

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-34>
УДК 685.34.016

ЧЕРТЕНКО ЛІЛІЯ

Київський національний університет технологій та дизайну
<https://orcid.org/0000-0003-4321-8475>
e-mail: Lily-che@ukr.net

КАПТЮРОВА ДАРІЯ

Київський національний університет технологій та дизайну
<https://orcid.org/0000-0001-9903-1066>
e-mail: kadaria132000@gmail.com

БОНДАР ОЛЕКСАНДР

Київський національний університет технологій та дизайну
<https://orcid.org/0000-0002-0775-1611>
e-mail: bai2708@ukr.net

УДОВЕНКО ОЛЕКСАНДР

ФОП Удовенко О.В. (виробництво взуття), 3д-дизайнер взуття
e-mail: Alexudovenko46@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ РОЗГОРТКИ ВЗУТТЄВИХ КОЛОДОК: ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ CAD-СИСТЕМ ДЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ 3D У 2D

Зростання впровадження цифрових технологій у проектування взуття суттєво підвищило точність, гнучкість і ефективність процесу моделювання взуття та його складових. У цьому дослідженні розглянуто застосування методів проектування складних 3D форм взуттєвих колодок, з особливим акцентом на перетворення 3D-поверхонь у 2D-лекала. Цей етап залишається одним із найскладніших з технічної точки зору, оскільки часто супроводжується суттєвими відхиленнями та неточностями в отриманих даних. Особлива увага приділяється викликам, пов'язаним із розгортанням складних криволінійних 3D-поверхонь, характерних для взуттєвих колодок.

Було проведено порівняльний аналіз результатів процесу розпластування 3D-поверхонь колодок у 2D-лекала за допомогою різних CAD-систем, зокрема Rhinoceros, ShoeMaker, PowerShape, ICAD, MindCAD та Rhino+Grasshopper. Метою було оцінити та порівняти алгоритми 3D\2D конвертування, реалізовані в кожній із систем. Для виявлення статистично значущих відмінностей у точності використано методи статистичного аналізу, зокрема ANOVA. Додатково проведена оптимізація процесу розгортання з використанням плагіна Grasshopper продемонструвала перспективні покращення точності та стабільності результатів.

Отримані результати підкреслюють важливість правильного вибору CAD-системи для забезпечення високої якості проектування взуття та зменшення потреби у трудомістких ручних коригуваннях. Крім того, дослідження показало, що потужні універсальні CAD-платформи, за умови коректного налаштування параметрів, здатні забезпечити необхідну точність для застосування в умовах промислового виробництва. Це відкриває нові перспективи для цифровізації проєктних процесів у взуттєвій галузі, сприяючи підвищенню точності, стабільності та ефективності розробки продукції.

Ключові слова: 3D-моделювання, взуттєва колодка, розгортка поверхні колодки, CAD-системи.

CHERTENKO LILIA, KAPTIUROVA DARIYA, BONDAR OLEXANDER, UDOVENKO OLEXANDER

Kyiv National University of Technologies and Design

OPTIMIZATION OF SHOE LAST FLATTENING METHODS: COMPARATIVE ANALYSIS OF CAD SYSTEMS FOR 3D TO 2D TRANSFORMATION

The increasing integration of digital technologies into footwear design has significantly enhanced the accuracy, flexibility, and efficiency of the modeling process for footwear and its components. This study explores the application of methods for designing complex 3D forms of shoe lasts, with a particular focus on converting 3D surfaces into 2D cutting patterns. This stage remains one of the most technically demanding, as it is often associated with considerable deviations and inaccuracies in the resulting data. Special attention is devoted to the challenges of unfolding complex, curved 3D surfaces typical for anatomical footwear lasts.

A comparative analysis of the outcomes of flattening 3D last surfaces into 2D layouts was performed using various CAD systems, including Rhinoceros, ShoeMaker, PowerShape, ICAD, MindCAD, and Rhino+Grasshopper. The aim was to evaluate and compare the surface unfolding algorithms implemented in each system. Statistical analysis, particularly ANOVA, was applied to determine significant differences in accuracy among the tested systems. Additionally, optimization of the unfolding process using the Grasshopper plugin showed promising improvements in accuracy and reliability.

The findings emphasize the critical role of selecting the appropriate CAD system in ensuring high-quality footwear design and reducing the need for time-consuming manual corrections. Furthermore, the study revealed that even general-purpose CAD platforms, when configured with suitable parameters, can deliver the precision required for industrial-scale production. This outcome opens further prospects for the digital standardization of processes in the footwear industry, contributing to greater consistency, efficiency, and scalability in product development workflows.

Keywords: 3D-modeling, footwear last, shoe last flattening, CAD-systems.

Стаття надійшла до редакції / Received 26.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.06.2025

Вступ

Взуттєва промисловість традиційно відноситься до галузей з домінуючим використанням ручної праці. Більшість виробників і досі використовують ручні способи проектування для розробки взуття,

обґрунтовуючи це складністю реалізації значної кількості процесів за допомогою цифрових технологій. Однак останнім часом відбуваються активні спроби цифровізації більшості процесів галузі. Цифрові інструменти забезпечують підвищену точність, гнучкість і швидкість виконання всіх процесів. Вони використовуються на всіх етапах проектного процесу від отримання вихідної 3D інформації про об'єкт проектування до виготовлення прототипів або елементів форми за допомогою 3D друку.

Цифрові технології, що використовуються для отримання вихідних даних проектування, при правильній подальшій обробці даних дозволяє покращити точність посадки взуття та знизити потребу у фізичних прототипах. Практичне використання результатів 3D-сканування у процесі конструювання колодок [1] підвищує ефективність проектних процесів та якість розроблюваних форм для колодок різного призначення.

