розв'язанням двовимірного рівняння теплопровідності.

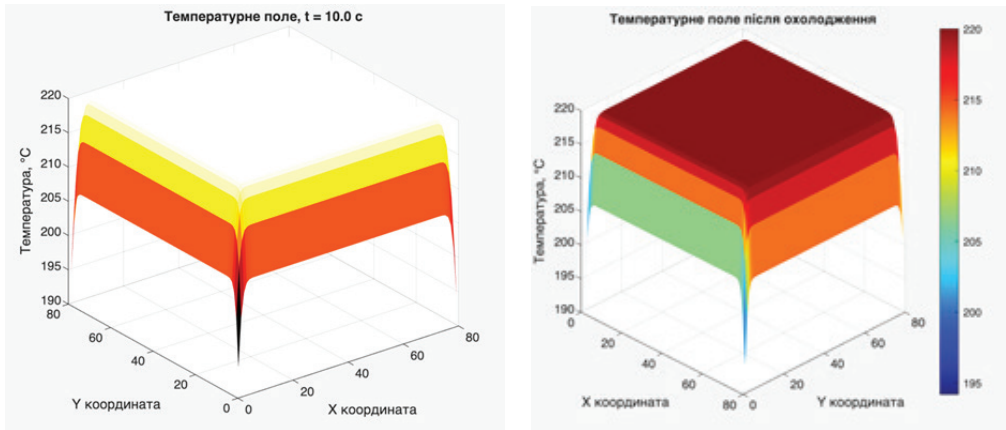


Рис. 3. Моделювання процесу нанесення шарів враховує усадку матеріалу

Оптимізація параметрів друку здійснюється на основі мінімізації цільової функції, що враховує відхилення геометричних параметрів від заданих значень та якість міжшарової адгезії (рис. 4).

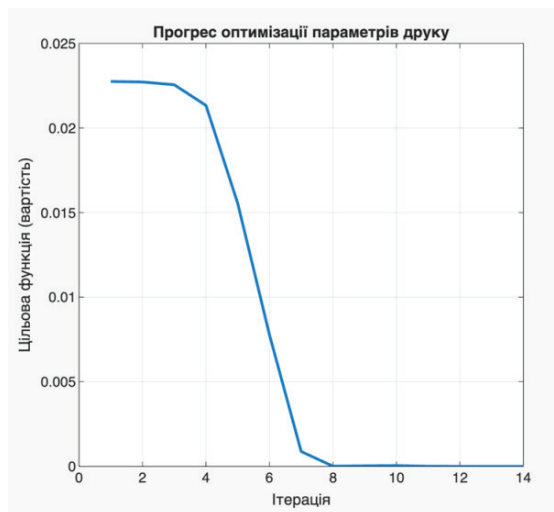


Рис. 4. Оптимізація параметрів друку

Розроблена система автоматизованого проектування тактильних поверхонь інтегрує всі запропоновані алгоритми в єдине програмне середовище (рис. 5).

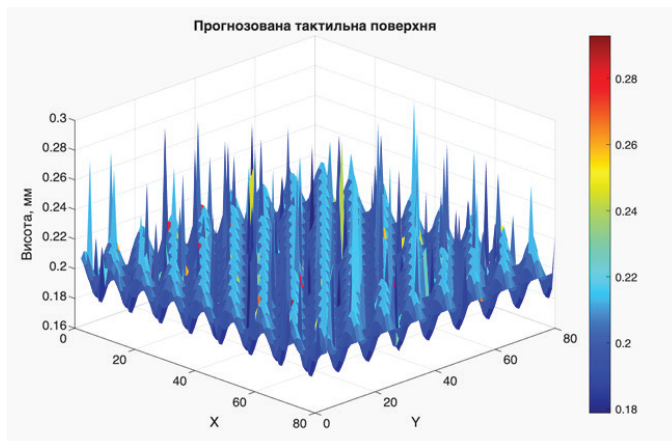


Рис. 5. Прогнозування тактильної поверхні

Експериментальна верифікація математичної моделі проводилася шляхом порівняння розрахункових значень геометричних параметрів тактильних структур з експериментально вимірними характеристиками надрукованих зразків. Для вимірювання використовувався оптичний профілометр з роздільною здатністю 0,01 мм. Результати порівняння для різних типів текстур показали середнє відхилення розрахункових значень від експериментальних на рівні 5–7%, що свідчить про адекватність розробленої моделі. Встановлено, що оптимальні параметри друку для створення тактильних структур з чітким розпізнаванням елементів знаходяться в наступних діапазонах: температура екструзії 200–215°C забезпечує баланс між текучістю розплаву та збереженням форми елементів; швидкість друку 20–40 мм/с дозволяє досягти необхідної точності при прийнятній продуктивності; висота шару 0,15–0,25 мм забезпечує достатню роздільну здатність у вертикальному напрямку.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє автоматизувати процес проектування тактильних поверхонь від етапу генерації геометрії до оптимізації технологічних параметрів та експорту готової моделі у форматі STL для 3D-друку. Інтеграція математичних моделей теплофізичних та реологічних процесів забезпечує прогнозування кінцевих характеристик виробу з високою точністю.

