

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
ДИЗАЙНУ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Бондар Олександр Іванович

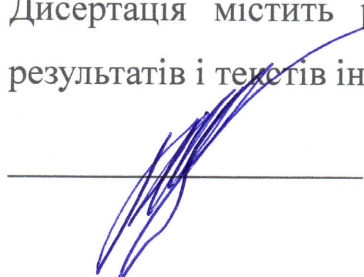
УДК 685.34.02:[005.961:005.336.1](043)

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ РОЗРОБКИ ЕРГОНОМІЧНОГО ВЗУТТЯ
В УМОВАХ МАСОВОГО ВИРОБНИЦТВА

Спеціальність 182 Технології легкої промисловості
Галузь знань 18 Виробництво та технології

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


_____ О.І. Бондар

Науковий керівник Первая Наталія Володимирівна, доктор технічних наук,
професор

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Бондар О.І. Удосконалення методів розробки ергономічного взуття в умовах масового виробництва. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 182 – Технології легкої промисловості. Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2025.

У дисертаційній роботі висвітлено питання вдосконалення методів розробки форми взуття на засадах ергономічного підходу, функціональної доцільності та персоналізації продукції. Дослідження має комплексний характер і охоплює науково-теоретичний аналіз проблеми, розробку вдосконалених методів цифрового моделювання форми взуття, експериментальну перевірку результатів та пропозиції щодо впровадження розробок у взуттєву галузь.

Актуальність теми зумовлена стрімким розвитком індустрії моди, зростанням вимог до зручності, безпеки та функціональності взуття, а також потребами адаптації масової продукції до індивідуальних антропометричних особливостей населення. Зміни у структурі населення, розширення ринку, розвиток інноваційних технологій, еволюція вимог до споживчих товарів та екологічні виклики потребують глибокого переосмислення принципів проєктування взуттєвих виробів.

У роботі обґрунтовано, що внутрішня форма взуття має першочергове значення для забезпечення комфорту та здоров'я стопи, оскільки саме вона визначає характер взаємодії між стопою людини та виробом. Незважаючи на наявність усталених розмірних сіток, сучасне взуття часто не відповідає індивідуальним особливостям будови стопи, що провокує появу ортопедичних захворювань та дискомфорту.

Метою роботи є вдосконалення методів розробки та виготовлення ергономічного взуття масового виробництва, з використанням цифрового

моделювання та автоматизації для забезпечення оптимізації проектно-виробничих процесів та можливості кастомізації форми взуття при мінімумі додаткових витрат.

Для реалізації зазначеної мети поставлено та вирішено такі завдання:

- проаналізовано ступінь відповідності взуття масового виробництва реальним вимогам споживачів,
- визначено шляхи вдосконалення взуття,
- досліджено параметри стоп цільових груп споживачів за допомогою прогресивних сучасних методів дослідження,
- розроблена вдосконалена ергономічна форма взуття, а також досягнуто персоналізацію форми взуття в умовах промислового виробництва.

Об'єкт дослідження – процес розробки ергономічної форми чоловічого взуття масового виробництва.

Предмет дослідження – удосконалення методів розробки ергономічного взуття в умовах масового виробництва з урахуванням можливості кастомізації відповідно до потреб споживача.

Методи дослідження. Поставлені в роботі завдання вирішено за допомогою традиційних та сучасних інструментальних методів: контактного та безконтактного методів антропометричних досліджень стоп споживачів, методу SubD, Nurbs 3D моделювання форми взуття та його елементів, методу опитування та анкетування споживачів під час визначення напрямів удосконалення внутрішньої форми взуття та дослідного носіння розроблених виробів.

Наукова новизна полягає в теоретичному та експериментальному обґрунтуванні технології розробки внутрішньої форми взуття, яка дозволила досягти персоналізації ергономічної форми взуття на основі типового виробничого процесу в умовах взуттєвого підприємства при застосуванні цифрових технологій. При цьому:

Уперше:

- встановлено параметри ергономічної форми взуття згідно актуальних антропометричних вимог споживачів;
- одержано параметри для вдосконалення форми взуття масового виробництва;

- розроблено спосіб кастомізації форми та конструкції взуття згідно індивідуальних потреб споживача в умовах масового виробництва взуття;
- підвищено рівень комфортності взуття, що виробляється, за рахунок удосконалення форми колодок та впровадження інноваційних операцій в стандартний технологічний процес виготовлення взуття;
- досліджено різні способи моделювання форми колодки на основі принципів зворотного інжинірингу з подальшим переходом від 3д поверхні до 2д лекал;
- досліджено способи виконання розпластування складної просторової форми колодки в різних САПР, запропоновано спосіб фрагментного розпластування бічної поверхні колодки за допомогою функцій 3д CAD для збільшення точності проектування;
- запропоновано впровадження операцій 3д друку для виготовлення колодок для кастомізованих проектів в умовах взуттєвого виробництва.

Практичне значення отриманих результатів:

- удосконалено методи розробки ергономічного чоловічого взуття в умовах масового виробництва:
- запропонований спосіб кастомізації форми взуття може бути впроваджений в умовах масового виробництва взуття для досягнення персоналізації взуття та збільшення відсотку реалізації продукції,
- Розроблено спосіб моделювання колодки за допомогою SubD в середовищі універсальної САПР Rhinoceros, який може бути ефективно використаний для створення нових колодок з можливістю швидкої кастомізації форми та логічним виходом на виготовлення колодки шляхом 3д друку,
- запропоновано методику фрагментного розпластування бічної поверхні колодки з використанням способів проектування в універсальних САПР для точнішого проектування лекал, яка може бути використана в умовах виробництва для підвищення точності проектних процесів, в тому числі при використанні штробельного способу формування верху,
- Розраховані інтервали зміни параметрів форми колодки та її 2д розгортки від розміру до розміру можуть бути використані для градирування лекал на розмірну серію,

– Запропоновані параметри 3D друку можна використати для виготовлення взуттєвої колодки при виготовленні кастомізованого взуття.

Для досягнення поставленої мети було здійснено аналіз проблеми розробки елементів форми взуття з точки зору відповідності продукції ергономічним критеріям, визначено шляхи вдосконалення підходів до розробки взуття, а також проведено антропометричні дослідження стоп чоловіків представників цільової групи споживачів з використанням прогресивних цифрових технологій.

Розроблено цифрову вдосконалену методику моделювання ергономічної форми колодки на базі результатів 3D-сканування та методу зворотного інжинірингу, а також технологію персоналізації форми взуття з використанням цифрових інструментів та адитивного виробництва (3D-друку). Обґрунтовано інтеграцію інновацій у стандартні технологічні цикли масового виробництва.

Запропонована методика розробки нової форми колодки представляє собою послідовність процесів 3D-моделювання, що включають параметричні маніпуляції з формою, проєктування контрольних контурів (контур сліду, що будується на основі плантограми), та візуальне 3D-моделювання форми з використанням SubD у програмі для 3D-моделювання Rhinoceros. Особливістю цієї методики є можливість адаптації базової форми до індивідуальних антропометричних параметрів шляхом локальної модифікації об'ємної геометрії у реальному часі, з подальшою генерацією високоточних 3D-сіток для виготовлення колодки засобами 3D-друку або подальшої обробки в САМ-середовищі.

Досліджено способи розпластування складної просторової форми взуттєвої колодки у різних САПР; обґрунтовано ефективність фрагментного розпластування бічної поверхні колодки за допомогою функціоналу САПР. Такий підхід дозволив досягти підвищеної точності побудови 2D-викрійок для верху взуття, забезпечити узгодженість між розгорткою та тривимірною формою колодки, а також оптимізувати процес проєктування для різних способів формування верху.

Отримані результати дозволять реалізувати цифрову трансформацію взуттєвої галузі на основі CAD/CAM-систем та 3D-технологій та розширити

можливості українських підприємств у напрямі екологічного, персоналізованого і високоякісного виробництва взуття.

У роботі також розглянуто соціально-економічний аспект теми, зокрема тенденцію до зростання частки споживачів, які віддають перевагу персоналізованим та ергономічним виробам. Згідно європейського досвіду розвинених країн, такий підхід сприяє підвищенню якості життя, зменшенню навантаження на медичну систему та створенню позитивного іміджу бренду.

Ідея кастомізації форми взуття в умовах масового виробництва реалізована шляхом розробки універсальної моделі взуття зі змінною конструкцією верху, конструкція якої передбачає використання однієї уніфікованої підошви для кількох варіантів верху. Завдяки змінному верхньому елементу, що фіксується за допомогою застібки-блискавки, вдалося забезпечити змінність стилістичного оформлення, кольору та матеріалів без зміни основи взуття. Така конструкція дозволяє також адаптувати взуття під індивідуальні параметри стопи споживача, приєднавши більш широку верхню частину. Такий підхід дозволяє реалізувати принцип «індивідуальності в серії», що сприяє зниженню складських залишків, адаптацію до смаків і потреб конкретного споживача.

Проведено апробацію розроблених методик у виробничих умовах на вітчизняному підприємстві Prime shoes, що підтверджує доцільність впровадження результатів дисертаційного дослідження в практику.

Запропонована наукова робота має важливе значення для сучасної взуттєвої науки й промисловості. Воно поєднує в собі класичні принципи ергономіки, новітні цифрові технології, принципи сталого розвитку та адаптивного дизайну. Результати дослідження можуть стати основою для подальшого розвитку інтегрованих систем проектування взуття, орієнтованих на індивідуальні потреби людини в умовах масового виробництва.

Ключові слова: внутрішня форма взуття, ергономіка, біомеханіка, цифрове моделювання, 3D-сканування, взуттєва колодка, кастомізація, SubD-моделювання, зворотний інжиніринг, антропометрія, комфорт, CAD/CAM, 3D-друк, технологія виготовлення.

ABSTRACT

Bondar O.I. Improvement of Methods for Designing Ergonomic Footwear in Mass Production Conditions. – A qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 182 – Technologies of Light Industry. Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, 2025.

The dissertation addresses the improvement of footwear design methods based on ergonomic principles, functional suitability, and product personalization. The research is comprehensive and includes a theoretical analysis of the problem, the development of improved digital modeling methods for footwear shape, experimental validation of results, and proposals for implementation in the footwear industry.

The relevance of the topic is driven by the rapid development of the fashion industry, growing demands for comfort, safety, and functionality of footwear, as well as the need to adapt mass products to individual anthropometric features. Changes in population structure, market expansion, innovative technologies, evolving consumer product requirements, and environmental challenges necessitate a profound rethinking of footwear design principles.

The research substantiates that the internal shape of footwear is crucial for comfort and foot health, as it determines the nature of interaction between the human foot and the product. Despite standardized size charts, modern footwear often fails to meet individual foot characteristics, leading to orthopedic issues and discomfort.

Object of study: ergonomic shape of men's footwear for mass production.

Subject of study: development of ergonomic footwear shape in industrial production with potential for consumer-driven customization.

Purpose: to improve methods for designing and producing ergonomic mass-produced footwear using digital modeling and automation, enabling optimization of design-manufacturing processes and customization with minimal additional cost.

Research objectives:

- Analyze the degree to which mass-produced footwear meets real consumer needs;
- Identify ways to improve footwear designs;
- Study foot parameters of target consumer groups using advanced modern research methods;
- Develop an improved ergonomic footwear shape;
- Achieve footwear shape personalization in industrial production conditions.

Scientific novelty:

The dissertation provides theoretical and experimental justification for a technology that enables ergonomic footwear shape personalization based on standard manufacturing processes using digital technologies.

For the first time:

- Ergonomic footwear shape parameters were established based on current anthropometric requirements;
- Parameters for improving the shape of mass-produced footwear were obtained;
- A method for customizing footwear shape and construction based on individual consumer needs in mass production conditions was developed;
- Comfort level of produced footwear was enhanced through last shape improvements and integration of innovative operations into the standard manufacturing process;
- Various methods for last shape modeling based on reverse engineering principles were studied, including transition from 3D surface to 2D patterns;
- Unfolding techniques for complex 3D last shapes in different CAD systems were analyzed; a method of fragmental unfolding of the side surface using CAD functions was proposed for increased design accuracy;
- Implementation of 3D printing operations for custom last production within industrial conditions was proposed.

Practical significance:

- The obtained parameters can be applied in the development and production of an improved ergonomic shape for men's footwear;
- The proposed customization method can be introduced into mass production to achieve personalization and increase product sales;
- The developed SubD-based last modeling method in Rhinoceros CAD can be effectively used for rapid customization and 3D-printed last production;
- The proposed method of fragmental last surface unfolding in universal CAD systems improves pattern design accuracy, especially for Strobel upper formation;
- Calculated parameter intervals for last shape and 2D developments can be used for pattern grading across size ranges;
- Proposed 3D printing parameters enable last manufacturing for customized footwear.

To achieve the research objectives, the study analyzes design issues from the standpoint of ergonomic criteria, determines ways to improve footwear design approaches, and conducts anthropometric studies of men's feet in the target group using advanced digital technologies.

An advanced digital method for ergonomic last modeling based on 3D scanning and reverse engineering was developed, as well as a footwear shape personalization technology using digital tools and additive manufacturing (3D printing). The integration of innovations into standard mass production cycles is substantiated.

The proposed last modeling method consists of a sequence of 3D modeling processes including parametric shape manipulation, footprint contour design based on plantogram data, and visual 3D modeling using SubD tools in Rhinoceros. A key feature of this method is its ability to adapt the base shape to individual anthropometric parameters through real-time localized volumetric modifications, enabling high-precision mesh generation for last production via 3D printing or CAM post-processing.

Different methods for unfolding the complex 3D shape of the footwear last in various CAD systems were studied. The efficiency of side-surface fragmental unfolding using CAD tools was justified. This approach allowed for more precise construction of 2D upper patterns, ensuring consistency between the unfolded pattern and 3D last shape, while optimizing design for different upper formation methods.

The obtained results facilitate digital transformation of the footwear industry based on CAD/CAM systems and 3D technologies, expanding the capabilities of Ukrainian enterprises toward sustainable, personalized, and high-quality footwear manufacturing.

The work also considers the socio-economic dimension, particularly the growing trend among consumers to prefer personalized and ergonomic products. European experience shows that this approach enhances quality of life, reduces medical system burden, and strengthens brand image.

The concept of customizing footwear shape in mass production was implemented through a universal shoe model with interchangeable upper construction. This design uses a single standardized sole with multiple upper variants. A detachable upper element, fixed via zipper, allows variation in style, color, and material without altering the shoe base. This design also enables fitting customization by attaching wider upper parts, realizing the “individuality within the series” principle, reducing inventory surplus, and meeting consumer preferences.

The developed methods were tested under production conditions at the domestic enterprise Prime Shoes, confirming the feasibility of implementing the research outcomes.

This dissertation is of significant importance to contemporary footwear science and industry. It combines classical ergonomic principles with cutting-edge digital technologies, sustainable development, and adaptive design. The research outcomes can serve as a foundation for further development of integrated footwear design systems oriented toward individual human needs in mass production environments.

Keywords: internal footwear shape, ergonomics, biomechanics, digital modeling, 3D scanning, footwear last, customization, SubD modeling, reverse engineering, anthropometry, comfort, CAD/CAM, 3D printing, manufacturing technology.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ:

У наукових виданнях, що проіндексовані в базі даних Скопус:

1. **Bondar, O.**, Chertenko, L., Spahiu, T., Shehi, E. Shoe customization in a mass-production mode. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2024, 19, doi:10.1177/15589250241239247 (Q2)

https://www.researchgate.net/publication/379084465_Shoe_customization_in_a_mass-production_mode

2. L. Chertenko, D. Kaptiurova, **O. Bondar** Improving the Footwear Ergonomics by Personalizing its Shape. ICAMS 2022 – 9 th International Conference on Advanced Materials and Systems, Bucharest, Romania, 26-28 October 2022, pp. 285–290, <https://doi.org/10.24264/icams-2022.III.5>

https://www.researchgate.net/publication/365723356_Improving_the_Footwear_Ergonomics_by_Personalizing_Its_Shape

У наукових фахових виданнях категорії Б:

1. Д. О. Каптюрова, Л. П. Чертенко, **О.І. Бондар**, О. Нос. Досконалення внутрішньої форми взуття з використанням сучасних прогресивних технологій // Вісник Хмельницького національного університету. Серія “Технічні науки”. - 2022. - № 6. - С. 102 – 110.

<https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-102-110>

2. Л.П. Чертенко, В.П. Кернеш, Б.І. Смоленська, **О.І. Бондар**. Шляхи підвищення рівня зручності взуття масового виробництва // Індустрія моди №1, 2022, ст. 20-27.

https://www.researchgate.net/publication/362229705_WAYS_TO_INCREASE_THE_COMFORT_LEVEL_OF_THE_MASS_PRODUCTION_FOOTWEAR

Тези доповідей на конференціях міжнародного рівня:

1. D. Kaptiurova, L. Chertenko, **O. Bondar**. Usage of Additive Technologies for Orthopedic Footwear Manufacturing / Technical Scientific Conference of Undergraduate, Master and PhD Students, Technical University of Moldova (April 2024)
<http://repository.utm.md:8080/bitstream/handle/5014/28359/Conf-TehStiint-UTM-StudMastDoct-2024-V4-p2155-2158.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
2. Liliia Chertenko. Additive Technologies to Boost Development and Improve New Shapes of Footwear Products I am running a few minutes late; my previous meeting is running over. L.Chertenko, O. Udovenko, **O.Bondar**, T.Spahiu. Book of Abstracts of 15th Joint International Conference on Innovation in Clothing – Clotech, Dresden 2024
3. Liliia Chertenko. Development of Orthopedic Footwear for Orthoses on the Lower Limbs \ L.Chertenko¹, D. Kaptiurova¹, T.Spahiu, **O. Bondar** KyivTexFashion conference, Kyiv 2024
4. D. Kaptiurova, L. Chertenko, **O. Bondar**. Improvement of the shape and design of tactical footwear for the Ukrainian military. V-th International symposium creativity technology marketing 2023 Technical University of Moldova, 31 березня 2023, с. 213-215. https://ibn.idsi.md/sites/default/files/imag_file/213-214_11.pdf
5. L. Chertenko, D.Kaptiurova, **O.Bondar** "Practical Aspects of 3D Scanning Results Application in Shoe Last Design", Proc. of 3DBODY.TECH 2023 - 14th Int. Conf. and Exh. on 3D Body Scanning and Processing Technologies, Lugano, Switzerland, 17-18 Oct. 2023, #28, <https://doi.org/10.15221/23.28>.
6. Л. Чертенко, М. Матвеев, **О. Бондар**. Вдосконалення форми ергономічного взуття в контексті «sustainable fashion». Збірник тез доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції текстильних та фешн технологій KyivTex&Fashion, м. Київ, 19 жовтня 2023 року. – Київ : КНУТД, 2023. – С.246-249

ЗМІСТ

ВСТУП	16
Розділ 1. ПЕРЕДУМОВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ФОРМИ ВЗУТТЯ	21
Висновки до 1 розділу.	34
Розділ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ ВЕКТОРІВ РОЗВИТКУ ВЗУТТЄВОЇ ІНДУСТРІЇ	36
2.1. Використання цифрових технологій сканування для підвищення ефективності взуттєвого виробництва.....	39
2.2. Виклики просторового моделювання форми взуття	51
2.3. 3D друк у взуттєвому виробництві.....	66
Висновки до розділу 2	70
Розділ 3. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	71
3.1 Шляхи вдосконалення форми взуття за допомогою антропометричних досліджень.....	71
3.2 Практичні аспекти застосування результатів 3Д сканування при розробці форм взуття.....	79
Висновки до розділу 3	96
Розділ 4. ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ВЗУТТЄВОЇ КОЛОДКИ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВОРОТНОГО ІНЖИНІРИНГУ ...	97
4.1. Дослідження методів зворотного інжинірингу для моделювання взуттєвої колодки	97
4.2. Шляхи реверс-інженірингу взуттєвої колодки	101
4.3. Розробка параметрів форми вдосконалених колодок	119
Висновки до розділу 4	128
Розділ 5. СУЧАСНІ РІШЕННЯ В РОЗРОБЦІ ЕРГОНОМІЧНОГО ВЗУТТЯ ТА ЙОГО АДАПТАЦІЇ ДО МАСОВОГО ВИРОБНИЦТВА.....	129

5.1. Вдосконалення форми ергономічного взуття та технології виробництва згідно актуальних вимог.....	129
5.2 Кастомізація взуття в умовах масового виробництва	137
Висновки до розділу 5	146
Розділ 6. РОЛЬ ЦИФРОВІЗАЦІЇ І 3D-ДРУКУ В ОПТИМІЗАЦІЇ ВЗУТТЄВОГО ВИРОБНИЦТВА.	147
6.1 Роль цифрових технологій у вдосконаленні проєктних процесів взуттєвого виробництва.....	147
6.2 Застосування 3д друку для вирішення задач взуттєвого виробництва	172
Висновки до розділу 6	177
ВИСНОВКИ.....	178
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	180
ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача	194

ВСТУП

Планування виробничих процесів виготовлення взуття повинно ґрунтуватися на потребах ринку споживачів. Всебічні маркетингові дослідження можуть дати інформацію стосовно тенденцій – мода, тренд, купівельна спроможність населення, розподіл ринку між вітчизняними виробниками та імпортерами та інше. Але цього недостатньо для формування уявлення зручності виробленого взуття. Бо тільки реальний покупець з його антропометричними особливостями може дати оцінку практичній придатності товару. Знання усереднених даних про розмір взуття населення та відповідність його розмірному стандарту, прийнятому на певній території, також недостатньо для реалізації «золотої мрії» кожного виробника про 100% реалізацію виробленої продукції з мінімальними витратами на виготовлення та збут. Важливим аспектом розвитку світового взуттєвого ринку є те, що, попри складні макроекономічні процеси, зберігається досить високий рівень попиту на взуття різного асортименту.

Ринок перенасичений пропозиціями різноманітного взуття, виготовленого у різних країнах за різними стандартами. Однак сьогодні як і раніше дуже актуальною є проблема розробки взуття, яке не шкодить здоров'ю стопи, допомагає виконувати її природну функцію та забезпечує правильну біомеханіку руху.

Внутрішня форма взуття має першочергове значення для забезпечення комфорту та здоров'я стопи, оскільки саме вона визначає характер взаємодії між стопою людини та виробом. Незважаючи на наявність усталених розмірних сіток, сучасне взуття часто не відповідає індивідуальним особливостям будови стопи, що провокує появу ортопедичних захворювань та дискомфорту.

Метою роботи є вдосконалення методів розробки та виготовлення ергономічного взуття масового виробництва, з використанням цифрового моделювання та автоматизації для забезпечення оптимізації проектно-

виробничих процесів та можливості кастомізації форми взуття при мінімумі додаткових витрат.

Для реалізації зазначеної мети поставлено та вирішено наступні завдання:

- проаналізовано ступінь відповідності взуття масового виробництва реальним вимогам споживачів,
- визначено шляхи вдосконалення взуття,
- досліджено параметри стоп цільових груп споживачів за допомогою прогресивних сучасних методів дослідження,
- розроблена вдосконалена ергономічна форма взуття, а також досягнуто персоналізацію форми взуття в умовах промислового виробництва.

Об’єкт дослідження – процес розробки ергономічної форми чоловічого взуття масового виробництва.

Предмет дослідження – удосконалення методів розробки ергономічного взуття в умовах масового виробництва з урахуванням можливості кастомізації відповідно до потреб споживача.

Методи дослідження. Поставлені в роботі завдання вирішено за допомогою традиційних та сучасних інструментальних методів: контактного та безконтактного методів антропометричних досліджень стоп споживачів, методу SubD, Nurbs 3D моделювання форми взуття та його елементів, методу опитування та анкетування споживачів під час визначення напрямів удосконалення внутрішньої форми взуття та дослідного носіння розроблених виробів.

Наукова новизна полягає в теоретичному та експериментальному обґрунтуванні технології розробки внутрішньої форми взуття, яка дозволила досягти персоналізації ергономічної форми взуття на основі типового виробничого процесу в умовах взуттєвого підприємства при застосуванні цифрових технологій. При цьому:

Уперше:

- встановлено параметри ергономічної форми взуття згідно актуальних антропометричних вимог споживачів;
- одержано параметри для вдосконалення форми взуття масового виробництва;
- розроблено спосіб кастомізації форми та конструкції взуття згідно індивідуальних потреб споживача в умовах масового виробництва взуття;
- підвищено рівень комфортності взуття, що виробляється, за рахунок удосконалення форми колодок та впровадження інноваційних операцій в стандартний технологічний процес виготовлення взуття;
- досліджено різні способи моделювання форми колодки на основі принципів зворотного інжинірингу з подальшим переходом від 3д поверхні до 2д лекал;
- досліджено способи виконання розпластування складної просторової форми колодки в різних САПР, запропоновано спосіб фрагментного розпластування бічної поверхні колодки за допомогою функцій 3д CAD для збільшення точності проектування;
- запропоновано впровадження операцій 3д друку для виготовлення колодок для кастомізованих проектів в умовах взуттєвого виробництва.

Практичне значення отриманих результатів:

- удосконалено методи розробки ергономічного чоловічого взуття в умовах масового виробництва:
- запропонований спосіб кастомізації форми взуття може бути впроваджений в умовах масового виробництва взуття для досягнення персоналізації взуття та збільшення відсотку реалізації продукції,
- Розроблено спосіб моделювання колодки за допомогою SubD в середовищі універсальної САПР Rhinoceros, який може бути ефективно використаний для створення нових колодок з можливістю швидкої кастомізації форми та логічним виходом на виготовлення колодки шляхом 3д друку,
- запропоновано методику фрагментного розпластування бічної поверхні колодки з використанням способів проектування в універсальних

САПР для точнішого проектування лекал, яка може бути використана в умовах виробництва для підвищення точності проєктних процесів, в тому числі при використанні штробельного способу формування верху,

- Розраховані інтервали зміни параметрів форми колодки та її 2д розгортки від розміру до розміру можуть бути використані для градирування лекал на розмірну серію,

- Запропоновані параметри 3д друку можна використати для виготовлення взуттєвої колодки при виготовленні кастомізованого взуття.

Особистий внесок здобувача полягає у постановці завдань, виборі теми, об'єктів та методів дослідження, проведенні експериментів, аналізі та узагальненні отриманих результатів, розробленні технології розробки раціональної внутрішньої форми взуття, формулюванні наукової новизни, практичної цінності, висновків та апробації отриманих результатів. Здобувачеві належать основні ідеї опублікованих робіт.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи протягом 2023-2024 рр. доповідались, обговорювались та здобули позитивну оцінку на Технічні науковій конференції студентів та аспірантів Технічного університету Молдови (квітень 2024); на 15-тій Міжнародній конференції інновацій в одязі (м.Дрезден, серпень 2024); на 8-мій Міжнародній науково-практичній конференції текстильних та фешен технологій KyivTex&Fashion (м.Київ, жовтень 2024); на 5-му Міжнародному симпозіумі технологій творчості в Технічному університеті Молдови (31 березня 2023); на 14-тій Міжнародній конференції та виставці з технологій 3D-сканування та обробки тіла (м. Лугано, Швейцарія, 17-18 жовтня 2023); на VII Міжнародній науково-практичній конференції текстильних та фешн технологій KyivTex&Fashion (м. Київ, 19 жовтня 2023).

Публікації. Основні положення і результати дисертаційного дослідження відображено у 10 наукових роботах, з них 2 статті у наукових фахових виданнях України; 2 статті у виданнях, які входять до міжнародних науко-метричних баз Scopus та/або Web of Science Core Collection.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, шістьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 195 сторінок, у тому числі 126 рисунків, 22 таблиці. Список використаних джерел містить 118 найменування, на 14 сторінках.

Розділ 1. ПЕРЕДУМОВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ФОРМИ ВЗУТТЯ

Основним покупцем взуття (40 %) є молодь віком від 17 до 30 років. Купівля у групі 30-45 років складає трохи більше 25 %, а на людей старшого віку припадає менше 15 %. Що ж стосується пропозиції, то тут виробни молодіжного асортименту, за оцінкою торговців, займають не менше 80-82 %. Значна диспропорція і за дитячим взуттям: питома вага попиту на нього становить 14 %, а пропозиція – лише 6,5 %. Асортимент взуттєвих магазинів становить: 70% – жіноче взуття, решта – чоловіче (17%) і дитяче (13%). Продавці пояснюють, що чоловіки менш вибагливі, ніж жінки, рідше купують взуття і мають до нього менше вимог [1].

Таблиця 1.1. Баланс попиту й пропозиції на взуттєвому ринку

Найменування показника	У 2000 р., млн. пар	У 2001 р., млн. пар
1. Потреба взуття	260,0	260,0
2. Обсяг внутрішнього продажу (попит на взуття)	120,0	110,0
3. Імпорт	12,0	5,0
4. Експорт	3,9	4,5
5. Товарні запаси	20,4	9,8
6. Виробництво взуття	29,3	33,0
7. Пропозиція ринку (п.6 + п.3 – п.4 + п.5)	57,8	41,9
8. Надлишок/дефіцит (п.2 – п.7)	62,2	68,1

Технологічний прогрес, глобалізація призвели до переміщення основних виробничих процесів у країни південно-східної Азії та центральної та північної Америки. Китай став світовим виробником та експортером взуття у світі, доля експорту якого складає до 63% від виробленого у країні (Табл. 1.2).

Таблиця 1.2. Обсяг володіння часткою ринку провідними країнами-виробниками

Регіон	Мільйонів пар	% від загальної кількості
Китай	2 768	22,2 %
Азія (без урахування Китаю)	2 706	21,7 %
Європа (усі країни)	2 544	20,4 %
Північна та Центральна Америка	2 381	19,1 %
Близький Схід, Африка, Океанія	1 172	9,4 %
Південна Америка	898	7,2 %
Усього	12 469	10

Пандемія COVID-19 спричинила у середині 2020 різке падіння виробництва та продажі взуття у світі. Але у наступному році 2021 відмічено вирівнювання показників до карантинного періоду (рис.1.1).

BUSINESS CONDITIONS INDICATORS,
2011 – 2021

INDICADORES DE CONJUNTURA, 2011 – 2021

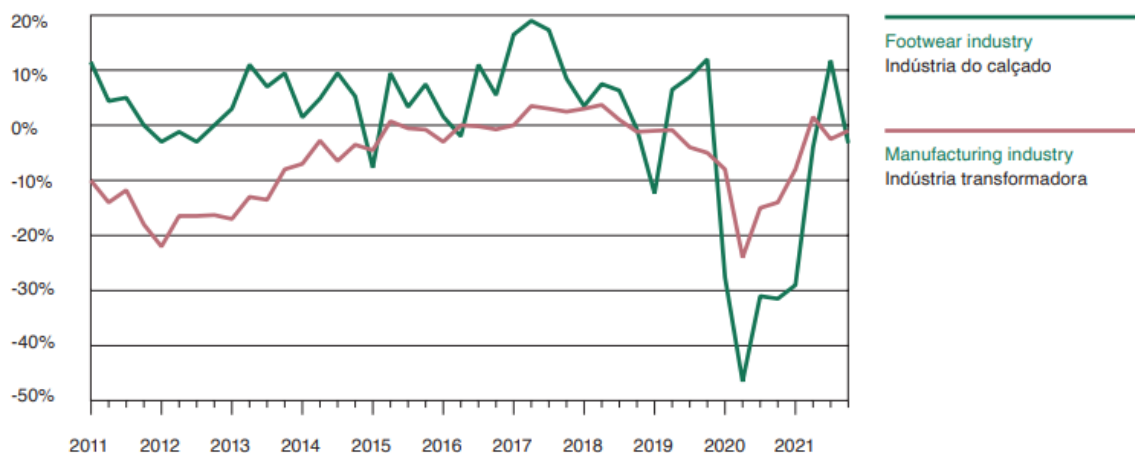


Рис.1.1. Ріст доходів взуттєвої індустрії та промислового виробництва у світі у період 2011-2021 роках [2]

Однак у період 2023 року за оцінками португальської асоціації Аріссарс світове виробництво взуття знов скоротилося на 1,5 млрд пар або на 6% порівняно з 2022 роком [3].

Сучасний світ також характеризується зростанням кількості населення на фоні урбанізації та постійних міграційних процесів. Урбанізація та міграція призводить до асиміляції великих груп населення на тих територіях на яких вони раніше не проживали. Це змінює популяцію населення у віковій, статевій та расовій складових [4]. Зміни у популяції призводять до змін купівельної спроможності та споживчого попиту населення на конкретній території.

Нажаль, війни є стимулом міграційних процесів у 21 сторіччі як і у попередні століття. Війни у Сирії та Україні спричинили дві великі хвилі зовнішньої міграції, перш за все у країни Євросоюзу за останні 10 років. На фоні військових дій значно зросла внутрішня міграція населення зі значною зміною гендерного та вікового складу населення на певних територіях. Але на цьому фоні не змінюється потреба у нормальних стандартах життя.

Міграційні коридори традиційно працюють у напрямку від менш економічно розвинених країн у сторону країн з більш стабільною економікою. За кілька століть змінилася складова міграційних потоків. Якщо раніше у США йшла міграція з Європи, то у останні роки превалюють мігранти з Латинської Америки та східної Азії. У Велику Британію йде потік мігрантів з бувших британських колоній – країн Індокитаю та Перської затоки [5]. Таким чином не тільки «новий світ», а і «старий» світ стають міжетнічними. На цьому фоні з'явився новий тренд – зростання міжетнічних шлюбів. Можна припустити, що велика кількість змішаних міжетнічних міжнаціональних шлюбів породжує покоління людей з іншими антропометричними даними.

Стопа людини як частина скелету схильна до змін упродовж життя. На морфологію стопи впливає багато факторів, таких як раса, спосіб життя, зріст, вік і стать [6,7,8].

Доведено існування відмінності в морфології стопи в різних частинах світу. При однаковій довжині стопи азійські стопи мають більшу ширину переднього відділу, нижчий поздовжній свід і більш пронатизовані стопи [9].

Вище перераховані фактори та ті що будуть зазначені далі, мають велике практичне значення на проектування форми взуттєвої колодки, а з нею і внутрішньої форми взуття.

Враховуючи факт зосередження виробництв у Китаї та Південно-Східній Азії можна припустити, що ці виробники будуть більше працювати над модними тенденціями та ціновою пропозицією, аніж адаптацією свого товару під антропометричні показники населення певних територій.

Українські виробники зараз знаходяться у трохи інших умовах. Гігантські обсяги виробництва та великі азіатські ринки їм поки не зовсім доступні. Тому вони мають можливість для адаптації своїх виробів до змін внутрішнього та зовнішніх ринків європейських сусідів.

Взуття можна розглядати як атрибут предметів першої необхідності нормального життя. З моменту винаходу людиною захисту своїх ніг за допомогою взуття, питання створення раціонального взуття так і перебуває у стадії невирішеності. Комфорт і функціональність - характеристики, які все частіше вимагаються споживачами. Але на сучасному етапі розвитку промислового дизайну з'являється потреба у відповідності виробляємих для людей товарів ще одному критерію - ергономічності.

Сучасна індустрія пропонує різні види взуття за складом верху - зі шкіри, синтетичних матеріалів та інших тканин та волокон. Оскільки всі люди різні за розміром, віком і смаком, дизайнери і виробники взуття повинні враховувати різні потреби і бажання покупців, пропонуючи нескінченний асортимент стилів - повсякденне взуття для чоловіків, жінок, дітей, офіційне взуття, спортивне взуття і так далі.

Але, якщо взуття неправильно сконструйоване або неправильно підібране – воно може стати джерелом захворювань стоп, нижніх кінцівок та хребта, не зважаючи на те, на якому континенті і для якого ринку воно вироблене.

Основні проблеми, такі як біль у передньому відділі стопи, набряки у гомілці та стопах, молотоподібні та кігтеподібні пальці, кісточки (hallus

valgus), врослі нігті, мозолі та потертості на шкірі певних ділянок стопи, грибок, вальгусна деформація, запалення ахіллового сухожилля, проблеми зі спиною, перекіс хребта, дискомфорт у колінах, розтягнення зв'язок, п'яткова шпора (плантарний фасцит) і т.д. - все це побічні ефекти взуття, що пропонується на ринку, розробленого відповідно до модних концепцій але неправильно підібраного [10, 11].

Доктор Вільям А. Россі, провідний мануальний терапевт і редактор журналу *Boot and Shoe Records*, заявив у жовтневому номері журналу Американської асоціації ортопедії за 1958 рік : «Відсутність наукових стандартів – це відсутня ланка в галузі здоров'я стоп і взуття. Лікарі , ортопеди, мануальні терапевти, взуттєві майстри, виробники взуття – всі мають індивідуальні підходи до здоров'я стоп, в результаті чого ніхто не знає що таке «нормальна стопа», «хороше взуття» або як оцінити стопу» [12].

Останніми роками дизайнери, виробники та споживачі почали виходити за рамки зовнішнього вигляду та естетичних вимог. На перший план виходять комфорт та функціональність при взаємодії між ногами людини та взуттям [13, 14].

Спроби зробити звичайне взуття більш комфортним та універсальним тривають довгі роки. Серед них – зменшення ваги взуття , заміна матеріалів верху та підошви на більш легкі, дихаючі, ячеїсто-пористі , вкладання устілок у взуття з самоформуємих пінних та різних волоконних матеріалів для більшого комфорту стопи та інше [15].

З цього можна зробити висновок, що стандартні способи проектування, виробництва та підбору взуття потребують нових рішень в усіх ланках.

«Стратегії дизайну повинні працювати для інтерфейсів "людина-взуття" з урахуванням інженерії людини з тієї причини, що взаємодія між продуктом і людиною є основним фактором для проектування хороших продуктів. Основним фактором є вивчення людської стопи, біомеханіки та людського тіла в русі. Спроба зрозуміти дизайн і конструкцію хорошого взуття була б складною без знання того, що знаходиться всередині або над ним. Отже,

всебічне знання анатомії людини є ключовим для інженерії людини. Отже, дизайн взуття вимагає зусиль кількох академічних галузей» - стверджує своїй дисертаційній роботі Özgü Özkan у 2005 році.

Дизайн взуття – це складний процес, який передбачає співпрацю різних професіоналів, дизайнерів, майстрів, техніків, науковців та лікарів-ортопедів . Дизайнери відіграють вирішальну роль у розробці взуття і, як наслідок у покращенні якості життя людини [16].

Тобто у сучасних умовах виникла потреба вивчення зміни антропометричних даних у кейсі функціональній взаємодії нижньої кінцівки (стопи), взуття та оточуючого середовища. У деяких роботах присвячених проектуванню взуття навіть з'явився термін – human ingineering – інженерія людини.

Але цей термін є основною складовою поняття – ергономіка.

Ергономіка, також відома як людський фактор або інженерія людського фактору (HFE), — це застосування психологічних і фізіологічних принципів до розробки та проектування продуктів, процесів і систем. Основними цілями розробки людського фактора є зменшення людських помилок, підвищення продуктивності та доступності системи, а також підвищення безпеки, здоров'я та комфорту з особливим акцентом на взаємодію між людиною та обладнанням [17].

Ергономіка - це сфера, що являє собою комбінацію численних дисциплін, таких як психологія, соціологія, інженерія, біомеханіка, промисловий дизайн, фізіологія, антропометрія, дизайн взаємодії, візуальний дизайн, досвід користувача та дизайн інтерфейсу користувача. Дослідження людського фактора використовує методи та підходи з цих та інших наукових дисциплін для вивчення людської поведінки та отримання даних, що стосуються раніше сформульованих цілей. При вивченні та обміні знаннями про проектування обладнання, пристроїв і процесів, які відповідають людському тілу та його когнітивним здібностям, два терміни, «людський фактор» і «ергономіка», по суті, є синонімами щодо їх посилення та значення в сучасній літературі [18, 19].

Ергономічність, функціональність та комфорт – мабуть так треба розподіляти пріоретети при дизайні взуття.

Пошуковий запит у Гугл дає таке визначення: ергономічне взуття призначене для сприяння здоровому та зручному руху стопи, одночасно забезпечуючи підтримку та стабільність для стоп, ніг і спини.

Також є і інші визначення: «Ергономічне взуття» відноситься до взуття, яке спеціально розроблено для забезпечення оптимальної підтримки, комфорту та функціональності, при цьому мінімізуючи ризик проблем зі стопами або дискомфорту [20].

Існує визначення ергономічного спортивного взуття. Це взуття спроектоване так, щоб підтримувати стопу в правильному положенні, знижувати навантаження на суглоби і м'язи, а також забезпечувати оптимальну амортизацію [21].

Тобто під ергономічністю можна розуміти ряд дизайнерських дій та рішень у конкретних продуктах (товарах) вироблених для користування людьми, конструкція яких максимально пристосована до потреб користувача (людини) з урахуванням їх фізико-біологічних особливостей.

Важливість дизайну взуття в ефективному лікуванні багатьох розладів стопи широко вважається аксіомою в ортопедичній літературі, проте на сьогоднішній день мало робіт зосереджено на визначенні «здорового» взуття з огляду на його компонентні характеристики та критерії підгонки.

Експерною групою «Критерії визнання здорового взуття» у королівстві Великої Британії було визначено одинадцять критеріїв із високою згодою між взуттєвою промисловістю та клінічними ортопедичними експертами.

Серед цих критеріїв:

- Взуття забезпечує нормальне функціонування стопи людини
- Адекватна ширина та глибина, досяжна для функціонування стопи користувача
- Підшва не заважає нормальній роботі стопи

- М'якість і еластичність верху та підкладки взуття
- Стійкий каблук відповідної висоти колодки приблизно 25 мм
- Клімат у взутті, який сприяє здоровому середовищу у взутті
- Взуття забезпечує розумну фіксацію вразливих ділянок стопи.
- Взуття зберігає свою придатність за призначенням протягом розумного періоду часу
- Взуття не повинно помітно ковзати по нозі
- Наявність консультацій і підтримки щодо продукту
- Зчеплення підошви відповідає стандартам SATRA

Такі важливі критерії, як стійкість підошви до надмірного скручування середнього відділу стопи та наявність змінної (анатомічної) устілки були відхилені груповим консенсусом та не стали частиною стандарту [22].

Поставити знак рівняння між поняттями здорове взуття та ергономічне взуття неможливо, хоча деякі їх критерії співпадають.

Під терміном «здорове взуття» розуміють різні види персоналізованого взуття (ортопедичне взуття, взуття для людей з відсутніми на даний момент розладами стопи при наявності діабету, взуття для людей які мають розлади стопи при діабеті, ревматоїдному та подагричному артриті, парезі кінцівок і т.д.), виготовленого для людей з розладами або деформаціями стоп та нижніх кінцівок. Основна мета такого взуття – покращення якості життя та захист стоп з метою профілактики та реабілітації при вже наявних розладах.

Ергономічне взуття також можна було б віднести до «здорового взуття», але воно не персоналізоване, більше орієнтовано на здорову популяцію різних вікових груп населення, та первинно проєктується щоб попередити дискомфорт та розвиток розладів у стопі та організмі у цілому під час виконання певних навантажень.

Нажаль в Україні на законодавчому та державотворчому рівні конкретні критерії ергономічного або здорового взуття поки не сформульовані.

У діючому стандарті «ДСТУ 2157-93 Взуття. Терміни та визначення» [23] навіть немає визначення ергономічного взуття.

За функціональним призначенням є кілька видів взуття, на які розроблені відповідні стандарти.

Діючі стандарти на виготовлення захисного, робочого та іншого взуття передбачають велику кількість технічних характеристик по розмірам, жорсткості або гнучкості деталей, способах кріплення та інше. Червоною ниткою через ряд документів проходить фраза «взуття повинно бути видане в експлуатацію за призначенням, розміром, та повнотою» [24]. Таким чином на законодавчому регуляторному державному рівні регулюється тільки призначення взуття, його впорність у відповідності з розміром та повнотою.

Тобто у нормативних документах відсутнє тлумачення терміну або поняття про комфортне розміщення стопи.

Визначенню терміну «комфорт» стосовно виробів, виготовлених для людей, присвячена певна кількість робіт на межі століть.