Взуттєве виробництво характеризується необхідністю постійної взаємної трансформації 3D форм та 2D деталей, що суттєво ускладнює проектні процеси. На сьогодні актуальною задачею є пошук оптимальних алгоритмів отримання умовної 2D розгортки 3D поверхні колодки з застосуванням доступних інструментів універсальних або спеціалізованих САПР.

Аналіз досліджень та публікацій

Форма взуття відноситься до складних форм, які практично неможливо побудувати за принципами прямого проектування. Для створення форми взуттєвої колодки зазвичай використовують спосіб зворотного інжинірингу в середовищі спеціалізованих або універсальних САПР [2].

При використанні принципу зворотного інжинірингу вихідною інформацією для проектування нової форми колодки є базова форма колодки, яку отримують зазвичай шляхом оцифрування фізичного еталону. Модель сканованої колодки спочатку представлена у вигляді поверхні з хмари точок, які після здійснення процесу триангуляції перетворюються у сітку трикутників з вершинами в цих точках та зберігається в STL файлі, що підтримується CAD\CAM програмами та обладнанням. Однак для можливості подальшої модифікації вихідної форми її необхідно описати математичними методами або геометричними поверхнями, що дозволяють проводити маніпуляції з редагування вихідної форми.

Поверхні довільної форми подвійної кривизни, якою є взуттєва колодка, доволі добре описуються B-сплайнами за допомогою інструментів NURBS-моделювання [3].

При роботі в універсальних САПР такі поверхні можуть створюватися вручну стандартними функціями програмного середовища. Виділивши найбільш топологічно однорідні ділянки поверхні, дизайнер створює каркас, зони якого описуються NURBS поверхнями [4].

Останнім часом актуальним прогресивним підходом до цифрового моделювання складної форми колодки став параметричний дизайн, який може бути реалізований за допомогою багатьох спеціалізованих САПР таких як Forma [5], Crispin LastMaker [6], та інших.

Застосування CAD/CAM технологій у взуттєвій промисловості має великі перспективи, але вимагає впровадження нових підходів до проектно-виробничих процесів.

Взуття утворюється з кількох компонентів, які відрізняються за особливостями формоутворення та способами виготовлення. У взутті, виготовленому за традиційною технологією, поєднуються деталі, викроєні з плоских матеріалів, з елементами, що мають просторову форму. Тому проектування елементів форми взуття орієнтоване на комплекс процесів, що включають 2D та 3D моделювання, а також взаємні конвертації 2D та 3D форм.

Проблема отримання максимально точних 2D розгорток взуттєвих колодок з 3D моделей – не нова, над нею працюють дослідники вже понад 20 років. Так, у роботах [7,8] було запропоновано нові методи побудови площинних розгорток довільних тривимірних поверхонь на основі глобальної оптимізації з обмеженнями.

У дослідженні [9] представлено алгоритм для розгортки нижньої частини взуттєвої колодки. Алгоритм дозволяє точно оцінити прилягання колодки до стопи, що є критичним для комфорту та функціональності взуття.

У дослідженні [10] представлено метод розгортки 3D-поверхонь взуттєвих колодок у 2D-лекала, використовуючи трикутну сітку та оптимізацію з мінімізацією геометричних помилок і енергії деформації.

Математичний апарат, покладений в основу спеціалізованих взуттєвих 3D систем, дозволяє будувати просторовий каркас поверхні колодки на основі хмари точок або полігональної моделі, використовуючи при цьому один певний вид просторового каркасу та спосіб інтерполяції. Побудована 3D поверхня може бути модифікована та коригована доступними функціями редагування. Сучасні універсальні CAD-системи (наприклад, PowerShape, Rhinoceros та ін.) також можуть бути успішно використані для задач проектування форми взуття, дозволяють будувати різними способами точні 3D-моделі на основі хмар точок і полігональних сіток, а також виконувати їх модифікацію.

При 3D-проектуванні застосовуються різні способи задання та модифікації просторових форм. Кожен з цих методів має свої сильні сторони та певні недоліки.

1) Полігональне моделювання, (форма задана сіткою трикутників)

Сітки — це популярний підхід до 3D-моделювання, який передбачає представлення 3D-геометрії у вигляді серії взаємопов'язаних багатокутників (трикутників та/або чотирикутників). Полігональні сітки

широко використовуються в іграх та анімації, але також використовуються в дизайні взуття. Усі моделі, які ми використовуємо для 3D-друку, є сітками.

Деякі з ключових особливостей полігональних сіток для моделювання взуття включають:

- Універсальність: сітки можна використовувати для створення широкого спектру форм і дизайнів, що робить їх надзвичайно універсальними.
- Реалістичні текстури: багатокутні сітки можна текстурувати та затінювати для створення дуже реалістичних та деталізованих дизайнів.
- Велика кількість багатокутників: сітками не так просто маніпулювати та редагувати, оскільки вони складаються з багатьох багатокутників, і зазвичай потрібно відремонтувати геометрію, щоб усі багатокутники та вершини були з'єднані.

2) *NURBS моделювання (форма задана поверхнями, утвореними різнонаправленими та в параметричними кривими)*

NURBS (нерівномірний раціональний базисний сплайн) — це математичне представлення тривимірної геометрії, яке широко використовується в програмах автоматизованого проектування. Поверхні NURBS визначаються контрольними точками та кривими, які використовуються для визначення форми поверхні. Поверхні NURBS відрізняються високою точністю, ними можна точно керувати, що робить їх ідеальними для моделювання складних форм і кривих.