Висновки. Розроблена математична модель процесу формування тактильних структур при 3D-друці зі змінними текстурами дозволяє прогнозувати геометричні та фізико-механічні характеристики виготовлених виробів з урахуванням технологічних параметрів процесу. Алгоритми генерації параметричних поверхонь забезпечують створення різноманітних типів тактильних текстур з контрольованими характеристиками, що відповідають вимогам користувачів з особливими освітніми потребами. Експериментально встановлені кореляційні залежності між параметрами друку та характеристиками тактильних елементів створюють основу для оптимізації технологічного процесу. Розроблене програмне забезпечення в середовищі MATLAB інтегрує всі компоненти математичної моделі та забезпечує автоматизоване проектування тактильних навчальних матеріалів. Верифікація моделі

підтвердила її адекватність з похибкою не більше 7%, що дозволяє рекомендувати розроблений підхід для практичного впровадження при створенні інклюзивних освітніх матеріалів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення бібліотеки тактильних патернів та адаптацію моделі для нових типів полімерних матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Brown C., Hurst A. VizTouch: automatically generated tactile visualizations of coordinate spaces. Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (TEI '12). New York: ACM Press, 2012. P. 131–138. DOI: 10.1145/2148131.2148160.
2. Buehler E., Comrie N., Hofmann M., McDonald S., Hurst A. Investigating the 67 Implications of 3D Printing in Special Education. ACM Transactions on Accessible Computing. 2016. Vol. 8, No. 3. P. 1–28. DOI: 10.1145/2870640.
3. Buehler E., Hurst A., Hofmann M. Coming to grips: 3D printing for accessibility. Proceedings of the 16th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility (ASSETS '14). New York: ACM Press, 2014. P. 291– DOI: 10.1145/2661334.2661345.
4. Buehler E., Kane S. K., Hurst A. ABC and 3D: opportunities and obstacles to 3D printing in special education environments. Proceedings of the 16th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility (ASSETS '14). New York: ACM Press, 2014. P. 107–114. DOI: 10.1145/2661334.2661365.
5. Karbowski C. F. See3D: 3D Printing for People Who Are Blind / C. F. Karbowski // Journal of Science Education for Students with Disabilities. — 2020. — Vol. 23, No. 1. — P. 54–66. — URL: <https://repository.rit.edu/jsesd/vol23/iss1/6>.

REFERENCES

1. Brown C., Hurst A. VizTouch: automatically generated tactile visualizations of coordinate spaces. Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (TEI '12). New York: ACM Press, 2012. P. 131–138. DOI: 10.1145/2148131.2148160.
2. Buehler E., Comrie N., Hofmann M., McDonald S., Hurst A. Investigating the 67 Implications of 3D Printing in Special Education. ACM Transactions on Accessible Computing. 2016. Vol. 8, No. 3. P. 1–28. DOI: 10.1145/2870640.
3. Buehler E., Hurst A., Hofmann M. Coming to grips: 3D printing for accessibility. Proceedings of the 16th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility (ASSETS '14). New York: ACM Press, 2014. P. 291– DOI: 10.1145/2661334.2661345.
4. Buehler E., Kane S. K., Hurst A. ABC and 3D: opportunities and obstacles to 3D printing in special education environments. Proceedings of the 16th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility (ASSETS '14). New York: ACM Press, 2014. P. 107–114. DOI: 10.1145/2661334.2661365.
5. Karbowski C. F. See3D: 3D Printing for People Who Are Blind / C. F. Karbowski // Journal of Science Education for Students with Disabilities. — 2020. — Vol. 23, No. 1. — P. 54–66. — URL: <https://repository.rit.edu/jsesd/vol23/iss1/6>.

doi: 10.32403/1998-6912-2025-2-71-166-172

MODELING OF THE PROCESSES OF FORMING TACTILE STRUCTURES IN 3D PRINTING WITH VARIABLE TEXTURES

N. D. Lotoshynska, V. I. Manko

Lviv Polytechnic National University,
12 S. Bandera St., Lviv, 79013, Ukraine
nataliia.d.lotoshynska@lpnu.ua, volodymyr.i.manko@lpnu.ua

A generalized model of the process of forming tactile structures using additive manufacturing with variable textures has been developed to create educational and didactic materials for people with visual impairments. A concept for constructing parametric surfaces based on sinusoidal functions, harmonic oscillations, and parametric curves is proposed, enabling the generation of three-dimensional tactile elements with various morphologies and levels of complexity. Algorithms for automated generation of geometric models have been implemented, providing variation in the periodicity, amplitude, and orientation of the relief depending on the purpose of the tactile sample. Numerical modeling of polymer melt behavior during extrusion was carried out using the finite element method, which made it possible to assess the influence of temperature and speed parameters on the formation of surface microrelief.

The experimental part of the study included a series of test prints with variations in technological parameters. Correlation dependencies were established between the mentioned parameters and the geometric characteristics of the formed tactile structures. Optimal printing modes ensure the clear formation of elements with a height of 0.8–1.5 mm and a structural period of 2–3 mm, providing reliable tactile perception for users with total or partial vision loss.

Software tools have been developed for automated design and optimization of printing parameters, taking into account the physico-technological properties of the material. Verification of the proposed mathematical model showed a deviation of the calculated data from the experimental results of no more than 7%, confirming its adequacy and practical applicability for predicting the processes of tactile surface formation. The developed model can be used to improve technologies for producing educational and navigation materials for people with visual impairments, as well as in the field of 3D design of specialized printed products with relief-graphic elements.

Keywords: 3D printing, tactile structure parameters, modeling, thermophysical and rheological processes, additive manufacturing.

Стаття надійшла до редакції 22.09.2025.

Received 22.09.2025.