Комфорт охоплює багато різних характеристик і має різні визначення: наприклад, його визначали як відсутність дискомфорту [25].

Однак є і інша трактовка, що комфорт асоціюється з відчуттям розслаблення та благополуччя [26]. Автори цієї трактовки зазначають, що погана біомеханіка може перетворити комфорт на дискомфорт, навіть якщо хороша біомеханіка не є необхідною та достатньою умовою комфорту.

Якщо комфорт трактувати як відсутність дискомфорту, то виникає питання як останнє можна описати, які його характеристики, чим його можна виміряти.

Вікіпедія дає наступні трактовки дискомфорту Дискомфорт - відсутність комфорту, незручність, невигода, несприятливість; порушення або відсутність належних умов, потрібних для нормальної життєдіяльності організму, виконання певної роботи тощо. У медицині під дискомфортом розуміють незвичні та неприємні відчуття, пов'язані із діяльністю якого-небудь органу чи системи організму, які можуть свідчити про його дисфункцію [27].

Дисфункція (від лат. Dys - поганий, утруднений та Functio – дія, здійснення) - порушення діяльності.

Дискомфорт можна характеризувати такими відчуттями як біль, печія,

втома, незвичність руху, онеміння, відчуття сухісті або надлишкової вологості, холоду або високої температури та інше.

Дискомфорт це відчуття людини яке має суб'єктивний характер, але деякі параметри можуть бути виміряні об'єктивними методами.

Один з основоположників ергономіки у взутті професор Goonetilleke Ravinda (1998) аналізуючи різні теорії виникнення відчуття комфорту-дискомфорту зробив кілька практичних висновків. Один з них, що проектуючи ергономічні речі для людини, неможна розглядати взаємодію людських тканин з іншими матеріалами як взаємодію двох або більше неживих матеріалів : «бо людська тканина не поводить себе як «інший мертвий матеріал».

Прості фізичні формули та розрахунки у таких випадках можуть не діяти. Це пов'язано з фізіологією біологічних та біомеханічних процесів.

На сьогоднішній час актуальними стають дослідження, направлені на визначення особливості деформації тильного та бокових відділів стопи під час навантажень та різних рухів. Можливість нижніх кінцівок безперешкодно здійснювати повноцінні рухи при ходьбі у взутті – одна з головних вимог до комфортного взуття. Існує думка, що ідеально комфортним взуттям можна вважати таке, у якому біомеханічні показники нижніх кінцівок у русі будуть ідентичні показникам при русі без взуття [28, 29, 30]. Зробити оцінку тиску можливо розміщуючи тензометричні датчики у конструкції взуття у точках контакту з гребнем стопи (у точці виміру прямого підйому стопи) та на бокових поверхнях внутрішнього та зовнішнього пучків. Потік інформації оцінюють при різних рухах стопи за допомогою мікропроцесорних устроїв та комп'ютерних програм. Однак у цього методу є недолік у вигляді резистентності тканин (текстиля, шкіри), обумовлених їх текстурою та властивостями приформовуватися до форми стопи при русі [31].

На основі цих даних можна припустити, що колодки для виготовлення однієї і тієї ж моделі взуття з різних матеріалів повинні бути різними.

Біомеханічні дані мають важливе значення для ергономічного дослідження продукту або середовища, оскільки вони можуть допомогти виділити та

кількісно оцінити причини дискомфорту, який відчують користувачі системи [32].

Для визначення цього критерію запропонована велика кількість різних приборів та приладів.

Дизайн більшості цих пристроїв має вигляд бароподометричних (силових) платформ та бароподометричних устілок. Вони фіксують особливості ходи, взаємодії підошвеного відділу стопи з опорою, підошвеного відділу стопи з устілкою взуття, дозволяють відстежувати вектор розподілу навантаження на відділи стопи при різній інтенсивності руху, дозволяють оцінити вплив підошви взуття, шкарпеток, устілок, шнурівки та конструкції верху взуття на зменшення/збільшення тиску на частини стопи у русі [33-36].

Але знання підошвеного тиску це тільки частина знань про взаємодію «піраміди стопи» з внутрішньою поверхнею взуття. Щоб зробити взуття зручним, слід враховувати різні фактори.

Відомо, що на комфорт взуття впливають такі фактори, як розмір, форма, гнучкість, стиль, вага, клімат всередині взуття (температура, вологість), матеріали, протектор, амортизація [37].

Міжнародна Організація зі Стандартизації (ISO) оприлюднила звіт ISO/TR 7250-2:2010 "Основні антропометричні вимірювання для технічного проектування. Частина 2. Статистичні підсумки антропометричних вимірювань за окремим популяціям за ISO". У 2013 цей звіт був доповнений, а у 2024 році був переглянутим [38]. Основна мета створення цих звітів полягала у допомозі виробникам довести продукцію до цільового клієнта, враховуючи значні зміни форми та розмірів тіла людей різних країн.

Антропометричні дослідження нижніх кінцівок та стоп розпочались ще у доіндустріальну еру. Широке впровадження мікропроцесорних пристроїв керованих комп'ютерними програмами породило ряд прогресивних методик вивчення антропометричної та функціональної будови та функціонування стопи та нижньої кінцівки. Отримані параметри дозволяють всебічно оцінювати поведінку стопи та нижньої кінцівки при різних видах статичного,

фізичного та динамічного навантаження. Складові цих даних треба закладати у розрахунки розробки будови взуттєвих колодок та деталей взуття.

Досі основними критеріями при розробці взуття були його впорність та функціональне застосування [39]. Схильність покупців до впливу реклами та моди підштовхує до придбання та носіння взуття, яке не зовсім відповідає параметрам та формі стопи, чим провокується розвиток проблем та захворювання опорно-рухового апарату. Проектування сучасного взуття потребує урахування не тільки змінених антропометричних параметрів у популяції, а також законів змін розмірів стопи та нижні кінцівки при виконанні різних видів функціонального статичного та динамічного навантаження. Від стану та тону м'язів гомілки залежить антропометрія стопи та її деформація у продовж дня та життя. Особливо це помітно у дитячих та вікових групах населення.

Анатомічно стопа є частиною нижньої кінцівки і складається з твердих та м'яких тканин. Основу скелета стопи складає комплекс кісток, які формують анатомічно і функціонально три відділи стопи (рис.1.2).

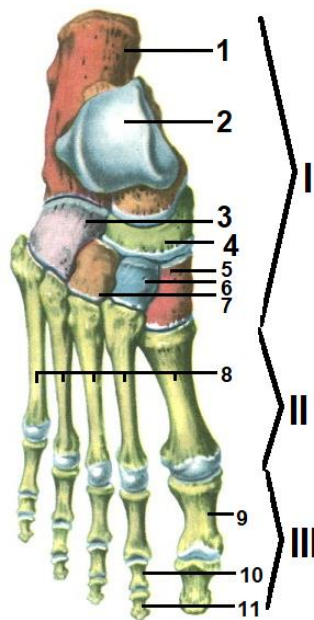


Рис.1.2. Стопа складається з трьох частин: передплюсни (I), плесна (II) і пальців(III)

Передплюсна, що складається із семи кісток, представляє задню частину стопи.

До складу входять: п'яткова кістка (1) - os calcaneus; таранна кістка (2) - os talus; кубовидна кістка (3) - os cuboideum, човноподібна кістка (4) - os naviculare pedis; три клиноподібні кістки (5,6,7) - ossa cuneiformia.

Плюсна складається з п'яти вигнутих трубчастих кісток - передплюсневих кісток (8) - ossa metatarsi.

Пальцева частина складається з фаланг (9,10,11) по 2 на великий палець і 3 на інші.

По зовнішньому виду переднього відділу стопи розділяють на єгипетську, грецьку, римську (пряма, полінезійська) (рис.1.3).

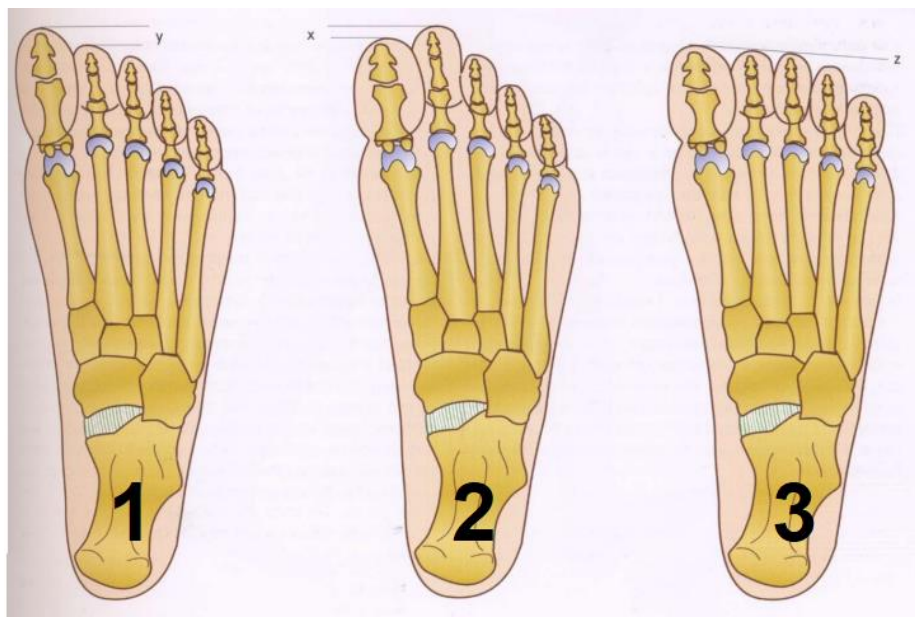


Рис. 1.3. Типи стопи 1. Єгипетська . 2. Грецька. 3. Римська

Кожна стопа має 26 кісток, які взаємодіють між собою 32 суглобами, та утримуються 112 зв'язками та 19 м'язами. Взаємодія усіх анатомічних складових стопи формують архітектурну конструкцію у вигляді арок або склепінь [40].

Передплюсна та плюснові кістки формують 2 арки – внутрішню та зовнішню поздовжні склепіння. Дистальні кінці плюсневих кісток формують

передню арку або поперечне склепіння. Три арки формують підшовне склепіння (рис. 1.4).

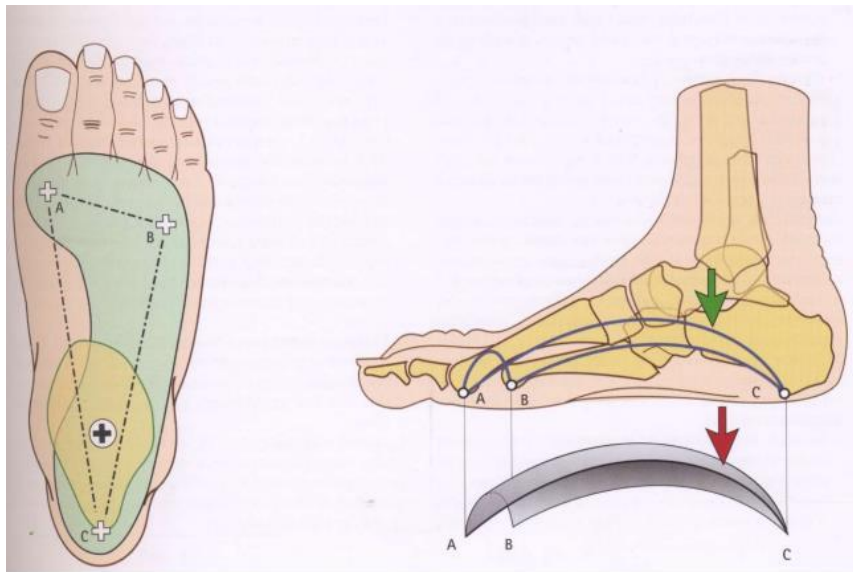


Рис. 1.4. Формування арок та підшовного склепіння.

Форма підшовного склепіння нагадує парус наповнений вітром, де його верх зміщений дозад (червона стрілка). Маса (зелена стрілка) впливає на нього (зелена стрілка) у точці (чорний хрестик) найбільшого підйому.

Отже, стопа – це дуже складний механізм, а правильне розуміння біомеханіки стопи є критичним для створення зручного, здорового і функціонального взуття, особливо для дітей та літніх людей.

Висновки до 1 розділу.

Неправильно сконструйоване або неправильно підібране взуття – це джерело захворювань стоп, нижніх кінцівок та хребта.

Останніми роками дизайнери, виробники та споживачі почали виходити за рамки зовнішнього вигляду та естетичних вподобань, а почали звертати увагу на комфорт, функціональність та ергономічність виробу.

Наразі актуальною потребою є вивчення зміни антропометричних даних у кейсі функціональній взаємодії нижньої кінцівки (стопи), взуття та оточуючого середовища. У деяких роботах присвячених проектуванню взуття навіть з'явився термін – human engineering – інженерія людини. Але цей термін є

основною складовою поняття – ергономіка.

Проте на сьогоднішній день мало робіт зосереджено на визначенні «здорового» взуття з огляду на його компонентні характеристики та критерії підгонки. Основна мета такого взуття – покращення якості життя та захист стоп з метою профілактики та реабілітації при вже наявних розладах. До поняття «здорового» взуття можна віднести ергономічне взуття, що орієнтовано на здорову популяцію різних вікових груп населення, та первинно проєктується щоб попередити дискомфорт та розвиток розладів у стопі та організмі у цілому під час виконання певних навантажень.

Нажаль в Україні на законодавчому та державотворчому рівні конкретні критерії ергономічного або здорового взуття поки не сформульовані.

Діючі стандарти на виготовлення захисного, робочого та іншого взуття передбачають велику кількість технічних характеристик по розмірам, жорсткості або гнучкості деталей, способах кріплення та інше. Регулюється тільки призначення взуття, його впорність у відповідності з розміром та повнотою, та не має акценту на комфортне розміщення стопи.

Тому актуальною задачею сьогодні є вдосконалення методів розробки та виготовлення ергономічного взуття в умовах масового виробництва для забезпечення оптимізації проєктно-виробничих процесів та можливості кастомізації форми взуття при мінімумі додаткових витрат.

Для реалізації зазначеної мети необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати ступінь відповідності взуття масового виробництва реальним вимогам споживачів,
- визначити шляхи вдосконалення взуття,
- дослідити параметри стоп цільових груп споживачів за допомогою прогресивних сучасних методів дослідження,
- розробити вдосконалену ергономічну форму взуття в умовах промислового виробництва.

Розділ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ ВЕКТОРІВ РОЗВИТКУ ВЗУТТЄВОЇ ІНДУСТРІЇ

Через відомий факт, що ми проводимо більшу частину свого життя у взутті, а біомеханіка нашого тіла пов'язана з правильно підібраним взуттям, конструкція та матеріали, які використовуються для їх виготовлення, повинні забезпечувати комфорт і підвищувати продуктивність користувача. Невідповідне взуття призводить до багатьох проблем, таких як підошовний фасциит [41] або інші травми. Дослідники припускають, що комфорту можна досягти шляхом застосування біологічного дизайну взуття або взуття анатомічної форми [42].

Розробка взуття, а також дизайн і виробництво модних виробів є в основному промисловістю, заснованою на робочій силі. Але сучасний прогрес і стійкі вимоги моди змушують нас впроваджувати інноваційні технології, такі як 3D дизайн, віртуальне прототипування та цифрові методи отримання вихідної інформації для проектування. Сучасні інструменти розробки віртуальних продуктів для модних товарів допомагають сьогодні надавати надійні виробничі рішення (43). Інтеграція систем CAD/CAM у взуттєву промисловість на різних етапах розробки продукту, як-от моделювання, симуляція, візуалізація тощо, пропонує цифрові інструменти, які покращують увесь процес щодо витрат, часу, скорочення відходів тощо. Крім того, підвищена увага до сталого розвитку сприймається як поштовх у адаптації цих нових технологій, які є стійким фактором у виробництві взуття [43]. Як наслідок, зросла обізнаність різних компаній у всьому світі про необхідність зосередитися на інтеграції стійких процесів і матеріалів у взуттєву промисловість. У цьому сценарії дизайн продукту стає вирішальним фактором для виробництва взуття з достатнім комфортом і екологічним виробництвом.

Сучасні підвищені вимоги до зручності та ергономічності продукції індустрії моди викликані тенденцією до підвищення якості життя споживачів. Тому багато робіт присвячено вивченню форми тіла людини та його частин для

створення раціональних, правильних форм виробів на основі антропометрії та біомеханіки [44].

Індивідуалізація – це підхід до адаптації товарів масового виробництва до потреб споживачів, що швидко розвивається. Індивідуалізація не тільки пов'язана з високими витратами на виробництво взуття, але й є важливим рішенням для всіх споживачів, які шукають продукцію на замовлення. Були проведені різні дослідження, щоб оцінити вплив персоналізованих частин взуття, таких як устілки, які корисні для полегшення болю, спричиненого проблемами зі стопами [44].

Індивідуалізація взуття в режимі масового виробництва дає переваги з точки зору посадки, комфорту та сприяє сталому виробництву. Ця методологія відповідає цілям сталого розвитку у взуттєвій промисловості, одночасно розширюючи асортимент взуття.

Сталий розвиток є трендом в усьому світі, і різні визначення мають спільне завдання поінформувати людей про свої дії, щоб не мати негативного впливу на майбутнє. Організація Об'єднаних Націй визначила різні цілі, які слід враховувати для забезпечення сталого розвитку. Серед них мета, пов'язана з промисловістю, інноваціями та інфраструктурою, відіграє ключову роль у сталому виробництві, включаючи взуттєвий сектор [45], на який припадає приблизно 1,4% глобального кліматичного впливу [46]. Обсяг ринку взуття зростає, і за прогнозами очікується зростання на рівні 1,9% середньорічного темпу зростання [47]. Завдяки збільшенню уваги до сталого розвитку, це сприймається як поштовх у адаптації нових технологій, які є факторами сталого розвитку у виробництві взуття. Спочатку їхня інтеграція була в основному зосереджена на 2D шаблонах і з часом розвивалася шляхом включення 3D технологій для процесу розробки продукту у взуттєвій промисловості. Моделювання, симуляція, візуалізація тощо пропонують цифрові інструменти, які покращують весь процес щодо витрат, часу, скорочення відходів тощо. Через природу сектора виробництва взуття, який все ще переважно залежить від енергії, інтеграція цифрових інструментів

полегшила цей процес. Стандарт Step-NC, який використовується як інструмент для взаємозв'язку всіх підсистем, необхідних у взуттєвій промисловості, може покращити процес виробництва взуття [48].

Зростає кількість відомих компаній, що займаються виробництвом взуття, які намагаються просувати подальшу інтеграцію екологічних процесів і матеріалів у взуттєву промисловість. У цьому сценарії дизайн продукту стає вирішальним фактором для виробництва взуття з достатнім комфортом і екологічним виробництвом. Розуміння поведінки споживачів та залучення їх до виробничого процесу призвело до нової парадигми як соціального виробництва для індивідуального виробництва у взуттєвій промисловості [49]. Це підтверджується використанням цифрових технологій, які стимулюють персоналізацію продукту [50], а приклад португальських взуттєвих компаній демонструє зацікавленість галузі в спільному проектуванні та персоналізації, де I4.0 є ключовим фактором [51]. Рішення споживачів про покупку відіграють важливу роль у стійкості, яка була в центрі дослідницької роботи. Висновки можуть відрізнятися від низьких інтересів до стійкості модного бренду [52] або оцінюватися як останні фактори [53] або не відображатися новими поколіннями з точки зору взуття [54]. Дослідження показали, що серед трьох стовпів сталого розвитку соціальна стійкість є найважливішою в ланцюжку поставок для взуттєвої компанії [55].

Рішення можна знайти, зосередившись на принципі дизайну та циркулярній економіці, щоб вийти зі зниженою вартістю відходів і негативним впливом на високому рівні [56]. Зміни у виробництві взуття пов'язані навіть з матеріалами, які використовуються, оскільки вони містять велику кількість пластмаси, гуми, шкіри, текстилю тощо, що у більшості випадків унеможлиблює процес переробки.

Щоб мати більш стійке виробництво взуття, Spahiu та інші [57] використовували карти підошовного тиску та схеми топологічної оптимізації, щоб розробити підошву з найкращим дизайном найменшого матеріалу відповідно до тиску стопи, зберігаючи біомеханічні характеристики та

естетику. Індивідуалізація – це додаткова цінність до сталого розвитку, і дані індустрії моди показують, що 75% споживачів вважають за краще купувати персоналізовані продукти.

2.1. Використання цифрових технологій сканування для підвищення ефективності взуттєвого виробництва.

Отримання антропометричної інформації про стопу та нижні кінцівки можливо з використанням традиційних методів зняття зліпків з застосуванням гіпсових бинтів, поліуретанової ортопедичної піни, альгінатних та силіконових мас. Ці методи мають свої позитивні моменти, а також недоліки.

Позитивні моменти зумовлені тим, що ці методи класичні та доступні, годяться для виготовлення індивідуального взуття, дозволяють використовувати отримані позитиви безпосередньо для виготовлення гіпсової колодки та моделі взуття, легкий морфінг та скульптинг окремих ділянок колодки та інше.

Негативних моментів виготовлення взуття по гіпсовій колодці дуже багато. Основними недоліками є :

- багатоетапність та трудомісткість: спочатку отримується негатив, який треба перевести у позитив з використанням традиційного гіпсу, або інших доступних матеріалів - гіпсу з наповнювачами, спеціальних двокомпонентних твердих спінених поліуретанів або литьових смол;
- складно віддзеркалювати симетрію певних ділянок полупар колодок;
- складно контролювати об'єми та перерізи при відносно легкому скульптингу;
- виготовлені методом лиття гіпсові колодки доволі важкі, та практично є одноразовими, бо схильні до поломок у процесі зняття взуття з колодки;
- отриману бібліотеку зразків моделей стоп та колодок складно зберігати, класифікувати, зрівнювати та оцінювати без послідуєчого використання цифрових методів обробки інформації.

Тому отримання інформації про стопи та нижні кінцівки у сучасних умовах нерозривно пов'язано з використанням комп'ютерних технологій, оптоелектронних приладів, діджитайзерів та іншого прогресивного обладнання.

Спеціалізовані 3д сканери для оцифрування стопи можна умовно розділити на три великі групи:

- 3д сканери для плантарної поверхні стопи
- 3д сканери для стопи до рівня щиколотки
- 3д сканери для стопи та гомілки

Перша група сканерів використовується для проектування та виготовлення коригуючих та профілактичних устілок. Друга та третя групи підходять для проектування взуттєвих колодок, адже висота робочої зони сканування (більше 10 см) дозволяє отримувати всю необхідну інформацію про формо-розміри стопи. Третя група сканерів сканує найбільшу площину поверхні ноги, але використовується рідше, в основному для більш складних медичних цілей (розробка коригуючих пристосувань для гомілки, протезів, ортезів тощо).

На сьогоднішній день в країнах з розвинутою економікою і високим рівнем наукового потенціалу 3д сканери використовуються досить широко для різних цілей:

- 1) Для масових досліджень:
 - Для проведення масових антропометричних обмірів різних груп населення з метою розробки розмірного асортименту, форм колодок, підошов та інше
 - Для аналізу відповідності форм колодок для виготовлення взуття за формо-розмірами стоп споживачів
 - Для діагностичних досліджень фізичного стану стоп різних груп населення
- 2) Для індивідуальних досліджень:

- Для оцінки фізичного стану стопи з метою призначення та розробки коригуючих пристосувань (устілок, ортезів тощо)
- Для порівняльного аналізу клінічного стану стопи в динаміці (протягом певного періоду через визначені інтервали часу)
- Для вимірювання антропометричних та морфологічних параметрів з метою проектування взуття, його елементів та індивідуальної колодки.

Серед сучасних моделей 3д сканерів для стопи найбільше розповсюдження отримали наступні:

1 група – сканери плантарної частини стопи для розробки ортопедичних устілок:

- ParoScan 3dm (від фірми Paromed, Німеччина)
- RS scan E100 (від фірми RS scan, Бельгія)
- iQube (від фірми Delcam (AutoDesk), Англія)
- Usol (від фірми ScanPod3d, Китай/Англія)

2 група – сканери стопи до щиколотки та вище для розробки колодок:

- ParoScan 3Dv (від фірми Paromed, Німеччина)
- RS scan E500 (від фірми RS scan, Бельгія)
- Podia (від фірми STT, Гонконг)
- inFoot 3d (від фірми Orthobaltic, Литва)
- Yeti (від фірми Vorum, Канада)
- Pedus (від фірми Vitronic, Німеччина)
- Upod S (від фірми ScanPod3d, Китай\Англія)
- Duna (від фірми Inescor, Іспанія)
- Right Shoes (від фірми NewLast, Італія)

Практично всі представлені сучасні прогресивні 3д сканери для отримання інформації про стопу відповідають аналогічним вимогам та мають подібні характеристики:

- Швидко знімають просторові координати точок поверхні (від 3 до 25 секунд в залежності від встановлених параметрів налаштування)

- Мають область сканування, визначену габаритами максимальних розмірів стопи згідно узагальненим даним антропометричних обмірів (в середньому Довжина 400мм, Ширина 200 мм, Висота залежить від моделі сканеру: для сканерів плантарної поверхні вона обмежена 50-60 мм, а для сканерів поверхні стопи до щиколотки досягає 150 - 250 мм)
- Забезпечують високу точність отримання антропометричної інформації (0.3-0.5 мм)
- Виконують автоматичні вимірювання основних параметрів стопи: включений набір стандартних вимірювань (довжина стопи, обхват стопи по діагоналі пучків, обхват стопи по прямому підйому, обхват стопи по косому підйому, ширина стопи та ін.).
- Програмне забезпечення сканерів генерує файл хмари точок сканованої поверхні, а також виконує тріангуляцію і створення 3D-сітки, які можуть бути експортовані в стандартні універсальні 3d формати (найчастіше .STL, .OBJ, .IGS)

Паралельно з розвитком професійних та напівпрофесійних 3D скануючих пристроїв в останнє десятиліття відмічено прогрес у розробці програм фотограмметрії (MeshRoom, PolyCam, 3DF Zephyr, Kiri Engine) по обробці зображень отриманих звичайними (цифрові камери смартфона, цифрові фотоапарати) та спеціалізованими цифровими устроями (рис.2.1, 2.2). Якість моделей та їх точність поки уступають якості моделей отриманих на спеціалізованій професійній контрактній та безконтактній апаратурі. Але процес отримання цифрової копії різних предметів чи частин тіла без великих фінансових вкладень значно полегшився та став доступнішим та зрозумілим. Завдяки цим розробкам маємо змогу швидко зафіксувати особливості вихідної форми для послідуєчого реверс-інжинірінга або 3D моделювання.

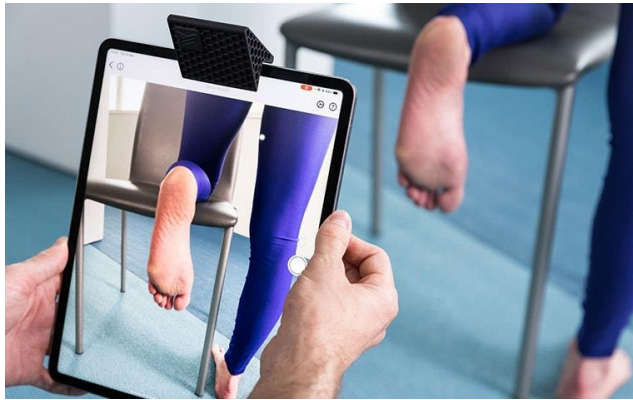


Рис. 2.1. Materialise SAM — 3D застосунок для сканування [58]



Рис. 2.2. Мобільна програма, що показує, наскільки добре взуття підійде за 3D-формою стопи користувача [59]

Використання 3D технологій для отримання цифрового зображення частин тіла людини має потенціал для вдосконалення процесу розробки та виготовлення широкого кола виробів [60]. По мірі того, як дослідницьке поле переходить на більш досконалі інформаційні стандарти та кращу точність, 3D-сканування швидко стало стандартом у фіксації геометрії стоп [61].

На відміну від розповсюджених ручних вимірювачів стопи (напр. рис. 2.3) (стопомірів, штангенциркулів, висотомірів тощо), які дають виключно 2D данні для складних об'єктів, методи 3D-сканування та фотограмметрії, розроблені за допомогою передових технологій та позбавлені таких недоліків, як залежність точності результатів від кваліфікації, досвіду та навичок дослідника [62, 63].



Рис. 2.3. 3D-сканування взуттєвої колодки за допомогою координатно-вимірального пристрою

Обидва методи для отримання та збору даних використовує оптичелектронні технології [64, 65]. Обидва методи формують тривимірний об'єкт за допомогою полігональної сітки у форматах stl чи obj, які легко відтворюються у сучасних CAD програмах.

Техніка 3D-сканування дозволяє отримати інформацію про поверхню тіла, об'єм, всі розміри та перерізи тіла, а також цифрові плантограми стопи. Переваги використання 3D-сканування ніг в тому, що це дозволяє сканувати велику кількість учасників доволі швидко, і вимірювання є надійним та ефективним [66]. Результати вимірювань зберігаються у вигляді файлів інформаційних даних, доступних для використання у будь-який час. Точність отримуваних даних вища за точність проведення ручних вимірювань. Недоліком є відносно висока початкова вартість встановлення стаціонарного спеціалізованого обладнання та переносних ручних професійних сканерів. Хоча цей недолік компенсується, як раніше було відмічено, можливістю використання також доволі доступними за ціною полупрофесійних ручних 3D сканерів та фотограмметричних пристроїв та програм.

Аналіз можливостей 3D-сканування для моделювання форми стопи показав, що 3D-сканування були дуже надійними та повторюваними [67]. Крім

того, були визначені обмеження та похибки в процесі лиття через значну роль участі людини в цьому процесі. Також 3D-сканування є кращою довгостроковою інвестицією завдяки його мінімальній експлуатаційній вартості, оскільки це прискорює процес обміру і не вимагає витратного матеріалу на відміну від методів лиття.

Перевага 3D-сканування за допомоги професійних 3D сканерів (рис.2.4) та фотограмметрії має широкомасштабні перспективи використання, такі як забезпечення масових антропометричних вимірювань та дослідження морфології стоп та нижніх кінцівок.

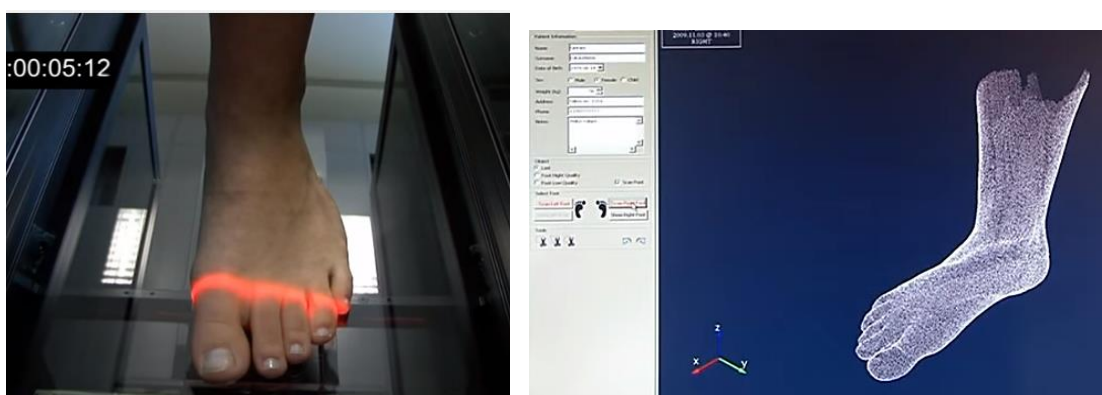


Рис. 2.4. 3д сканування стопи з використанням сканера

Обхват та його площинна геометрія - один з найважливіших параметрів при конструюванні верху взуття, і його вимірювання повинно здійснюватися кваліфікованим спеціалістом. З появою доступних пристроїв для сканування було проведено роботу над створенням алгоритмів, які автоматично вимірюють обхват пучків, гомілкостопа, короткий та довгий косий підйом до точності 0,175 дюйма (4 мм) [68]. Це знову зменшує помилку людських факторів та несертифікованих традиційних вимірювальних виробів (стопомір, гнучка стрічка) і забезпечує більш надійне вимірювання стопи. Нарешті, аналіз великої вибірки 3D-сканування ніг може бути використаний для отримання загальної класифікації форм стоп населення. Можуть бути проведені дослідження, які співвідносять параметри ступні щодо регіону, віку, статі, спортивної діяльності та професійної роботи, як показано Гріммером [69]. Цей

масштабний статистичний огляд може допомогти великим виробникам взуття краще підлаштувати свою продукцію та мінімізувати відходи.

3D-скануючі пристрої є приборами оцифрування, що створюють точкову хмару об'єкту. Хмара точок - це список точок у просторі з координатами X, Y, Z. Всі точки будуть розташовані на поверхні відсканованої моделі. Ці хмари точок можна зшити разом із картографуванням поверхні в програмному забезпеченні CAD для створення поверхневої моделі. Отримана модель, зокрема нижньої кінцівки та стопи, є вихідною базою для створення моделей колодки коригуючого взуття та ортопедичних пристосувань на замовлення, що базуються на індивідуальних потребах замовника.

Бази даних, що отримані за допомогою 3D-сканування, можуть запропонувати набагато більш детальну інформацію по контурах тіла і потенційно забезпечують розуміння змін в антропометричних вимірюваннях, пов'язані з динамічним рухом. Такі ініціативи, як дослідження CAESAR (цивільний Американський та європейський Ресурс поверхневої антропометрії) [70] здійснено з метою збору цього типу інформації. 3D сканування поверхні грає важливу роль у розвитку виробів на замовлення, тобто виробів, які розроблені для людини з використанням їх точних антропометричних вимірювань [68]. Цифровий опис стопи важливий для цілей, що стосуються ергономічного дизайну взуття, ортопедичних пристосувань та устілок, а також для клінічних досліджень деформацій стопи. На додачу до того, оскільки стопа - це гнучка і складна структура, 3d сканування дає розуміння того, як змінюється її форма у різних ситуаціях, наприклад в різних фазах навантаження, циклах ходи, що може призвести до поліпшення загального стану комфорту та функціональності розроблюваного взуття та ортопедичних елементів.

Міжнародний стандарт ISO 20685, розроблений з метою забезпечення проведення вимірювань за допомогою систем 3D-сканування, обмежений параметрами вимірювання довжини і ширини стопи і вимагає, що максимальна середня різниця між традиційним і отриманим значенням 3D-сканування не

перевищувала 2 мм. Після виправлення систематичних помилок, Witana та інші [71] змогли показати, що не було суттєвих відмінностей між автоматично створеними вимірюваннями на 3д сканері та вимірюваннями, зробленими вручну. Висновки з цієї роботи припускають, що вимірювання стопи на 3д сканері є чутливими до використовуваного процесу вирівнювання положення стопи в процесі сканування, та автори рекомендували, що вимірювання повинні базуватися на анатомічних орієнтирах, які не залежать від процесу реєстрації цифрової копії.

Mall та ін. [72] порівняли зібрані розміри стопи з використанням оптичних прийомів та вимірювальних пристроїв і повідомили, що використання оптичних методів було настільки ж надійним як вимірювання штангенциркуля, а час вимірювання було зменшено. Чжао та ін. [68] запропонували новий підхід до отримання 6 обхватів стопи для підбору та персоніфікації взуття, їх результати показали, що різниця в порівнянні з ручними вимірюваннями менше 5 мм.

De Mits та ін. [73] провели вивчення оцінки придатності вимірювань 3D-сканування за допомогою порівнянь їх результатів з рентгенівськими та мануальними вимірюваннями. Вони вказали що метод 3D-сканування показав хороший результат при скануванні здорових учасників. Для аномальних стоп метод 3D-сканування також продемонстрував хорошу достовірність та надійність порівняно з клінічними вимірюваннями [74]. Нолднер та Едгар [75] порівнювали 3D, 2D та ручні вимірювання при описі морфології та повідомили, що метод 3D-сканування був надійним.

Дослідження за допомогою 3D-сканування для отримання інформації для проектування внутрішньої форми взуття проводилися багатьма вченими: в роботі [76] автори використовували отримані дані для категоризації стопи на різні типи форми. У аналогічному дослідженні брали участь у скануванні стоп близько 3 тис. дітей, і автори змогли класифікувати результати на три типи стоп [77]. Луо та ін [78] використовували 3D-сканування щоб оцінити відмінності у чоловічих та жіночих стопах та виявлено, що чоловіки мають довші і ширші

ноги, ніж жінки, що відповідає результатам попередніх досліджень, проведених вручну.

3D-сканери та дигітайзери використовуються в вимірюванні змін, які стаються в формі стопи між невагомим станом і навантаженим. В останні роки 3D-сканери були використані для цієї мети або шляхом прямого сканування стопи під час навантаження [79, 80], або шляхом сканування гіпсових копій, які були взяті під час навантаження. Цей підхід до проведення антропометричних вимірювань може потенційно зменшити помилки внаслідок зміщення шкіри та викривлення тканин, які можуть виникнути при використанні штангенциркуля або інших контактних вимірювальних інструментів. Загалом, комбіновані результати досліджень із використанням 3D-сканеру вигідно порівняні з попередньою літературою та підкріплені результатами досліджень з використанням інших вимірювальних методів, що дозволяють припустити, що збільшення довжини та ширини між ненавантаженими та напівнавантаженими більше, ніж між напівнавантаженими та навантаженими стопами [81].

Кількість варіацій в результатах між дослідженнями висловлює припущення, що методика, протокол сканування стопи та спосіб отримання даних має сильний вплив на результати і що це повинно бути стандартизовано, де це можливо.

Найбільш ефективним є використання 3д сканування стопи для подальшого виготовлення взуттєвої колодки, що вимагає проведення широкого спектру вимірювань від оцифрування стопи до використання сучасних методів виготовлення, таких як швидке прототипування колодки безпосередньо із комп'ютерної моделі [82, 83]. Рання спроба була зроблена Бао та ін. [84] для розробки інтегрованої системи виробництва персоналізованих колодок для ортопедичного взуття. Підхід ґрунтувався на 3D скануванні стопи з подальшим виготовленням колодки з використанням САМ, і цей основний підхід досі залишається основним для персоналізації (кастомізації) колодки та взуття.

Модель, отримана за допомогою 3D сканування, після виконання триангуляції буде сітчастою поверхнею, створеною з набору трикутників, що з'єднують кожні три сусідні точки точкової хмари в тривимірному (3D) просторі. Використовуючи міжплатформенну файлову систему зберігання, таку як стереолітографія (.stl), будь-яке програмне забезпечення для автоматизованого виготовлення (САМ) може бути використане для створення шляхів інструментів та автоматичної обробки колодки.

Традиційно ортопедичні вироби виготовляють за допомогою гіпсового відливу форми стопи пацієнта (негативний зліпок), виготовляючи позитивний гіпсовий відлив стопи шляхом заповнення негативу сумішшю, а потім ліплення (скульптингу) ортеза навколо позитиву лиття для отримання високоякісної форми [85, 86]. Позитивний зліпок можна коригувати, видаливши або додавши до неї.

Сучасні системи сканування дозволяють отримати «позитивну» форму стопи безпосередньо шляхом сканування, обходячи потребу гіпсування. А ряд програмних пакетів (наприклад, Orthomodel від PLC Delcam, Великобританія; та Automated Orthotic Manufacturing System (Автоматизована Ортопедична система виготовлення), Sharp Shape, Каліфорнія, США мають можливість проектування ортопедичних виробів для ніг безпосередньо на основі 3D-зображень стопи, отриманої поверхневим скануванням.

Взуттєва колодка – це складна форма, конструкція якої базується на принципі зворотного проектування, найчастіше за допомогою спеціальних комп'ютерних програм у режимі порівняння форми взуття з формою стопи. Тому 3D-сканування сьогодні є незамінним, прогресивним та ефективним способом отримання інформації про форму та розміри стопи для проектування взуттєвої колодки [87].

Найефективнішим методом є використання 3D-сканування стопи для подальшого моделювання взуття, що передбачає впровадження широкого спектру прогресивних технологій від цифровізації стопи до використання

сучасних методів виготовлення, таких як швидке прототипування колодки безпосередньо з комп'ютерної моделі [88].

Для порівняння точності антропометричних досліджень за допомогою різних методів було виміряно шість основних лінійних розмірів стопи за допомогою чотирьох методів вимірювання (цикуль, 3D сканер стопи, цифровий відбиток стопи та традиційна плантограма) [89]. Анатомічні орієнтири визначали за допомогою маркерів, наклеєних на поверхню стопи. Метод 3D-сканування показав більш точні результати, ніж інші три методи в чотирьох із шести вимірів. Результати цього дослідження показали, що вимірювання стопи, зроблені за допомогою 3D-сканера, були більш точними, ніж вимірювання стопи, зроблені трьома іншими методами. Це пояснюється тим, що 3D-сканер легше виявляє найбільш опуклі точки внутрішнього і зовнішнього балок, ніж ручні методи. Іншою причиною може бути те, що дослідник може стиснути м'яку тканину, що оточує орієнтир, під час вимірювання. Таким чином, точність і адекватність результатів ручних вимірювань сильно залежить від кваліфікації дослідника. Метод 3D сканування стопи продемонстрував більш високу точність збору антропометричної інформації. Переваги використання системи 3D-сканування для визначення розміру стопи включають економію часу на вимірювання та більшу ефективність вимірювання великої кількості зразків.

Традиційно для виготовлення ортезів використовують гіпсовий зліпок стопи пацієнта (негативний зліпок), виготовлення позитивного гіпсового зліпка стопи шляхом заповнення негативу гіпсовим розчином і подальшого формування ортеза навколо позитивного зліпка для отримання високоякісної форми [90]. Позитивний зліпок можна скорегувати, видаливши або додавши гіпс. Сучасні скануючі системи дозволяють отримати «позитивну» форму стопи безпосередньо за допомогою сканування, де вже не потрібна стадія лиття. А низка програмних пакетів (наприклад, Orthomodel, Automated Orthotic Manufacturing System, Sharp Shape та ін.) мають можливість проектувати ортопедичні вироби для стоп безпосередньо на основі 3D-копії стопи,

отриманої шляхом поверхневого 3D сканування. За допомогою зв'язку з комп'ютерним керуванням верстатів з ЧПК цей підхід зменшує кількість етапів у виробничому процесі та допомагає уникнути багатьох людських помилок.

Сучасна взуттєва промисловість має тенденцію до підвищення комфорту виробленої продукції. Але, на жаль, переважна більшість представленого на ринку взуття має необґрунтовану з наукової точки зору форму та параметри. Особливо гостро ця проблема стоїть перед окремими категоріями споживачів: людьми з патологіями стопи, людьми похилого віку, хворими на цукровий діабет тощо. Існують дослідження, які свідчать, що стопи людей похилого віку ширші в ділянці передньої частини стопи та мають більш плоский медіальний поздовжній звід, ніж у молоді [91]. У публікаціях [92] зазначено, що ширина взуття є особливою проблемою для літніх людей.

Переважна сьогодні тенденція стійкої моди передбачає впровадження зручних форм взуття, внутрішня форма якого повторює природну форму стопи. Таке ергономічне взуття повинно випускатися в декількох розмірах (не менше трьох ширин для кожного розміру), щоб задовольнити потреби різних груп споживачів.

Ортопедичне, профілактичне та комфортне взуття має бути оснащено спеціальними вкладишами - ортопедичною (або анатомічною) устілкою, яка коригує положення стопи, перерозподіляє навантаження та полегшує людині ходу. Для виготовлення таких устілок за інноваційними технологіями поверхню підшви стопи сканують за допомогою 3D сканера. Потім геометричні форми 3D-моделей стопи використовуються для проектування поверхні ортопедичної устілки та інтегруються з САМ (автоматизоване виробництво) [93]. Загалом, вставні ортопедичні та профілактичні устілки дозволяють значно підвищити зручність взуття та створити більш ергономічну форму.