Деякі з переваг NURBS для моделювання взуття включають:

- Високоточні поверхні: поверхнями NURBS можна точно керувати, що дозволяє точно моделювати складні форми та криві.
- Гладкі поверхні: поверхні NURBS можна згладжувати та доопрацьовувати, що призводить до полірованого та візуально привабливого дизайну.
- Ефективний робочий процес: поверхні NURBS можна легко редагувати та змінювати, що забезпечує ефективний робочий процес і швидші ітерації дизайну.
- Форма, створена таким чином, представляє собою невеликий за обсягом файл, доступний для легкого редагування та пересилання.

NURBS є галузевим стандартом, який використовується для представлення форми, проектування та обміну даними при обробці геометричної інформації за допомогою комп'ютера. Як результат, NURBS є потужним інструментом у стандартному геометричному дизайні. Однак NURBS поверхні досить складно модифікуються функціями поверхневого моделювання стандартних 3D програм.

3) *SubD моделювання*

SubD - це тип багатокутної решітки, який використовується для створення плавних, органічних форм із використанням спеціальних алгоритмів, які зазвичай використовуються в індустрії 3D-анімації з 1978 року. SubD визначаються набором граней, країв і вершин, які можна переміщувати та регулювати для створення складних форм. Деякі з основних функцій і переваг:

- Гладкі поверхні: SubD можна згладжувати та доопрацьовувати, що призводить до високополірованого та візуально привабливого дизайну.
- Органічні форми: ця топологія ідеально підходить для створення органічних кривих форм, таких як у взутті.
- Ефективний робочий процес: геометрії SubD можна легко редагувати та змінювати, що забезпечує ефективний робочий процес і швидші ітерації проектування.

4) *Параметричне моделювання*

Це підхід до проектування, у якому елементи конструкції формуються на основі алгоритмічних процесів, а не прямих маніпуляцій. При моделюванні колодки її вихідна форма модифікується шляхом зміни параметрів елементів форми до досягнення необхідного результату.

Параметричні моделі колодки представлено як моделі, які можна кількісно визначити за певними параметрами. Зміни в значеннях параметрів можуть ініціювати зміни розмірів елементів форми колодки, але зберігають подібні геометричні форми.

Параметричне моделювання здатне впорядкувати та автоматизувати численні завдання, що допомагає підвищити ефективність і точність роботи дизайнера.

Серед найскладніших задач, які вирішують графічні САПР в процесі проектування взуття, є конвертування 3D форми взуттєвої колодки, яка є вихідною інформацією для проектування, в 2D креслення розгортки, яке є основою для проектування деталей верху. При цьому практика показує, що розгортки, які близькі за параметрами до розгорток, виконаних традиційним ручним способом, дають найкращий результат проектування лекал.

Кожна програма 3D моделювання має власний математичний алгоритм, що забезпечує конвертацію 3D моделі в 2D формат та математичні закономірності для розрахунку і побудови розпластаного деталі на основі 3D моделі складної форми, якою є взуттєва колодка.

На якість розгортки бічної поверхні колодки впливає ряд факторів:

- Якість сітки або поверхні, яка формує об'єкт,
- Припіднятність п'яткової частини колодки (найскладніші для розпластування висококаблучні колодки),

- Плавність та симетричність форми колодки,
- Форма носкової частини (найлегше розпластується загострена носкова частина, найважче, із значними деформаціями – квадратна або кареподібна),
- Висота колодки по гребню та по п'ятковому контуру.

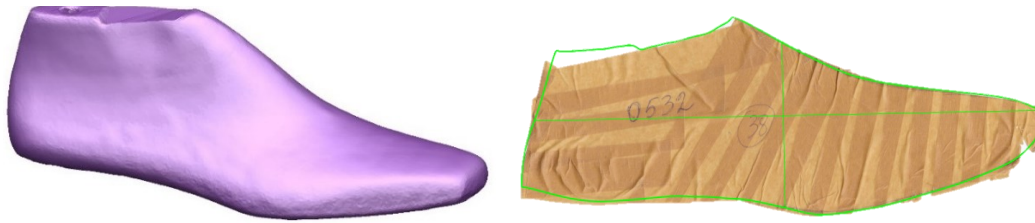


Рис. 1 Порівняння Розгортки, виконаної ручним способом, з розгорткою, отриманою в ShoeMaker

Виконати розпластування форми колодки з метою отримання плоского креслення розгортки можна двома головними шляхами, залежно від вихідного формату 3д моделі колодки:

- 1) Розплющування триангулярної або квадрангулярної сітки,
- 2) Розплющення NURBS поверхні

Якщо 3д модель колодки збережена у вигляді MESH сітки трикутників файлу STL, то для отримання 2д розгортки використовуємо функцію Squish. Такий спосіб розпластування поверхні може давати різні за якістю результати в залежності від якості триангульованої сітки, від математичного алгоритму, закладеного в основу розрахунків, від кривизни поверхні в різних ділянках та ін. Суттєві деформації спостерігаються в п'ятковій та носковій частині (Рис. 2).

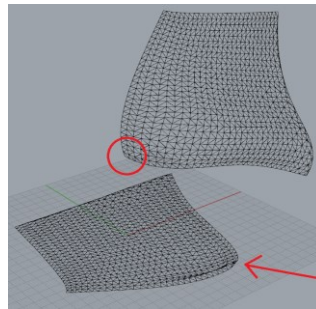


Рис. 2 Розпластування триангульованої сітки поверхні колодки

Найбільш розповсюджений спосіб розпластування для NURBS поверхонь базується на конвертуванні u та v просторових кривих, що утворюють поверхні колодки, в площинний формат.

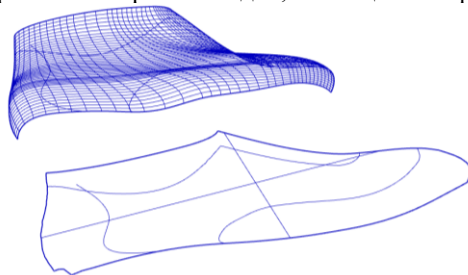


Рис. 3 Розпластування NURBS – поверхні колодки

Практично всі актуальні сьогодні програми для 3д моделювання поверхонь мають можливість розпластування 3д поверхні на площину, але дають різні результати.

В роботі було поставлено задачу проаналізувати та порівняти результати конвертування поверхні колодки із 3д формату в 2д в різних програмах. В якості об'єктів дослідження обрано три колодки різного фасону, з різною висотою підйому п'яткової частини.

Методи дослідження

Колодки, що застосовано для експерименту, було відскановано за допомогою професійного 3D-сканера FootIn 3d (виробництва Orthobaltic) та програмного забезпечення Foot3d. Процес отримання цифрової моделі колодок включав такі етапи:

- 1) Сканування колодки
- 2) Отримання хмари точок, коригування та видалення зайвих точок за потреби (програма Foot 3d)
- 3) Триангуляція сканованої поверхні (програма Foot 3d)
- 4) Збереження проекту та експорт результату триангуляції в STL файл.

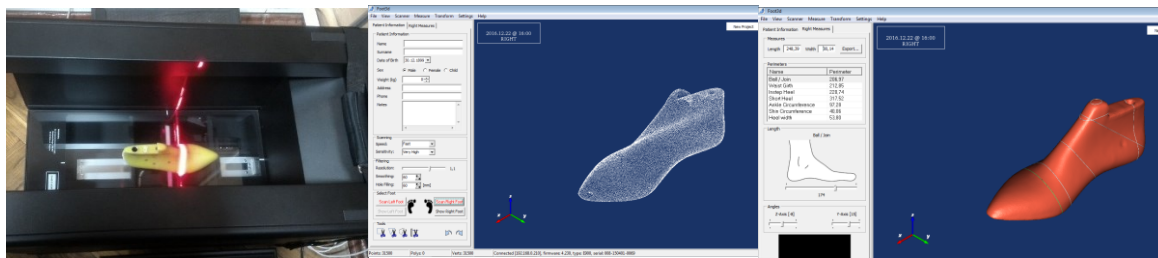


Рис. 4. Процес сканування колодки та обробка даних за допомогою спеціалізованого сканера FootIn 3d

Крім того, для кожної колодки було знято розгортки бічної поверхні традиційним ручним способом. Форми, параметри сканованих колодок та зображення їх розгортки ручним способом представлені на Рис.5.

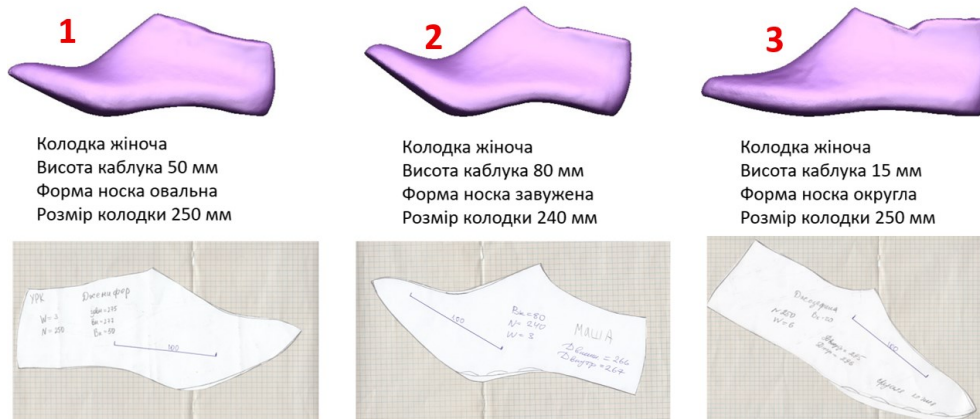


Рис. 5. Колодки, задіяні в експерименті, та їх ручні розгортки

В якості програм, за допомогою яких отримували розгортки, обрали популярні сьогодні спеціалізовані взуттєві САПР (Crispin ShoeMaker, MindCAD 3d, Icad3D+) та універсальні потужні 3д CAD (PowerShape 2016, Rhinoceros 7 та плагін Grasshopper).

Спеціалізовані програмні продукти для проєктування взуття (такі як Crispin ShoeMaker, MindCAD 3d Last, Icad3D+ та інші) мають в своїй структурі певний чіткий математичний алгоритм виконання функції розпластування складної просторової поверхні колодки на площину.

Послідовність дій з виконання функції розпластування поверхні колодки в середовищі САПР можна реалізувати за допомогою ряду етапів:

- 1) Імпортування триангульованої сітки поверхні колодки.
- 2) Визначення основних точок, за рахунок яких досягається позиціонування форми колодки в просторовій системі координат (точка носка, нижня точка п'яtkового контуру, верхня точка п'яtkового контуру, верхня точка гребня колодки).
- 3) Визначення контурів, що ділять форму колодки на окремі поверхні (контури сліду та верхньої площадки).
- 4) Визначення та коригування положення центрального переднього та заднього контурів бічної поверхні колодки.
- 5) Побудова програмою поверхні, що утворена u та v кривими, на основі заданих користувачем вихідних даних в автоматизованому режимі.
- 6) Розпластування бічної поверхні колодки програмою за допомогою закладеного математичного алгоритму.
- 7) Коригування параметрів розгортки в діалоговому режимі.