2.2. Виклики просторового моделювання форми взуття

Для моделювання складної просторової форми взуття та взуттєвої колодки використовують спеціалізовані 3d-моделювальники з широким діапазоном функцій реалістичного відображення просторової форми взуття та його елементів. Такі програмні продукти містять весь необхідний функціонал для розробки деталей верху та низу, оздоблення та декорування моделі, дає можливість підбору матеріалів верху, форми низу, фурнітури та різних видів оздоблення.

За останні десятиліття створений цілий ряд САПР взуття. Так, наприклад, можна виділити наступні взуттєві CAD системи, що добре зарекомендували себе:

- ShoeMaster фірми Torielli (Італія);
- Crispin фірми Delcam (тепер Autodesk, США);
- “NAXOS” італійської фірми “TESEO (Італія)”;
- ROMANS 3d/2d фірми Lectra (Франція)
- Icad 3d, 2d (Іспанія)
- MaindCAD (Португалія)

Всі наведені системи мають як модулі для тривимірного просторового проектування на колодці, так і модулі для розробки лекал моделі в плоскому вигляді.

Прогресивні взуттєві САПР нового покоління призначені для моделювання взуття та його елементів в тривимірному середовищі з можливістю послідовного переходу до 2д проектування лекал. Кожен елемент форми взуття, розроблений в САПР, має далі бути виготовлений на відповідному цифровому обладнанні.

Для взаємообміну інформацією між різними програмними модулями та обладнанням слід використовувати універсальні формати файлів 3d-графіки, які підтримуються різними системами. Серед таких форматів: STL, OBJ, IGES.

Загальна структура процесу проектування та виготовлення взуття із залученням САПР виглядатиме наступним чином (рис.2.5):

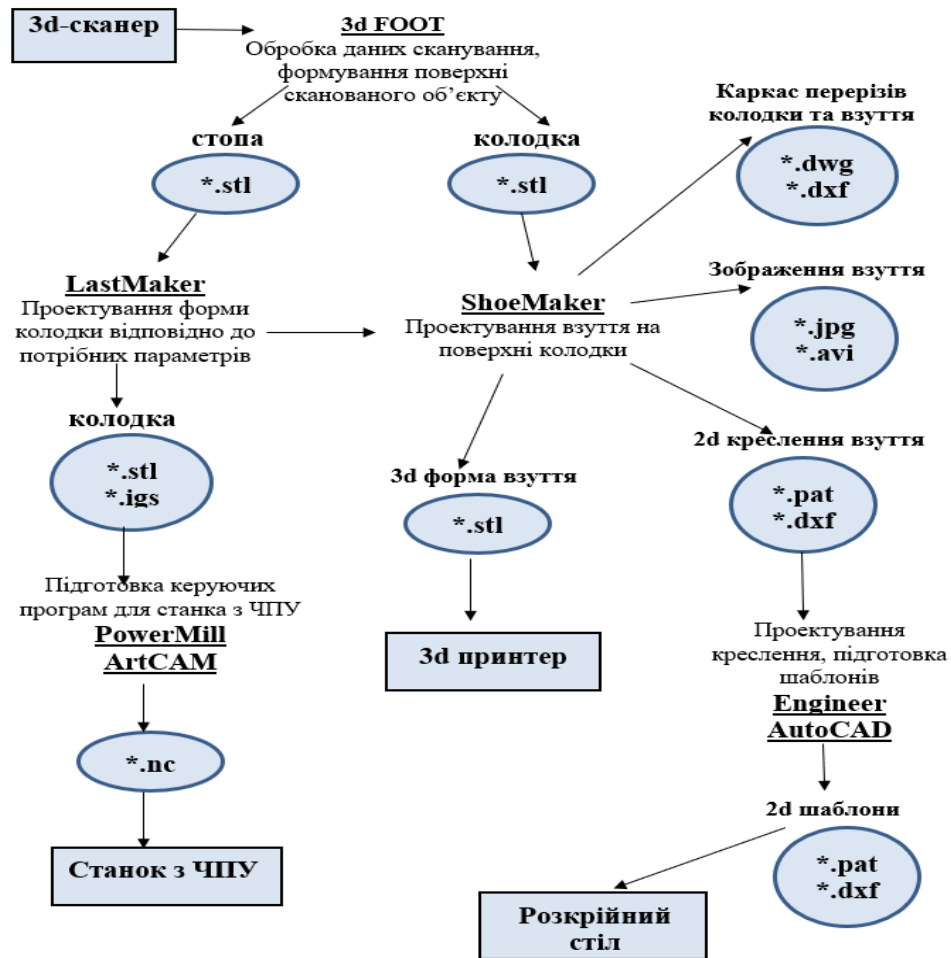


Рис. 2.5. Структура процесу проектування та виготовлення взуття із залученням САПР

В останні роки з'явилося багато САПР та плагинів орієнтованих на моделювання взуттєвої колодки та устілок, які добре інтегруються та взаємодіють з інструментами програмного середовища Rhinoceros 3D (корпорації McNeel, США) – Lutracad (Нідерланди), LastELF (Китай), 3D Shoemaker (Канада).

Окрім того, Rhinoceros 3D 7 та 8 версії мають вбудовані інструменти моделювання SubD та Grasshopper.

SubD-інструменти дозволяють об'єднати зручність полігонального mesh – моделювання з плавністю форм NURBS- моделювання. Окрім того

SubD дозволяють конвертувати mesh в NURBS, що іншими способами зробити важко.

Grasshopper – це візуальний редактор програмування алгоритмів моделювання, який дає нам змогу точного використання параметричного контролю над створюємою моделлю. Завдяки закладеним алгоритмам використання інструментів Rhinoceros та шляхом завдання певних параметрів можна автоматично генерувати та змінювати моделі, не створюючи їх вручну.

У спеціалізованих продуктах Lutracad та 3D Shoemaker відслідковуються алгоритми автоматичного параметричного моделювання Grasshopper.

Продукти Lutracad орієнтовані роботу з полігональною сіткою, дозволяють моделювати ортопедичні устілки, звичайні та ортопедичні колодки, міжпідшви.

3D Shoemaker повністю параметричне програмне забезпечення моделювання колодок та устілок з застосування інструментів NURBS-моделювання.

Більшість продуктів має додатки у вигляді САМ програм, які дозволяють генерувати варіанти 3D, 4D та навіть 5D обробок.

За допомогою зв'язку з комп'ютерним керуванням машин з ЧПК, такий підхід зменшує кількість етапів виробничого процесу, а також видалення багатьох джерел людських помилок.

Сьогодні в світовій взуттєвій індустрії паралельно існують такі альтернативні підходи до проектно-виробничих процесів:

- Ремісничий, заснований на високій кваліфікації представників виробництв;
- Іноваційний, заснований на активному впровадженні цифрових технологій на різних етапах процесу, аж до повної автоматизації.
- Змішаний формат, який використовує переваги обох підходів, ефективно пов'язуючи їх.

Для українського взуттєвого виробництва, так само, як і для багатьох європейських виробництв, зокрема, італійського, третій змішаний формат підходить найбільше з урахуванням наявної традиційної школи взуттєвого виробництва, числених ремісників та виробників різного масштабу. Однак сучасні реалії невпинно змінюються під тиском науково-технічного прогресу і вимагають впровадження цифрових технологій в усіх галузях виробництва.

Стаття [94] має на меті описати сценарій сучасного взуттєвого сектора, що дає перспективу методологічних підходів до проектування продукції в контексті так званих галузевих стандартів 4.0. Для цього в тексті пропонується опис проведених практичних експериментів зосереджуючись на CAD-CAM дизайні і методах виробництва з ЧПУ. Цифровий дизайн і процеси виробництва (від 3D сканування стопи до персоналізованого взуття, від концепції стилю до віртуального параметричного прототипу взуття) включають, з одного боку, передові методи виробництва, які підтримуються новими технологіями, з іншого боку, оновлення традиційного ручного виробництва та індивідуального виробництва. Традиції та інновації спрямовані на імплементацію нових культурних підходів до традиційних стандартів і нових ключів до конкурентоспроможності взуттєвої промисловості.

3D-моделювання є невід’ємною частиною сучасного процесу дизайну взуття. Це дозволяє дизайнерам і розробникам створювати та візуалізувати свої проекти у віртуальному середовищі, забезпечуючи більшу точність, ефективність та інновації.

3D-моделювання — це потужний інструмент для дизайнерів взуття, який пропонує підвищену швидкість, точність і можливості візуалізації. Використовуючи цю технологію, дизайнери можуть створювати кращі продукти, швидше та з більшою ефективністю.

Основні переваги 3д-моделювання:

1. Більша точність і ефективність: програмне забезпечення для 3D-моделювання дозволяє дизайнерам і розробникам створювати з високою

точністю цифрову форму колодки як основи для подальшого моделювання форми взуття. Це зменшує потребу в фізичному прототипуванні, яке може бути трудомістким і дорогим.

2. Розширена співпраця: за допомогою 3D-моделювання дизайнери та розробники можуть ділитися своїми проектами з членами команди та зацікавленими сторонами у віртуальному середовищі. Це спрощує співпрацю дизайнерів і отримання зворотного зв'язку, навіть якщо члени команди та заводські партнери знаходяться в різних частинах світу.

3. Інновації та креативність: програмне забезпечення для 3D-моделювання, дозволяє дизайнерам досліджувати нові дизайни та розширювати межі традиційного дизайну взуття. Маючи можливість створювати складні форми та текстури, дизайнери можуть експериментувати з новими матеріалами та конструкціями, що призводить до створення інноваційного та унікального дизайну взуття.

4. Покращена візуалізація та комунікація: 3D-моделі можна легко ділитися та переглядати під різними кутами, що полегшує візуалізацію та розуміння дизайну дизайнерами, розробниками, інженерами, партнерами взуттєвих фабрик та іншими зацікавленими сторонами.

3D-моделювання має широкий спектр застосувань у дизайні та розробці взуття, зокрема:

1. Розробка концепції: 3D-моделювання можна використовувати для швидкого створення та вдосконалення нових концепцій дизайну, дозволяючи дизайнерам вивчати різні ідеї та варіації, перш ніж приступити до остаточного дизайну.

2. Технічні пакети: 3D-моделі можуть бути ефективною частиною технічного пакету. Розробники взуття діляться технічним пакетом зі своїми партнерами взуттєвих фабрик, щоб надати інструкції щодо розробки та виробництва моделі. 3D-моделі мають набагато вищий рівень інформативності, якщо вони включають 360-градусні 3D-моделі автоматизованого проектування (CAD), шаблон оболонки, шарування

інструментів, вимірювання та верхні шари. Зокрема, відображення CAD у всіх 5 типових видах (боковий, середній, вид зверху, вид підошви та вид п'яти) стає застарілим, якщо його можна замінити однією 3D-моделлю.

3. Прототипування: 3D-моделі можна використовувати для створення фізичних прототипів за допомогою 3D-друку або інших методів швидкого прототипування. Це може допомогти дизайнерам і розробникам перевірити й удосконалити свої проекти перед тим, як розпочати масове виробництво.

4. Виробництво: 3D-моделі можна використовувати для створення готових до виробництва конструкцій та інструментів, які можуть допомогти забезпечити послідовність і якість кінцевого продукту.

Форма колодки моделюється згідно з необхідними вимогами на основі базової вихідної форми колодки за допомогою різних функцій 3D-проекування спеціалізованого програмного забезпечення. Програмне забезпечення для 3D-моделювання дозволяє дизайнерам створювати віртуальний образ колодки, а також створює базову інформацію для обміну з 3D-друком та іншими процесами виробництва.

Процес моделювання відбувається за участю різних функцій та режимів. Найбільш розповсюджені такі підходи до 3D моделювання:

1) полігональна сітка, (сітка 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 і переваг 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.

Коли ми скануємо вихідну 3д модель, ми отримуємо файл сітки (рис.2.6). Цей файл сітки може містити тисячі або мільйони полігонів, щоб мати найкращу роздільну здатність і точність.

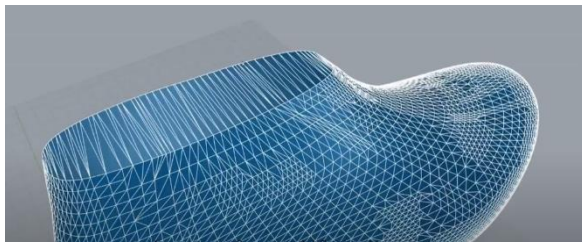


Рис. 2.6. Полігональна сітка

2) NURBS поверхні (набір поздовжніх та горизонтальних кривих)

NURBS (нерівномірний раціональний базисний сплайн) — це математичне представлення тривимірної геометрії, яке широко використовується в програмах автоматизованого проектування (САПР). Поверхні NURBS визначаються контрольними точками та кривими, які використовуються для визначення форми поверхні (рис.2.7). 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.

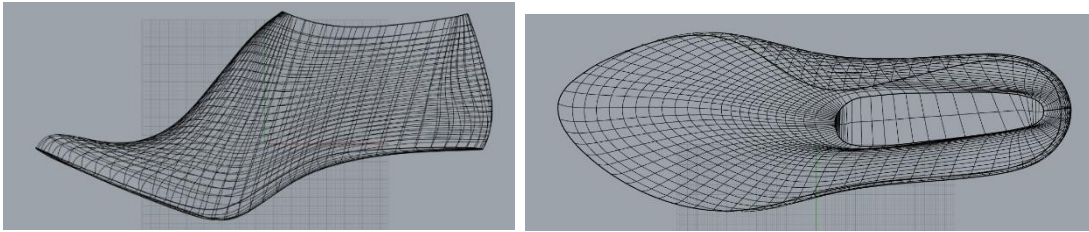


Рис. 2.7. NURBS поверхні

Однак, при проектуванні колодки за допомогою NURBS є ряд недоліків: окремі поверхні, що обмежують форму колодки, важко з'єднуються у єдину поверхню або тверде тіло, якщо вони були піддані обробці певними інструментами проектування (наприклад, обрізка) або поверхні були зроблені різними способами та описані кривими з різною кількістю контрольних точок. Враховуючи той факт, що кількість точок на кривій може бути необмежана, з'єднані перебудовані поверхні будуть мати велику щільність по u та v , що значно утруднює наступний контроль форми, а також збільшує розмір файлів

3) SubD

це тип багатокутної сітки, який використовується для створення плавних, органічних форм із використанням 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 (рис.2.8). 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 спортивному взутті.
- Ефективний робочий процес: геометрії SubD можна легко редагувати та змінювати, що забезпечує ефективний робочий процес і швидші ітерації проектування.

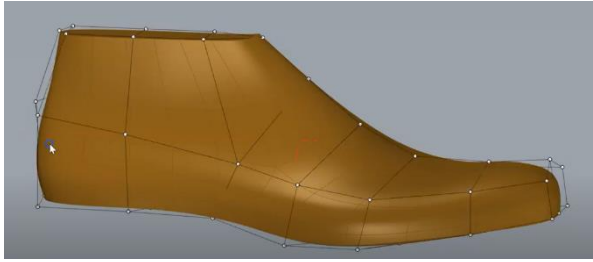


Рис. 2.8. SubD

Інструменти органічного або концептуального моделювання (Т-сплайн та SubD) дозволяють легко створювати органічні криволінійні форми, але мають обмежений контроль за габаритами до чітко закладених параметрів форми. SubD моделювання у середовищі САПР Rhino 3D 7 версії можна розглядати як концептуальне моделювання перед остаточним створенням робочих моделей колодок у полігональній чи NURBS формі.

1) 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 (рис.2.9). 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.

Параметричне моделювання дуже ефективне тоді, коли необхідно розробляти багато різних форм, що мають єдині особливості формоутворення.

модель, що найкраще підходить, на основі результатів 3D-сканування стопи клієнта для виготовлення індивідуального взуття.

Робота [96] присвячена розробці системи автоматизованого проектування для проектування персоналізованої форми колодки на основі вибраного стилю взуття та особливостей стопи клієнта. Система CAD спочатку автоматично виділяє та вимірює 18 важливих характеристик стопи на основі сканованої лазером стопи клієнта. Потім застосовує глобальне оцінювання форми з метою локальної деформації, що може деформувати вихідну форму у відповідності до стопи замовника на основі вилучених особливостей стопи

Дуже перспективними є роботи, присвячені розробці науково обгрунтованих підходів до моделювання складної форми взуття за допомогою спеціалізованих графічних систем.

Дослідження [97] об'єднує техніку 3д сканування стопи з новою методологією модифікації еталонної колодки, і спрямоване на розробку алгоритму перепроєктування моделі колодки у відповідності до форморозмірів стопи. Це дослідження наголошує на необхідності об'єднання різних методів моделювання та техніки сканування у новий загальний стандартизований та науково обгрунтований підхід.

Інша складність пов'язана із особливостями просторової форми колодки та її формоутворення засобами комп'ютерного моделювання.

Нова форма взуттєвої колодки зазвичай моделюється на основі зворотного інжинірингу на основі базової форми відсканованої колодки. Модель сканованої колодки представлена у вигляді хмари точок поверхні, які після здійснення процесу триангуляції перетворюються у сітку трикутників з вершинами в цих точках. Однак для більш правильної подальшої модифікації вихідної форми її необхідно описати математичними методами або геометричними поверхнями, що дозволяють проводити маніпуляції з модифікації вихідної форми. В спеціалізованих програмах з моделювання колодок закладено математичні алгоритми, які дозволяють в автоматизованому

режимі розділити STL сітку вихідної моделі на окремі поверхні (рис.2.10). Цей процес реконструкції поверхні на основі хмари точок або сітки трикутників відбувається згідно складних алгоритмів, закладених в основу програми моделювання [98].

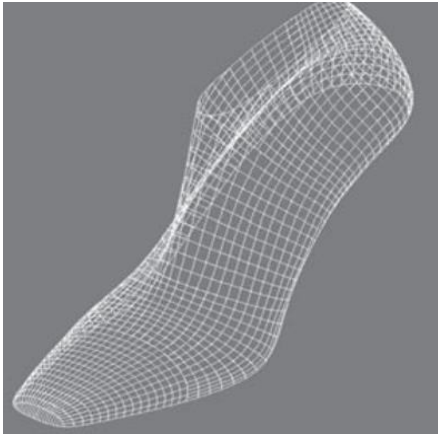


Рис. 2.10. Колодка, описана геометричними поверхнями

Однак при роботі в універсальних САПР такі поверхні створюються вручну стандартними функціями програмного середовища. Виділивши найбільш топологічно однорідні ділянки поверхні, дизайнер створює каркас, зони якого описуються NURBS поверхнями [99].

Останнім часом прогресивним підходом до цифрового моделювання складної форми колодки є параметричний дизайн, який може бути реалізований за допомогою багатьох спеціалізованих САПР таких як Forma [100], Crispin LastMaker [101], та інших.

Подібні програми орієнтовані на модифікацію вихідної форми колодки шляхом зміни значень формоутворюючих параметрів відповідно до необхідних антропометричних даних.

Однак процес параметричного моделювання такого складного об'єкта як взуттєва колодка не обмежується простими геометричними модифікаціями вихідної форми відповідно до 3д моделі стопи. На створення моделі колодки впливає цілий ряд факторів та багато додаткової інформації. Особливо якщо мова іде про ортопедичне або профілактичне взуття. Так, автор роботи [102] пропонує використовувати Інформаційне моделювання для створення

обґрунтованої 3д моделі медичного взуття. Використовуючи в якості вихідної інформації 3д модель стопи пацієнта, результати бароподометричних досліджень, плантограму, особливості біомеханіки або патомеханіки, естетичні вподобання та ін., дизайнер маніпулює формою за допомогою функцій програмного середовища. Параметричний дизайн є ядром запропонованого Інформаційного моделювання, що дозволяє розповсюдження будь-якої модифікації вхідних параметрів з миттєвим оновленням вихідних результатів.

Поверхні вільної форми взуттєвої колодки мають характеристики, які не можуть бути точно виражені за допомогою однієї або декількох аналітичних функцій, а кривизна таких поверхонь має складну геометричну форму.

Поверхні довільної форми подвійної кривізми, якою є взуттєва колодка, традиційно описуються NURBS поверхнями. NURBS є галузевим стандартом, який використовується для представлення форми, проектування та обміну даними при обробці геометричної інформації за допомогою комп'ютера та використовується у більшості сучасних CAD програм. Як результат, NURBS є потужним інструментом у стандартному геометричному дизайні. NURBS реалізує довільну форму поверхні шляхом налаштування її контрольних точок, вузлів і встановлює однозначну відповідність між поверхнею і параметричною областю, що є зручним для послідовного вирівнювання поверхні і генерації сітки [103].

Однак, взуттєву колодку неможливо описати однією поверхнею. Це, як правило, поліповерхня складена як мінімум з трьох поверхонь або поліповерхонь. Поліповерхні не мають загальних контрольних точок, математично можуть бути роз'єднані, не розплющується та не розкатуються стандартними інструментами або зі значними деформаціями. Їх треба перебудовувати або переводити у формат, який легко розкладається.

Крім того, більшість пристроїв для отримання вихідної 3д інформації (3д сканери) та САМ систем (фрезерування, 3D принтинг, тощо) орієнтовані на

об'єкти на основі полігональної сітки і найбільш розвинутим стандартом взаємодії між CAD та CAM є STL формат файлів.

Процес розгладжування поверхні довільної форми дорівнює процесу відображення поверхні з тривимірної (3D) простору на двовимірну площину. У строгому сенсі, відображення в основному залежить від ізометричного відображення (ISOMAP), яке зберігає геодезичну відстань між двома довільними точками незмінною до і після відображення [103]. Таким чином геодезичні лінії можна розглядати як своєрідні направляючі вздовж яких можна розгортати поверхню, контролюючи їх довжину, можна контролювати правильність процесу.

На сьогодні існує три методи розпластування поверхні: геометричне вирівнювання, механічне вирівнювання та геометричне вирівнювання/механічне вирівнювання. [104, 105].

На практиці це виглядає як отримання розплющеної розгортки автоматичним способом з задіянням інструментів та алгоритмів CAD систем, механічне зняття та розплющення умовної розгортки з колодки класичними способами, та комбінація двох способів.

Методи геометричного вирівнювання чи згладжування представляють великий інтерес, бо значно економлять час, дають змогу автоматизувати процес, отримані розгортки у формі кривих чи векторної графіки, легко редагуються та коректуються. Це значно прискорює виробничі процеси.

Kim SH та Shin K.H. (2009) [106] представлено метод деформування моделі поверхні за допомогою напрямних поверхонь. Дві напрямні поверхні подано як еталони, на яких лежить модель поверхні до та після деформації. Пропонований метод складається з двох етапів: розробки поверхні та деформації моделі. Розробка поверхні спочатку створює однозначне відображення між двома напрямними поверхнями та дає обмеження переміщення. Потім обмеження переміщення використовуються для створення плавного 3D-векторного поля, функції деформації для деформації моделі, яка відображає довільну точку на вихідній моделі на відповідну точку

на деформованій моделі. Запропонований метод, реалізований як модуль системи дизайну взуття на C++ та Unigraphics з використанням UG/Open, також може бути застосований до різноманітних задач проектування (наприклад, одягу).

Не зважаючи на чималу кількість досліджень методів конвертування 3д поверхонь колодки в 2д розгортки, нажаль більшість робіт дають скоріше фундаментальні знання про різні аспекти розгортання поверхонь подвійної кривізни, реалізовані у вигляді окремих плагинів у специфічних CAD системах та недоступні практичного використання.

2.3. 3D друк у взуттєвому виробництві

Відтворити практично будь-яку форму можна за допомогою адитивних технологій.

Для взуттєвої галузі найоптимальнішим є FDM, SLS або SLP-друк. У виробництві ортопедичного взуття 3д друк активно використовується для виготовлення індивідуальних устілок, підошов, каблуків, індивідуальних колодок або накладок на колодки.

Переваги методу: швидкість, зменшення відходів, можливість кастомізації, екологічні та біорозкладні матеріали, використання рослинних полімерів, біорозкладних підошов.

3D-друк, також відомий як адитивне виробництво, став трансформаційною технологією у виробництві взуття, що пропонує нові можливості для дизайну, налаштування та екологічності.

Шляхи застосування:

1) Швидке створення прототипів: 3D-друк дозволяє дизайнерам швидко створювати та тестувати прототипи, скорочуючи час, необхідний для розробки продукту.

2) Індивідуалізовані проекти: технології сканування можуть фіксувати розміри стопи клієнта, що дозволяє виготовляти персоналізоване

взуття з ідеальною посадкою. При цьому можна легко створити складні та незвичайні конструкції, які важко досягти звичайними методами.

3) Сучасні матеріали для 3D-друку, такі як термопластичний поліуретан (TPU), забезпечують гнучкість, довговічність і комфорт, необхідні для взуття.

4) Екологічність: для зменшення відходів у 3D-друку все частіше використовуються придатні для вторинної переробки та біологічні матеріали.

5) 3D-друк зазвичай використовується для виготовлення проміжних підошв із вдосконаленою амортизацією, наприклад, ґратчастими структурами, оптимізованими для продуктивності.

6) 3D друк дозволяє виготовляти індивідуальні ортези, ортопедичні устілки та інші вироби відповідно до конкретних медичних потреб.

7) Місцеве виробництво: децентралізоване виробництво за допомогою 3D-принтерів скорочує час доставки та вплив на навколишнє середовище.

8) Зменшення відходів: адитивне виробництво створює мінімальні відходи порівняно з традиційними методами різання та зшивання.

9) Циркулярна економіка: деякі компанії експериментують із повністю переробленим 3D-друкованим взуттям, створюючи замкнуті виробничі цикли.

Такі бренди, як Adidas, Nike і New Balance, уже застосували 3D-друк для інноваційних продуктів, підкреслюючи його зростаючу роль у формуванні майбутнього дизайну та виробництва взуття.

Найефективнішим форматом сучасного виробництва є виробництво із залученням цифрових технологій. Використання 3D-сканування стопи для подальшого моделювання форми взуття, що передбачає впровадження широкого спектру передових технологій від цифровізації стопи до використання сучасних методів виготовлення, таких як швидке прототипування 3D елементів безпосередньо з комп'ютерної моделі [107].

У взуттєвому виробництві цифрове прототипування може внести значний внесок у екологічну та економічну стійкість [108].

Найбільш ефективним в індустрії моди є застосування адитивних технологій для виготовлення кастомізованих елементів 3д форм. Так, потужний потенціал 3д друку може бути реалізований для персоналізованих форм взуттєвих колодок з індивідуальною адаптацією до параметрів та вимог замовника [109].

В більшості випадків інтегрування інноваційних підходів у виробництво ортопедичного або індивідуального взуття адитивні технології використовуються для виготовлення колодок, ортезів та елементів протезів.

При цьому дослідження [110] демонструють можливість 3д друку кастомізованих взуттєвих колодок потрібних фізико-механічних властивостей, придатних для використання у виробничих умовах. Алгоритм адаптації 3д моделі колодки під параметри замовника дозволяє швидко виготовити кастомізований виріб, уникаючи числених повторюваних процесів проектування нових форм колодок та підготовки їх до 3д друку.

3D-друк допомагає створювати також індивідуальні форми ортопедичних устілок і ортезів, змодельованих на основі форми стопи пацієнта (рис. 2.11). На сучасному рівні розвитку адитивних технологій і використовуваних матеріалів можна досягти необхідних заданих фізико-механічних властивостей ортопедичних елементів, таких як устілки [111]



Рис. 2.11. Шляхи застосування 3д друку у взуттєвій галузі:

1 – ортези; 2 – колодка; 3 – зразки підошов; 4 – зразки взуття; 5 – тестове взуття; 6 – Ортопедичні устілки.

Висновки до розділу 2

Індивідуалізація взуття в режимі масового виробництва дає переваги з точки зору посадки, комфорту та сприяє сталому виробництву. Ця методологія відповідає цілям сталого розвитку у взуттєвій промисловості, одночасно розширюючи асортимент взуття.

Розуміння поведінки споживачів та залучення їх до виробничого процесу призвело до нової парадигми як соціального виробництва для індивідуального виробництва у взуттєвій промисловості. Це підтверджується використанням цифрових технологій, які стимулюють персоналізацію продукту.

Залучення цифрових технологій таких як 3D-сканування стопи для подальшого моделювання форми взуття передбачає впровадження широкого спектру передових технологій від цифровізації стопи до використання сучасних методів виготовлення, таких як швидке прототипування 3д елементів безпосередньо з комп'ютерної моделі та застосування адитивних технологій для виготовлення кастомізованих елементів 3д форм.

Потенціал 3д друку може бути реалізований для персоналізованих форм взуттєвих колодок з індивідуальною адаптацією до параметрів та вимог замовника.

Розділ 3. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Шляхи вдосконалення форми взуття за допомогою антропометричних досліджень.

Сучасні вимоги зростаючої конкуренції на взуттєвому ринку змушують виробників вдаватися до залучення прогресивного обладнання, нових методик та автоматизації процесів розробки форми та конструкції взуття.

Метою автоматизованого проектування моделей є підвищення якості, зниження матеріало- та трудомісткості, скорочення штатів проектувальників та термінів виконання проектно-конструкторських робіт.

Однак застосування прогресивної цифрової техніки не гарантує досконалого результату. Основна складність при проектуванні взуття – це пошук балансу між функціональністю та естетикою в умовах масового виробництва та за необхідності врахування великої кількості антропоморфологічних параметрів.

Тому одне з важливих завдань, яке вирішувалося в роботі – розробка обґрунтованої методики розробки параметрів колодки на основі антропометричної форми стопи.

Проектування поверхні нової колодки заданих параметрів відбувається в просторовому графічному середовищі спеціалізованих САПР на основі результатів 3д сканування та модифікації існуючих зразків за допомогою методу зворотнього інжинірингу. Перетворення параметрів стоп в формо-розміри внутрішньої форми взуття вимагає розробки вдосконаленого методу проектування поверхні колодки на основі форми стопи з урахуванням актуальних функціонально-експлуатаційних вимог та можливості адаптації до функцій програмного середовища.

Розробка індивідуальних форм колодок на кшталт ортопедичних колодок має добре апробовану практику, обґрунтовані методи, які регулярно використовуються та демонструють гарний результат.

Натомість проектування колодок для взуття масового виробництва вимагає впровадження нових методів, які базуються не на існуючих формах колодок, а на формі стопи споживачів. При цьому очевидно є неможливість використання всіх індивідуальних 3d сканів стопи для розробки нових форм колодок для масового взуття.

Дослідження 1,2 мільйонів 3d-сканувань стопи [112] підтверджує наявність багатьох статистично значущих відмінностей у середніх вимірюваннях стопи між регіонами та значну дисперсію вимірювань стопи в кожній групі клієнтів. Таким чином, взуття має бути розроблено окремо для кожної групи, регіону та статі, і щонайменше 3 ширини взуття для кожного класу довжини потрібні, щоб забезпечити належну посадку для 90% клієнтів. Ці масштабні статистичні огляди можуть допомогти великим виробникам взуття краще налаштувати свою продукцію.

Важливим аспектом досліджень є визначення можливості використання усереднених параметрів для окремих груп споживачів.

З метою оптимізації зусиль та мінімізації вихідної інформації, що використовується для проектування та вибору колодки, можна запропонувати наступний алгоритм отримання та використання даних антропометричних досліджень стоп певних категорій населення (Рис. 3.1).

Таким чином, при розробці колодок для взуття для дорослих груп населення ми можемо використовувати форми стоп, що відповідають середнім параметрам по даній сукупності споживачів. Для розробки обґрунтованих форм колодок перш за все треба визначити такі параметри, які максимально б задовольняли якнайбільшу кількість споживачів.

Згідно із задачами даної роботи, в роботі було проведено антропометричні дослідження стоп 214 представників цільової чоловічої групи споживачів віком 21-45 років.

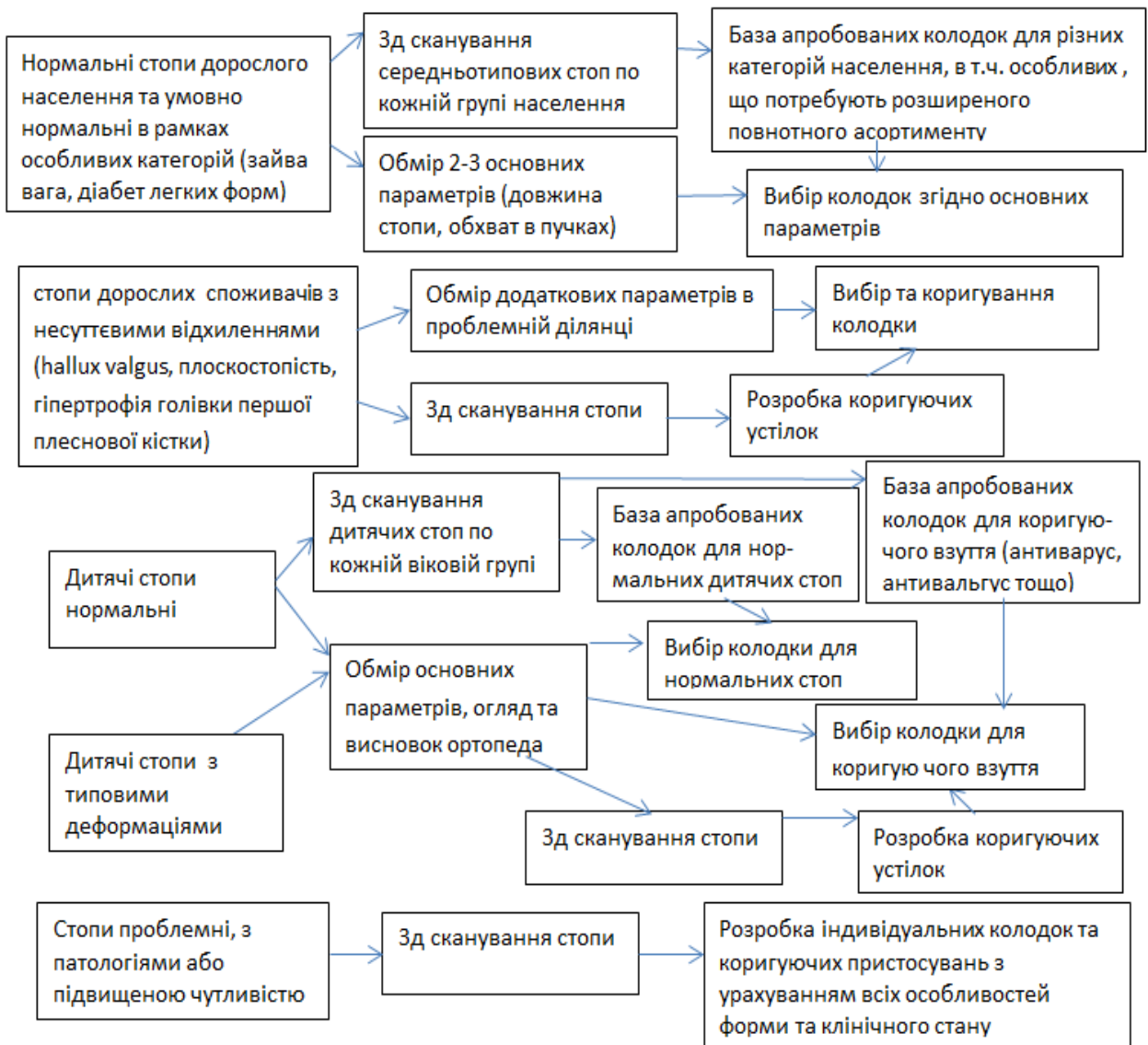


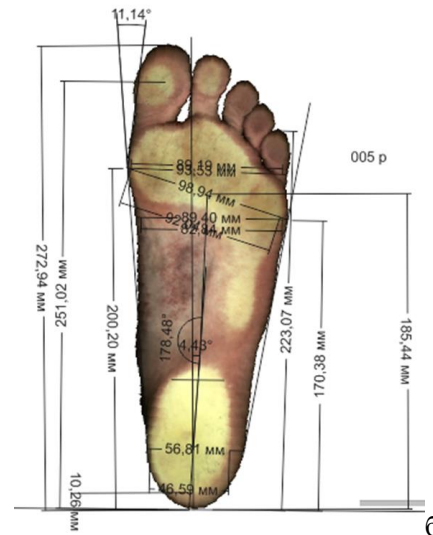
Рис. 3.1. Алгоритм отримання та використання даних антропометричних досліджень стоп

Антропометрична інформація в роботі отримується такими методами:

- За допомогою безконтактного 3d сканера визначали основні цифрові параметри досліджуваних стоп (Рис. 3.2-а)
- Шляхом обробки плантограми отримували необхідні довжинні та широтні параметри стоп (Рис. 3.2-б)

Name	Perimeter
Ball / Join	263,54
Waist Girth	259,90
Instep Heel	273,00
Short Heel	374,36
Ankle Circumference	292,93
Shin Circumference	5,25
Heel width	68,06

а



б

Рис. 3.2. Приклад отриманих даних про стопи: а – за допомогою безконтактного 3d сканера, б – довжинні та широтні параметри стоп, отримані за допомогою плантограми.

Отримавши інформаційну базу даних на основі певної кількості стоп визначеної статеві-вікової групи населення, необхідно розробити усереднену математичну модель середньотипової стопи. Усереднити просторові форми стоп не є можливим, тому усередненню підлягають цифрові параметри стоп (довжина, периметр стопи в пучках, периметри по прямому підйому, периметр по косому підйому, висота до надщиколоткового перерізу, периметр надщиколоткового перерізу), а також плантограми стоп.

Необхідність знаходження усереднених параметрів складної просторової форми стопи вимагає чіткого дотримання методології визначення цих параметрів.

Основні антропометричні точки стопи, які є основою для визначення параметрів складної форми стопи, показані на Рис. 3.3.

1. точка Pternion – найбільш випукла точка п'ятки
2. голівка другої плесневої кістки
3. точка внутрішнього пучка - центр голівки першої плесневої кістки
4. точка зовнішнього пучка – центр голівки п'ятої плесневої кістки
5. точка висоти міжфалангового суглоба першого пальця

6. точка висоти міжфалангового суглоба п'ятого пальця
7. точка висоти внутрішнього пучка
8. точка висоти зовнішнього пучка
9. точка внутрішнього мищелка
10. точка зовнішнього мищелка
11. точка згину стопи
12. точка висоти прямого підйому (на рівні середини стопи)
13. човноподібна кістка



Рис. 3.3. Основні антропометричні орієнтири, що визначають параметри форми стопи.

Таблиця 3.1 Основні параметри стопи, що визначають її просторову форму.

Параметр стопи	Вимірювання	Анатомічне визначення параметру
Довжина стопи	Довжина від т. 1 до крайньої точки найдовшого пальця	Відстань між точкою Pternion та кінцевою точкою найдовшого пальця, проведена паралельно до вісі стопи
Медіальна метатарзальна (плеснова) довжина	Довжина від т. 1 до т. 3	Відстань від точки Pternion до центру голівки першої плеснової кістки (точки внутрішнього пучка)

Довжина до медіальної лоджки	Довжина від т. 1 до т. 9	Відстань від точки Pternion до найбільш виступаючої точки внутрішньої кісточки, виміряна паралельно осі стопи
Довжина до латеральної лоджки	Довжина від т. 1 до т. 10	Відстань від точки Pternion до найбільш виступаючої точки зовнішньої кісточки, виміряна паралельно осі стопи
Ширина стопи	Ширина стопи по найширшій ділянці	Відстань між точками внутрішнього та зовнішнього пучків по перпендикуляру до вісі стопи
Ширина п'ятки	Ширина в найширшій ділянці п'яtkової частини	Ширина між двома найбільш виступаючими точками п'ятки на рівні 0.16Дст від т. Pternion
Висота до медіальної лоджки	Висота до т. 9	Відстань по висоті від опори до найбільш виступаючої точки внутрішньої кісточки
Висота до латеральної лоджки	Висота до т. 10	Відстань по висоті від опори до найбільш виступаючої точки зовнішньої кісточки
Висота передплюсни на рівні середини стопи (висота дорсальної арки)	Висота прямого підйому (відстань від підлоги до т. 12)	Максимальна висота перетину вертикального перерізу на рівні 0.5Дст з тильною поверхнею стопи
Периметр стопи по плюсно-фалангових суглобах	Обхват пучків, виміряний через точки 3 та 4	Загальний периметр пучкового перерізу, що проводиться через найбільш випуклу точку внутрішнього та зовнішнього пучка

Периметр перерізу середини стопи	Обхват прямого підйому, виміряний на рівні т. 12	Найменший обхват на рівні середньої клиноподібної кістки
Периметр косого перерізу стопи через п'ятку та точку підйому	Обхват довгого косого підйому, виміряний через т. 1 та т. 12	Найкоротший периметр обхвату, проведеного чрез т. Pternion та точку прямого підйому на рівні 0.5Дст
Периметр косого перерізу стопи через п'ятку та згин	Обхват короткого косого підйому, виміряний через т. 1 та т. 11	Периметр обхвату, проведеного через т. Pternion та точку згину стопи
Периметр гомілково-стопного суглоба	Обхват лоджки, виміряний через т. 11	Периметр горизонтального перерізу, що проходить через точку згину стопи
Висота голівки першої плесневої кістки	Висота по внутрішньому пучку від підлоги до т. 7.	Максимальна висота перерізу в пучках (який проходить через найбільш випуклу точку внутрішнього та зовнішнього пучка).
Ширина пучків	Ширина пучків від т. 3 до т. 4.	Відстань між найбільш випуклою точкою внутрішнього та зовнішнього пучка
Латеральна метатарзальна (плеснова) довжина	Довжина до зовнішнього пучка (від т. 1 до т. 4)	Відстань від точки Pternion до центру голівки п'ятої плеснової кістки (точки зовнішнього пучка)

Згідно з наведеною схемою розташування антропометричних параметрів (рис.3.4) в роботі визначалися усереднені висотні, широтні та обхватні параметри досліджених стоп досліджуваної вибіркової групи. Результати обробки даних антропометричних досліджень представлені в Табл. 4.

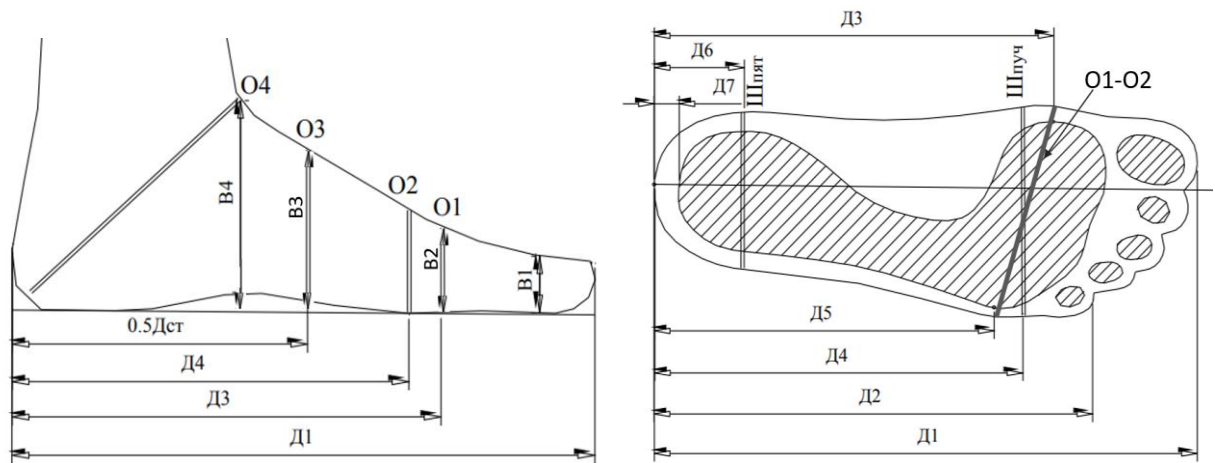


Рис. 3.4. Схема розташування антропометричних параметрів

Таблиця 3.2. Результати антропометричних обмірів представників цільового сегменту споживачів

	Параметр стопи	Середньоарифметичні значення M , мм	Середньоквадратичне відхилення σ , мм
Д1	Довжина стопи	271,4	11,3
Д2	Довжина до кінця 5-го пальця	223,9	7,2
Д3	Медіальна метатарзальна (плеснова) довжина	202,1	6,5
Д5	Латеральна метатарзальна (плеснова) довжина	166,8	7,7
Д6	Довжина до найширшого місця п'ятки	45,7	4,2
Шпуч	Ширина стопи по габариту	106,3	6,7
Шпучк	Ширина стопи по контуру	97,8	5,0

Шпят	Ширина п'ятки	52,7	5,8
O1-O2	Периметр стопи по плюсно-фалангових суглобах	255,7	12,9
O1	Периметр перерізу стопи через центр голівки 1-ї плесневої кістки	248,2	12,6
O3	Периметр перерізу середини стопи	269,2	16,1
O2	Периметр перерізу стопи через центр голівки 5-ї плесневої кістки	250,0	18,4
O4	Периметр косого перерізу стопи через п'ятку та згин	345,4	18,5
B2	Висота голівки першої плесневої кістки	45,4	5,7
B1	Висота 1-го пальця	23,5	4,5

3.2 Практичні аспекти застосування результатів 3D сканування при розробці форм взуття

Взуттєва колодка – це складна форма, конструкція якої будується на основі принципу зворотного проектування, найчастіше за допомогою спеціальних комп'ютерних програм у режимі порівняння форми взуття з формою стопи.