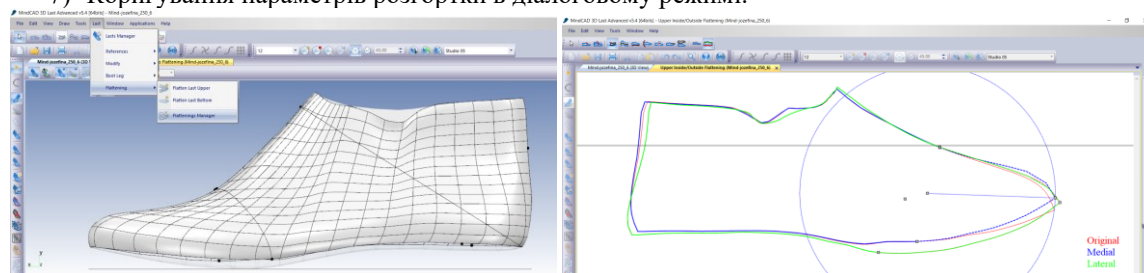


Рис. 6. Процес отримання плоскої розгортки колодки у САПР MindCAD

Коригування розгортки відбувається в залежності від технологічних особливостей виробничого процесу та методів проєктування, що застосовуються. При цьому можна відкоригувати такі параметри:

- Напруження в носку (припіднятість носкової частини),

- Вкорочення верхнього або нижнього контуру розгортки цілком або по зонах,
- Усереднення контурів зовнішньої та внутрішньої розгортки,
- Згладжування контурів,
- Коригування контурів по точках

При використанні універсальних САПР для розпластування складних 3д поверхонь маємо два варіанта виконання розгортки:

- Розплющування сітки (для сітки MESH),
- Розпластування або розкатування поверхні подвійної кривизни (для NURBS поверхні).

Алгоритм конвертування триангульованої 3D сітки в 2D формат за допомогою Squish функції програмного комплексу Rhinoceros розплющує просторову сітку трикутників в плоске креслення, мінімізуючи зміни в площі граней та зміни довжин країв кожного трикутника між 3-D сіткою та 2-D сіткою. При розплющуванні MESH сітки отримуємо результат, який має деякі візуальні дефекти розгортки, накладання трикутників на певних ділянках тощо (Рис. 7)

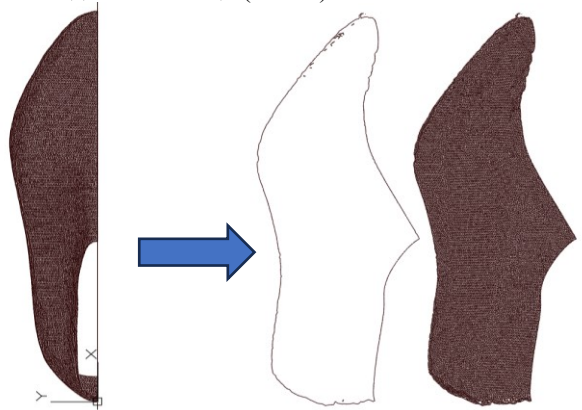


Рис. 7. Результат розплющення триангульованої сітки поверхні колодки

Для розпластування NURBS поверхонь подвійної кривизни, до яких відноситься взуттєва колодка, різні програмні продукти (PowerShape, Rhino та ін.) дозволяють обирати параметри налаштування процесу розпластування для досягнення оптимального результату (Рис. 8):

- вирівнювання по нормалі до площини
- вирівнювання по хорді
- мінімізація деформації по u-напрямку
- мінімізація деформації по v-напрямку
- глобальна мінімізація деформації
- жорстка оболонка
- гнучка оболонка
- переважне стискання,
- переважне розтягнення та ін.

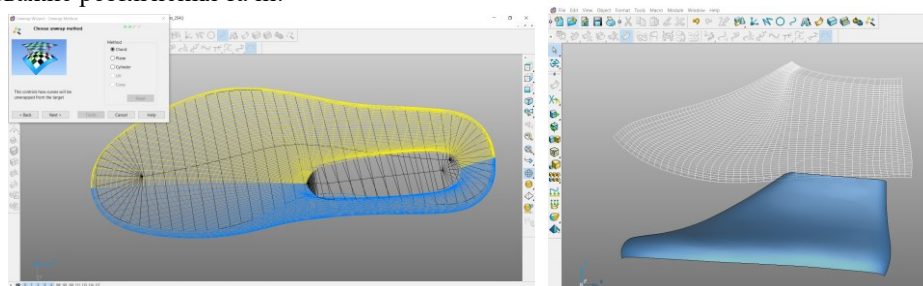


Рис. 8. Процес отримання плоскої розгортки колодки у PowerShape

Також, слід зазначити, що у САПР Rhino 3D складовою частиною є розділ алгоритмічного параметричного проєктування Grasshopper. Перевагою розробки алгоритму в Grasshopper для отримання розгортки на основі 3д поверхні є можливість закласти всі необхідні умови та опції виконання процесу розпластування. Так в ході роботи було розроблено алгоритм для отримання розгортки бічної поверхні колодки на основі зовнішньої або внутрішньої частини бічної поверхні колодки, представленої у NURBS форматі (рис.9).

Пошук оптимальних методик проєктування 3д форм колодок, а також конвертації 3д форми в 2д формат не втрачає актуальності. Проблема розгортки складних 3D-поверхонь колодок у площину для побудови лекал залишається надзвичайно важливою, адже від точності розгортки залежить збереження анатомічної відповідності та зменшення деформацій у заготовці.