Методика 3D сканування дозволяє отримати інформацію про поверхню об'єкта, його об'єм, усі розміри та розрізи, а також цифрові плантограми стопи.

Переваги використання 3D-сканування стоп полягають у тому, що воно дозволяє швидко сканувати велику кількість учасників, а вимірювання є надійним та ефективним. Точність отриманих даних вище, ніж точність ручних вимірювань.

Найефективнішим методом є використання 3D-сканування стопи для подальшого моделювання взуття, що передбачає впровадження широкого спектру прогресивних технологій від цифровізації стопи до використання сучасних методів виготовлення, таких як швидке прототипування колодки безпосередньо з комп'ютерної моделі (рис.3.5).

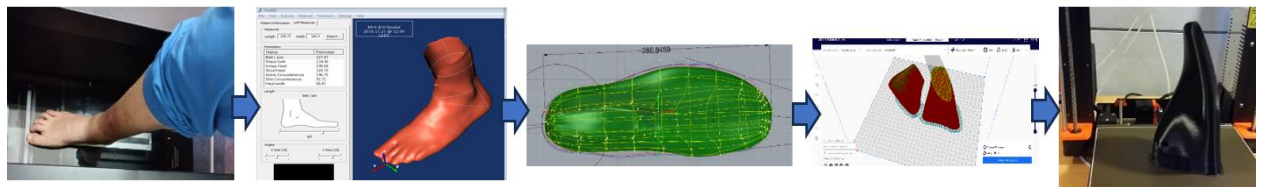


Рис. 3.5. Послідовність процесу розробки колодки із залученням цифрових технологій

У 1990-х роках відомий американський ортопед, автор ряду книг про захворювання стопи Гленн Коупленд віддавав перевагу комп'ютерним методам отримання інформації про стопу для створення взуття та ортокорекції. Порівнюючи результати, отримані при використанні гіпсової пов'язки та 3D-сканування стопи, його пацієнти в 98% випадків віддавали перевагу взуттю, виготовленому на основі комп'ютерних технологій [113].

Переваги 3D-сканування не обмежуються виготовленням індивідуальних виробів, але мають широкі перспективи використання, наприклад, для забезпечення масових антропометричних вимірювань і вивчення морфології стопи людини. Також, аналіз великої вибірки 3D-сканувань ніг може бути використаний для отримання загальної класифікації форм стопи людини.

Слід зауважити, що процес 3д сканування при зовнішній легкості також не є легким.

Навіть при застосуванні професійних сканерів можливо отримання дефектів полігональної моделі, які потребують ручної або автоматичної корекції.

На якість полігональної моделі можуть впливати зовнішнє освітлення, колір шкіри або шкарпеток, закладені виробником алгоритми розпізнавання та побудови моделі.

Зд сканування базових колодок для здійснення процесу моделювання нових форм здійснювалося на тому самому сканері

Практика дизайну взуттєвої колодки на основі 3D-сканування стопи передбачає різні техніки сканування стопи залежно від стану стопи та типу взуття, що розробляється:

- Сканування стоп спеціальним 3D сканером в положенні стоячи з рівною вагою на обох ногах
- Сканування стопи без навантаження, в положенні сидючи
- Сканування стопи, встановленої в скоригованому біомеханічному положенні, утримуваному спеціальними фіксаторами або рукою лікаря
- Сканування стопи, встановленої на ортопедичну устілку або спеціальні ортези
- Сканування стопи, поміщеної в пінопластовий бокс

Найчастіше використовують стандартний спосіб сканування стопи в положенні стоячи з рівномірним навантаженням на обидві ноги (рис.3.6). Цей метод використовується для проведення масових антропометричних вимірювань для оцінки клінічного стану стоп певної статеві-вікової групи споживачів для створення усередненої моделі стопи певної групи споживачів, а також для розробки індивідуальної форми останньої у випадках стопи без суттєвих патологій.

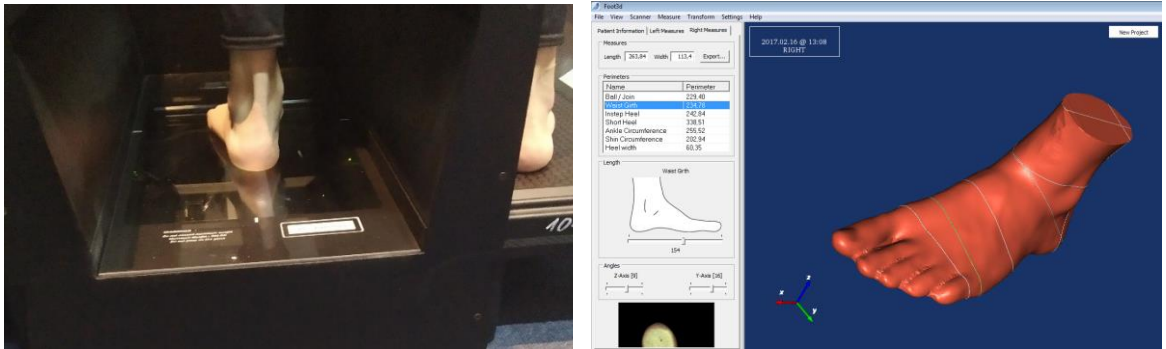


Рис. 3.6. Стандартний спосіб сканування стопи в положенні стоячи з рівномірним навантаженням на обидві ноги

Стопа в положенні сидячи або лежачи, без навантаження, сканується для отримання допоміжної моделі стопи, коли необхідно розробити останню форму взуття для елегантного або модного взуття на замовлення, а також для розробки анатомічних устілок (рис.3.7).

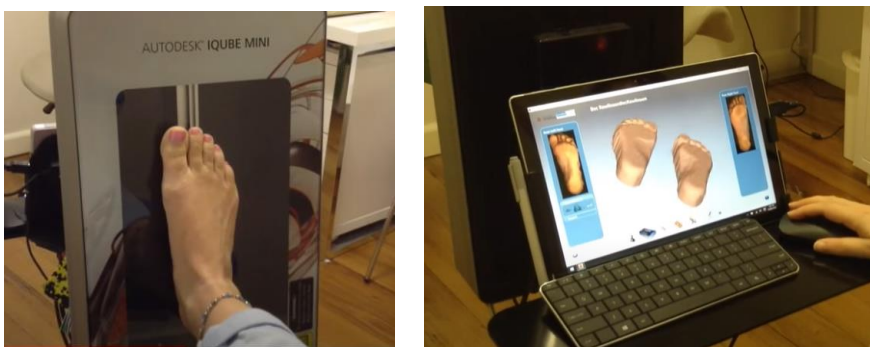


Рис. 3.7. Сканування стопи в положенні сидячи або лежачи без навантаження

3D-скан стопи, поміщеної в коробку з пінопласту, використовується для розробки внутрішньої форми взуття з підвищеним комфортом, коли колодка розроблена разом з анатомічно профільованою устілкою (рис.3.8).



Рис. 3.8. 3D-скан стопи, поміщеної в пінопластовий бокс.

З точки зору особливостей генерування параметрів колодки на основі результатів 3д сканування можна умовно виділити такі варіанти:

- 1) Проєктування колодки для низькокаблучного елегантного модного взуття,
- 2) Проєктування колодки для жіночого висококаблучного взуття,
- 3) Проєктування колодки для ортопедичного взуття,
- 4) Проєктування внутрішньої форми взуття підвищеної комфортності.

При цьому перші два варіанти передбачають використання 3D-сканування стопи лише як початкового орієнтира для модифікації базової форми останнього. Форма колодки підлаштовується під основні параметри стопи, залишаючись принципово незмінною (рис. 3.9).

Останні два варіанти, натомість, орієнтовані на максимальне відтворення анатомо-морфологічної будови стопи у формі колодки, тому в таких випадках 3D-сканування стопи є основною базовою формою для подальшого моделювання стопи.

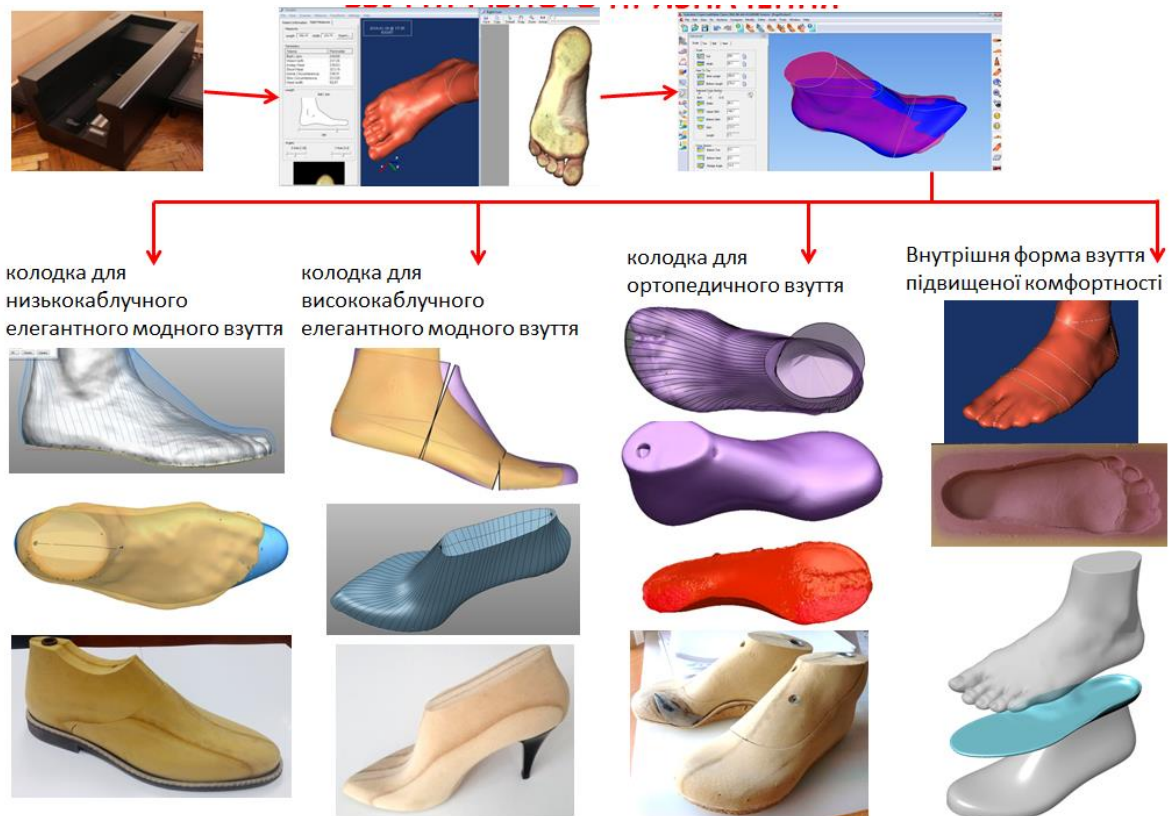


Рис. 3.9. Інформаційна база проєктування внутрішньої форми взуття різного призначення.

Кожен з наведених варіантів проєктування колодки передбачає окремий спосіб застосування 3д скану стопи:

1) При проєктуванні колодки для низькокаблучного елегантного взуття необхідно скоригувати базову форму колодки у відповідності до анатомо-морфологічних параметрів стопи, зберігаючи елегантний дизайн. Для порівняння 3д форм колодки та стопи використовуємо морфінг, приводячи 3д модель стопи у відповідність до нижнього профілю колодки.

2) При проєктуванні колодки для висококаблучного взуття основною складністю є порівняння форми колодки та стопи. В даному випадку необхідно застосовувати модульний дизайн форми, попередньо розчленувавши 3д форму стопи на три частини, що змінюють взаємну орієнтацію відносно одна одної при підйомі на каблук.

3) Ортопедична колодка максимально повторює форму стопи, приведеної у правильне біомеханічне положення, з урахуванням ортопедичної коригуючої устілки

4) Внутрішня форма взуття підвищеної комфортності утворюється на основі антропометрично правильної форми колодки та анатомічної розвантажуючої устілки, що забезпечує підтримку поздовжніх та поперечної арок стопи.

На підставі актуальних викликів сьогодення та враховуючи необхідність підвищення рівня комфортності взуття для українських споживачів, ми провели антропометричні дослідження стоп представників чоловічого сегменту споживачів. Використовуючи результати попередніх масових антропометричних досліджень [114], ми зосередилися на чоловіках із розміром стопи в діапазоні 42-43. У цьому дослідженні було обстежено 28 чоловіків (56 стоп) віком 21-45 років з довжиною стопи 265-280 мм, без серйозних деформацій стопи. Дослідження проводилися за допомогою 3D-сканера FootIn 3d (рис. 3.10), яким обладнана науково-дослідна лабораторія 3д сканування (КНУТД). Цей пристрій забезпечує достатню точність вимірювань при високій швидкості сканування.



Рис. 3.10. Сканування стопи на професійному 3д сканері

Програмне забезпечення Foot 3d дозволяє швидко перетворити отриману хмару точок в трикутну полігональну сітку, з якою зручно працювати в програмному забезпеченні 3D-інженерії. Програма 3d-сканування дозволяє в

автоматичному режимі виміряти основні параметри сканованого об'єкта (стопи або колодки) (рис. 3.11).

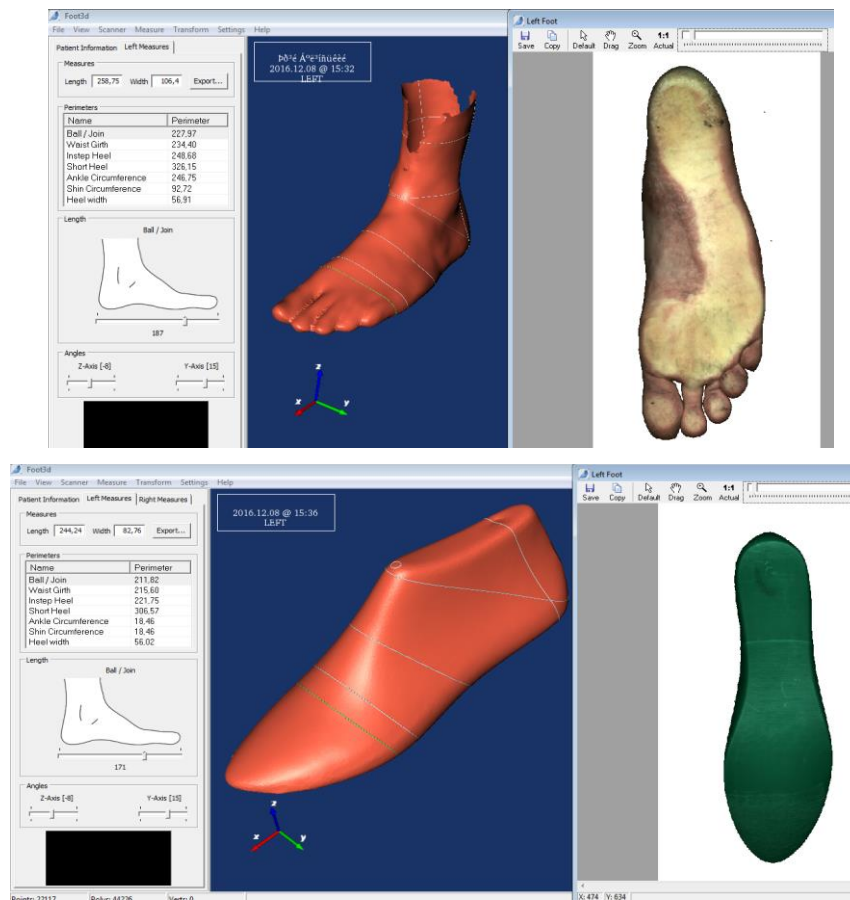


Рис. 3.11. Обробка результатів сканування за допомогою Foot 3d

Сканована форма стопи та колодки експортується в STL-формат, з якого далі імпортується в середовище CAD програми.

Послідовність сканування та обробки даних стопи та колодки відбувається в програмі Foot3d в такий спосіб:

1. сканування колодки за допомогою спеціалізованого сканер Foot in 3d,
2. ідентифікація ліва чи права колодка (стопа) взята для сканування (рис. 3.12).



Рис. 3.12. Ідентифікація лівої чи правої стопи.

3. Після процесу сканування на екрані монітору з'являється хмара точок об'єкту (рис. 3.13). При наявності зайвих точок в полі сканування їх необхідно видалити доступними інструментами .

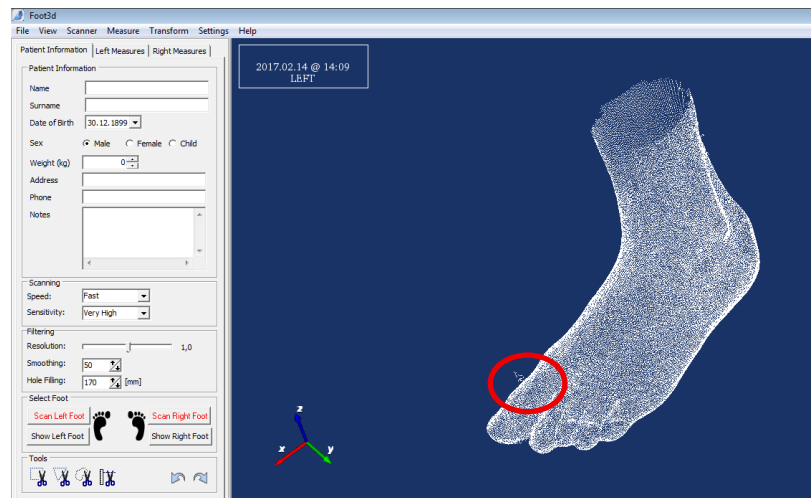


Рис. 3.13. Хмара точок отримана після сканування

4. Триангуляція поверхні «Triangulation», використовуючи функцію Right (або Left) Measures.

5. Експорт отриманої моделі в STL формат.

Після проведення 3д сканування стоп представників цільового сегменту споживачів та обробки даних сканування отримані STL моделі стоп були завантажені в середовище PowerShape (Рис. 3.14) для порівняння та розрахунку необхідних параметрів для подальшого проектування колодок.



Рис. 3.14. Фрагмент зразка стопи цільової групи споживачів, дослідженого методом 3D сканування

Детальні параметри форми стопи отримували шляхом обміру цифрових 3д моделей стопи та 2д плантограм за допомогою функцій графічного середовища САПР програм (PowerShape та CorelDraw) (рис.3.15).

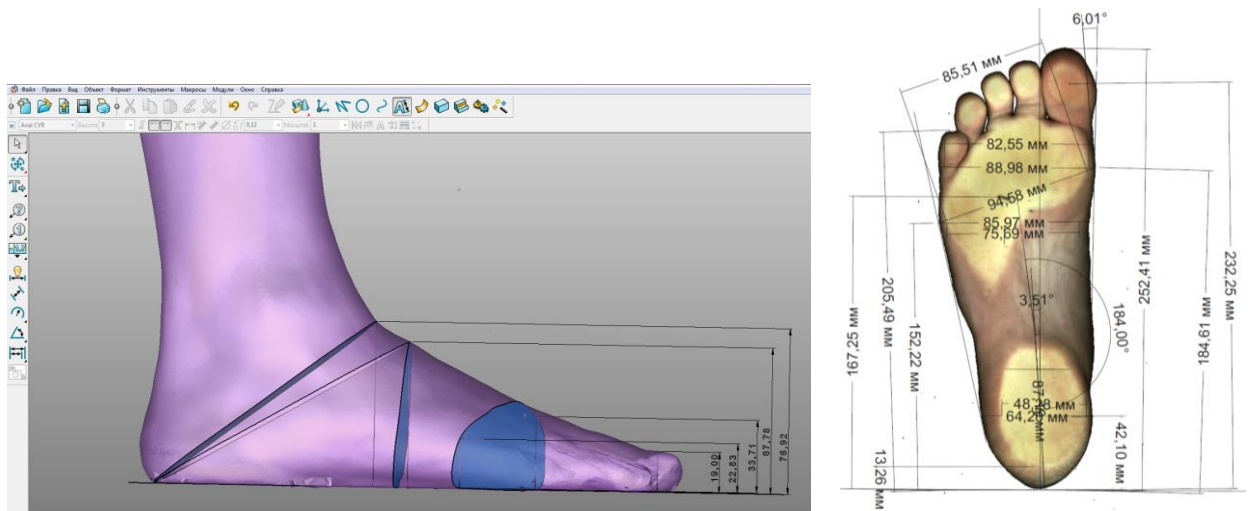


Рис. 3.15. Обмір цифрових 3д моделей стопи та 2д плантограм за допомогою функцій САПР.

Результати антропометричних досліджень (Рис. 3.16) цієї обмеженої вибіркової сукупності представлені в Табл. 3.3.

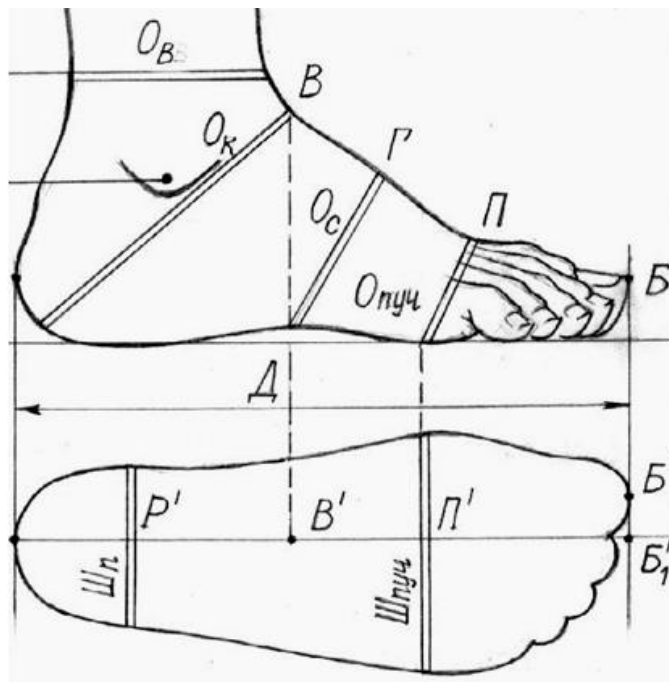


Рис. 3.16. Основні розмірні ознаки стоп

Таблиця 3.3. Результати антропометричних досліджень відібраних стоп з розміром стопи 42-43 (EU)

Розмірна ознака	Середньоарифметичні значення М, мм	Середньоквадратичне відхилення	Min по даному розмірному інтервалу, мм	Max по даному розмірному інтервалу, мм	Колодка відповідного розміру стандартної повноти, мм
Довжина стопи	271,4	3,6	266,9	272,5	278
Обхват в пучках	256,3	6,0	244,3	270,1	252
Обхват короткий косий підйом	344,6	7,9	342,2	370,0	352
Обхват по середині стопи	267,2	6,8	249,8	275,7	268
Обхват щиколотки	267,1	7,4	253,5	282,2	270
Ш. п'ятки (по контуру)	63,5	3,2	56,8	70,5	67
Ш. п'ятки (по відбитку)	51,79	2,8	45,5	60,1	60
Ш пучки(по контуру)	104,5	4,4	99,0	110,3	96
Ш пучки(по відбитку)	97,8	4,1	93,0	102,1	90
Висота першого пальця	23,5	2,5	20,1	26,8	27
Висота по пучковому перерізу	45, 4	4,3	42,1	49,8	48
Висота колодки на рівні короткого косого підйому	86,7	6,3	79,8	93,1	92

Аналіз результатів цифрових досліджень показав широкий діапазон форм і параметрів стоп у представників досліджуваної групи (Рис. 3.17).



Рис. 3.17. Порівняння різних форм стопи довжиною 270 ± 4 мм

Окружність стопи в ділянці пучків і в ділянці прямого підйому має значні розбіжності (рис. 3.18): різниця між обхватами досягає 18 мм в межах одного розміру. Поширеними відхиленнями стопи від норми є вальгусна установка стопи, гіпертрофія відповідного м'яза п'ятого пальця, плоскостопість.

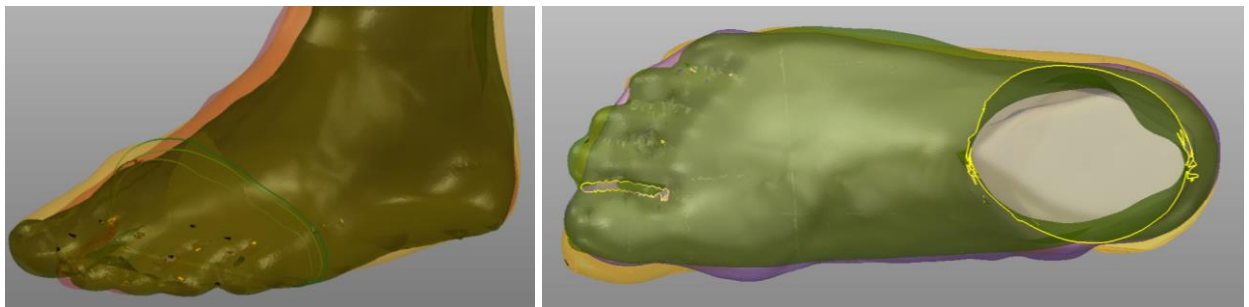


Рис. 3.18. Співставлення 3д форм стоп однієї довжини.

Оцифровування (сканування) поверхні колодки, що використовується в якості базової форми для подальшого моделювання нової форми, також проводилося за допомогою спеціалізованого сканера Foot in 3d (рис. 3.19), який дозволяє отримати цифрову копію як поверхні стопи людини, так і поверхні взуттєвої колодки. Для сканування використали чотири стандартні форми колодки, що використовувалися на підприємстві для виробництва повсякденного взуття.

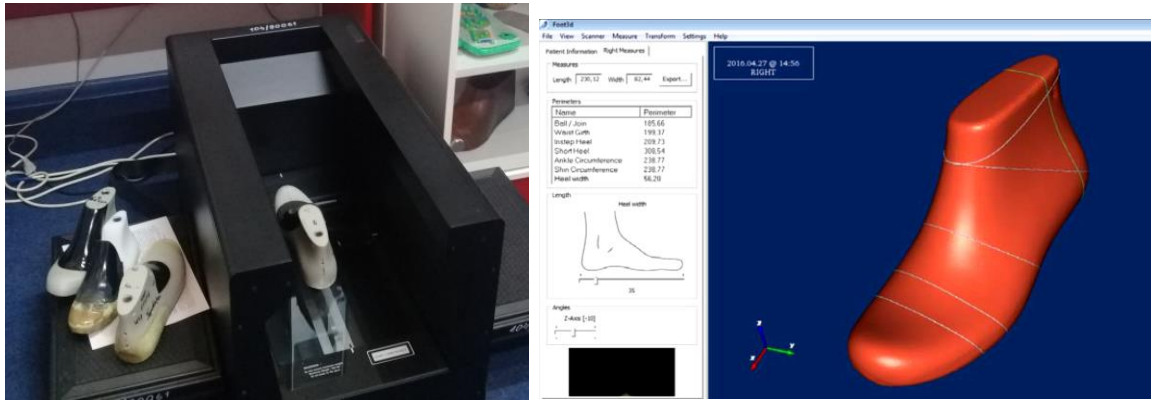


Рис. 3.19. Оцифровування поверхні колодки, що використовується в якості базової форми для подальшого моделювання нової форми.

Отримані методом 3D сканування тримірні моделі колодок в майбутньому можуть бути оброблені засобами САПР і застосовуватися для розробки технології виготовлення (CAM) та інженерних розрахунків (CAE).

Загалом процес створення нової колодки методом зворотного інжинірингу починається з 3д сканера та задіює цілий ряд спеціальних програмних продуктів та високотехнологічного обладнання (Рис. 3.20).

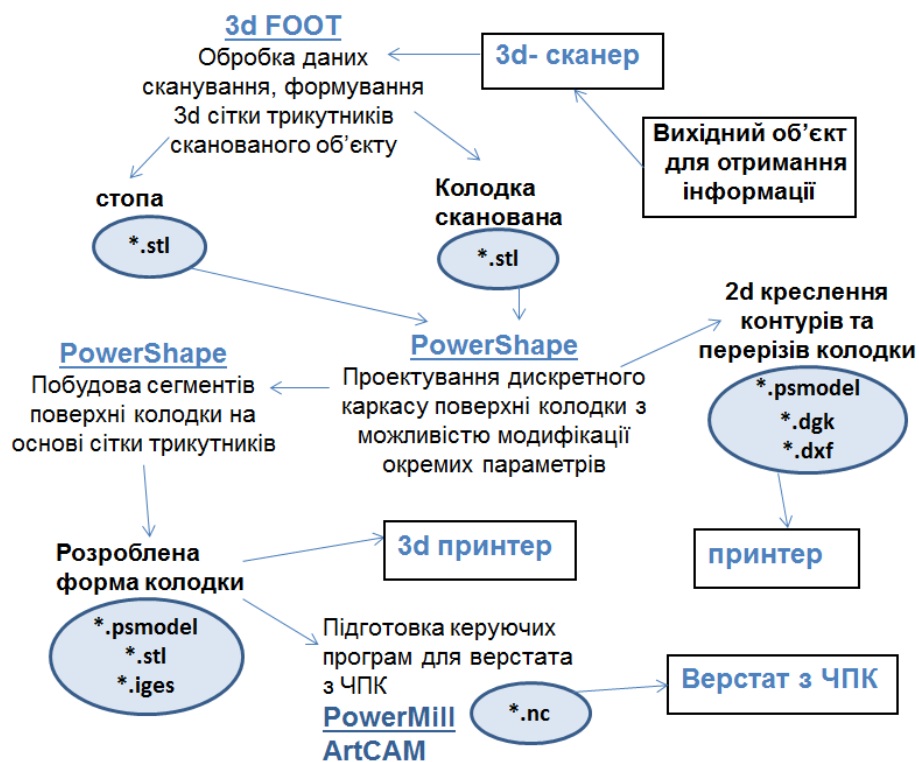


Рис. 3.20. Алгоритм процесу проектування та виготовлення форми

колодки з використанням сучасних універсальних САПР та високотехнологічного обладнання

Сканування обмежується тільки безпосередньо деякими властивостями поверхні. Так глянсові, блискучі й темні об'єкти не будуть оцифровані ефективно, для досягнення кращої якості модель повинна бути пофарбована в червоний, білий або жовтий кольори. Отримані в результаті тривимірного сканування координати точок, описують геометрію об'єкта у системі координат, яка закладена у сканері.

Після завершення процесу сканування зберігаємо та підписуємо сканований об'єкт в доступному для подальшої роботи форматі – STL.

При виникненні так званих «сліпих зон» сканування – тобто ділянок поверхні, в яких при скануванні утворюються отвори (рис.3.21), необхідно застосувати відповідний функціонал програмного середовища PowerShape – універсального 3d моделювальника з широким спектром інструментів 3d проектування. Такі дефекти сканування виникають при скануванні пластикових колодок із зеленого пластику з гладкою поверхнею.

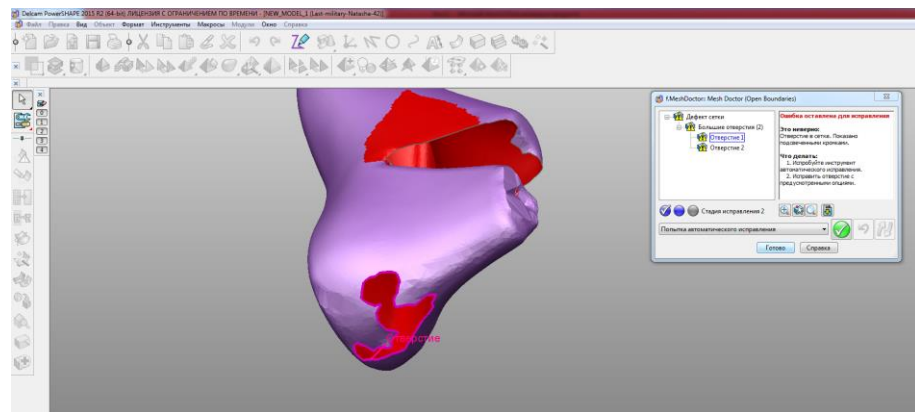


Рис. 3.21. Застосування функції «Закрити отвір» для усунення отворів

Програма автоматично заповнює отвори недостаючими трикутниками поверхні, враховуючи плавність та гладкість загальної форми (рис.3.22).

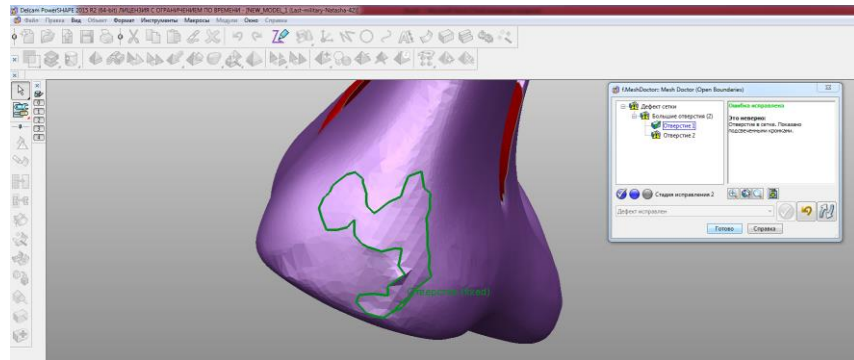


Рис. 3.22. Результат заповнення отворів трикутниками поверхні

Така форма готова до подальшого використання в середовищі Cad програм. Ці дані використовують для створення комп'ютерної моделі виробу по його фізичному прототипу, контролю точності геометричних параметрів виробів та проектування нових виробів.

Для завантаження базових форм колодки для подальшої роботи в середовищі PowerShape, Rhinoceros, LastMaker та ін. застосовують функцію Імпорт. При імпортуванні колодки використовується STL файл триангульованої моделі, отриманої шляхом 3д сканування. Для правильного орієнтування і точного відображення форми вказуються наступні параметри:

- контрольні точки поверхні
- висота припіднятості п'яткової частини
- ліва або права орієнтація
- тип колодки (нормальна, завищені берці, або чобітки)

Контрольні точки, що вказуються на поверхні колодки (рис.3.23):

- передня точка носка,
- точка гребеня,
- верхня точка п'яtkового контуру
- нижня точка п'яtkового контуру

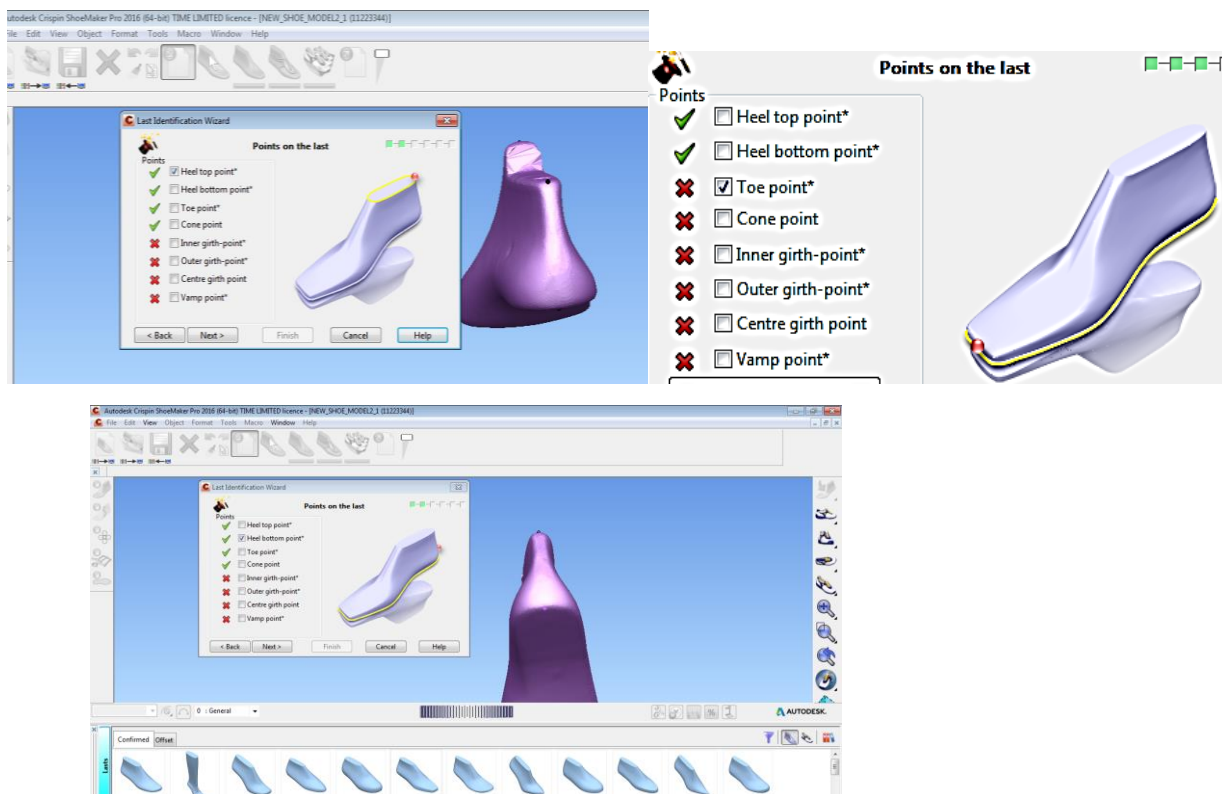


Рис. 3.23. Контрольні точки, що вказуються на поверхні колодки.

6. Вказуємо та коригуємо основні криві колодки, такі як:
 - feather curve
 - top curve
 - centre curve
 - heel curve

Контури кривих колодки можна коригувати по точкам (рис. 3.24).

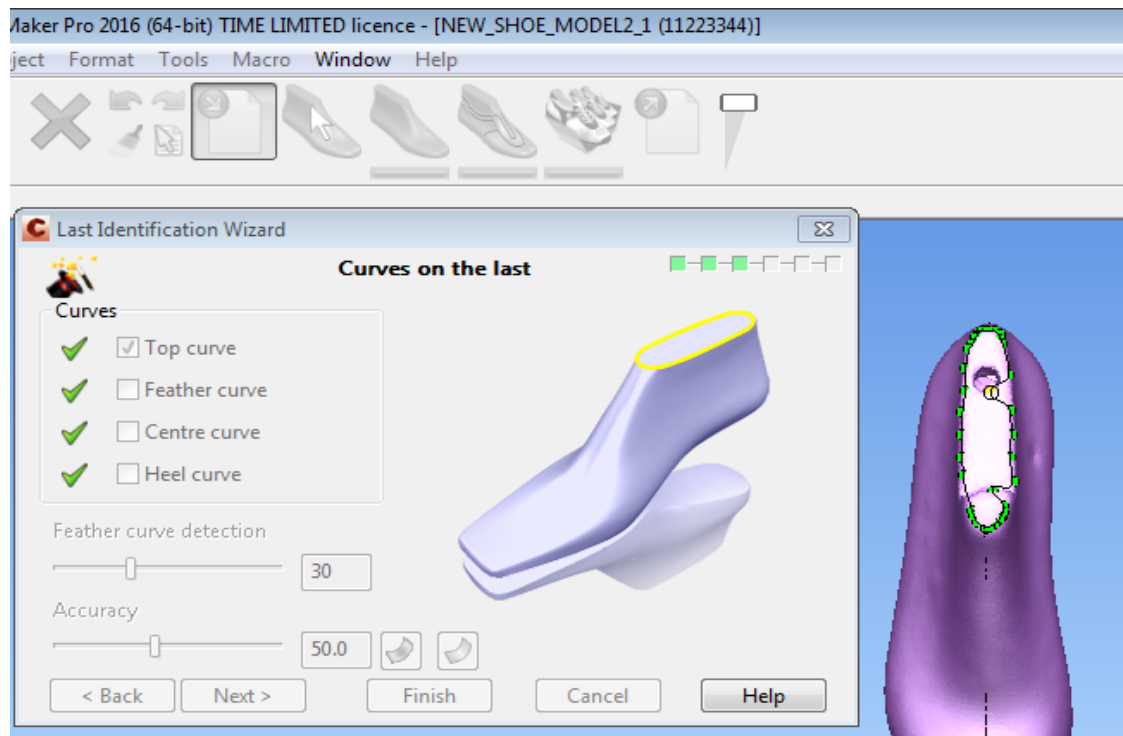


Рис. 3.24. Коригування контуру кривої по овалу гребеневої частини

Вказуємо правильну, або необхідну висоту підйому п'яткової частини колодки (рис. 3.25).

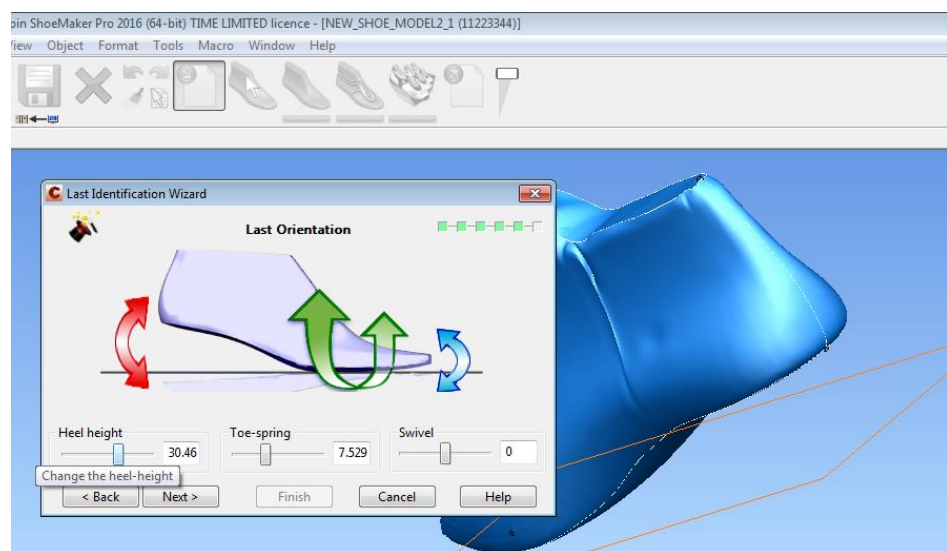


Рис. 3.25. встановлення параметру висоти каблука при імпортуванні.

Далі з завантаженої колодки можна виконати розгортку поверхонь в автоматизованому або напівавтоматизованому режимі та виконувати її коригування (рис. 3.26).