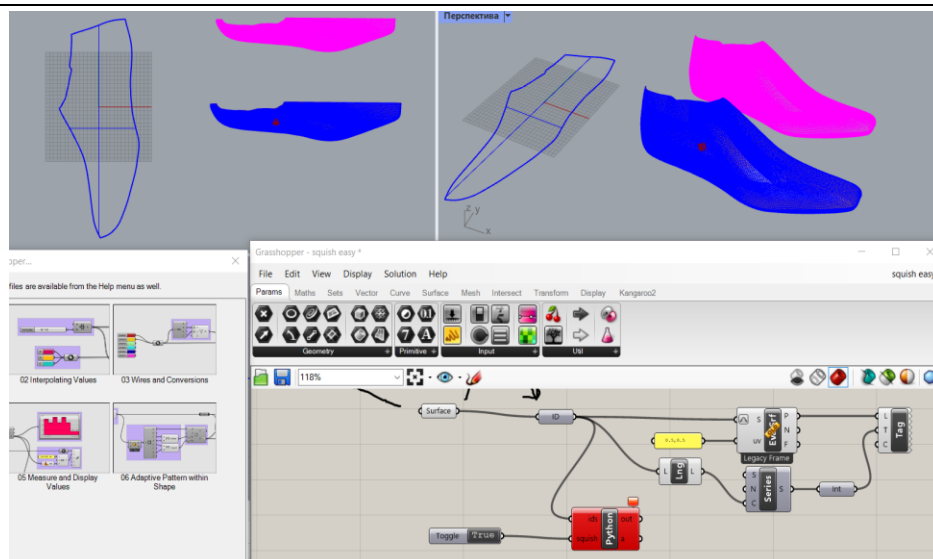


Рис. 9. Алгоритм отримання розгортки колодки за допомогою Grasshopper

Обговорення результатів

У процесі переходу від 3D-моделі взуттєвої колодки до 2D-лекал особливу увагу слід приділити точності розгортки. В роботі було проведено порівняння параметрів розгортки, отриманих вручну та за допомогою спеціальних функцій різних САПР (PowerShape, Rhinoceros, ShoeMaker, ICAD 3d+, MindCAD 3d) та з використанням плагіну Grasshopper (Рис. 10) для 3 колодок.

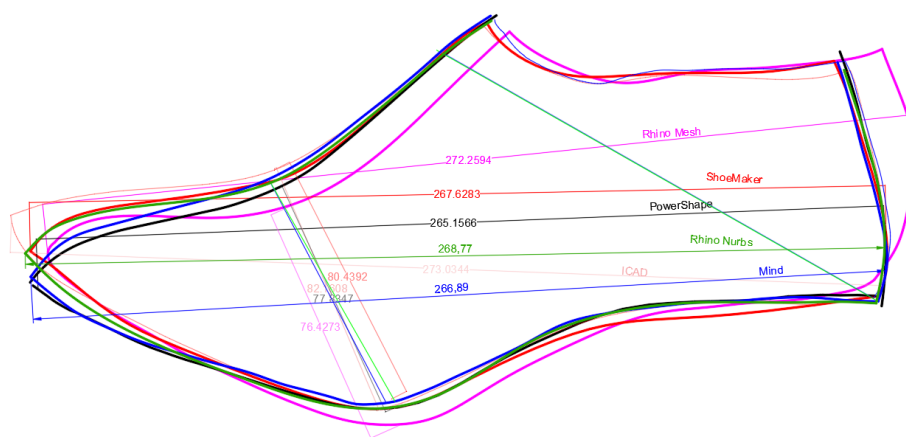


Рис. 10 Порівняльний аналіз розгортки, отриманих за допомогою Різних САПР

У отриманих розгортках за допомогою інструментів програмного комплексу AutoCAD було виміряно довжину кожної УРК (від самої випуклої точки п'ятки до найвищої точки носка) та ширину УРК в пучках вздовж лінії кальцати для кожної з 3-х досліджуваних колодок (Табл.1).

Таблиця 1

Розпластування бічної поверхні колодок 1, 2 та 3 (див. Рис. 5)

коло дка	Параметри (мм)	Ручна	Rhino (Mesh)	ShoeM aker	Power Shape	ICAD	MindC AD	Rhino (Nurbs)	Grasshopper
1	Довжина УРК, мм	279	271,93	277,18	276,41	281,13	280,5	278,7	278,9
	Ширина в пучках, мм	77,44	70,85	81,63	82,32	79,49	78,9	80,1	80,25
2	Довжина УРК, мм	266	272,26	267,63	265,15	273,03	270,55	269,6	269,82
	Ширина в пучках, мм	78	72,42	80,43	77,79	82,22	79,98	70,8	80,12
3	Довжина УРК, мм	295	301,04	298,1	294,24	295,8	295,24	294,72	294,68
	Ширина в пучках, мм	79,63	70,93	87	80,28	79,9	80,74	83,43	85,12

Отримані дані порівняли з довжиною та шириною розгортки, отриманої ручним способом. Результати представлено у Табл.2.

Таблиця 2

Відхилення від параметрів ручної розгортки

Відхилення від параметрів 3D моделі (%) по Довжині (ΔД) та Ширині (ΔШ) для кожної колодки		Rhino (Mesh)	ShoeMaker	PowerShape	ICAD	MindCAD	Rhino NURBS	Grasshopper
ΔД1		2,5341	0,6523	0,9283	-0,7634	-0,5376	0,1075	0,0358
ΔШ1		8,5098	-5,4106	-6,3017	-2,6472	-1,8853	-3,4349	-3,6286
ΔД2		-2,3534	-0,6128	0,3195	-2,6429	-1,7105	-1,3534	-1,4361
ΔШ2		7,1538	-3,1154	0,2692	-5,4103	-2,5385	-3,5897	-2,7179
ΔД3		-2,0475	-1,0508	0,2576	-0,2712	-0,0814	0,0949	0,1085
ΔШ3		10,9255	-9,2553	-0,8163	-0,3391	-1,3939	-4,7721	-6,8944
Середнє арифметичне відхилення параметрів		4,1204	-3,1321	-0,8905	-2,0123	-1,3579	-0,0212	-2,4221

Для наочності дані представлено на діаграмі розмаху (рис.11). Як видно на діаграмі, розгортка виконана в Rhinoceros (Squish функція для MESH сітки) має найбільший діапазон варіації зі значним позитивним відхиленням.