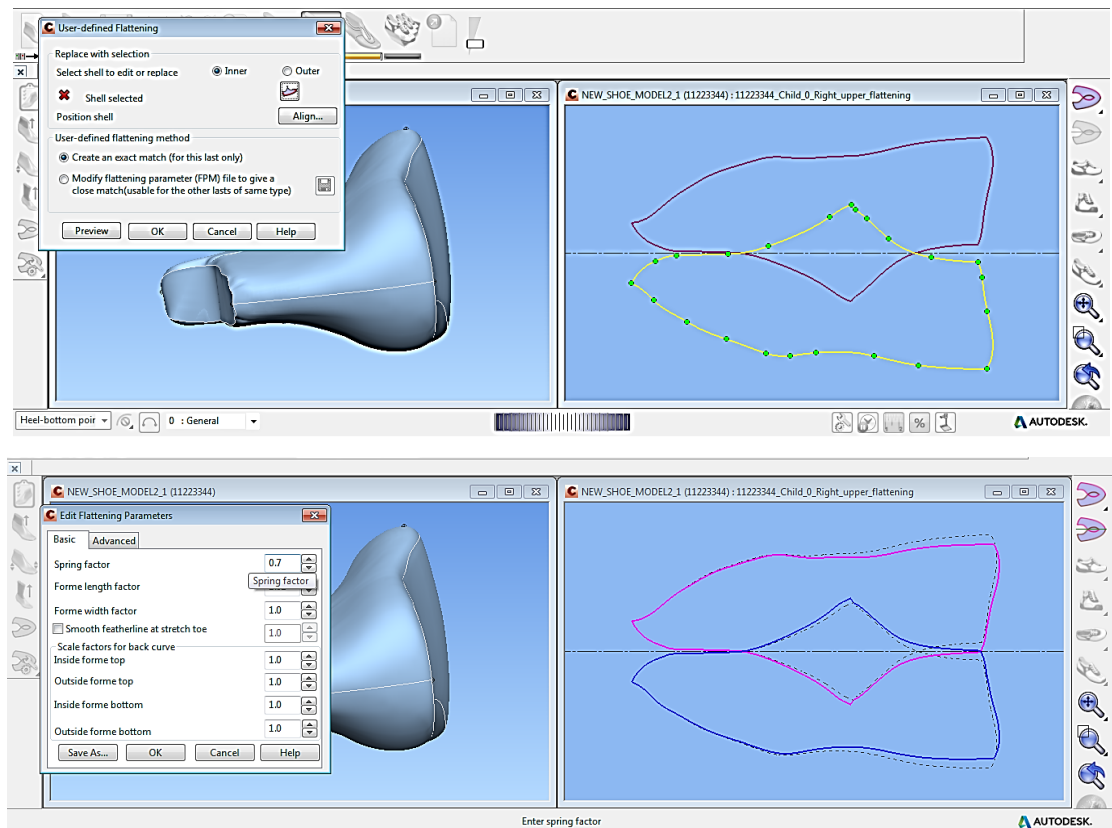


Рис. 3.26. коригування розгортки колодки в ShoeMaker

Висновки до розділу 3

Поставлені в роботі завдання вирішено за допомогою традиційних та сучасних інструментальних методів: контактних та безконтактних методів антропометричних досліджень стоп споживачів, методу SubD, Nurbs 3D моделювання форми взуття та його елементів.

Для розробки ергономічної форми колодки запропоновано використовувати 3D-сканування та метод зворотного інжинірингу, а також технологію персоналізації форми взуття з використанням цифрових інструментів та адитивного виробництва (3D-друку).

Розділ 4. ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ВЗУТТЄВОЇ КОЛОДКИ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВОРОТНОГО ІНЖИНІРИНГУ

4.1. Дослідження методів зворотного інжинірингу для моделювання взуттєвої колодки

Задача експерименту – пошук оптимальних алгоритмів реверсінжиніринга моделі взуттєвої колодки за допомогою універсальних 3д САПР.

Взуттєве виробництво має певну специфіку постійної трансформації 2D у 3D форми та в зворотньому напрямку: 2D малюнок , ескіз або фотографія перетворюється у 3D форму взуттєвої колодки по якій будується 2D модель лекал майбутнього взуття , які на колодці перетворюються у 3D форму готового взуття.

Тому пошук оптимальних правил проектування, реверс-інженіринга, розплющення просторової поверхні колодки не втрачає актуальності.

Традиційно для вирішення складних задач проектування взуття використовують потужні спеціалізовані САПР, які мають широкий діапазон функцій поверхневого та параметричного моделювання. Однак сьогодні не усі виробники масового взуття (особливо в Україні) можуть дозволити собі придбання вартісних продуктів програмної розробки взуття та їх компонентів. Тому в даній роботі ми зосередилися на можливостях доступних стандартних САПР середовищах, які постійно розвиваються та оновлюються.

У практичній роботі виробництва взуття при переході на цифрові технології дизайнерам, проектувальникам та модельєрам доводиться неодноразово вирішувати питання повної або часткової взаємної трансформації 3д та 2д форм. Взаємний обмін цифровими 3д копіями файлів у певних форматах дозволяє краще підібрати ідеальну пару колодка-підощва, розмістити замовлення на виготовлення підощви по вже існуючим формам для лиття, верха взуття по розробленим лекалам з застосуванням систем автоматичного розкрою та шиття.

Пошуки різних практичних алгоритмів вирішення задачі розплющення поверхні подвійної кривизни на професійних інтернет площадках-форумах не дає однозначної відповіді. Але наштовхує на вектор вирішення проблеми. Доволі часто на форумах згадується система САПР Rhino 3D з її інструментом Squish. Слід зазначити, що ця система була розроблена для проєктування поверхонь морських суден, переросла у універсальну систему проєктування, яку дуже активно підтримують та розвивають її користувачі.

У довідці програми RhinoHelp є наступна інформація стосовно принципів розгортання – розплющення:

Squish – це алгоритм, який працює на сітках. Сквиш згладжує сіть, "мінімізуючи зміни в площі граней та зміни довжин гранейних країв" між 3-D сіткою та 2-D сіткою, з урахуванням деяких обмежень.

Наприклад, якщо A,B,C є кутами 3-D трикутника, а a,b,c є відповідними кутами 2-D трикутника, то зміни в довжині ребра дорівнюють

$$d1 = |\text{Відстань}(A,B) - \text{Відстань}(a,b)|$$

$$d2 = |\text{Відстань}(B,C) - \text{Відстань}(b,c)|$$

$$d3 = |\text{Distance}(C,A) - \text{Відстань}(c,a)|$$

$$da = |\text{Площа}(A,B,C) - \text{площа}(a,b,c)|$$

$$DL = d1 + d2 + d3$$

$$DL2 = d1^2 + d2^2 + d3^2$$

$$DA = da$$

$$DA2 = da^2$$

$$D = \text{деяка комбінація } DL, DL2, DA \text{ і } DA2$$

Наведене вище "мінімізація змін у площі та/або довжині країв" означає створення 2-D сітки так, щоб "D" була якомога меншою.

На практиці існують тисячі аспектів і безліч способів мінімізувати D, більшість з яких не мають практичного сенсу. Таким чином, Сквиш обмежує відповідь, щоб запобігти складанню 2-D сітки назад на себе і змушувати певні 3-D точки опинятися в заданих 2-D місцях.

Обрізана поверхня NURBS роздавлюється шляхом роздавлювання щільної сітки поверхні.

Параметри сквішу визначають, як комбінуються DA , $DA2$, $D1$ і $D2$ і дозволяють використовувати більш складні способи розрахунку DA , $DA2$, $D1$ і $D2$, а також допускати ухил у бік розтягування або стиснення.

З вище зазначеного можна зробити висновок, що базовий механізм інструмента Squish працює за правилом «однакових площин». Розплющування цих поверхонь може йти по направляючим, якщо вони не задані, то автоматично використовуються контури форми, які формують об'єкт.

Якщо за об'єкт вирівнювання обирається NURBS або квадрангулярна сітка, то механізм розгортання можна представити приблизно так:

Параметрична область поверхні довільної форми розбивається в напрямках u і v на ряд сегментів на основі співвідношення між довжинами прилеглих до поверхні границь. Параметрична область може бути дискретизована на сітки $N \times N$ або $N \times M$, що відповідають приблизній рівності або нерівності довжин прилеглих до поверхні границь. Дискретна поверхня вільної форми генерується шляхом відображення точок розбиття параметричної області на поверхню (рис. 4.1).

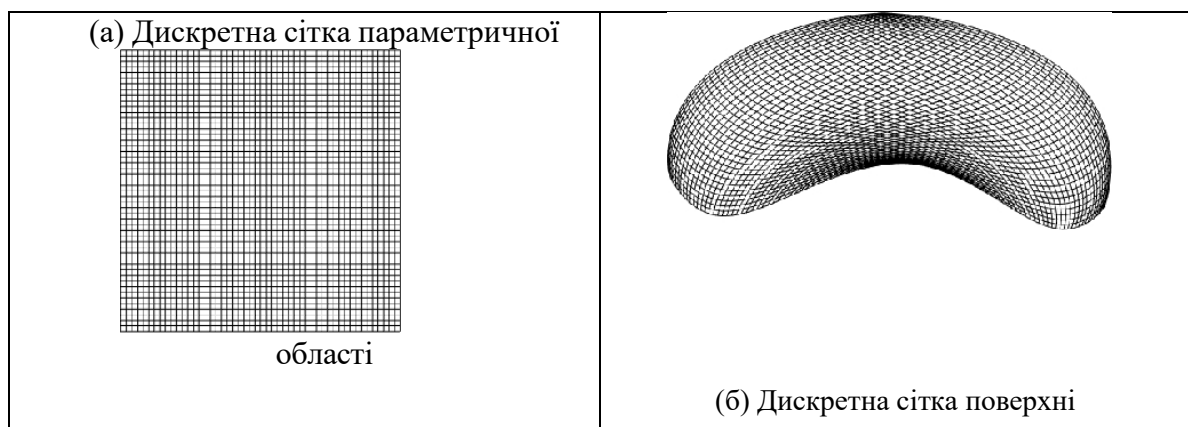
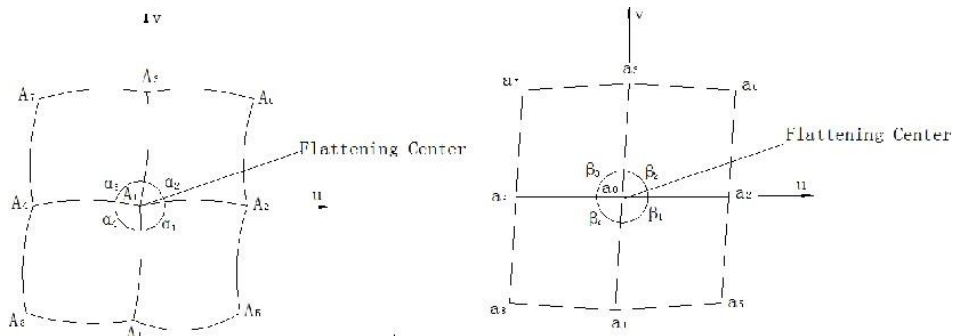


Рис. 4.1 Дискретизація поверхні

Згладжування центральної точки та навколишніх точок. Центральна точка ($u = 1/2$, $v = 1/2$) поверхневої сітки береться за центр сплюснення. Спочатку слід визначити координати точок розгорнутої площини, що

відповідають центру сплюснення та навколишнім 8 точкам на поверхні, як показано на рис. 4.2.



(а) До вирівнювання

(б) Після вирівнювання

Рис. 4.2. Згладжування центральної точки та навколишніх точок.

Згладжування сіток цілих регіонів. Вся поверхня розбивається на чотири області при визначенні центру сплюснення поверхні, після чого області будуть сплюснені. Після згладжування $A(0)$ та навколо 8 точок, точка $A2$ знаходиться праворуч від точки $A0$, що використовується як центр вирівнювання навколишніх точок за принципом однакової площини (Рис. 4.2). Всі сітки будуть вирівняні шляхом повторення вищеописаних кроків.

Цей метод враховує ряд факторів, таких як форма поверхні та співвідношення між довжинами суміжних границь при дискретизації поверхні. Поверхню можна розбити на сітки $N \times M$, так що метод також підходить для вузьких поверхонь.

Геометричний метод вирівнювання, заснований на принципі однакової площі, дозволяє уникнути утворення тріщин і перекриттів у процесі вирівнювання поверхні. Крім того, цей метод простіше реалізувати і він є більш адаптивним у поточному випадку.

Більшість дослідників згодні з тим що на якість розплюснення впливає якість сітки (три чи квадрангулярної) яка формує об'єкт.

Шляхи отримання оптимальної сітки можуть бути різними:

- перетворення NURBS по ізометричним лініям U та V кривим, які контролюють поверхню,
- шляхом конвертації NURBS у MESH стандартними інструментами,

- перетворення завдяки інструментам роботи з SUBD та інші.

Наразі немає чіткої концепції, яка сітка краще розгортається – трикутна чи чотирикутна. Дослідження у світі по цьому поводу тривають. .

У нашому дослідженні ми більше зосередимося на розгортанні «квадріангулярних» сіток з NURBS або MESH поверхонь. Враховуючи факт зміни габаритів та площі об'єктів у процесі перебудови та трансформації у різні види геометрії, обов'язковим було правило контролю габаритів та площ розгортаємих поверхонь.

4.2. Шляхи ревес-інженірінгу взуттєвої колодки

Сучасні універсальні програми CAD проектування мають певні вже стандартні інструменти NURBS та полігонального моделювання та постійно розширюються за рахунок додавання нових плагинів та інструментів, алгоритмів, які розширюють можливості інженерів та дизайнерів у реалізації певних задумів (рис. 4.3.).

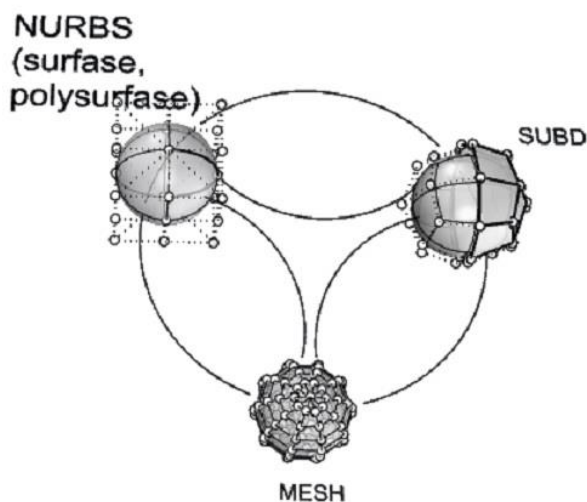


Рис. 4.3. Можливості перетворення геометрії у сучасних САПР системах.

Треба розуміти що взаємні переходи –перетворення геометрії служать певним конкретним цілям, а саме

1. NURBS у SUBD - для послідуочого легкого полігонального моделювання

2. SUBD у NURBS - для точного моделювання (обрізання, логічні булеві операції)
3. SUBD у MESH - для використання MESH інструментів у Grasshopper ;
-для експорту та рендинга
4. MESH у SUBD - для використання у органічному сглаженому (концептуальному) моделюванні;
- для послідуєчого перетворення у NURBS поверхні (поліповерхні)
5. NURBS у MESH - для використання «mesh» інструментів у Grasshopper;
- для перетворення на полегшену геометрію;
6. MESH у NURBS - для використання інструментів «поверхня» у Grasshopper;
- для експорту у рендінг.

Частиною САПР Rhino 3D 7 став розділ параметричного проектування Grasshopper (Грассхопер). Розробники Grasshopper дають таку трактовку –це графічний редактор алгоритмів тісно пов’язаний з інструментами 3D-моделювання Rhino. Grasshopper не потребує знання програмування чи написання скриптів, але все одно дозволяє дизайнерам створювати генератори форм від самих простих до вражаючих [115].

Генератори форми дозволяють отримувати геометрію не викреслюючи її у ручну.

Саме поява цих двох інструментів та редакторів моделювання роблять можливим відносно простим вирішення раніше дуже складних задач.

Наразі описано 2 алгоритми перетворення відносно простих полігонів mesh у NURBS полі поверхні. Також складені генератори перетворення полиповерхонь у цілісну поверхню.

Перший шлях вирішення задачі це – деконструкція полігонів сітки з отриманням хмари точок та побудові по них поверхні інструментом «по хмарі точок» (рис. 4.4.).

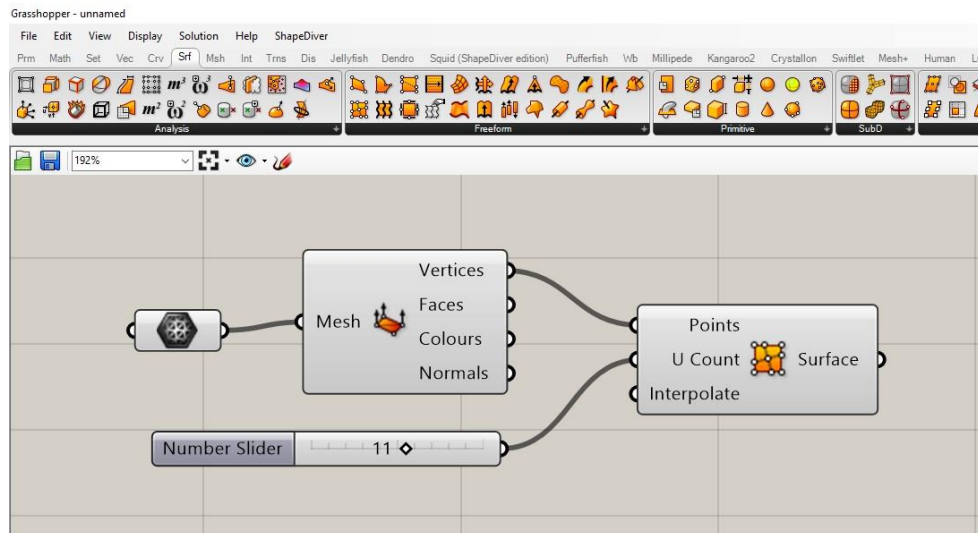


Рис.4.4. Алгоритм переводу геометрії сітки у поверхню

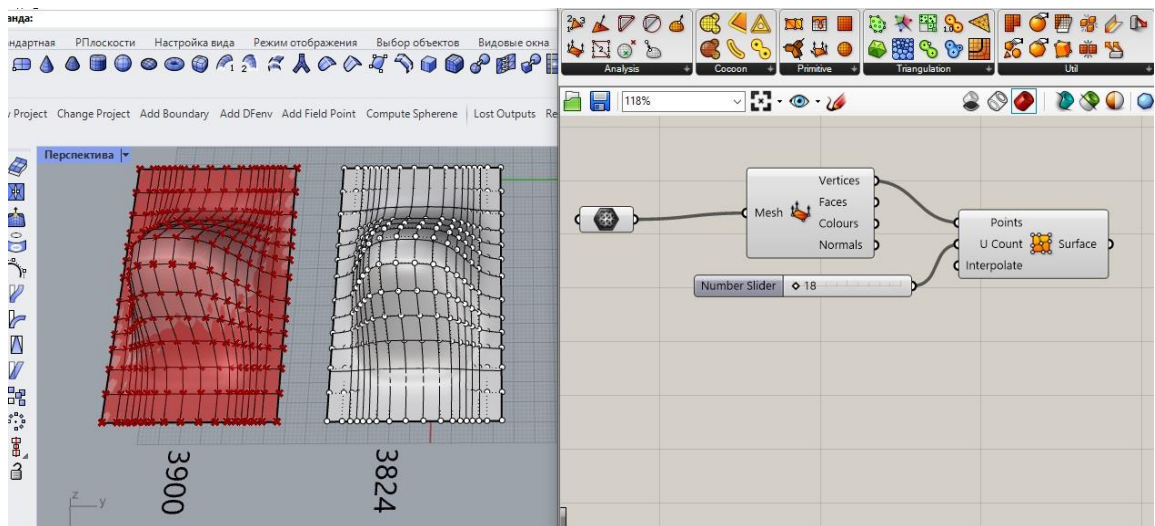


Рис.4.5. Приклад генерації поверхні (посередині) з сітки (зліва) та алгоритм (справа) .

Слід зауважити, що цей генератор (алгоритм) гарно працює з відносно простою геометрією з полігонами чотирикутної форми.

Перетворення геометрії mesh у NURBS призводить до зменшення розмірів останнього.

Другий шлях вирішення задачі –провести демонтаж сітки та демонтаж поверхонь з послідовним запуском функції побудови поверхні по 4 точкам (рис. 4.6). На виході повинні отримати безліч (множество) поверхонь, які можна з'єднати у поліповерхню.

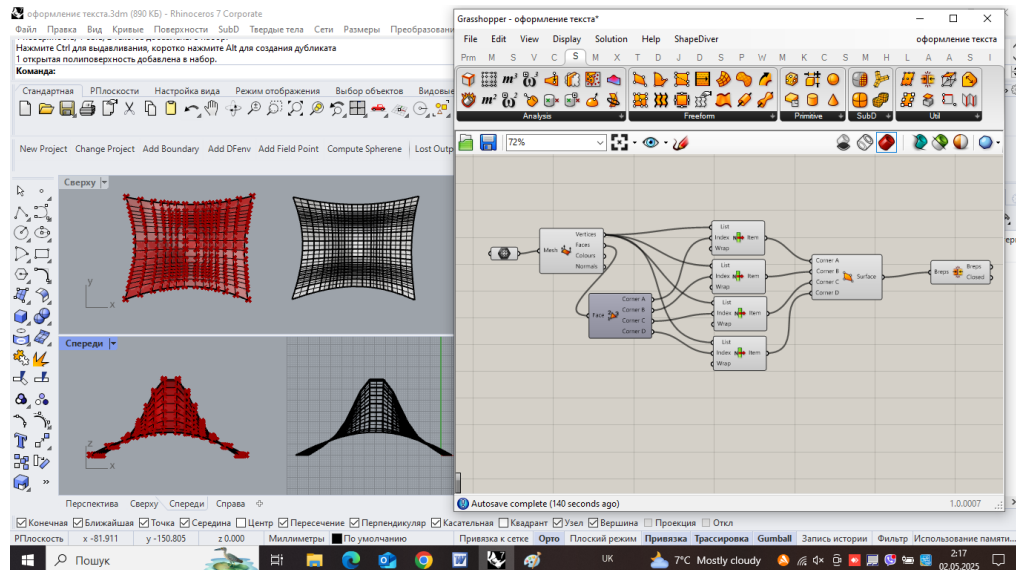


Рис. 4.6. Приклад генерації поліповерхні (посередині) з сітки (зліва) та алгоритм (справа) .

Отриману таким чином полі поверхню можливо надалі використовувати зі стандартними інструментами NURBS моделювання.

Але для перетворення її у цільну поверхню необхідно здійснити такі дії:

1. перебудувати шляхом залучення інструментів роботи з кривими та побудові по них нової коректної поверхні інструментами LOFT (по сеченіям), Curves network (по сітці кривих), SWEEP 2 (по 2 направляющим);

2. перебудувати з залученням інструментів Grasshopper (рис. 4.7). На практиці це доволі складний алгоритм зі складанням списків даних, фільтрацією однакових значень, вилученням дублікатів даних, отримання правильного списку даних, побудові по ним кривих з послідууючою побудові по ним поверхні та тд.

Складність вирішення цього завдання полягає у тому, більшість точок усередині поліповерхні мають однакові координати. Ця координата має по факту три або чотири точки, які є вузловими точками для кривих, які формують поліповерхні. Для того щоб провести через цю координату

перетинаючися криві, які стануть основою параметричних кривих по u чи v цільної поверхні, треба видалити зайві дублюючі точки.

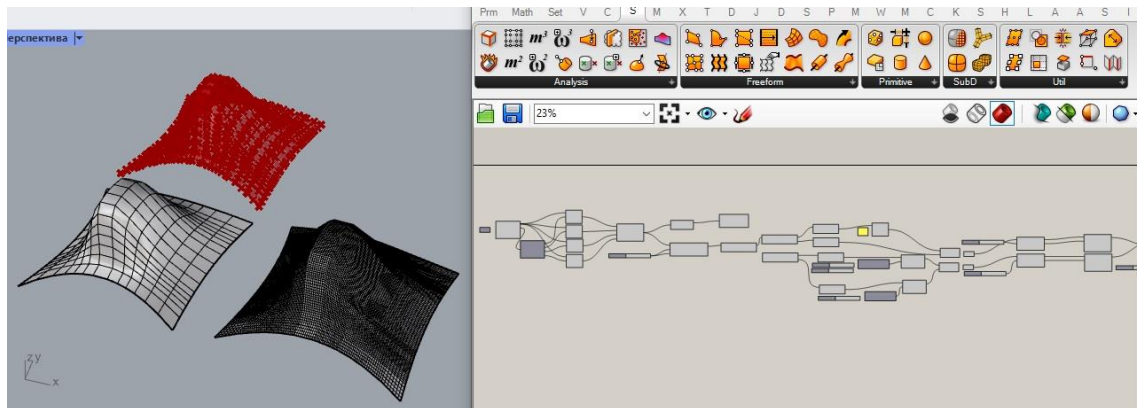


Рис.4.7. Приклад перетворення квадрангулярної сітки з залучення алгоритмів Grasshopper у NURBS поверхню по сітці кривих.

Розглянемо кілька способів ревес-інженіринга сканованих колодок.

1 Спосіб - автоматичне перетворення об'єкта у SUBD.

Доволі простим методом отримання квадрангульованої поверхні з MESH або NURBS об'єкта є стандартний інструмент Quad Remesh розділу (закладки) SUBD.

Для отримання коректної квадрангульованої сітки слід обов'язково спроектувати на об'єкт декілька кривих, які будуть враховані при перебудові об'єкта. По нашим розрахункам, слід задавати не більше 500 полігонів та адаптивні розміри у діапазоні біля 90%. Для подальшої роботи з перебудованим об'єктом інструментами SUBD, обов'язково задати конвертацію нового створюваного об'єкта у SUBD. Якщо не виконати останню дію, то побудований об'єкт буде квадрангульованою полігональною сіткою та буде оброблятися інструментами MESH (рис. 4.8).

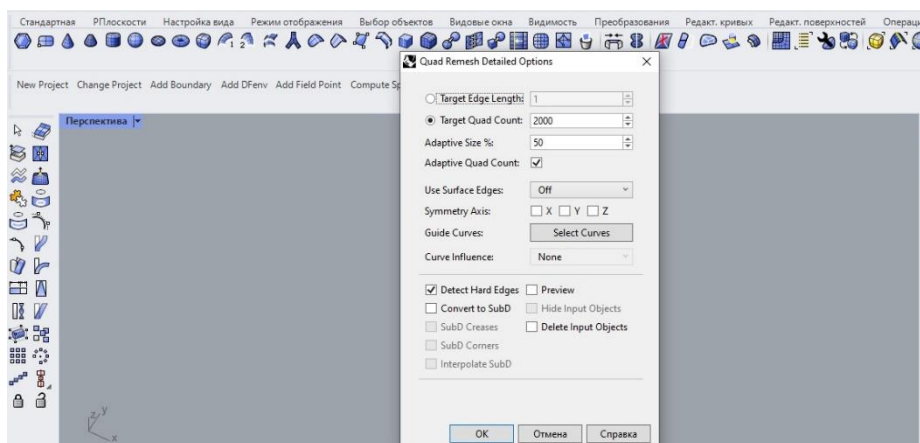


Рис. 4.8. Діалогове вікно автоматичного створення квадрангульованої структури об'єкта з/без конвертації у SUBD.

Побудовані об'єкти мають дещо менші розміри й відповідно і площі. Є певні дефекти сітки (рис. 4.9). Зустрічаються дефектні триангульовані поверхні/грані, а також поверхні/грані з більшою кількістю ребер, аніж 4.

Також SUBD об'єкт має більш згладжену форму, згладження присутні на ребрах між тілом колодки та верхньою площадкою та устілочною поверхнею.

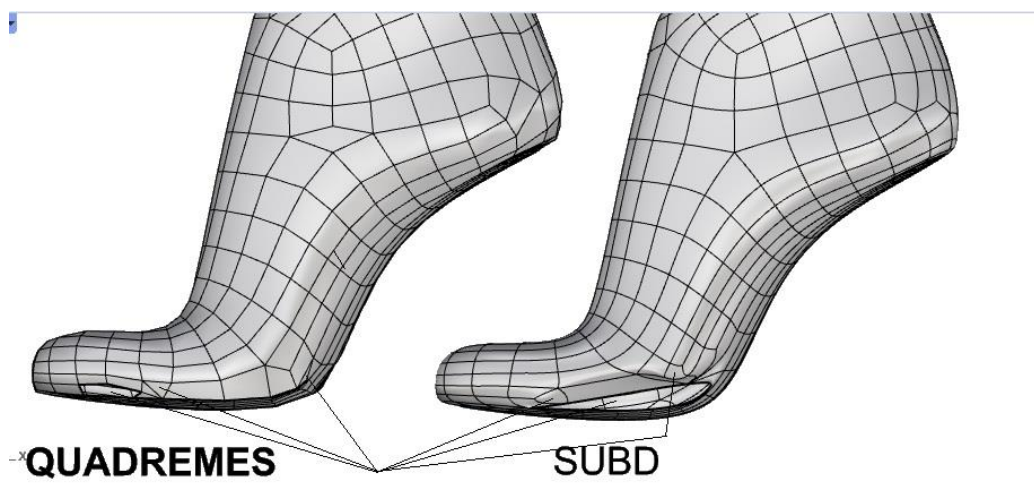


Рис. 4.9. Стрілками вказані дефектні поверхні та грані при недостатній кількості завданих полігонів.

Зміни розмірів об'єктів при заданні автоматичного перетворення об'єкта з триангулярною сіткою у об'єкт SUBD вивчалася з застосуванням інструментів аналізу «габаритний контейнер» та «площа».

Завдавалися наступні параметри перетворення: кількість полігонів 600, адаптивний розмір 50%, 90%, 90% з завданням направляючих кривих, 100% .

Отримані результати у вигляді % зведені у приведеній таблиці:

Таблиця 4.1. Зміни при перебудові геометрії колодки при перебудові геометрії з триангулярної MESH у SUBD.

	Габарити при автоматичному перетворенні	Площа об'єктів при автоматичному перетворенні	Площа об'єктів при приведенні до габаритів вихідної MESH
Вихідна MESH	100%	100%	100%
600 полігонів та 50% адаптації	96,158	96,530	102,102
600 полігонів та 90% адаптації	97,041	98,255	101,521
600 полігонів та 90% адаптації з напрвляючими кривими	96,823	98,001	101,592
600 полігонів та 100% адаптації	97,342	98,153	101,410

Недоліки методу:

- закладений алгоритм отримання SUBD об'єкта не співпадає з очукавіними завдаєними результатами. На фоні незначної зміни (менше 4%) зменшення об'єму та площі об'єкту, реально маємо більшу у 2.5-2.7 рази більшу кількість граней, що ускладнює подальшу роботу ,
- маємо малий контроль за формою окремих ділянок, немає чітких переходів з однієї поверхні на іншу (наприклад, зникає чіткий перехід між тілом колодки та слідом , тілом та верхнею площадкою).

- велика кількість вершин , ребер та граней утруднюють послідовну роботу з об'єктом.

Для більш коректної роботи через інструмент Quad Remesh розділу (закладки) SUBD , краще розділити модель колодки на 4 частини, причому тіло колодки по лінії сіметрії. Кожну окрему частину обробити інструментом Quad Remesh SUBD. Кількість задаваних граней на бокові частини тіла колодки приблизно по 60, на устілку 14-16, верхню площадку 8-10. Отримані частини реконструйованої колодки зшити інструментами «зшити ребра/вершини SUBD», «мост SUBD». Для моделювання чіткої грані між тілом колодки та нижньою та верхньою частинами використовувати інструмент «додати складку», «вставити контур з ребер SUBD».

2 спосіб . Побудова майстер–колодки інструментами SUBD з послідовною адаптацією її до вихідної колодки.

Дуже простий та відносно малий по трудозатратам спосіб. У деяких випадках працює краще та швидше ніж перший спосіб – автоматичної генерації SUBD.

Вихідна модель або скан колодки служать базовою формою, навколо якої йде побудова SUBD стандартними інструментами.

Для відтворення форми можна скористатися інструментом «створення SUBD паралепіпеда» з вихідною кількістю граней по вісям x, y, z по 2. Процес відтворення поверхні нагадує скульптинг. Для створення об'єкту використовуються інструменти: «видавлювання граней та ребер», «зшити ребра/вершини SUBD», «мост SUBD» , «додати складку», «видалити складку», «вставити контур з ребер SUBD», операції з точками / вершинами граней, операції з контрольними точками та інші (рис. 4.10).

Слід зауважити , що об'єкти SUBD можуть відображатися у 2 робочих режимах: згладженій та пласкій формі. Придання загальних контурів об'єкта та грубе моделювання/редагування краще проводити у пласкому режимі. Контроль точності форми та тонке редагування – у згладженій формі.

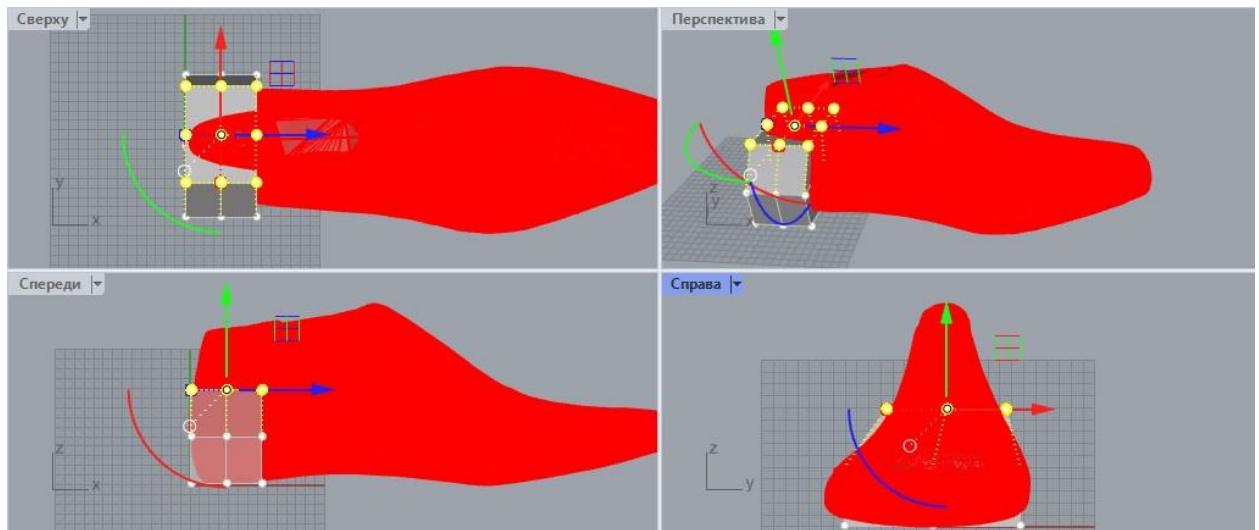


Рис. 4.10. Побудова колодки SUBD паралелепіпедом з застосуванням інструментів операції з контрольними точками.

Важливо відмітити, що краще оперувати з гранями, вершинами граней, контрольними точками SUBD. Необхідною умовою задання форми буде правило використання невеликої кількості згенерованих граней. Невеликою кількістю граней та контрольних точок легко оперувати, легко підганяти до форми потрібної геометрії.

При моделюванні (реверс-інженірінг) взуттєвої колодки на низькому каблучці достатньо згенерувати до 120 граней (рис. 4.11). Приблизно цієї кількості достатньо для отримання гарного результату.

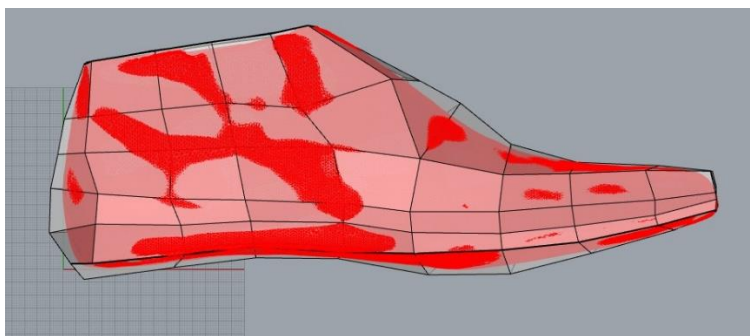


Рис. 4.11. Вигляд змодельованої SUBD колодки. Для надання форми використано не більше 120 граней.

Слід зауважити що для попереднього концептуального моделювання для сліду колодки достатньо 16 граней, верхньої площадки – 10, тіла колодки

– біля 80- 100 граней. Розподіл кількості граней між п'яточно-геленочною частиною та пучково-носковою – рівний.

Надання згладженості контурів п'яточної та носочної частині досягається шляхом переміщення вершин граней, надаючи їм форму неправильного ромба (рис. 4.12, 4.13). У деяких випадках виникає потреба додавання точок на ребрах, перетворюючи грані у п'яти або шестигонні.

При моделюванні треба чітко слідити за тим, щоб не виникали грані трикутної форми. Краще віддати перевагу п'яти або шестигранній грані.

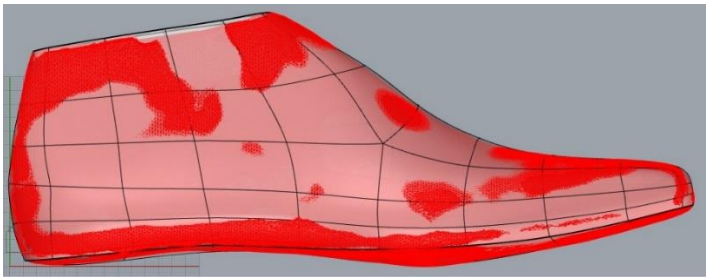


Рис. 4.12. Вигляд змодельованої SUBD колодки у згладженому режимі.

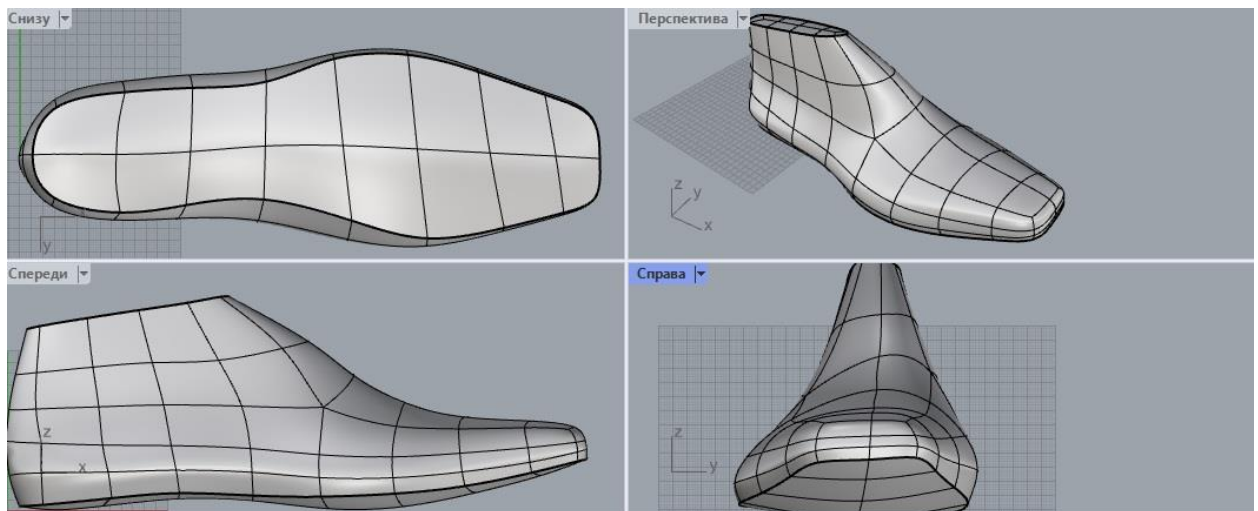


Рис. 4.13. Вигляд змодельованної SUBD колодки.

Для остаточної чіткої підгонки до вхідної форми , можна використати інструмент «підрозділити SUBD». Це майже у 4 рази збільшить кількість граней , контрольних точок та вершин та можливість попрацювати на проблемних ділянках модельованого об'єкта.

Таким чином є можливість наблизитися до дуже точного відтворення форми.

Інструменти SUBD дозволяють перетворити SUBD об'єкт у NURBS . При прямому перетворенні, як правило утворюється поліповерхня.

Отримана поліповерхня обробляється інструментами NURBS, взаємодіє з NURBS, але не може бути розгорнута або розплющена як цільний об'єкт, тільки окремими площинами. Або для наступної роботи по розгортанню поверхні, поліповерхня повинна бути перебудована інструментами “поверхня по сітці кривих», «по поверхні по 2 напрямляючим».

Прямих механізмів перетворення SUBD у MESH у сьомій версії Rhino немає. Отримати сітку для подальшої роботи можна кількома способами:

- експортом SUBD у формат STL. У цьому випадку отримуємо дуже плотну триангулярну високополігональну сітку. Триангулярна сітка може бути розплющена стандартними інструментами Rhinoceros.
- з застосуванням стандартного нода «Mesh from SubD» Grasshopper у вкладці «Surface» (рис. 4.15) можна отримати квадріангулярну сітчасту структуру для наступної роботи. Триангулярна сітка може бути розплющена стандартними інструментами Rhinoceros.

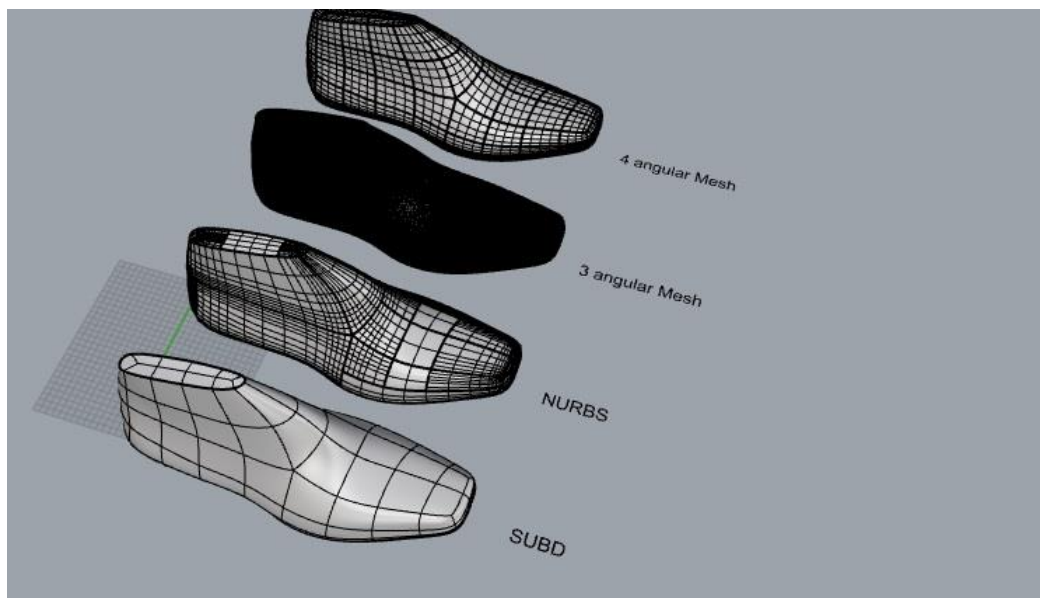


Рис. 4.14. Перетворення SUBD у NURBS поліповерхню, триангулярний та квадріангулярний полігональні сітчасті структури.

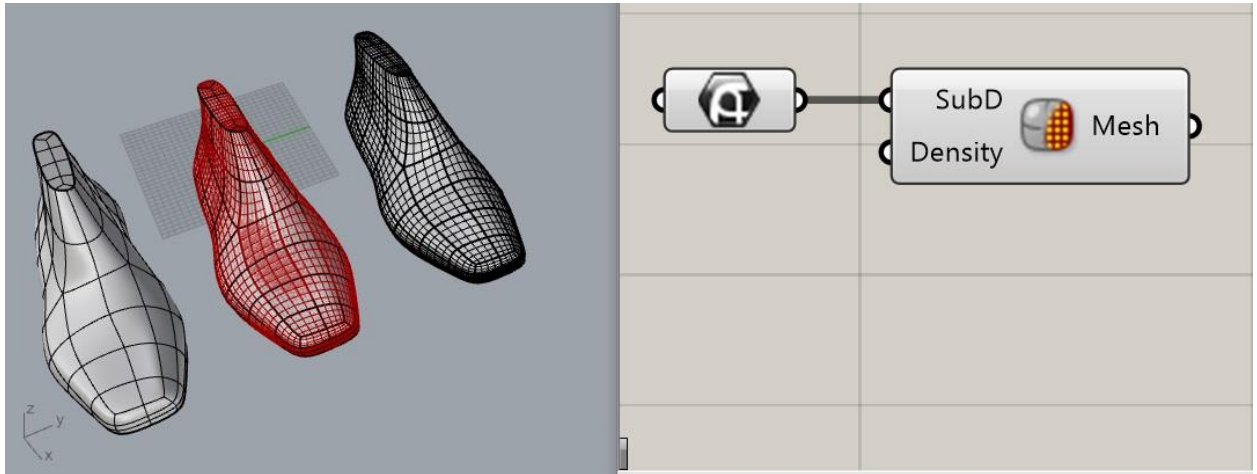


Рис. 4.15. Механізм перетворення SUBD у квадріангулярну сітку з задіянням інструментів Grasshopper.