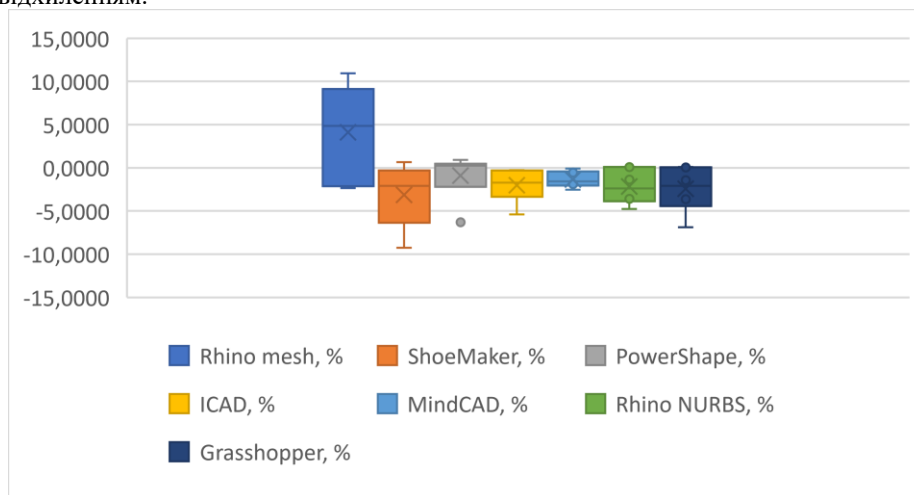


Рис.11. Діаграма розмаху, яка відображає варіацію значень у Rhino Mesh, ShoeMaker, PowerShape, ICAD, MindCAD, Rhino NURBS, Grasshopper

ShoeMaker демонструє від'ємне середнє значення та широкий інтерквартильний розмах, що означає нестабільність. PowerShape та ICAD мають вузькі коробки з невеликою варіативністю, що вказує на стабільність значень навколо середнього. MindCAD має дуже незначний розмах та позитивне середнє значення — це означає стабільність і передбачуваність результатів. Rhino NURBS та Grasshopper має вузький інтервал, але середнє значення трохи нижче нуля, що може свідчити про незначні відхилення.

Однак слід зауважити, що універсальні САПР системи (PowerShape та Rhinoceros) мають широкі можливості налаштування опцій виконання функції 3D\2D конвертування, які не повністю досліджені в контексті розгортання NURBS поверхонь колодок, а отже мають перспективу покращення результатів.

Для підтвердження статистичної значущості та спростування нульової гіпотези було проведено однофакторний дисперсійний аналіз ANOVA. ANOVA (Analysis of Variance) — статистичний метод, який використовується для порівняння середніх значень у кількох групах, щоб визначити, чи є статистично значущі відмінності між ними [11].

Розраховано загальне середнє (сума середнього всіх груп поділена на кількість груп). Виміряно, наскільки середні значення окремих груп відрізняються від загального середнього (дисперсія між групами, SS). Далі виміряно варіативність всередині кожної групи. Обчислено середньоквадратичні відхилення (MS) — частка суми квадратів на ступені свободи, обчислено критерій Фішера та p -значення. Усі розрахунки предсталено у Табл 3. Де F — співвідношення варіацій, що показує значущість різниць, p -значення — показує, чи є різниця статистично значущою.

Оскільки:

$$F = 3,603034 > F_{crit} = 2,371781,$$

$$P\text{-value} = 0,006914 < 0,05$$

Таблиця 3

Однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA), проведений на основі параметрів розгортки, отриманих різними методами.

ЗВЕДЕНА ТАБЛИЦЯ						
Група	Кількість (n)		Сума	Середнє	Дисперсія	
Rhino (MESH), %	6		24,7224	4,1204	31,44948	
ShoeMaker, %	6		-18,7926	-3,13211	13,53723	
PowerShape, %	6		-5,34321	-0,89053	7,344313	
ICAD, %	6		-12,074	-2,01234	3,94753	
MindCAD, %	6		-8,14726	-1,35788	0,819991	
Rhino (NURBS), %	6		-12,94767	-2,1579455	4,273884177	
Grasshopper, %	6		-14,5327	-2,42212	6,992411	
ANOVA – дисперсійний аналіз						
Джерело варіації	Сума квадратів (SS)	Ступені вільності (df)	Середній квадрат (MS)	F	P-значення	F критичне
Між групами	211,1321	6	35,18869	3,603034	0,006914	2,371781
Всередині груп	341,8242	35	9,766406			
Загальна	552,9563	41				

Відхиляємо нульову гіпотезу, яка стверджує, що середні значення всіх груп рівні. Є статистично значущі відмінності між показниками програмного забезпечення (Rhino mesh, ShoeMaker, PowerShape, ICAD, MindCAD, Rhino NURBS, Grasshopper). Особливо виділяється Rhino mesh з позитивним середнім значенням 4.12%, у той час як решта програм мають негативні показники.

Висновки

У результаті проведеного дослідження було встановлено, що якість, форма та точність розгортки 3D-моделі взуттєвої колодки у 2D-формат в значній мірі залежить від використаної CAD-системи та формату цифрової моделі колодки. Проведене в роботі дослідження виявило наявність істотної статистичної різниці між результатами, отриманими в різних САПР. Статистичний аналіз (ANOVA) показав, що значуща різниця існує принаймні між двома із чотирьох програм, причому найбільше відхилення спостерігається у Rhino при розплющуванні сітки трикутників, а найменше — в ICAD (розпластування Nurbs-поверхні).