3 спосіб Опис поверхні інструментами NURBS.

Цей метод можна розглядати як самий класичний.

Хоча реконструкція тіла колодки з застосуванням NURBS кривих у практичному плані не представляє складнощів, але має багато нюансів.

Процес розпочинається з нанесення на взуттєву колодку певної кількості кривих шляхом їх проєкції.

Криві повинні бути розташовані у певних ділянках у певній кількості, щоб отримана по них поверхня чітко відтворювала контури реконструйованої колодки.

При застосуванні цього метода реверс-інженірінга слід притримуватися певних умов:

1. криві повинні бути розташовані у певних місцях, щоб створена по ним частина поверхні чітко відтворювала реконструйовану ділянку;
2. Кількість кривих по U та V повинна бути оптимальною, щоб створена по них поверхня не мала зайвих дефектів;
3. Кількість точок, які контролюють умовно горизонтальні та вертикальні криві повинні мати однакову кількість у своїх напрямленнях. Кількість точок, які описують криву повинно бути мінімально достатнім, щоб була можливість легко керувати кривою.

4. Якщо реконструкція йде по моделі з щільною триангулярною сіткою, краще виконати роботи по зменшенню кількості полігонів без втрати габаритних розмірів колодки.
5. Перед початком реконструкції, модель колодки бажано розрізати на складові: слід, тіло та верхня площадка. Отримані частини рознести по окремих листах без зміни координат. Криві., які будуть проєктуватися на складові колодки теж бажано розмістити на окремому листі. Так краще буде керувати процес реверс інженерінга не заплітавшись у вихідній та створюваній геометрії.

Проектування NURBS поверхонь у Rhinoceros

На скан колодки у різних проєкціях потрібно спроектувати кілька ліній: лінію передньої та задньої сіметрії, лінії контура п'яти, лінії початку склепінь, лінію кінця склепінь, по дві лінії, що контролюють зовнішній та внутрішній пучки, дві лінії, що контролюють форму параболи носка. Загалом на кожній боковій частині колодки повинно бути 8-10 ліній.

Потім приховуємо скановану колодку та проводимо коректировку отриманих секційних ліній.

Якщо модель колодки попередньо була розділена на три частини, то коректуємо криві на кожній частині окремо.

Якщо колодка не була розділена, то використовуючи інструмент «розділити- точка» розділяємо криві шляхом розтошування точок місць переходу кривих з тіла (верха) колодки на підошвену частину та верхню площадку.

Видаляємо зайві фрагменти кривих, деякі з'єднуємо у цільну криву. Отримані кривій секцій мають велику кількість точок та ступінь кривізни 1. Для отримання гладких кривих потрібно їх перебудувати. Для цього використовують інструменти «правка – перебудувати» або «перебудувати криву у неоднорідну».

Перебудувати криві, використовуючи наступну кількість контрольних точок (табл. 4.2).

Таблиця 4.2. Кількість контрольних точок для перебудови кривих.

Частина колодки	Число контрольних точок
Верхня задня секція	5
Фронтальна радіальна	15
Кроссекція підшви	3
Централь ось	10

Вид кривої, що описує форму носка може бути втрачений, але вона підлягає окремій корекції пізніше.

Використовуючи інструменти «крива інторполяція по точках» у інструментах «криві» та прив'язку «кінець» у панелі об'єктної прив'язки, створити верхню та нижню секційні лінії (рис. 4.16). Верхня буде виступати краєм верхньої площадки, нижня – краєм підшви.

Покращення якості лінії, що описує край підшовеної частини, має велике значення для отримання гарного результату реверс-інженірінга.

Для цього використовуємо інструменти по роботі з контрольними точками у вкладці «правка» - «контрорльні точки» «дати вузол». Додаючи або видаляючи потрібну кількість точок на криву, досягаємо необхідної геометрії кривої.

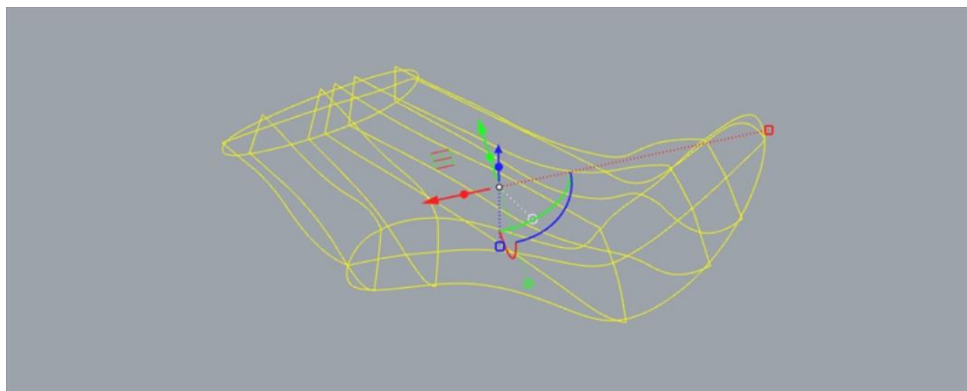


Рис. 4.16. Отримані криві для послідууючої роботи

Створення поверхні тіла колодки.

Цей етап складається з двох підетапів:

1. Створення попередньої поверхні
2. Використання попередньо створеної поверхні для додання додаткових кривих відтворення особливостей остаточної поверхні.

Створення попередньої поверхні: вмикаємо контрольні точки на кривих, якими описувалися секції колодки, та переміщуємо їх кінечні точки до кривих, які описують ребра верхньої площадки та підошви. Для цього використовуємо інструмент «рух» у вкладці «трансформація». Використовуючи інструмент «поверхня по сеті кривих» з вкладки «поверхні» створюємо попередню поверхню, використовуючи усі створені криві та запропонований діалог.

Отриману поверхню можна порівняти з поверхнею сканованої колодки, задіяти інструменти вивчення кривізни поверхні з вкладки «аналіз» (рис. 4.17).

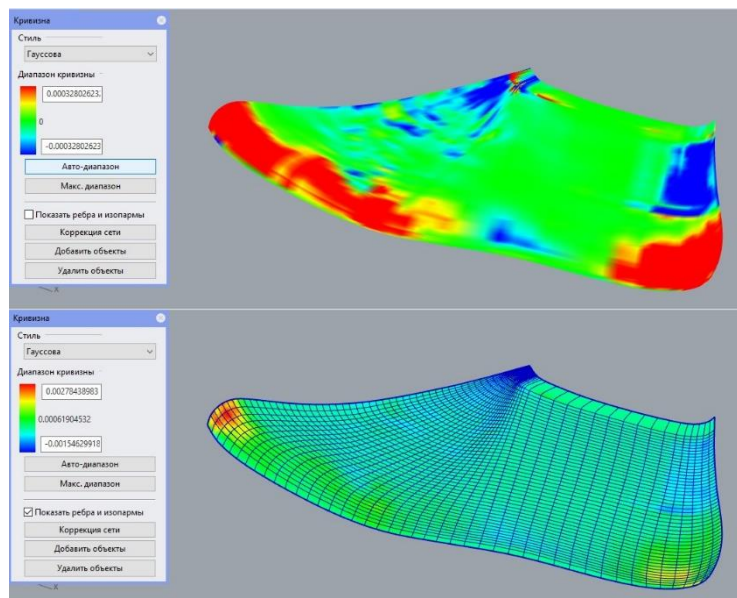


Рис. 4.17. Використання інструмента аналізу кривізни поверхні «Гаусова кривізна»

Взаємодію поверхонь сканованої колодки та попередньо створеної колодки можна дослідити завдяки інструменту «додати площу відсікання» з

вкладки «режим відображення». Завдяти цьому інструменту можна дослідити якість умовної конгруентності MESH та NURBS поверхонь та намітити шляхи виправлення невідповідностей: корекція кривих або корекція об'єкта. Останній можна коректувати шляхом переміщення контрольних точок, перебудови щільності сітки ізопараметричних кривих або задіянням інструменту «редагування керуючої сітки» з вкладки «трансформація». Покращення попередньо побудованої поверхні шляхом додання додаткових кривих. Розташовуємо об'єкт у одному з бокових вікон та додаємо на нього пару інтерполірованих по точках кривих, які послідовно проєціюємо на поверхню та перебудовуємо від 10 до 20 точок згідно алгоритмів описаних вище.

Використовуємо інструмент «створення поверхні по сітці кривих» для отримання нової поверхні.

При необхідності перебудови, алгоритмічні дії можуть бути повторені.

Створення підшвної поверхні колодки.

Використовуємо раніше отримані криві кроссекцій підшвної частини, аксіальної кривої підшвної частини та відредаговану криву контура підшви. З останньої кривої робимо копію «перетворення»- «копіювати»-«копіювати по місцю». Завдяки інструменту «перетворення» - «рух» переміщуємо кінцеві точки кроссекційних та аксіальної кривої на дублікат кривої контура підшви. Аксіальною кривою розсікаємо дублікат кривої контура підшви. Усі отримані криві використовуємо для побудови поверхні інструментом «створення поверхні по сітці кривих».

Отриману поверхню тіла колодки та підшви колодки інструментом «з'єднати» об'єднуємо у єдину відкриту поліповерхню.

В середовищі PowerShape доступні такі способи створення поверхні колодки на основі сканованої триангульованої сітки:

- 1) Поверхня із сітки кривих - будується по граничним кривим, що перетинаються між собою;
- 2) Поверхня по окремих кривих – будується по ряду поперечних або

продольних кривих одного виду;

3) По напрямній – поверхня будується по двох кривих – формоутворюючій та направляючій;

4) По двох напрямних – поверхня будується від одної до другої формоутворюючої по направляючій;

5) Поверхня із трикутників – будується на основі трикутної сітки та граничних кривих (рис. 4.18).

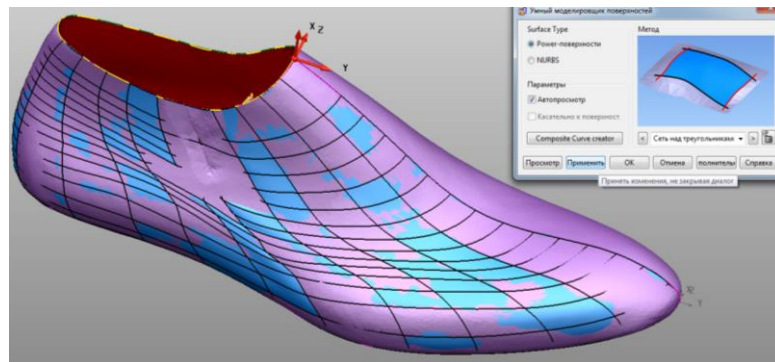


Рис. 4.18. Інтерполювання поверхні колодки по сітці трикутників сканованої поверхні

При спробі побудови суцільної поверхні колодки стикнулися з складностями описання поверхні на ділянках великої кривизни. Для коректної побудови поверхні колодки її рекомендовано розділити на такі сегменти (Рис. 4.19):

- Поверхня сліду
- Верхня поверхня колодки
- П'яткова частина внутрішня
- П'яткова частина зовнішня
- Геленково-пучкова частина
- Носкова частина

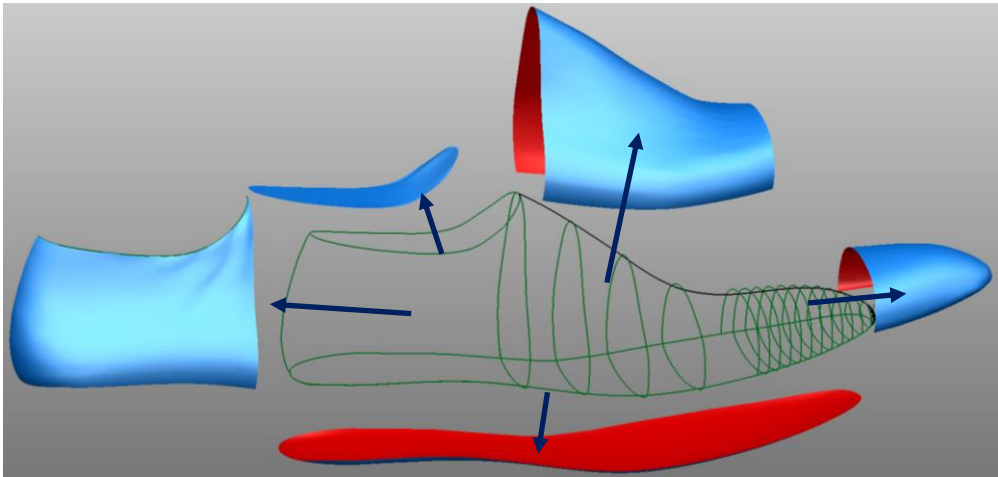


Рис. 4.19. Сегментація поверхні колодки для подальшого інтерполювання

Кожна з цих ділянок далі може бути інтерпольована поверхнею на основі полігональної сітки, поверхнею по окремих кривих тощо. Носкова частина може бути побудована прямим моделюванням на основі потрібного дизайну та граничних контурів.

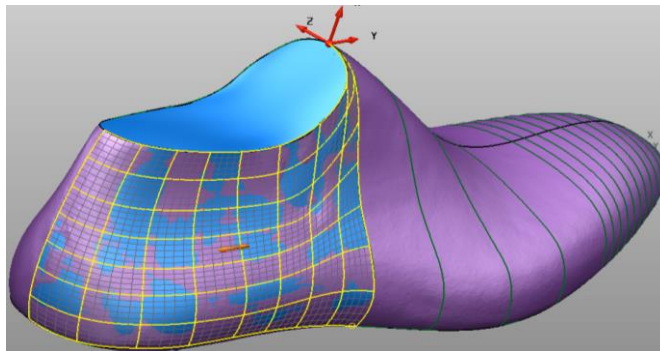


Рис. 4.20. Інтерполювання фрагменту поверхні колодки з прив'язкою до полігональної сітки.

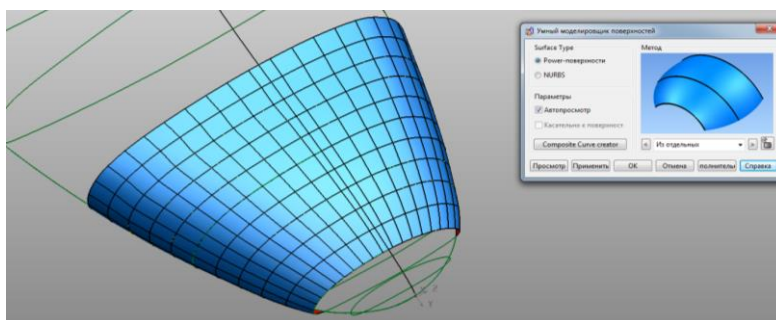


Рис. 4.21. Побудова носкової частини колодки.

Інтерпольована поверхня п'ятково-геленкової частини колодки може бути базою, на якій моделюється нова форма носка при створенні нових форм колодок (рис. 4.22).

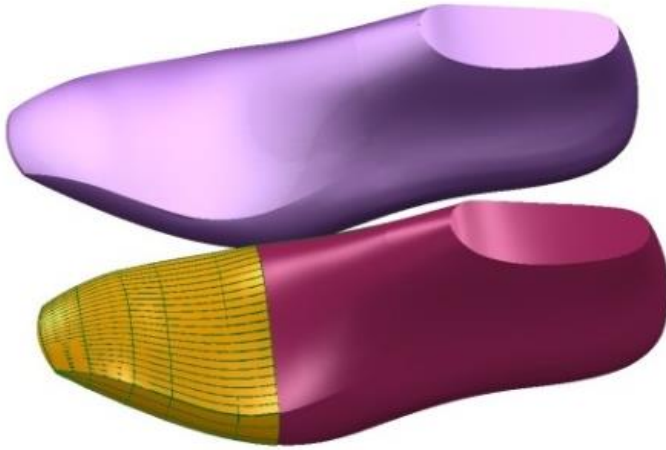


Рис. 4.22. Моделювання носкової частини колодки на базі стандартної задньої частини колодки.

4.3. Розробка параметрів форми вдосконалених колодок

Взуттєві колодки, які сьогодні використовують українські виробники, мають різні параметри, досить випадкові та не виправдані з точки зору масових антропометричних досліджень. Таким чином, після порівняння однієї з популярних колодок, що використовується місцевими виробниками, з параметрами стоп, обхватні параметри яких перевищують середні показники, ми бачимо, що форма і розміри колодки не відповідають антропометрії цих стоп (рис. 4.23).

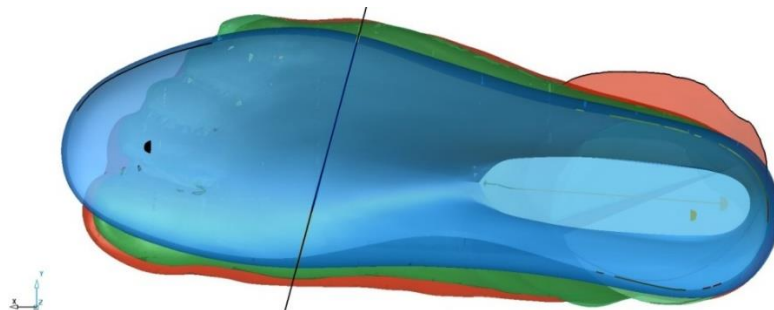


Рис. 4.23. Порівняння 3д моделей широкої стопи з стандартною колодкою.

Складність маніпулювання з параметрами незакономірної просторової 3д форми колодки вимагають визначення двохмірного базису, який використовуватиметься для узгодження 3д параметрів.

Таким базисом є контур сліду колодки, який є основою для проєктування всієї форми колодки та визначає правильність фінальної спроектованої форми.

Порівняння контурів сліду більшості колодок, що застосовуються для виробництва взуття масового виробництва, з окремими плантограмами досліджених стоп, параметри яких близькі до середніх по вибірковій сукупності, продемонстрували невідповідність як антропометричній будові стопи, так і вимогам нормальної біомеханіки (рис. 4.24). Зокрема, в більшості випадків спостерігалися невідповідності у ділянці 1 пальця, в зоні зовнішнього пучка та мізинця. Причому, при опитуваннях споживачів стосовно зручності стандартного взуття, ці ділянки як правило не викликають радикальних нарікань. Це можна пояснити тим, що переважна більшість споживачів просто звикла до подібної форми взуття, адже вона притаманна більшості стандартних та елегантних моделей. Тим часом постійне носіння взуття такої форми призводить до поступової деформації, зокрема першого пальця, викликаючи Халлюкс вальгус. Особливо це явище характерне для жінок. По-перше, у жінок підвищена схильність до такої деформації, по-друге, жіночі колодки мають як правило більш нераціональну форму, порівняно з чоловічим взуттям.

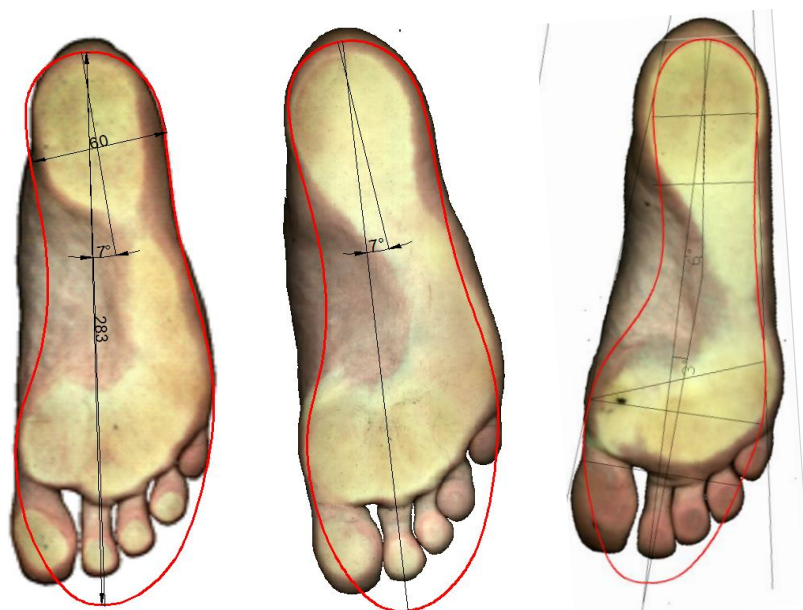


Рис. 4.24. Порівняння контурів сліду стандартних колодок з плантограмами стоп досліджуваних споживачів.

Державний стандарт регламентує розмірний ряд взуття, яке випускається однакової ширини. Чоловіки з широкими стопами, які спостерігаються у понад 15% з них (за результатами антропометричних досліджень), змушені шукати взуття спеціальних виробників.

Отже, виділивши 8 стоп широкої повноти, ми дослідили їх середні параметри (див. табл. 4.3). Крім того, розраховували параметри середньої стопи, встановленої на ортез (вставну анатомічну устілку). На основі отриманих даних розраховано параметри вдосконаленої колодки широкої повноти (Рис. 4.25), яка задовольнить вимоги більшості представників цільового сегменту з урахуванням необхідності використання додаткових вкладних пристосувань.

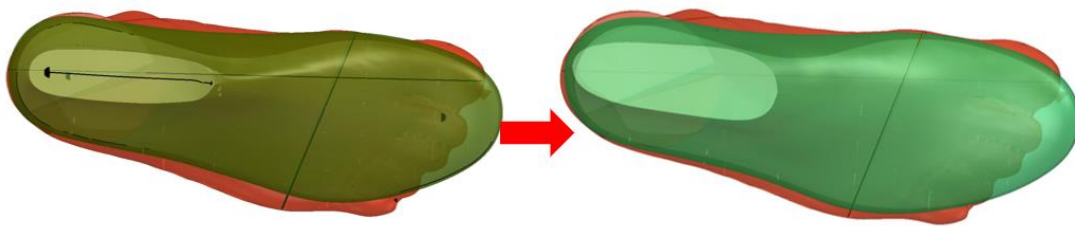


Рис. 4.25. Порівняння широкої форми стопи з реальною стандартною та вдосконаленою колодкою

Таблиця 4.3. Вихідні дані для проектування та результуючі параметри вдосконаленої форми розробленої колодки

Антропометричний параметр	Параметр стандартної колодки відповідного розміру	Середні параметри, розраховані по широким стопам досліджуваної сукупності	Середні значення параметрів стоп з урахуванням вкладних ортопедичних устілок	Параметри нової вдосконаленої колодки
Довжина стопи Д	278	273.9	278	278
Обхват в ділянці пучків О пуч	252	263.8	260.8	265
Короткий косий обхват Ок	350	352.4	350.1	375
Обхват по середині стоп Ос	270	270.9	280.4	282
Ширина п'ятки Шп	61	64.5	62.2	64
Ширина пучків Шпуч	99	108.3	105.4	104

Тому в даному проекті було поставлено задачу розробити нові форми взуттєвих колодок для ергономічного взуття підвищеної комфортності, які відповідають антропоморфологічним параметрам стоп цільового сегменту споживачів. Алгоритм процесу розробки нових форм колодок представлено на Рис. 4.26.

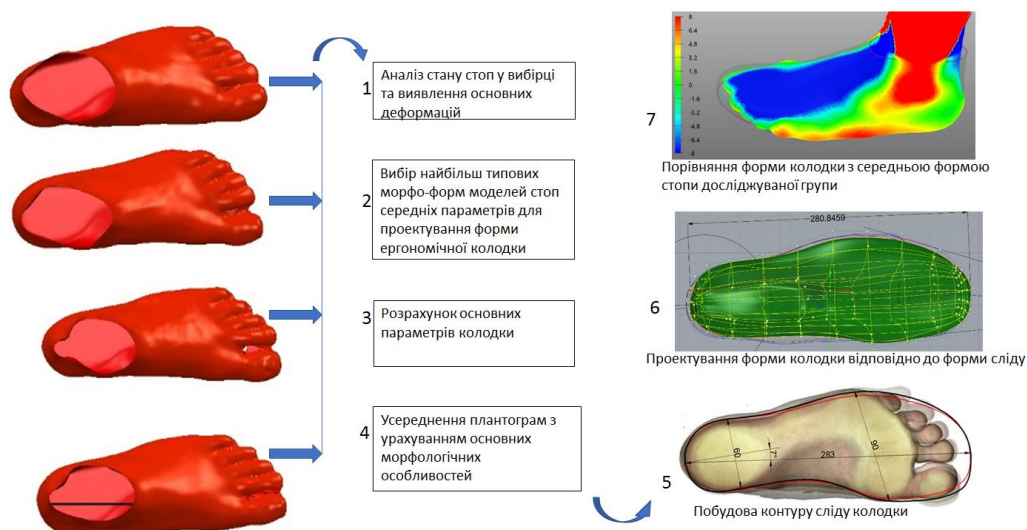


Рис. 4.26. Проектування форми колодки на основі результатів 3д дослідження

Слід колодки є каркасом для створення складної просторової форми колодки і в великій мірі визначає ступінь зручності майбутнього взуття.

Проектування контуру сліду колодки має відбуватися на основі усередненої плантограми досліджених стоп (рис.4.27).

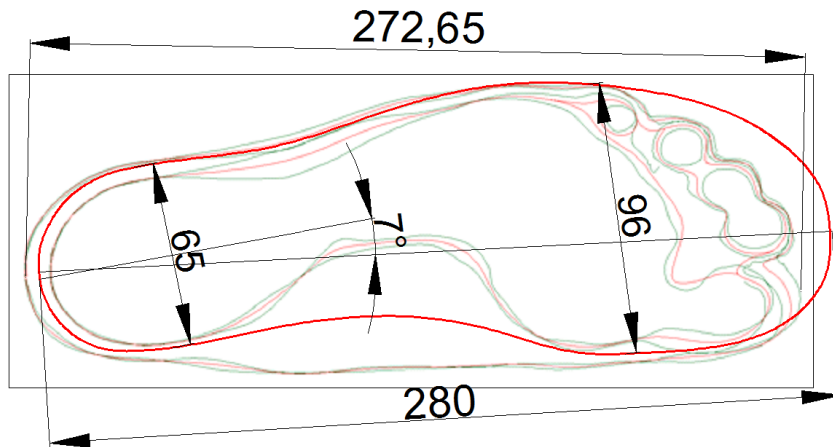


Рис. 4.27. Проектування контуру сліду колодки на основі усередненої плантограми досліджених стоп.

Особливу увагу при проектуванні сліду колодки приділяли формі носкової частини, яка в багатьох випадках не відповідає вимогам біомеханіки та фізіології стопи. Раціональна форма контуру сліду має бути дещо приведеної форми, враховувати середнє значення кута відхилення великого пальця та в жодному разі не тиснути на пальці (Рис. 4.28). Раціональна довжина сліду розраховується за формулою:

$$Д_{сл} = Д_{ст} + P1 + P3 - S$$

Де $Д_{ст}$ – довжина стопи

$P1$ – припуск на збільшення стопи при русі в носковій частині (10мм)

$P3$ – припуск декоративний

S – величина зсуву ребра сліду в п'ятці

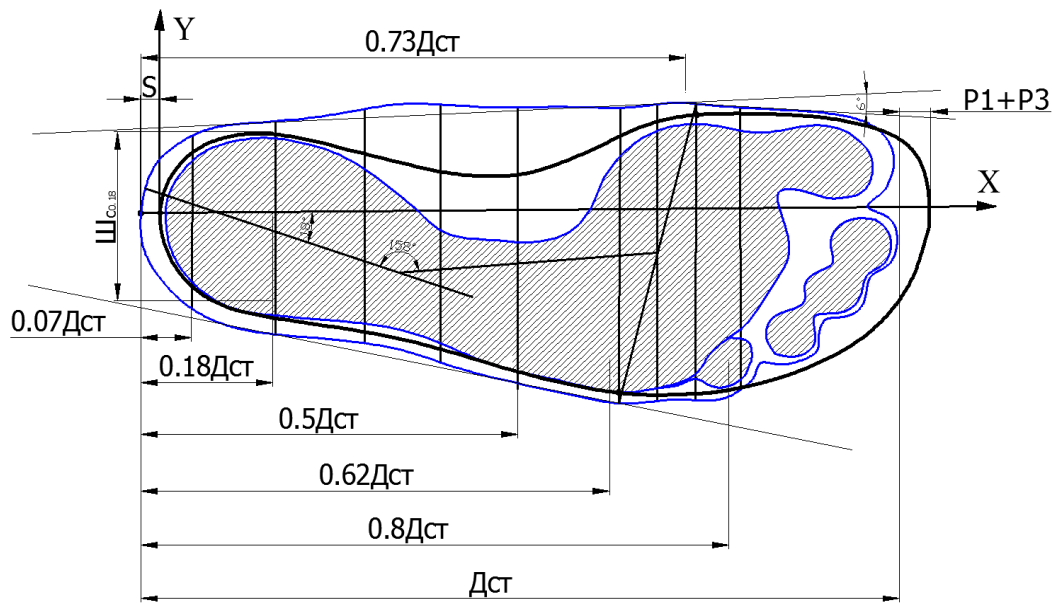


Рис. 4.28. Схема проектування параметрів сліду колодки на основі плантограми стопи.

Усереднені параметри стопи по групі українських чоловіків досліджуваного контингенту та контур сліду, побудований на основі середньо-середньої плантограми лягли в основу розробки нової вдосконаленої форми колодки для взуття підвищеної комфортності.

Нові форми колодок були змодельовані за допомогою функцій поверхневого моделювання програмного комплексу PowerShape 2016 та SubD моделювання програмного комплексу Rhinoceros 7. При проектуванні колодок до уваги бралися усереднені антропометричні параметри досліджених стоп, а також естетичні вимоги та сучасні модні тренди

Процес моделювання бази даних колодок здійснювався шляхом багаторівневої модифікації вихідних моделей колодок згідно з принципами зворотного інжинірингу відповідно до отриманих антропометричних параметрів. Процес проектування включав функції (рис. 4.29):

- морфінгу-трансформації,
- моделювання за допомогою SubD,
- створення та модифікація NURBS-поверхонь,
- деформацію MESH-сітки за допомогою 3D-клітки,

- функції параметричного моделювання,
- опції розширеного функціоналу 3д редагування сучасних САПР.

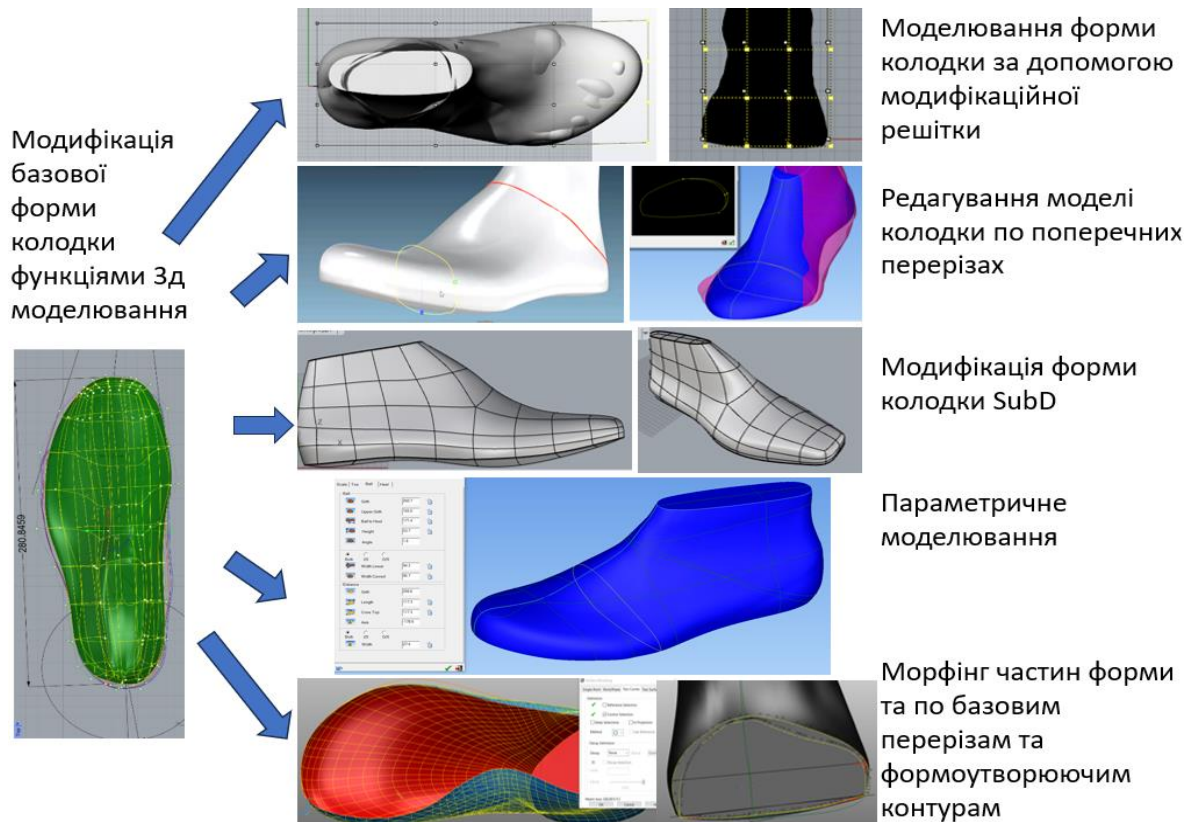


Рис. 4.29. Модифікація форми колодки функціями 3д моделювання.

На етапі експериментального пошуку було розроблено ряд 3д моделей колодок (Рис. 4.30), форми яких досліджувалися на відповідність вимогам споживачів перед запуском у масове виробництва взуття.



Рис. 4.30. Розробка бази ергономічних форм колодок для комфортного взуття

Згідно з рекомендаціями ортопедів, людям старше 40 років, які мають значні фізичні навантаження, для забезпечення нормальної роботи опорно-рухового апарату та зниження м'язової втоми необхідно постійно використовувати вкладиші (ортези), профілактичні анатомічні розвантажувальні устілки. Людям з певними патологіями стоп і проблемами опорно-рухового апарату такі вкладиші життєво необхідні. Висока частота випадків вальгусу стопи, який діагностовано при антропометричних дослідженнях, також є вагомою причиною для використання вкладишів – профілактичних (або ортопедичних при вираженій патології) устілок з підтримкою внутрішнього поздовжнього склепіння. Застосування профільованих устілок вимагає використання колодки збільшеної повноти. Параметри колодки для виготовлення взуття, в яке вкладатиметься ортопедична або профілактична устілка, визначаються з урахуванням параметрів вкладної ортопедичної устілки (рис. 4.40).

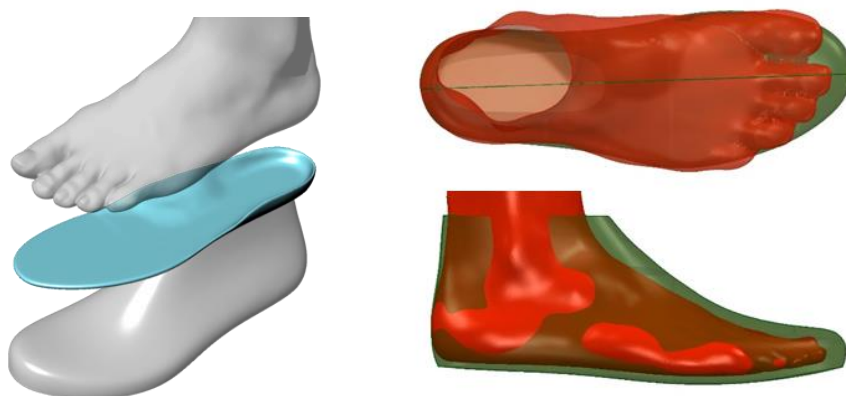


Рис. 4.40. Проектування параметрів форми колодки з урахуванням вкладної ортопедичної устілки

З метою реалізації цілі кастомізації форми взуття в умовах виробництва в роботі пропонується два альтернативних підходи (рис. 4.41):

1) Вибір моделі з розробленої бази колодок та адаптація до вимог замовника за кількома основними параметрами. Такий підхід придатний коли мова йде про замовників із здоровою стопою нетипових параметрів, або для стопи з незначними деформаціями. Такі колодки доцільно виготовляти із спеціальних міцних матеріалів в промислових умовах. Такі колодки можуть

використовуватися багаторазово, для різних споживачів, що мають аналогічні параметри.

2) Індивідуальна розробка колодки на основі 3д копії стопи. Використовується для стоп, параметри яких значно відрізняються від типових, мають деформації та деякі патології.



Рис. 4.41. Підходи до кастомізації форми взуття в умовах взуттєвого підприємства.

Таким чином, 3д сканування стопи сьогодні є необхідним методом дослідження стоп споживачів як для отримання вихідної інформації для проектування форми колодки та анатомічної устілки, так і для аналізу клінічного стану стоп окремих споживачів або груп населення. Використання результатів 3д сканування стопи для проектування взуттєвої колодки вимагає великого практичного досвіду та численних експериментів, адже кожен вид взуття має свої особливості проектування форми, що додатково ускладнюються індивідуальними особливостями стопи замовника, його вимогами, що висуваються до взуття, та умовами експлуатації взуття.

Взуттєва колодка при використанні цифрових технологій проектується згідно методу зворотного інжинірингу. Найбільш перспективним у плані

використання у виробничих умовах є спосіб побудови моделі колодки інструментами SUBD. Маючи невелику бібліотеку майстер колодок у вигляді SUBD поверхні, їх можна використовувати для реверс-інженірінга, створення нових колекцій колодок. Формат SUBD легко конвертується у NURBS об'єкти, полігональні сітки триангулярної та квадрангулярної форми.

Класичний метод побудови поверхні по отриманій сітці кривих з спроектованих на об'єкт кривих більш трудомістний, потребує гарного контролю над формою кривих та кількістю контрольних точок, що їх контролюють.

Однак спосіб проектування форми колодки з використанням каркасу кривих забезпечує високу точність і можливість контролю окремих контурів, що зручно у випадку такої складної форми як колодка. Тож запропонована в роботі методика побудови форми персональної колодки спирається на контур сліду колодки, розроблений на основі плантограми стопи.

Загалом процес моделювання колодки відбувається в режимі порівняння стопи з колодкою за допомогою числених функцій параметричного та візуального 3D моделювання.

Висновки до розділу 4

Запропонована методика розробки нової форми колодки представляє собою послідовність процесів 3D-моделювання, що включають параметричні маніпуляції з формою, проектування контрольних контурів (контур сліду, що будується на основі плантограми), та візуальне 3D-моделювання форми з використанням SubD у програмі для 3D-моделювання Rhinoceros. Особливістю цієї методики є можливість адаптації базової форми до індивідуальних антропометричних параметрів шляхом локальної модифікації об'ємної геометрії у реальному часі, з подальшою генерацією високоточних 3D-сіток для виготовлення колодки засобами 3D-друку або подальшої обробки в САМ-середовищі.

Розділ 5. СУЧАСНІ РІШЕННЯ В РОЗРОБЦІ ЕРГОНОМІЧНОГО ВЗУТТЯ ТА ЙОГО АДАПТАЦІЇ ДО МАСОВОГО ВИРОБНИЦТВА

5.1. Вдосконалення форми ергономічного взуття та технології виробництва згідно актуальних вимог

Сьогодні асортимент взуття на ринку України та світу розширився порівняно з минулими періодами; взуття класифікується по видах, стилях, методах кріплення підошви, матеріалах верху та ін.

Індустрія моди змінює свій формат, стаючи свідомою та відповідальною. В контексті глобального тренду sustainable fashion важливими стають сталий дизайн, екологічно-дружні технології та практичність виробів. У взуттєвому виробництві відбувається пошук нових конструктивно-технологічних рішень, що поєднують споживчі вимоги та актуальні принципи свідомої моди

Двокомпонентне шкіряне взуття, зокрема, мокасини та опанки, представляє окрему групу взуттєвих виробів, які мають хороші перспективи, оскільки поєднують утилітарність, технологічність, екологічність та зручність.

Наразі можна виокремити кілька видів взуття, які не схильні до глобальних змін, а отже мають перспективи до тривалої експлуатації. Серед них є конструкції, що давно зарекомендували себе серед споживачів як зручні, практичні та легкі. Так, мокасини є зручними завдяки відсутності жорсткого підноски, жорсткої устілки та вкороченого (або зовсім відсутнього) задника (рис. 5.1). Сьогодні взуттєвий ринок поповнився сучасною стилізованою версією опанків, в яких шкіряний верх простої конструкції приєднується безпосередньо до полімерної підошви коритоподібної форми. Такі види взуття, що за технологією виробництва нагадують мокасини, є не тільки зручними, але і екологічними за рахунок мінімізації використання клею та хімічних розчинників. Крім того, таке взуття не вимагає виконання обтяжно-затяжних операцій, за рахунок чого є більш економічно-вигідним та енерго-ощадним.

Взуття, що не містить жорстких каркасних деталей, виготовляється з натуральних екологічно-чистих матеріалів та має анатомічно-обґрунтовану форму, має перспективи в контексті “sustainable fashion”.



Рис. 5.1. Популярні моделі зручного взуття бренду Prime-Shoes.

Однак аналіз параметрів колодок, що застосовуються для виготовлення такого взуття на підприємстві, продемонстрував невідповідність результатам антропометричних досліджень [116]. Провівши 3д сканування стоп 12 чоловіків з довжиною стопи 270-276 мм що носять взуття розміру 42-43, ми підтвердили цей висновок. Крім того, частина споживачів виявила бажання вдосконалити внутрішню форму взуття за допомогою власних індивідуальних ортопедичних або анатомічних устілок, а це вимагає додаткового простору в середині взуття. Отже, виникла необхідність розробки нової форми колодки з анатомічно обґрунтованими параметрами.

Екологічна технологія виготовлення ергономічного взуття масового виробництва підтримує світовий састейнебл тренд тоді, коли продукція, що виготовляється, відповідає не лише вимогам екологічності, але і всім основним вимогам споживачів.



Рис. 5.2. Запропоновані конструктивні рішення для зручного практичного взуття.



Рис. 5.3. Приєднання заротовки верху до підошви нитковим швом

Саме тому на підприємстві Prime-Shoes було оновлено базу взуттєвих колодок, які було розроблено з урахуванням антропометричних вимог представників цільового сегменту споживачів, а також з урахуванням естетичних вимог і актуальних модних трендів для різних стилів.

Для цього було розроблено віртуальну базу моделей колодок за допомогою функцій таких програм як Crispin LastMaker, PowerShape Rhinoceros.

Розробка ергономічних форм колодок передбачає можливість кастомізації їх форми відповідно до вимог окремих споживачів або представників торгівлі, що працюють на окремі сегменти споживачів та представляють певні локальні ринки. Схема розробки ергономічних моделей колодок представлена на Рис. 5.4.

Розроблені моделі взуттєвих колодок були виготовлені на професійному обладнанні заводу LvivPlast (Рис. 5.5).

Далі ці колодки стали базою для виготовлення нової колекції комфортного ергономічного взуття з якісної натуральної шкіри. Запропоновані моделі взуття отримали схвальні відгуки споживачів.

Розроблений асортимент взуття включав в тому числі моделі з нитковим способом кріплення підршви без застосування хімічних кріпителів.



Рис. 5.6. Виготовлені моделі взуття на нових колодках вдосконаленої форми.

Для оцінки комфортності нової вдосконаленої форми взуття було проведено тестове носіння взуття п'ятьма споживачами, параметри стоп яких наближені до середніх по досліджуваній вибірці. При цьому кожен респондент носив по черзі три пари взуття (одна з тих пар була виготовлена на новій колодці за вдосконаленою технологією) по 7-8 годин кожно.

Відчуття від носіння було запропоновано оцінити за наступною анкетой:

1. Комфорт в передній частині взуття (зона пальців та пучків)
2. Зручність та нормальне функціонування стопи у геленковій частині (підтримка поздовжнього та поперечного склепіння стопи)
3. Комфортна посадка взуття (відчуття зручності стопи в середині взуття)
4. Зручність взуття протягом кількох годин носіння
5. Комфорт та відсутність болю чи уражень у п'ятковій частині

6. Відсутність дискомфорту в пучковій ділянці підошовної частини стопи,
7. Втомлюваність ніг при тривалому носінні

Максимальний бал (10) було присвоєно найзручнішому взуттю, мінімальний (1) – найменш зручному.

Результати опитування представлено на діаграмі (рис. 5.7).

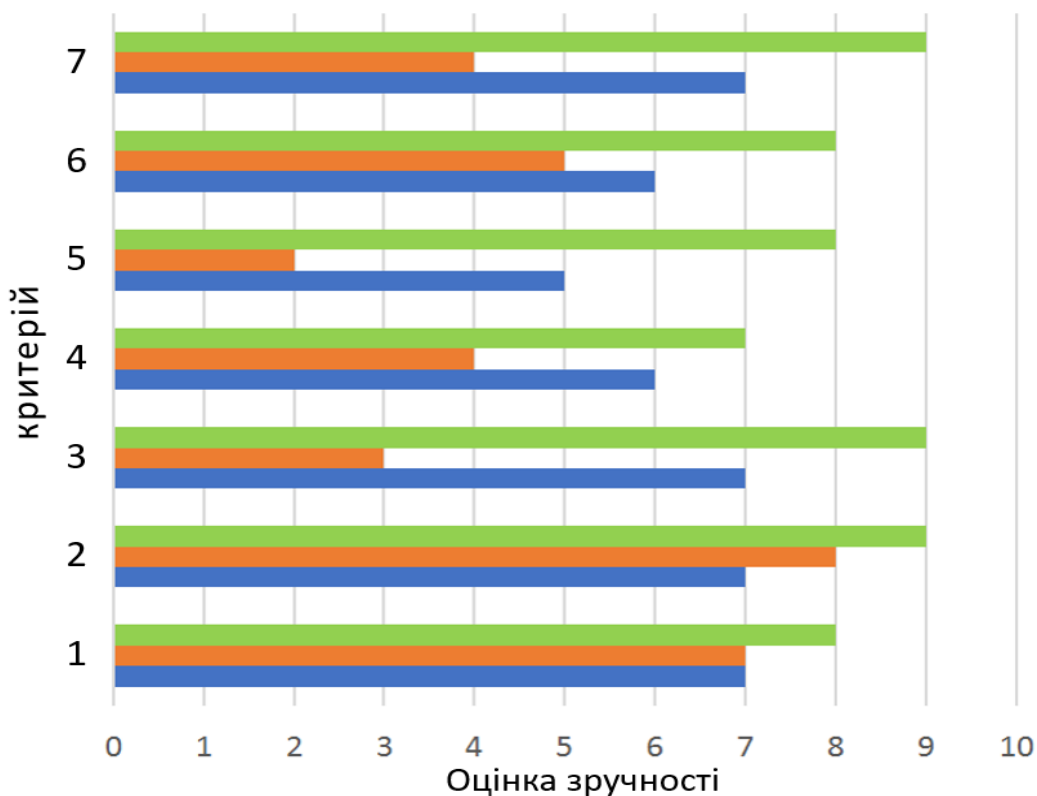


Рис. 5.7. Оцінка трьох тестових моделей жіночого взуття ремінцевого типу

Як видно, розроблене взуття, виготовлене на вдосконаленій формі колодки, зарекомендувало себе як найбільш зручне.

Подальше дослідження було зосереджене на вивченні відчуття зручності при експлуатації зразків взуття, виготовленого на вдосконалених колодках у порівнянні із взуттям, виготовленим на стандартних колодках (рис. 5.8, 5.9).



Рис. 5.8. Стандартна колодка, що використовувалася на підприємстві (зліва) та вдосконалена колодка (справа).



Рис. 5.9. Розроблена та виготовлена нова колодка і взуття, виготовлене на ній.

В результаті опитування 15 споживачів було оцінено зручність за такими критеріями:

- 1 – відсутність дискомфорту та болю в будь-якій ділянці стопи при взуванні та носінні
- 2 – Загальне відчуття комфортної посадки взуття на стопі
- 3 – Відсутність дискомфорту у стопі протягом кількогодинного носіння,
- 4 – Зручність у зоні пучків та пальців стопи
- 5 – Зручність п'яткової зони

Отримані бали представлено у Табл. 5.1.

Таблиця 5.1. Результати опитування споживачів стосовно відчуття зручності при носінні взуття, виготовленого на стандартній та вдосконаленій колодці.

	Стандартна колодка					Вдосконалена колодка				
ном ер	Крите рій 1	Критер ій 2	Критер ій 3	Крите рій 4	Крите рій 5	Крит ерій 1	Крите рій 2	Крите рій 3	Крите рій 4	Крите рій 5
1	5	3	2	6	4	8	10	7	10	6
2	4	6	6	4	5	8	9	7	8	7
3	6	4	5	5	2	7	9	10	9	7
4	5	5	6	1	4	9	8	10	8	6
5	4	3	2	3	2	6	7	6	8	6
6	7	4	3	6	5	9	8	7	7	9
7	5	3	2	3	5	10	8	8	9	9
8	4	5	5	4	5	8	7	9	7	5
9	7	5	3	1	5	9	7	7	7	10
10	6	3	5	1	6	8	8	9	10	8
11	7	6	3	4	3	7	7	8	8	7
12	5	5	6	5	9	10	9	10	9	10
13	3	4	5	2	5	9	9	9	10	8
14	6	6	8	3	7	8	8	10	9	10
15	5	5	2	6	6	7	7	6	9	8
сере дне	5,267	4,467	4,2	3,6	4,867	8,2	8,067	8,2	8,53	7,6
Станд артне відхил ення	1,181	1,087	1,833	1,74	1,746	1,11	0,929	1,42	1,02	1,569

Було обчислено стандартне відхилення на основі вибірки. Стандартне відхилення – це міра того, наскільки широко розташовані точки даних відносно їхнього середнього значення.

Згідно з результатами дослідження, вдосконалена колодка забезпечує більш зручну форму взуття.

Порівняння цифрових скан-копій досліджених форм стоп з стандартною та вдосконаленою формою колодки наочно демонструє різницю у співвідношеннях форм і пваметрів (Рис. 5.10). Значне зменшення червоних зон на новій колодці свідчить про кращу відповідність моделі анатомічній формі стопи. Для цього порівняння досліджували стопи без деформацій, параметри яких відповідають середньому розміру широкій повноті

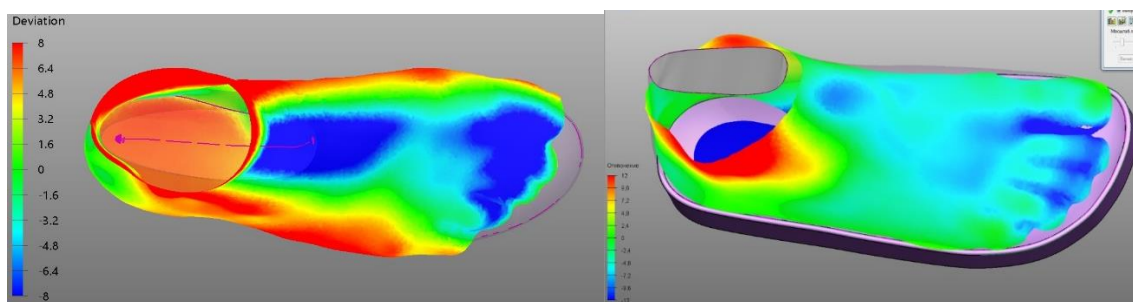


Рис. 5.10. Співвідношення форми стопи та форм колодки: зліва – з стандартною колодкою, справа – з вдосконаленою розробленою колодкою.

5.2 Кастомізація взуття в умовах масового виробництва

У цій роботі представлена проба запровадити кастомізацію зручного масового взуття на підприємстві-виробнику. Методика дизайну взуття – модель трансформер зі знімною верхньою частиною, яка кріпиться до низу взуття за допомогою блискавки.

Дослідження параметрів стоп у 12 осіб проводили за допомогою спеціалізованого 3D сканера Infoot3d, а за допомогою програмного забезпечення Foot3d знімали основні розмірні параметри та фотоплантограму (відбиток стопи). Обробку плантограм (відбитків) проводили в програмі CorelDraw, аналіз 3D копій стоп проводили в програмі PowerShape. У всіх людей не було патологій і значних деформацій, а довжина стоп коливалася від 267 мм до 273 мм.

Початкова ідея розробки взуття з можливістю заміни окремих деталей отримала подальший розвиток у напрямку можливості адаптації взуття під параметри стопи замовника. Така ідея є актуальною, виходячи з численних

запитів і відгуків українського замовника та результатів дослідження стопи українських чоловіків.

Основні етапи цієї роботи включають сканування форми колодки, яка використовувалася в компанії. Після цього аналізують параметри 3D останніх і порівнюють їх з параметрами моделей стоп. На основі порівняння даних розробка останньої форми збільшеної ширини за допомогою нижнього шаблону з базової колодки. Після розплющення бічних поверхонь і порівняння обох їх форм розрахувати необхідну площу редагування початкового малюнка верхньої частини. Наприкінці проектування викрійки для обох останків і зведення до єдиної форми єдиної частини верхньої частини. На рис. 5.11. представлено всі описані тут кроки.

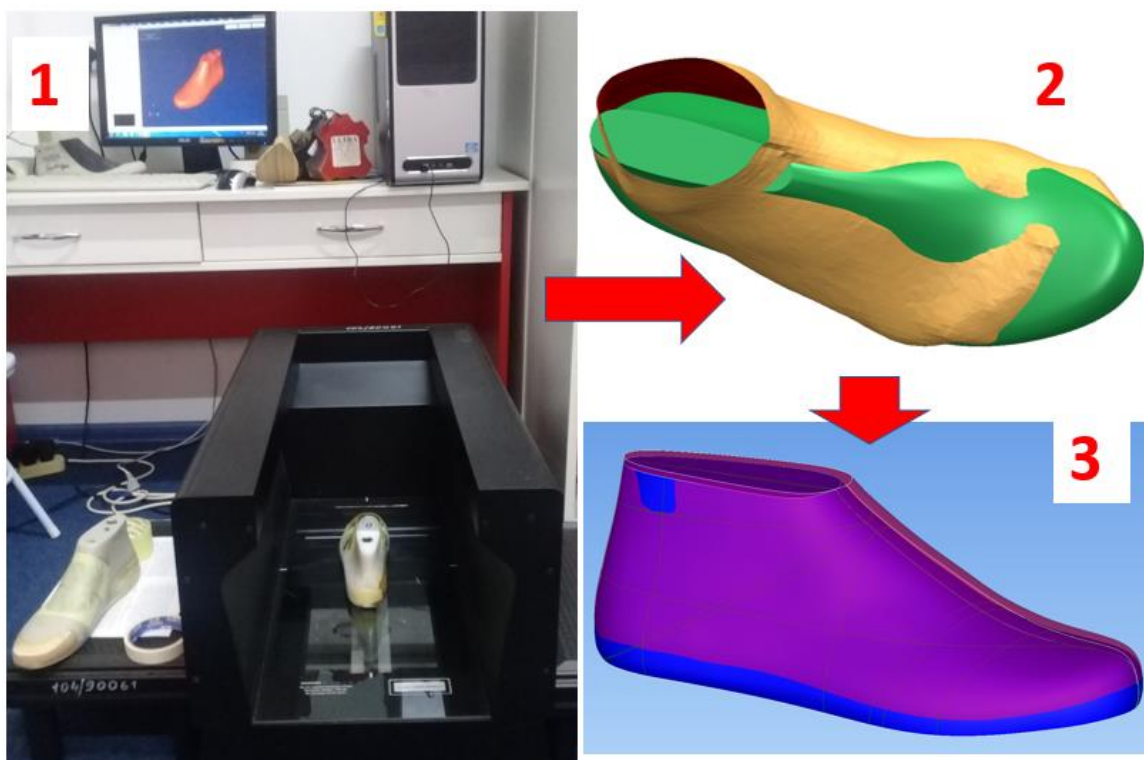


Рис. 5.11 (а). Модифікація базової форми колодки а розробка нової ергономічної моделі взуття.

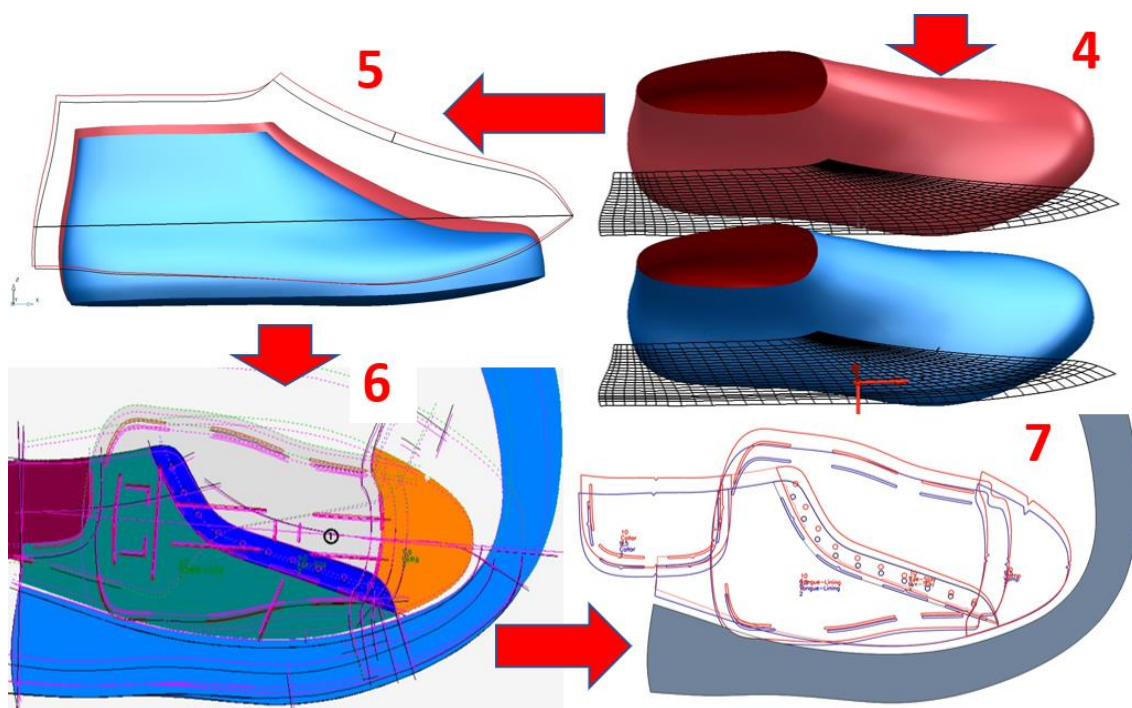


Рис. 5.11 (б). Модифікація базової форми колодки а розробка нової ергономічної моделі взуття.

Різниця в параметрах обхвату досліджуваних стоп сягала 17 мм в ділянці кульки та 21 мм у ділянці супінатора. При цьому різниця в ширині стопи в найширшій зоні не перевищувала 3 мм. Це говорить про можливість розробки зручного взуття для ніг різного обхвату з уніфікованою формою низу взуття. На рис. 5.12. наведено порівняння 3D моделей стопи довжиною 270 ± 3 мм.

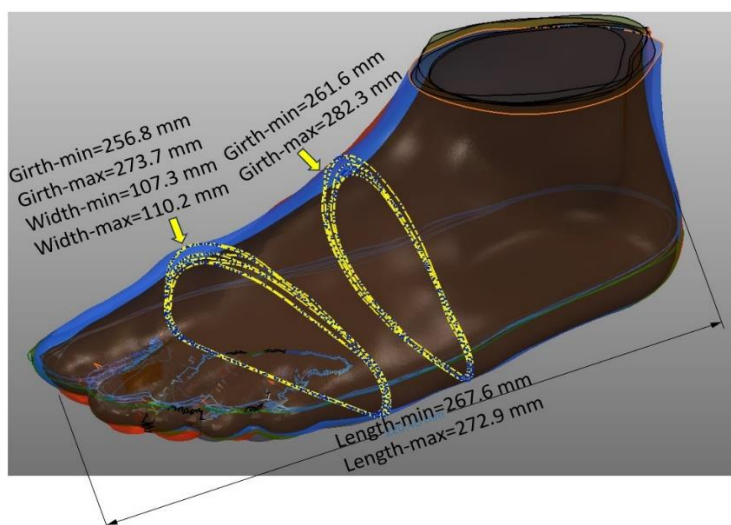


Рис 5.12. Порівняння 3D форм стопи довжиною 270 ± 3 мм.

Порівняльний аналіз стоп стандартної ширини 252 мм і обхвату в області пучків 260 мм зі стандартною колодкою показав прийнятний рівень відхилень форми і розмірів.

Тоді як порівняння параметрів стандартної колодки з параметрами широкої стопи довело необхідність використання іншої колодки з адаптованими параметрами. На рис. 5.13 показано порівняння стандартної форми колодки з 3D формами середньої та широкої стоп.

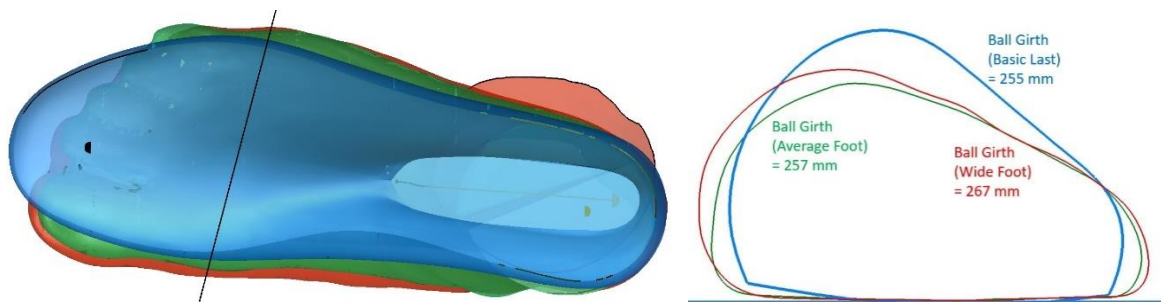


Рис. 5.13. Порівняння форм середньої та широкої стопи зі стандартною колодкою (ліворуч) та порівняння обхвату в пучках (праворуч).

Тим часом на рис. 5.14 зліва показано порівняння 3D-моделей широкої форми стопи (українського споживача) зі стандартною колодкою та праворуч з адаптованою формою колодки. Ця колодка має більші розміри в області пучка і збільшену висоту по всій площі сліду колодки. Ця форма дозволяє комфортно розташувати широку форму стопи, не тиснучи на неї. Це відрізняється від рис. 5.14 ліворуч, де ми бачимо неприйнятний рівень різниці між шириною колодки та стопи.

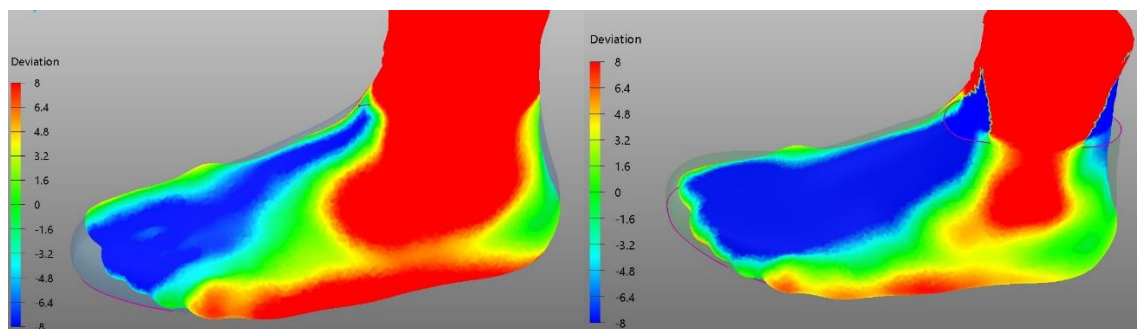


Рис 5.14. Порівняльний аналіз 3D-форми широкої стопи зі стандартною передньою частиною та широкою передньою частиною взуття.

Однак, намагаючись реалізувати процес виготовлення взуття розширеного асортименту, ми зіткнулися з проблемою неминучого зростання собівартості виробництва та впливу на навколишнє середовище. Тому з метою підвищення ефективності використовуваних деталей і виробничих зусиль були розроблені форми стандартної та широкої взуттєвих колодок, які мають уніфіковану форму нижньої поверхні. Це дозволяє використовувати однорідні компоненти для низу взуття. Форма була розроблена на основі форми ніг досліджуваних споживачів з урахуванням вимог комфорту. Після аналізу слідів досліджуваних стоп було розроблено усереднений контур нижньої поверхні колодки для виробництва вдосконаленого взуття. На рис. 5.15 зображено сліди досліджуваних стоп і створений контур червоним кольором, який є основою для розробки форми нижньої частини комфортного взуття.

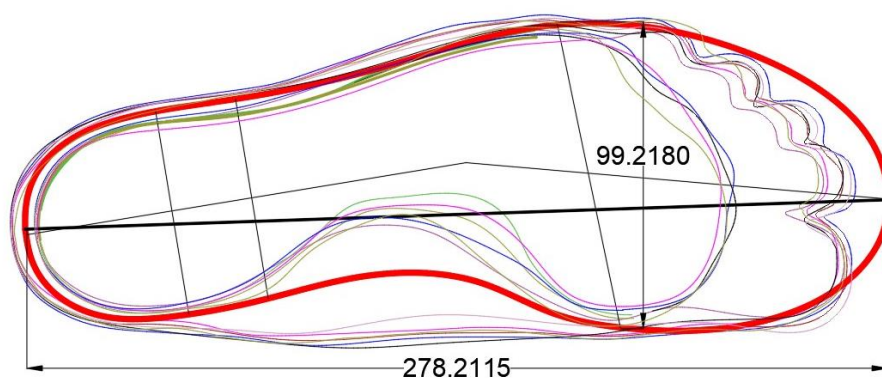


Рис. 5.15. Сліди досліджуваних стоп і усереднений контур (червоний колір).

У дослідження перспективи виробництва взуття, що налаштовується, включено параметри налаштування стилю та типу верху взуття. Одним з найпопулярніших дизайнів чоловічого комфортного взуття є низькі черевики та черевики на шнурівці. Його можна трансформувати, від'єднавши верхній варіант і прикріпивши інший. При цьому в асортименті споживача може бути бажана кількість дизайнів верху, що відрізняються за кольором, матеріалом, дизайном тощо (рис. 5.16).



Рис. 5.16. Різне чоловіче взуття, створене за зразком базової розробленої колодки.

Запропонована в роботі конструкція взуття значно полегшує завдання підгонки взуття під стопу замовника шляхом прикріплення верхньої частини взуття зі збільшеними параметрами обхвату. Таким чином, така конструкція дозволяє регулювати ширину взуття, прикріплюючи відповідний варіант верху взуття. Цю методологію виготовлення взуття на замовлення набагато легше реалізувати, ніж виробництво взуття додаткової ширини. На рис. 5.17 представлено налаштування взуття відповідно до параметрів стопи після порівняння базової колодки зі стопою клієнта, яка транлюється зі збільшенням ширини взуття.

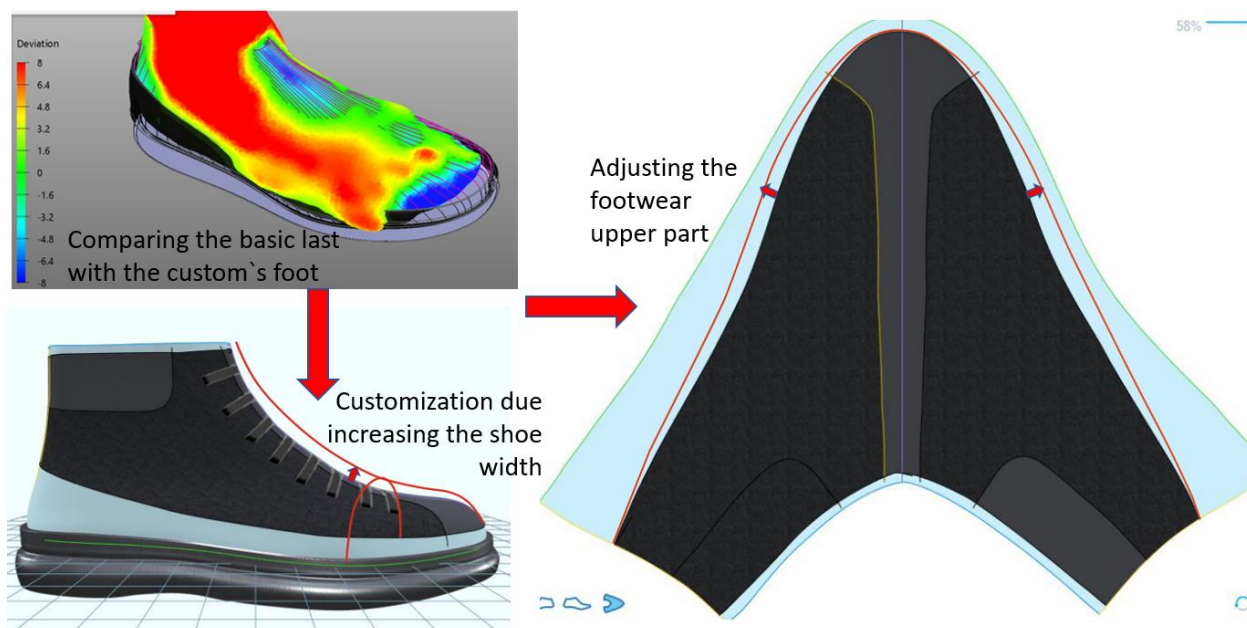


Рис. 5.17. Можливість налаштування взуття, відповідно до параметрів стопи.

З різних варіантів змінного верху взуття з різними розмірними параметрами також може бути досягнута можливість адаптації цього взуття до необхідних ортопедичних вставок споживача. Наприклад, знімні ортопедичні або профілактичні устілки мають значну товщину і не можуть вставлятися у взуття стандартних параметрів. На рис. 5.18 представлені ортопедичні вкладиші для змінного верху взуття.

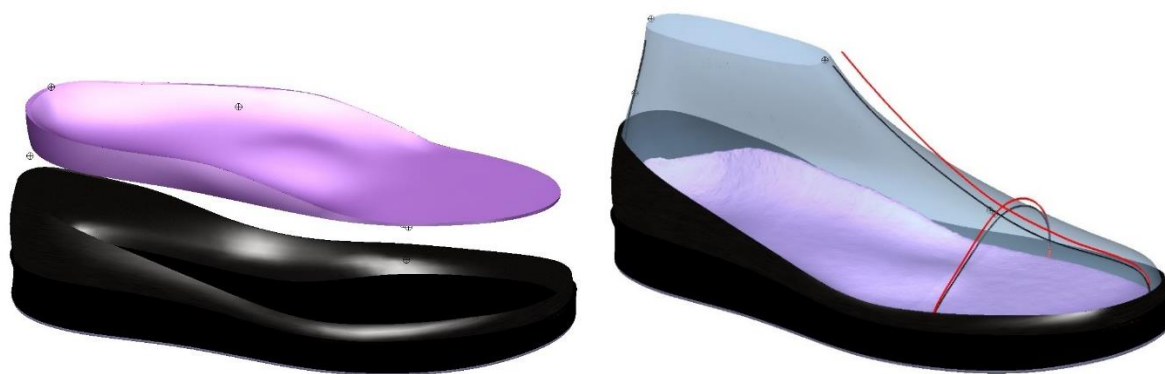


Рис. 5.18. Ортопедичні вкладиші для змінного верху взуття.

З метою демонстрації способу зміни верху взуття в цій роботі було змодельовано дві версії чоловічого взуття на основі однієї нижньої частини, до якої можна прикріпити два різних дизайни верху. Нижня частина взуття, яка є

основою трансформера, являє собою підошву з устілкою і прикріпленою обсоюзкою (бампером), до якої кріпиться одна стрічка-блискавка. Друга стрічка-блискавка прикріплена до змінного верху. Застібка-блискавка розташована по периметру взуття, в п'ятковій частині на рівні висоти ребра, а в зоні пучків трохи нижче габаритного контуру. Таке розташування застібки-блискавки обумовлено анатомо-технологічними вимогами. Висока задня частина дозволяє розмістити жорстке ребро жорсткості, яке є важливою деталлю каркаса, що забезпечує стабільність форми взуття.

Низьке розташування обсоюзки у зоні пучків робить взуття більш комфортним, уникаючи тиску ланцюжка блискавки на виступаючі зони пучків. З внутрішньої сторони блискавка ізолювана від стопи м'яким шкіряним клапаном. У п'ятковій частині конструкція має спеціальний клапан для фіксації зібраної конструкції взуття і для приховування бігунка блискавки. На рис. 5.19 представлені зображення індивідуального взуття з використанням однієї єдиної нижньої частини.



Рис. 5.19. Загальна схема можливості кастомізації за допомогою однієї уніфікованої нижньої частини взуття заводського виробництва.

Загальна послідовність робіт для виготовлення індивідуального взуття відповідно до потреб клієнта показана на рис. 5.20. Крім того, виробник завжди може залишити простір для фантазії споживача, запропонувавши інші версії верхньої частини, які можна спроектувати або адаптувати відповідно до їхнього смаку.



Рис. 5.20. Етапи виробництва індивідуального взуття.

Пропонована конструкція взуття являє собою модель-трансформер зі знімною верхньою частиною, яка кріпиться до низу взуття за допомогою блискавки. Причини, якими обґрунтовується доцільність даного виду трансформації, наступні:

1) Кріплення низу (підшви, устілки і жорстких частин) до верху є найбільш складним, енерговитратним і неекологічним процесом всього технологічного процесу виробництва взуття. Отже, можливість використання одного вузла низу в поєднанні з різними варіантами верху взуття дозволить значно знизити матеріаломісткість, енергомісткість виготовлення взуття, а також знизити навантаження на навколишнє середовище при розширенні асортименту взуття.

2) Підшва є найбільш уніфікованою частиною взуття, яка

виготовляється переважно шляхом лиття під тиском на великих фабриках у прес-формах і не дуже підходить для кастомізації, незважаючи на використання технології адитивного виробництва. Тому ми взяли підошву як початковий стійкий елемент, до якого будуть приєднуватися інші рухливі елементи взуття (версії верху взуття).

3) Блискавка зручна у використанні, забезпечує швидке кріплення двох окремих частин і щільне їх з'єднання.

Висновки до розділу 5

Таким чином, взуття зі змінними деталями зараз особливо актуальна в контексті стійкої моди. Практична реалізація цієї ідеї зумовлена пошуком рішень для мобільної адаптації форми та дизайну виготовленого взуття до потреб споживачів. Можливість комбінувати окремі елементи взуття відповідно до побажань клієнта - хороший спосіб продати взуття, одночасно зменшуючи кількість залишків на складі. При цьому важливо враховувати можливість ефективного використання тих елементів взуття, виготовлення яких є найбільш складним, дорогим або екологічно небезпечним.

У цій роботі було представлено кейс з кастомізації взуття в режимі масового виробництва. Реалізована у взуттєвому середовищі можливість використання одного вузла низу в поєднанні з різними варіантами верху взуття виявилася успішною. Крім того, це важливий фактор для зменшення відходів у масовому виробництві взуття та пропонування споживачам індивідуального крою, він сприяє екологічному способу виробництва. Це досягається шляхом значного зменшення використання матеріалів, споживання енергії для процесу виготовлення взуття тощо, одночасно розширюючи асортимент взуття.

Пропагування та рекомендація цієї методології, яка запроваджує індивідуальні налаштування для зручного масового виробництва взуття в середовищі взуттєвої фабрики, є додатковою цінністю для взуттєвих компаній, щоб задовольнити вимоги споживачів з точки зору комфорту, естетичної частини та водночас екологічного способу виробництва.

Розділ 6. РОЛЬ ЦИФРОВІЗАЦІЇ І 3D-ДРУКУ В ОПТИМІЗАЦІЇ ВЗУТТЄВОГО ВИРОБНИЦТВА.

6.1 Роль цифрових технологій у вдосконаленні проєктних процесів взуттєвого виробництва

Цифрові технології дають змогу дизайнерам швидше та точніше реалізовувати свої ідеї, це значно підвищує швидкість роботи, а особливо актуально це в умовах воєнного стану, коли необхідно забезпечити можливість роботи модельєра на відстані.

Алгоритм процесу розробки цифрового проєкту моделей черевиків у режимі віддаленого доступу для виготовлення на потужностях взуттєвого підприємства представлений на рис. 6.1.

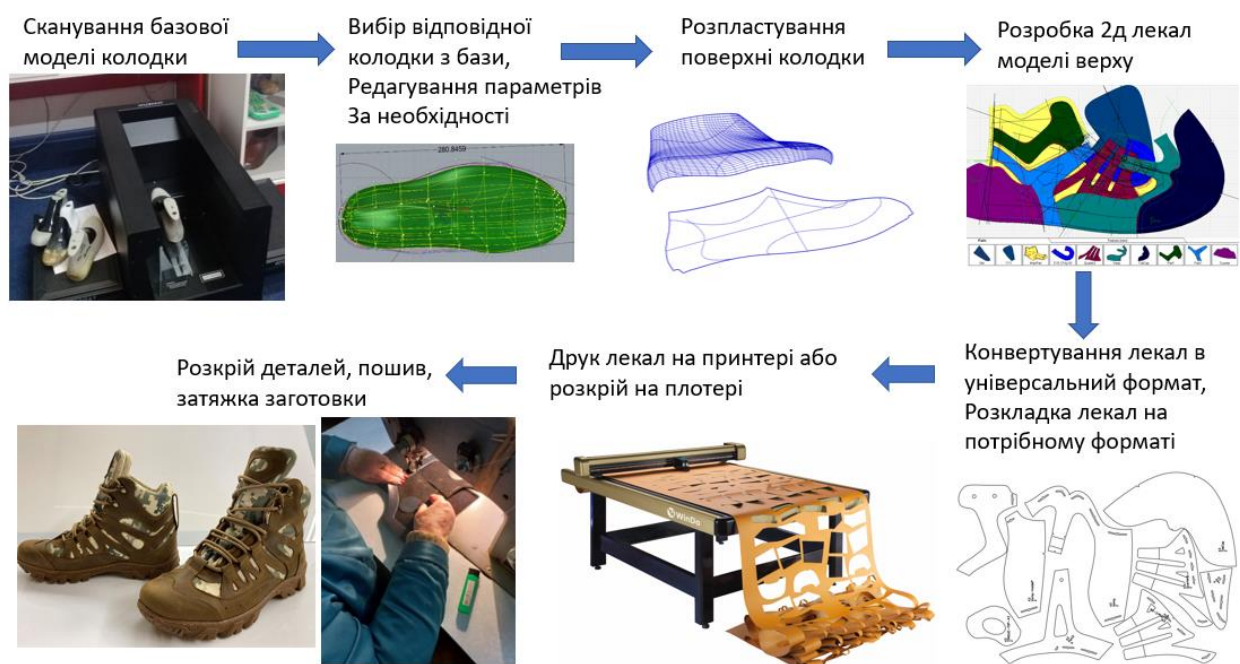


Рис. 6.1. Алгоритм процесу розробки та виготовлення цифрового проєкту в умовах взуттєвого виробництва на прикладі моделі тренувальних берців

При впровадженні прогресивних цифрових технологій на взуттєвому виробництві дуже важливим є етап 3д моделювання форм взуттєвих колодок, оскільки це забезпечить логічність переходу від 3д моделі колодки до 2д лекал розгорток бічної поверхні.

Серед найскладніших задач, які вирішують графічні САПР в процесі проектування взуття, є конвертування 3д форми взуттєвої колодки, яка є вихідною інформацією для проектування, в 2д 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 3д моделювання має власний математичний алгоритм, що забезпечує конвертацію 3д моделі в 2д формат та математичні закономірності для розрахунку і побудови розпластаної деталі на основі 3д 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 жіночі 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

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 квадриангулярної 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. 6.2).

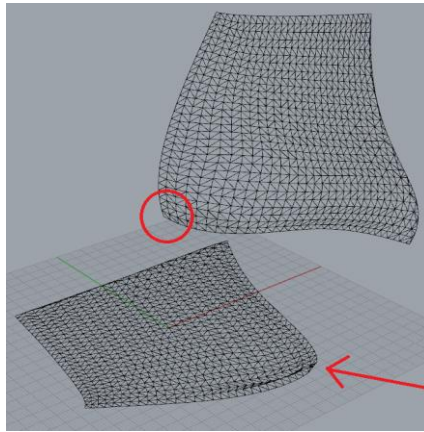


Рис. 6.2. Розпластування триангульованої сітки поверхні колодки

Найбільш розповсюджений спосіб розпластування для NURBS поверхонь базується на конвертуванні u та v просторових кривих, що утворюють поверхні колодки, в площинний формат (рис.6.3).

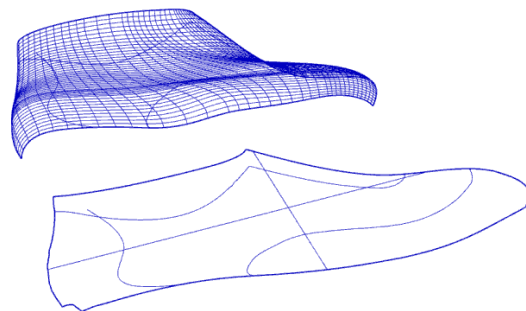


Рис. 6.3. Розпластування NURBS – поверхні колодки

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

Задача експерименту – порівняльний аналіз результатів отримання умовної розгортки колодки з застосуванням інструментів САПР. В роботі було поставлено задачу порівняти результати конвертування поверхні колодки із 3д формату в 2д в різних програмах. В якості об'єктів дослідження обрано три колодки різного фасону та розміру.

Колодки, що застосовано для експерименту, було відскановано за допомогою професійного 3D-сканера FootIn 3d (виробництва Orthobaltic) та

програмного забезпечення Foot3d (рис. 6.4). 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.

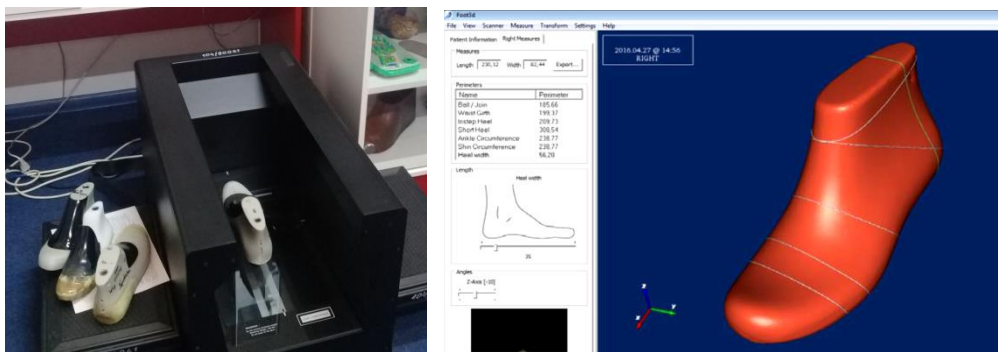


Рис. 6.4. Процес сканування колодки та обробка даних за допомогою спеціалізованого сканера FootIn 3d

Крім того, для кожної колодки було знято розгортки бічної поверхні традиційним ручним способом (Рис. 6.5 а). Форми, параметри сканованих колодок та зображення їх розгорток ручним способом представлені на рис. 6.5 б.



Рис. 6.5 (а) - 3д модель сканованої колодки та розгортки поверхні, отримані ручним способом та за допомогою САПР



Рис. 6.5 (б). Колодки, задіяні в експерименті, та їх ручні розгортки

В якості програм, за допомогою яких отримували розгортки, були обрані популярні спеціалізовані взуттєві САПР (Crispin ShoeMaker, MindCAD 3d, Icad3D+) та універсальні 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'яткового контуру, верхня точка п'яткового 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 з кривих, 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.

Коригування розгортки відбувається в залежності від технологічних особливостей виробничого процесу та методів проектування, 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.

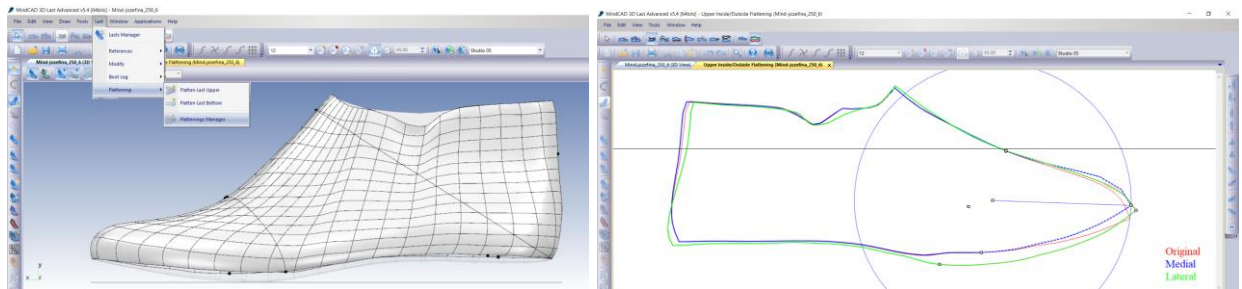


Рис. 6.6. Процес отримання плоскої розгортки колодки у САПР MindCAD

При використанні універсальних САПР для розпластування складних 3D 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 отримаємо результат, який має деякі візуальні дефекти розгортки, накладання трикутників на певних ділянках тощо (Рис. 6.7)

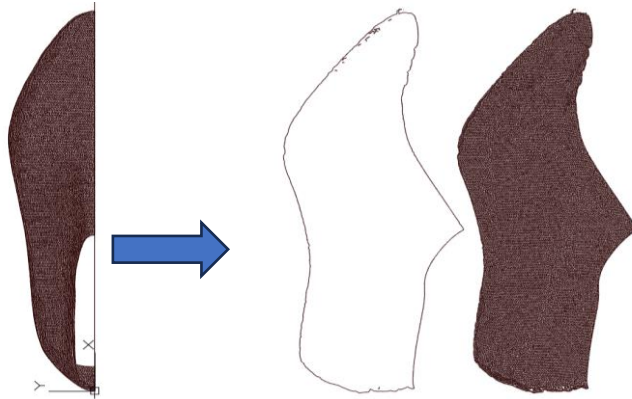


Рис. 6.7. Результат розплющення триангульованої сітки поверхні колодки

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. 6.8):

- 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.

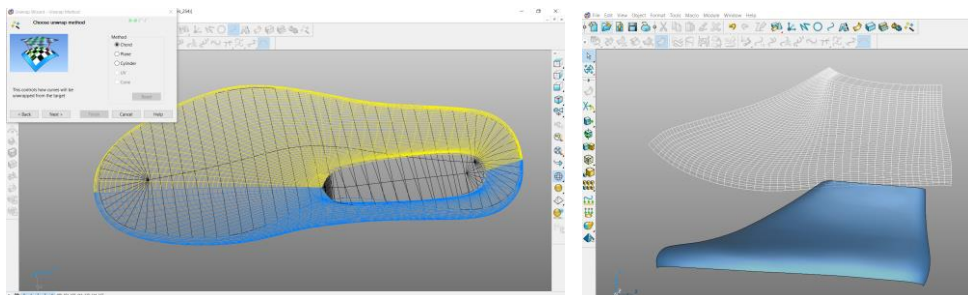


Рис. 6.8. Процес отримання плоскої розгортки колодки у PowerShape

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, представлена у NURBS форматі (рис. 6.9).