NURBS поверхні розпластуються значно краще ніж сітки трикутників, і забезпечують більш високу точність отриманих розгортки. Наявні незначні відхилення у параметрах розгортки можуть бути проігноровані у випадку застосування натуральної шкіри для виготовлення вершу, і традиційного способу зтягування заготовки на колодці. Однак значні відмінності у результатах розпластування NURBS поверхонь можуть бути більш значимими при висуванні підвищених вимог до точності побудови конструкції вершу (у випадку штробельного способу зтяжки, при виготовленні складних конструкцій вершу взуття тощо). Це спонукає до подальшого вивчення процесу 3д-2д конвертування складних поверхонь подвійної кривизни з дослідженням впливу параметрів налаштування процесу розпластування. Широкий діапазон налаштувань відповідних функцій потужних універсальних САПР дозволить в перспективі знайти оптимальні параметри виконання конвертації із 3 D в 2 D формат, які здатні забезпечити необхідну точність результатів, уникаючи потреби у коригуваннях.

Література

1. Chertenko, L., Kaptiurova, D., & Bondar, O. (2023). Practical aspects of 3D scanning results application in shoe last design. *3DBODY.TECH 2023 – 14th International Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies*, Lugano, Switzerland, 17–18 October 2023. Ascona, Switzerland. <https://doi.org/10.15221/23.28>
2. Goonetilleke, R. S. (2017). *The science of footwear*. CRC Press.
3. Пігл, Л., & Тіллер, В. (2012). *Книга NURBS*. Springer Science & Business Media.
4. Чертенко, Л. П., & Гопенко, А. В. (2017). Дослідження можливостей 3D САПР для проектування поверхні взуттєвої колодки. *Herald of Khmelnytskyi National University*, (3(249)), 80–86.
5. Wang, J., Zhang, X., Zhang, G., & Fang, F. (2011). Rapid parametric design methods for shoe-last customization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(1–4), 173–186. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-3144-y>
6. Driscu, M., & Costea, M. (2014). Shoe last shape customization. *Leather and Footwear Journal*, 14(3), 181–190. <https://doi.org/10.24264/lfj.14.3.4>

7. Azariadis, P. N., Nearchou, A. C., & Aspragathos, N. A. (2002). An evolutionary algorithm for generating planar developments of arbitrarily curved surfaces. *Computers in Industry*, 47(3), 357–368. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(01\)00155-5](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(01)00155-5)
8. Song, J., & Kim, H. (2004). A study on surface flattening for 3 dimensional shoe pattern design. *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 9.
9. Ma, X., Zhang, Y., Zhang, M., & Luximon, A. (2012). An algorithm for shoe-last bottom flattening. In V. G. Duffy (Ed.), *Advances in applied human modeling and simulation* (pp. 295–304). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12319>
10. Chung, W., Kim, S. H., & Shin, K. H. (2008). A method for planar development of 3D surfaces in shoe pattern design. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22, 1510–1519. <https://doi.org/10.1007/s12206-008-0609-0>
11. Саломао, А. (2025, May 20). Односторонній дисперсійний аналіз: розуміння, проведення та презентація. *Mind the Graph Blog*. <https://mindthegraph.com/blog/uk/одностороння-анова/>

References

1. Chertenko, L., Kaptiurova, D., & Bondar, O. (2023). Practical aspects of 3D scanning results application in shoe last design. 3DBODY.TECH 2023 – 14th International Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies, Lugano, Switzerland, 17–18 October 2023. Ascona, Switzerland. <https://doi.org/10.15221/23.28>
2. Goonetilleke, R. S. (2017). *The science of footwear*. CRC Press.
3. Pihl, L., & Tiller, V. (2012). *Knyha NURBS*. Springer Science & Business Media.
4. Chertenko, L. P., & Hopenko, A. V. (2017). Doslidzhennia mozhlyvostei 3D SAPR dlia proiektuvannia poverkhni vzuttievoi kolodky. *Herald of Khmelnytskyi National University*, (3(249)), 80–86.
5. Wang, J., Zhang, X., Zhang, G., & Fang, F. (2011). Rapid parametric design methods for shoe-last customization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(1–4), 173–186. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-3144-y>
6. Driscu, M., & Costea, M. (2014). Shoe last shape customization. *Leather and Footwear Journal*, 14(3), 181–190. <https://doi.org/10.24264/lfj.14.3.4>
7. Azariadis, P. N., Nearchou, A. C., & Aspragathos, N. A. (2002). An evolutionary algorithm for generating planar developments of arbitrarily curved surfaces. *Computers in Industry*, 47(3), 357–368. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(01\)00155-5](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(01)00155-5)
8. Song, J., & Kim, H. (2004). A study on surface flattening for 3 dimensional shoe pattern design. *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 9.
9. Ma, X., Zhang, Y., Zhang, M., & Luximon, A. (2012). An algorithm for shoe-last bottom flattening. In V. G. Duffy (Ed.), *Advances in applied human modeling and simulation* (pp. 295–304). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12319>
10. Chung, W., Kim, S. H., & Shin, K. H. (2008). A method for planar development of 3D surfaces in shoe pattern design. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22, 1510–1519. <https://doi.org/10.1007/s12206-008-0609-0>
11. Salomao, A. (2025, May 20). Odnostoronniy dyspersiinyi analiz: rozuminnia, provedennia ta prezentatsiia. *Mind the Graph Blog*. <https://mindthegraph.com/blog/uk/одностороння-анова/>