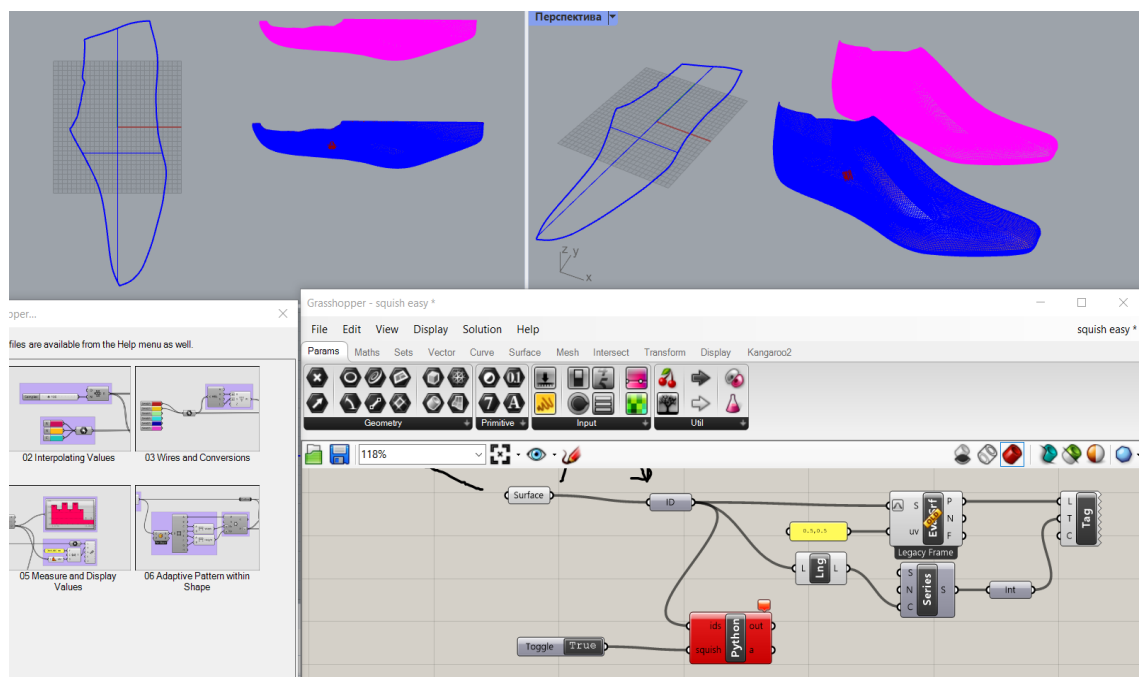


Рис. 6.9. Алгоритм отримання розгортки колодки за допомогою Grasshopper

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.

У процесі переходу від 3D-моделі взуттєвої колодки до 2D-лекал особливу увагу слід приділити точності розгортки. В роботі було проведено порівняння параметрів розгорток, отриманих вручну та за допомогою спеціальних функцій різних САПР (PowerShape, Rhinoceros, ShoeMaker, ICAD

3d+, MindCAD 3d) та з використанням плагіну Grasshopper (Рис. 6.10) для трьох колодок.

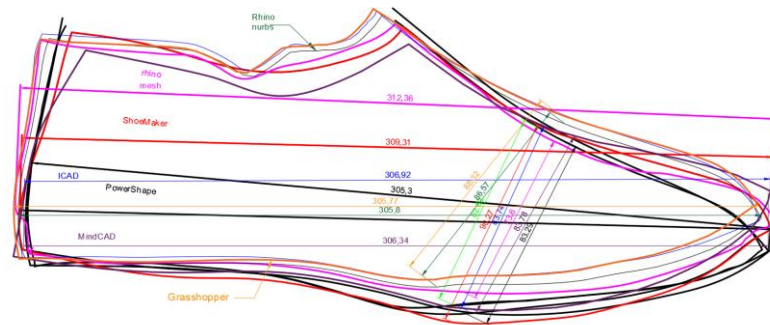


Рис. 6.10 Порівняльний аналіз розгорток, отриманих за допомогою різних САПР

У отриманих розгортках за допомогою інструментів програмного комплексу AutoCAD було виміряно довжину кожної УРК (від самої випуклої точки п'ятки до найвипуклішої точки носка) та ширину УРК в пучках вздовж лінії кальцати для кожної з 3-х досліджуваних колодок (Табл. 6.1).

Таблиця 6.1. Розпластування бічної поверхні колодок 1, 2 та 3 (див. Рис. 6.5)

колодка	Параметри (мм)	Ручна	Rhino (Mesh)	Shoe Maker	Power Shape	ICAD	MindCAD	Rhino (Nurbs)	Grasshopper
	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
	Довжина УРК, мм	306	312,26	307,63	305,15	313,03	310,55	309,6	309,82
	Ширина в пучках, мм	88	82,42	90,43	87,79	92,22	89,98	80,8	90,12
	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.6.2.

Таблиця 6.2. 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
Д1		2,5341	0,6523	0,9283	-0,7634	-0,5376	0,1075	0,0358
Ш1		8,5098	-5,4106	-6,3017	-2,6472	-1,8853	3,4349	-3,6286
Д2		-2,3534	-0,6128	0,3195	-2,6429	-1,7105	1,3534	-1,4361
Ш2		7,1538	-3,1154	0,2692	-5,4103	-2,5385	3,5897	-2,7179
Д3		-2,0475	-1,0508	0,2576	-0,2712	-0,0814	0,0949	0,1085
Ш3		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. 6.11). Як видно на діаграмі, розгортка виконана в Rhinoceros (Squish функція для MESH сітки) має найбільший діапазон варіації зі значним позитивним відхиленням.

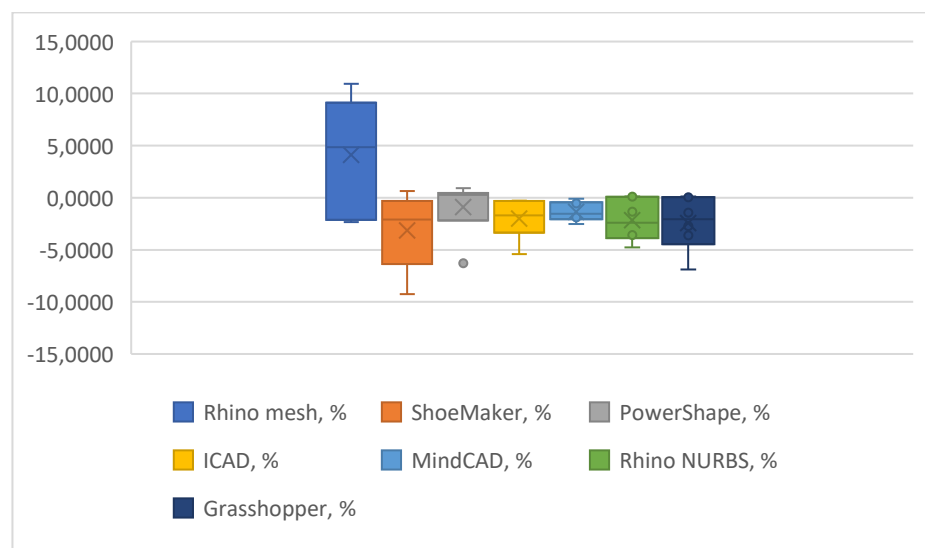


Рис. 6.11. Діаграма розмаху, яка відображає варіацію значень у Rhino Mesh, ShoeMaker, PowerShape, ICAD, MindCAD, Rhino NURBS, Grasshopper.

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.

Отже, найкращий результат конвертування поверхні колодки із 3д в 2д показав MindCAD, за ним слідує — PowerShape та ICAD.

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 [117].

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. 6.3. Де F — співвідношення варіацій, що показує значущість різниць, p -значення — показує, чи є різниця статистично значущою.

Таблиця 6.3. 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	-12,9476731	-2,157945516	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				

Оскільки:

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

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

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.

Щоб дізнатися між якими саме парами груп є відмінності, проведено тест Тьюкі (табл. 6.4).

Згідно з попередньо проведеним аналізом ANOVA, середньоквадратичне відхилення помилки (MS_{within}) = 13,6098; кількість степенів вільності, яка відповідає варіації всередині груп у дисперсійному аналізі (df_{within}) = 20; кількість значень у кожній групі (n) = 6; також відомі середні значення груп.

Критичне значення q для Тьюкі HSD знайдено згідно таблиці з розподілу Ст'юдентизованого розмаху (Studentized Range distribution) [118]. Де довірчий рівень $\alpha = 0.05$, кількість груп $k = 4$, $df_{within} = 20$. q критичне $\approx 3,96$.

$$HSD = q_{crit} \sqrt{\frac{MS_{within}}{n}} = 3,96 \sqrt{\frac{13,6098}{6}} \approx 5,97$$

Таблиця 6.4. Різниці між середніми груп.

Пара груп	Середнє 1	Середнє 2	Різниця (сер1-сер2)	Значуща при HSD = 5,97
Rhino – ShoeMaker	3,2657	-3,1321	6,3978	Так
Rhino – PowerShape	3,2657	-0,8905	4,1562	Ні
Rhino – ICAD	3,2657	-2,0123	5,2780	Ні
ShoeMaker – PowerShape	-3,1321	-0,8905	2,2416	Ні
ShoeMaker – ICAD	-3,1321	-2,0123	1,1198	Ні
PowerShape – ICAD	-0,8905	-2,0123	1,1218	Ні

Отже, лише різниця між Rhino та ShoeMaker є статистично значущою. Усі інші пари не мають достовірної різниці при рівні значущості 0.05.

Однак при аналізі результатів конвертування моделі із 3д в 2д формат також слід брати до уваги технологічні особливості виготовлення та модель взуття, яка виготовлятиметься на колодці. В силу складної криволінійної форми 3д моделі колодки перехід до 2д лекал практично завжди пов'язаний з похибками та деформаціями. Досягнення просторової форми заготовки верху взуття за рахунок з'єднання окремих плоских деталей в просторову конструкцію допомагає вдосконалити складальний процес та підвищити точність проектно-виробничих процесів.

При виготовленні взуття штробельного методу затяжки необхідним є збереження периметру нижнього контуру розгортки, що відповідає грані колодки. В подібних випадках при проектуванні конструкції верху слід передбачати відрізну деталь обсоюзки або інші відрізні деталі, які після їх з'єднання утворюватимуть об'ємну заготовку правильних параметрів. Для мінімізації деформації деталей при розпластуванні варто передбачити розділення поверхні колодки на окремі деталі, кожна з яких розпластуватиметься окремо (рис. 6.12).

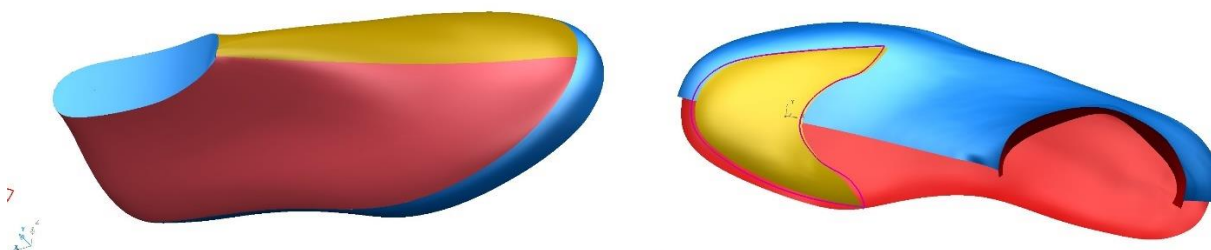


Рис. 6.12. Розділення поверхні колодки на окремі деталі для точнішого розпластування.

Такий спосіб розпластування поверхні колодки може бути реалізований в універсальних САПР (рис. 6.13).

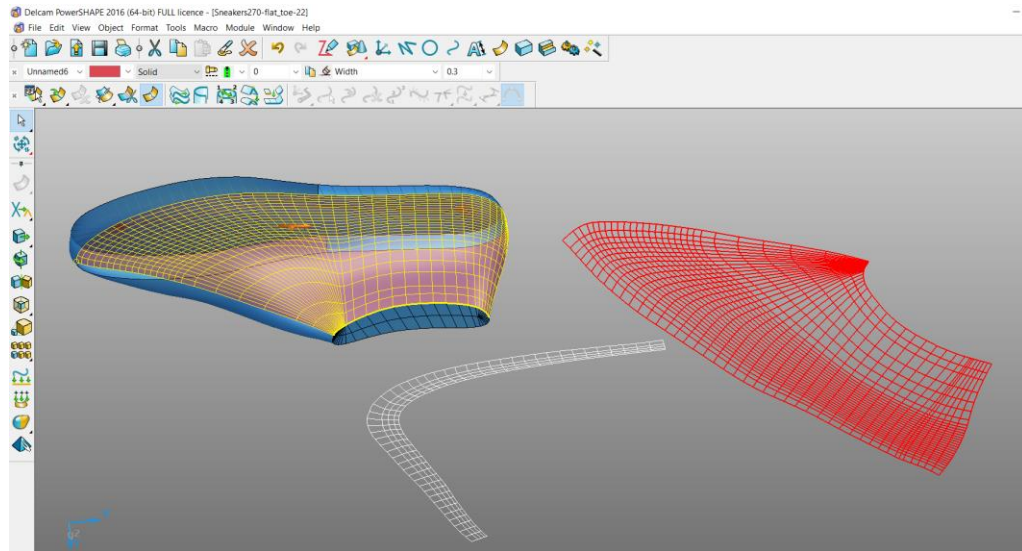


Рис. 6.13. Розпластування поверхні колодки по частинам у САПР PowerShape.

При такому способі розпластування кардинально змінюється форма розгортки, і мінімізується деформація кожної ділянки, що розпластується (рис. 6.15).

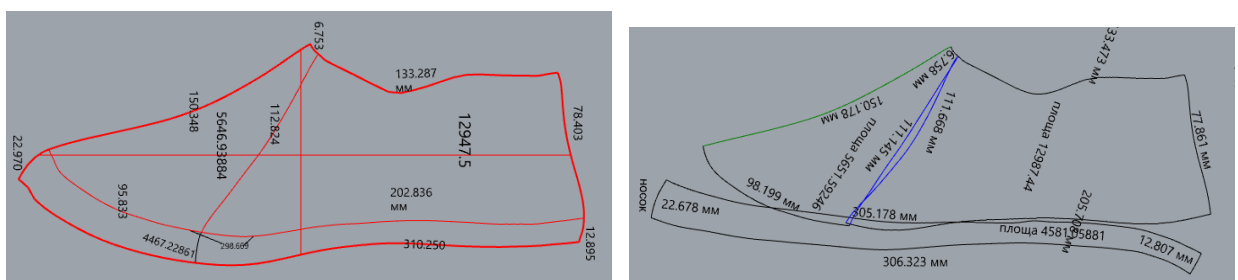


Рис. 6.15. Порівняння довжин контурів колодки до та після розпластування.

Для аналізу переваг, недоліків та доцільності використання фрагментарного розпластування 3д моделі колодки в універсальних САПР було проведено експеримент з дослідження параметрів колодки при стандартному та фрагментарному розпластуванні на одній моделі колодки в

середовищі потужних універсальних САПР, доступних для використання: Rhinoceros та PowerShape.

Половину бічної поверхні колодки, описану NURBS – поверхнями, було розрізано на три частини по ізопармам (Рис. 6.16). В ході експерименту вимірювали та порівнювали довжини контурів, що стикуються між собою у вузлових точках 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.

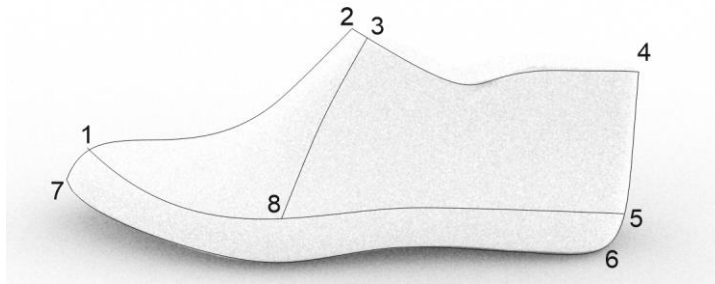


Рис. 6.16. Вузлові точки контурів та контури поділу колодки.

Далі досліджувана поверхня колодки розпластувалася трьома способами:

- 1) як суцільна поверхня за допомогою стандартного алгоритму Rhinoceros розкатування поверхні подвійної кривизни, з опцією жорсткої оболонки, із збереженням граничних контурів.
- 2) Як три окремі фрагменти поверхні за допомогою розробленого алгоритму в Grasshopper з реалізацією в Rhinoceros.
- 3) Як три окремі фрагменти поверхні за допомогою стандартної функції Unwrap (Розгортання) кривих на площину в середовищі PowerShape з опцією жорсткої оболонки

Результати трьох способів відображені в Табл. 6.5.

Таблиця 6.5. Порівняння результатів розпластування поверхні колодки з використанням різних САПР

Контури поверхні	3D модель (мм)	1) Розгортка суцільна в Rhino (мм)	2) Розгортка фрагментна в Rhino + Grasshopper (мм)	3) Розгортка фрагментна в PowerShape (мм)
Лінія 1-2	151,344	150,348	150,178	150,656
Лінія 3-4	133,717	133,287	133,473	133,008
Лінія 2-3	6,759	6,753	6,758	6,694
Лінія 4-5	78,149	78,403	77,861	75,81
Лінія 1-7	22,369	22,97	22,678	23,639
Лінія 5-6	12,755	12,895	12,807	14,31
Лінія 1-5	304,243	298,669	305,178	311,674
Лінія 1-8	98,469	95,833	98,199	98,464
Лінія 8-5	205,759	202,836	205,708	205,732
Лінія 6-7	304,363	310,25	306,323	309,338
Лінія 3-8 (задня частина)	112,004	112,824	111,668	112,261
Лінія 3-8 (передня частина)	111,997		111,145	109,294

З експерименту видно, що при розділенні поверхні подвійної кривизни в ділянках різкої зміни кривизни, отримуємо фрагменти, що розпластуються легше та коректніше. Розташування швів, що з'єднують окремі деталі взуття, в цих ділянках, здатне забезпечити вищу точність побудови конструкції та її виготовлення (рис. 6.17). Відхилення параметрів 2D розгорток від параметрів 3D моделі колодок представлено у табл. 6.6, а однофакторний аналіз даних Anova – у табл. 6.7.

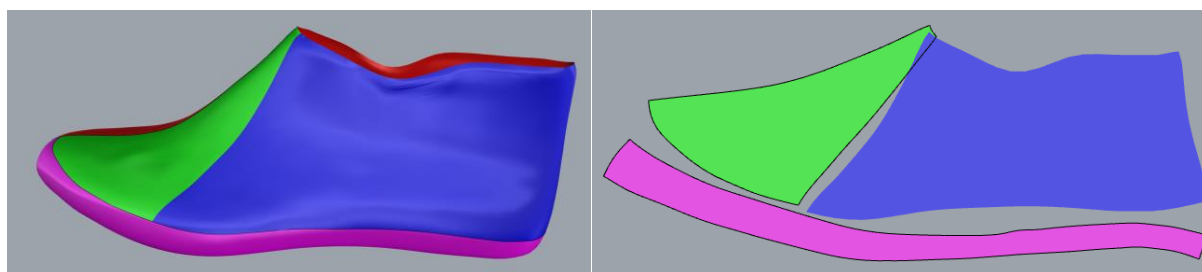


Рис. 6.17. Візуалізація поділу колодки на частини.

Таблиця 6.6. Відхилення параметрів 2D розгорток від параметрів 3D моделі.

Контури поверхні	Розгортка суцільна в Rhino (мм)	Розгортка фрагментна в Rhino + Grasshopper (мм)	Розгортка фрагментна в PowerShape (мм)
Лінія 1-2	0,658103394	0,770430278	0,454593509
Лінія 3-4	0,321574669	0,182474928	0,53022428
Лінія 2-3	0,088770528	0,014795088	0,961680722
Лінія 4-5	-0,325020154	0,368526789	2,99300055
Лінія 1-7	-2,68675399	-1,381376011	-5,677500112
Лінія 5-6	-1,097608781	-0,407683261	2,442455537
Лінія 1-5	1,832088166	-0,307320136	-12,19129753-
Лінія 1-8	2,676984635	0,274197971	0,00507774
Лінія 8-5	1,420593996	0,024786279	0,013122148
Лінія 6-7	-1,934203566	-0,643967894	-1,634561363
Лінія 3-8 (задня частина)	-0,73211671	0,299989286	-0,229456091
Лінія 3-8 (передня частина)	-0,738412636	0,760734663	2,413457503
Середнє арифметичне відхилення параметрів за методом	-0,043000037	-0,003701002	-1,233676182

Таблиця 6.7. Anova: Single Factor - однофакторний аналіз дисперсії

SUMMARY						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
2D Rhino (%)	12	-0,516000449	-0,043000037	2,401318661		
2D Rhino Grasshopper (%)	12	-0,04441202	-0,003701002	0,371889251		
2D PowerShape (%)	12	-14,80411418	-1,233676182	17,04399456		
ANOVA						
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	11,72837215	2	5,864186077	0,887741761	0,421184698	3,284917651

Within Groups	217,9892272	33	6,605734158			
Total	229,7175994	35				

Інтерпритація:

1) $P\text{-value} = 0.4212 > 0.05$ ---немає статистично значущих відмінностей між середніми відхиленнями трьох методів.

Різниця між 2D Rhino, Grasshopper і PowerShape може бути випадковою, і немає підстав вважати, що один метод суттєво кращий чи гірший за інші.

2) $F = 0.8877 < F_{\text{крит}} = 3.2849$

Це підтверджує попередній висновок: нульову гіпотезу не відкидаємо. Припущення, що усі середні відхилення однакові, залишається в силі.

Отже, за результатами однофакторного аналізу дисперсії (ANOVA), з імовірністю 95% можна сказати, що статистично значущих відмінностей між методами 2D розпластування поверхні колодки в середовищах Rhino, Grasshopper і PowerShape,- немає.

Хоча PowerShape має вищу дисперсію і середнє відхилення, це не підтверджено статистично.

Візуальний аналіз результатів розпластування (Рис. 6.18) спільно з оцінкою відхилення параметрів 2D розгорток від параметрів 3D моделі свідчить про переваги використання розробленого за допомогою Grasshopper алгоритму розпластування поверхні подвійної кривизни в Rhinoceros.

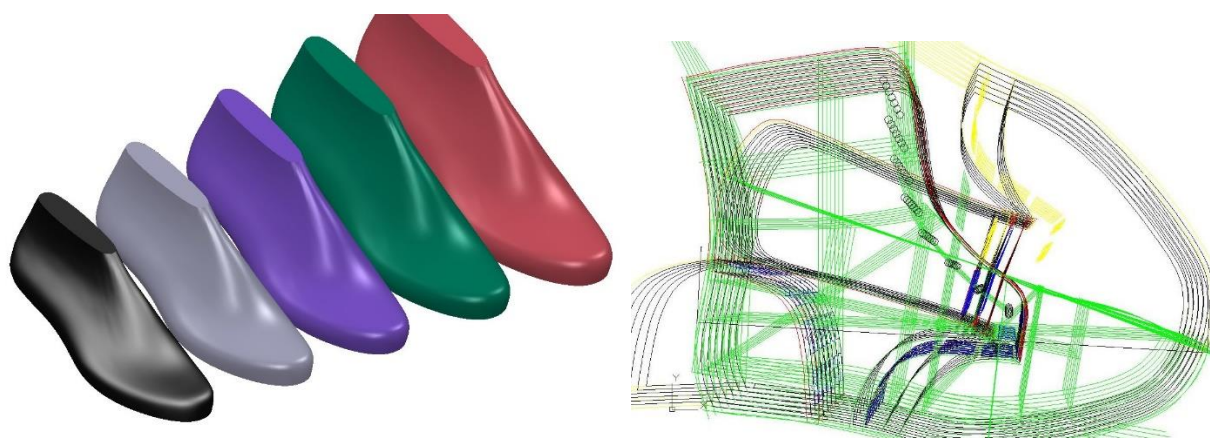


Рис. 6.19. Градирування 3д моделей колодки та 2д моделей лекал верху

Абсолютним показником зміни розміру взуття та колодки в серії є різниця по довжині сліду колодки між суміжними розмірами. Ця різниця може бути різною в залежності від системи нумерації взуття, яка дійсна на певному підприємстві. На сьогоднішній день, на жаль, в світовій практиці немає єдиного стандарту розмірної нумерації взуття. Найбільш популярні та розповсюджені системи нумерації – Європейська (що відповідає штихмасовій, або системі ParisPoint), та Американська (що відповідає дюймовій, але відрізняється від дюймової англійської) (Табл. 6.8).

Таблиця 6.8. Розміри взуття у різних системах.

Розмір (США, чоловічий)	Розмір (США, жіночий)	Європейський розмір (EU)	Довжина колодки, мм	Довжина стопи, мм	Обхват передньої частини стопи, мм
	5	35	228	225	211
	5.5	36	232.5	230	214
	6	36	236.8	234	217
	6.5	37	241	238	220
	7	37	245.3	242	223
6	7.5	38	249.5	246	226
6.5	8	39	253.8	250	229
7	8.5	39	258	254	232
7.5	9	40	262.3	258	235
8	9.5	41	266.5	262	238
8.5	10	42	270.7	266	241
9	10.5	42	275	270	244
9.5	11	43	279.5	275	247

10		43	284	279	250
10.5		44	288.5	284	253
11		45	293	289	256
11.5		45	298	293	259
12		46	303	298	262
12.5		47	308	302	265

Параметри розгортки бічної поверхні колодки змінюються не однаково з параметрами сліду колодки. Інтервали зміни параметрів бічної розгортки залежать не лише від зміни довжини сліду колодки, але також від форми колодки, висоти припіднітості п'яткової частини та інших параметрів.

Для визначення зміни параметрів 3д моделей та розгорток бічної поверхні колодки різних розмірів серії було проведено розпластування поверхні колодок одного фасону різних розмірів з довжиною сліду 240 ÷ 270 мм за допомогою алгоритма Grasshopper for Rhino, а також вимірювання ряду важливих параметрів 3д форм колодок і розгорток бічної поверхні для зазначених розмірів.

В ході експерименту для зовнішньої та внутрішньої розгортки було виміряно такі параметри (рис.6.20):

- Довжина контура верхньої площадки між центральною віськовою та п'ятковим контуром (А)
- Довжина переднього віськового контуру (В)
- Довжина контуру ребра сліду між центральною віськовою та п'ятковим контуром (С)
- Довжина п'яткового контуру (D)
- Довжина розгортки
- Довжина лінії кальцати
- Довжина розгортки сліду
- Ширина розгортки сліду колодки

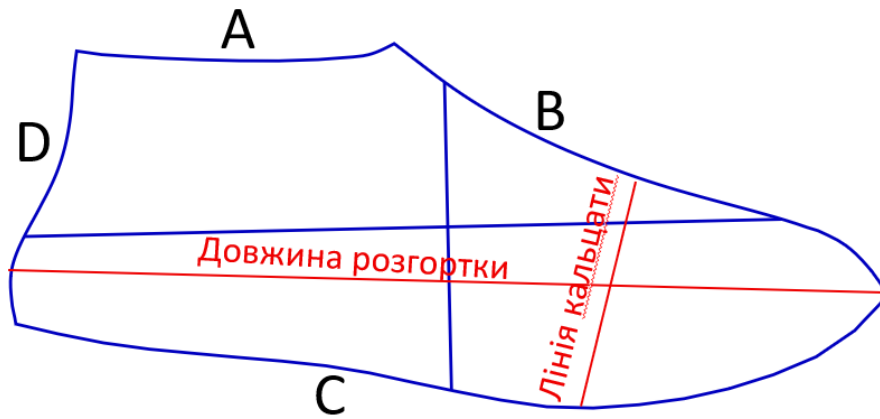


Рис. 6.20. Досліджувані параметри розгортки бічної поверхні колодки

В табл. 6.9. наведено параметри, які було виміряно для кожного розміру колодки при застосуванні таких способів розплющування поверхні:

- 1) Застосування алгоритму Grasshopper for Rhino,
- 2) Розплющування поверхні в Rhino, жорстка оболонка, зі збереженням контуру,
- 3) Розплющування в Rhino, гнучка оболонка, без збереження контуру

Таблиця 6.9. Досліджувані параметри 3д моделей та розгорток колодок різних розмірів.

240		спосіб 1			спосіб 2			спосіб 3		
	вихідна модель	розплющення ГХ	абс різниця	% від вих. 3д	розплющ збер контуру	жорстке		розплющ без збереж контуру, гнучка		
площа	21261,5426	21183,9125	77,6301	99,63488	21183,911	77,6316	99,63487	21183,9125	77,6301	99,63488
A контур верхньої площ.	102,716	101,361	1,355	98,68083	101,359	1,357	98,67888	101,369	1,347	98,68862
B контур перед. центр.	177,931	178,519	-0,588	100,3305	178,515	-0,584	100,3282	178,519	-0,588	100,3305
C контур грані сліду	280,704	288,869	-8,165	102,9088	288,877	-8,173	102,9116	288,977	-8,273	102,9472
D контур п'ятковий	90,091	91,023	-0,932	101,0345	91,023	-0,932	101,0345	91,021	-0,93	101,0323
габарити колодки	244,71									
габарити пучків	88,57									
кальцата	78,1	75,757			75,76					
геодезична	281,9	277,597			265,925					
габарити устілки										
довжина	239,938	239,49	0,448	99,81329	239,49	0,448	99,81329	239,49	0,448	99,81329
ширина	82,36	82,56	-0,2	100,2428	82,56	-0,2	100,2428	82,56	-0,2	100,2428
площина	14575,2979	14551,3654	23,9325	99,8358	14549,1794	26,1185	99,8208	14551,1729	24,125	99,83448
периметр контуру	555,036	555,797	-0,761	100,1371	555,797	-0,761	100,1371	555,793	-0,757	100,1364
245										
площа	21866,0224	21786,9013	79,1211	99,63816	21566,8199	299,2025	98,63166	21786,9013	79,1211	99,63816
A	104,802	103,375	1,427	98,63838	104,032	0,77	99,26528	103,375	1,427	98,63838
B	181,162	182,158	-0,996	100,5498	180,784	0,378	99,79135	182,158	-0,996	100,5498
C	285,533	293,319	-7,786	102,7268	287,302	-1,769	100,6195	293,319	-7,786	102,7268
D	91,017	92,055	-1,038	101,1404	90,913	0,104	99,88574	92,055	-1,038	101,1404
габарити колодки	249,9									
габарити пучків	89,52									
кальцата	80,6	77,141			75,462					
геодезична	286,1	282,965			274,388					
габарити устілки										
довжина	244,859	244,64	0,219	99,91056	244,65	0,209	99,91464	244,65	0,209	99,91464
пучки	83,26	83,41	-0,15	100,1802	83,41	-0,15	100,1802	83,41	-0,15	100,1802
площина	15039,0898	15014,878	24,2118	99,83901	15015,0802	24,0096	99,84035	15015,0793	24,0105	99,84035
периметр контуру	565,437	566,21	-0,773	100,1367	566,214	-0,777	100,1374	566,213	-0,776	100,1372

З результатів дослідження видно, що довжини граничних контурів отриманих розгорток приблизно ідентичні при всіх трьох способах розпластування. Тоді як Довжина розгортки та лінії кальцати відрізняється при різних способах розпластування, і відрізняється від вихідного параметру. Найменше відхилення від 3д моделі спостерігається при використанні алгоритму Grasshopper для розпластуванні поверхні в Rhino.

В таблиці 6.10. наведено результати дослідження довжин граничних контурів для різних розмірів колодки при розпластуванні поверхні різними способами.

Таблиця 6.10. Довжини контурів поверхні та розгортки колодки для розмірної серії

довжина	240	245	249,5	255	258	262	266,5	271
сліду колодки								
Розмір US	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
A	102,716	104,802	106,766	108,618	110,347	112,036	113,813	115,65
A спосіб1	101,361	103,375	105,282	107,109	108,835	110,49	112,24	114,041
A2 спосіб2	101,359	104,032	105,944	107,78	109,502	111,16	112,938	114,76
A3 спосіб3	101,369	103,375	105,282	107,109	108,805	110,49	112,23	114,041
B	177,931	181,162	184,336	187,339	190,242	193,066	196,018	199,095
B спосіб1	178,519	182,158	184,994	187,888	190,961	193,768	196,83	200,109
B спосіб2	178,515	180,784	183,714	186,839	189,904	192,952	195,464	198,792
B спосіб3	178,519	182,158	184,994	187,888	191,042	193,768	196,895	200,109
C	280,704	285,533	290,526	295,442	300,075	304,568	309,345	314,312
C спосіб1	288,869	293,319	298,472	303,628	308,249	312,817	317,683	322,675
C спосіб2	288,877	287,302	292,234	297,153	301,841	306,409	311,152	316,167
C спосіб3	288,977	293,319	298,472	303,628	308,201	312,817	317,73	322,675
D	90,01	91,02	92,25	93,54	94,65	96,05	97,25	98,48
D спосіб1	91,023	92,055	93,465	94,743	95,977	97,217	98,465	99,807
D спосіб2	91,023	90,913	92,112	93,332	94,607	95,819	97,032	98,39
D спосіб3	91,021	92,055	93,465	94,743	95,947	97,217	98,467	99,807
геодезична	281,9	286,7	291,4	295,2	300,1	305	309,8	314,7
спосіб 1	277,597	282,965	288,073	293,099	297,741	302,221	307,04	312,024
спосіб 2	265,925	265,388	283,474	288,392	293,082	297,815	302,199	307,286

Як видно з таблиці, спосіб розпластування 1 за допомогою алгоритму Grasshopper для контурів A, B, C, D всіх розмірів дає мінімальне відхилення від базових параметрів 3д моделі, при цьому результати, що показали інші два способи, також незначно відрізняються. Однак параметри геодезичної лінії

поверхні колодки, яка відповідає довжині розгортки при розпластуванні, демонструє різні результати і відхилення від базового параметру 3д моделі. І знову спосіб 1 дає найкращий результат і найменше відхилення.

Отже можна зробити висновки про можливість застосування способу розпластування поверхні колодки за допомогою алгоритму Grasshopper в середовищі Rhinoceros для подальшого використання результату для проектування 2д лекал верху.

На рис. 6.21 Показано співвідношення параметрів розгорток сліду та бічних поверхонь для розмірів з довжиною сліду 245 мм та 270 мм.

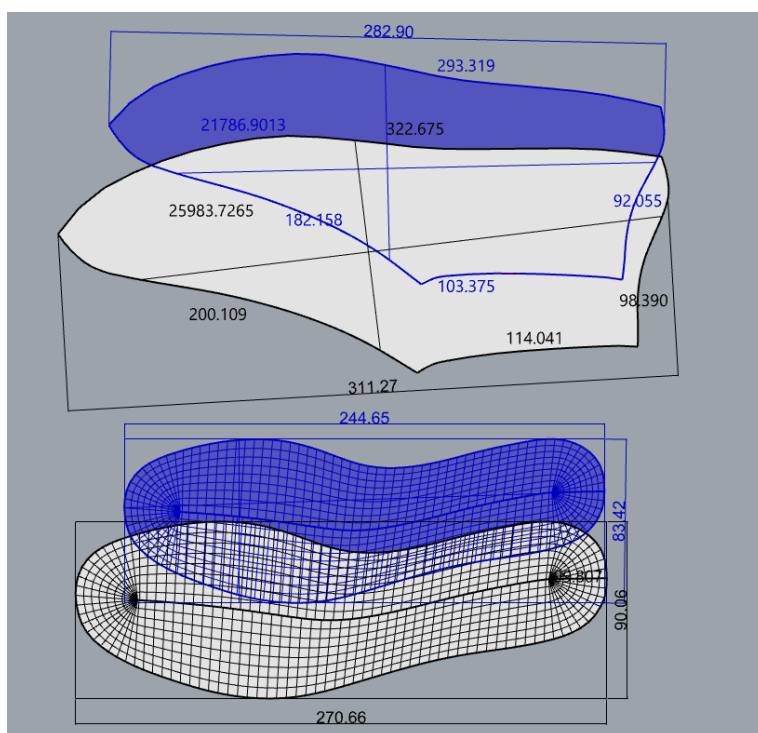


Рис. 6.21. Порівняння параметрів розгорток бічної та нижньої поверхні колодки для розмірів 245 мм та 270 мм.

При цьому важливим питанням для масового виробництва взуття є розрахунок параметрів прирощення 2д розгортки при градируванні лекал на всі розміри серії. Оскільки довжина розгортки сліду та розгортки бічної поверхні змінюється неоднаково, то необхідно розрахувати залежність прирощення довжини розгортки бічної поверхні в розмірній серії від прирощення довжини сліду колодки.

Для цього порівняли зміну довжини розгортки в розмірній серії колодок з фіксованим інтервалом зміни довжини сліду. Результати показали, що при інтервалі зміни довжини сліду колодки 4,4 мм довжина розгортки бічної поверхні змінюється від розміру до розміру на 4,8 мм (табл. 6.11).

Таблиця 6.11. Результати дослідження основних параметрів колодки в розмірній серії.

Показник	240	245	249,5	254	258	262	266,5	271	Інтервал
довжина сліду	240,1	244,7	249,3	253,7	258	262,2	266,5	270,9	4,4
ширина сліду	82,36	83,42	84,5	85,48	86,5	87,55	88,68	89,8	1,03
габарит колодки	245,2	249,9	254,4	258,6	263,3	267,7	272,2	276,6	4,45
довжина розміру	277,9	282,9	288	293	297,7	302,4	307,1	312	4,8
лінія кальцати	75,7	76,9	78	79	80	81	82,1	83,2	1,05

Отже, виходячи з результатів дослідження, було розраховано необхідні параметри градирування лекал верху, які відповідають зміні параметрів 3д моделі чоловічої взуттєвої колодки між суміжними розмірами.

Таблиця 6.12. Зміна параметрів моделі взуття між суміжними розмірами при градируванні.

Система розмірів	Прирошення по довжині сліду, мм	Зміна периметру перерізу пучків, мм	Пророшення по довжині ґрунд-моделі верху, мм	Прирошення по ширині ґрунд-моделі верху, мм
Дюймова	8.48	5.9	9.15	2.0
Штихмасова	6.67	4.4	7.2	1.5
Метрична	5	3,2	5.4	1.1

6.2 Застосування 3д друку для вирішення задач взуттєвого виробництва

У процесі підготовки зміни технології виробництва та випуску на ринок нової продукції виникає необхідність створення прототипів моделей, їх обкатка та доведення до досконалості.

Одним з таких інструментів матеріалізації віртуальних цифрових образів у наш час виступає 3Dдрук. На етапі розробки та проектування 3 D друк має певні переваги перед обробкою на фрезерних станках.

По-перше, це компактне та доступне по ціні обладнання, яке можна розмістити у офісі конструктора-модельєра.

По-друге, його запуск не потребує тривалої підготовки персонала. Доступні слайсери для завдання параметрів друку дозволяють у лічені хвилини змінювати параметри та розраховувати час виконання роботи, кількість необхідного матеріалу та інше. При наявності принтера певних габаритів, можна одночасно друкувати кілька різних деталей.

По-третє, завдяки зміні параметрів друку, можна з одного ж того матеріалу отримати вироби з різними фізичними властивостями.

По-четверте, використовуючи певні еластичні матеріали, можна надрукувати пробне взуття повністю, пропустивши етап створення оснастки (колодки, устілки) та елементів верху взуття. Технологічний цикл скорочується на кілька етапів: 3д модель – 3д друк виробу.

Сучасна технічне середовище пропонує великий вибір технологій 3д друку для реалізації інженерних та технологічних задумів. Пошук ймовірного рішення нашої задачі ми розпочали шляхом аналізу принципів роботи принтерів, які теоретично підходять для її розв'язання. Розглянули можливості FDM, SLA, SLM принтерів. Короткий аналіз представлений в описі та табл. 6.13 нижче.

FDM-метод пошарового нанесення розплавленого пластика, який подається упринтер у вигляді філаменту. Отриманий виріб потребує мінімальної пост обробки. Для вирішення нашої задачі потрібен принтер з

полем друку приблизно 300x300 мм. Ринок пропонує широку лінійку настільних полупрофесійних та професійних принтерів. Для запуску виробництва потрібна площа від 1 м².

SLA (LCD/DLP) – метод пошарової засвітки рідкого фотополімера, який під дією світла твердіє і поступово перетворюється у готовий виріб. Для вирішення нашої задачі потрібен LCD/DLP принтер з дисплеєм від 13.6 дюймів та об'ємом друку приблизно 290x160x300 мм та більше. Окрім того потрібні станція промивки від залишків фотополімеру та ультрафіолетової засвітки. Організація виробництва потребує площі від 6 м², наявності води та хорошої витяжної вентиляції.

SLM- метод пошарового спікання порошкового полімеру за допомоги лазерного променя. Технологія дорога (від 20000€), потребує великих площ (від 20 м²) та допоміжного великого обладнання, енергозатратна. Можна розглядати як аутсорсинг.

Таблиця 6.13. Порівняльний аналіз систем 3д принтінга.

ТИП ПРИНТЕРА	FDM (FFF)	LCD/DLP/SLA	SLM
Принцип роботи	Пошарове нанесення розплавленого філаменту	Пошарова засвітка рідкого фотополімеру	Пошарова спікання порошко-подібного матеріалу за допомогою лазерного променя
Тип матеріалу	Гнучки філаменти (поліуретани), жорсткі філаменти – поліамід (нейлон), поліпропілен	Рідкі фото полімерні смоли твердіючи під дією світла довжиною 350-405 нм (ультрафіолетовий діапазон)	Мілкодесперсни й порошок поліаміду
Постобробка	Ручний інструмент(	Ручний інструмент(щипці),	Станція відновлення

	щипці), ручна шліф машина	Станція для промівки виробу в ізопропиловому спирті Станція остаточної фотополімеризації (засвітки)	порошку, станція постобробки
Габарити поля друку	От 280x280x50мм	Принтери з екраном засвітки від 13.6 дюйма	380x280x380
Умови техпроцесу	Кімнатна температура 18-20 гр С.	Температура +25-35гр С, добра приточно-витяжна вентиляція, краще витяжна шафа.	Кімнатна температура 18-20 гр С.
Енергоспоживання	220 В, 350-500 Вт/год	220 В, до 500 вт/год	380В, від 9 кВт/год
Площа розміщення виробництва	Від 2 м2	Від 6 м2	Від 20 м2
Доступність матеріалів на ринку	Вільна	вільна	Тільки авторизованим виробникам
Ціна матеріалу	Від 38\$ за 1 кг	Від 90 \$ за 1 кг	Від 150 \$ за 1 кг
Доступність принтерів на ринку	Вільна	вільна	По предзаказу
Ціна принтера	Від 190 \$	Від 1500\$	Від 25000\$
Технічне обслуговування	Самостійне, мінімальне	Самостійне, заміна матраци після 2000 годин роботи (LCD), модуля DLP через 20000 годин роботи.	Сервісне обслуговування авторизованих компаній
Слайсери для роботи	Безкоштовні (CURA, PrusaSliser, OrcaSliser), платні	Безкоштовні (Chitubox, Anicubic) LCD/DLP принтерів, спеціалізовані для SLA принтерів	Спеціалізовані до обладнання

Враховуючи вище зазначені дані, подальші наші теоретичні та практичні експерименти сфокусували на можливостях доступних FDM друку.

Для друку взуттєвої колодки та її елементів використовували PETG – філамент вітчизняного виробництва. Він має певні механічні властивості, вироби з нього дозволяють витримувати достані механічні навантаження (вбивання цвяхів), вони стійкі до розчинників та клеїв, які використовуються у взуттєвому виробництві.

Для процесу друку використовували сопла з великим діаметром 1 та 1,2 мм. Параметри друку наведені у Табл. 6.14:

Таблиця 6.14. Параметри 3д друку елементів колодки

Температура друку	215- 220 °C
Температура столу	85 °C
Діаметр сопла	1.2 мм
Висота слою	0.36-0.4 мм
Висота 1 слою	0.2 мм
Ширина ліній зовнішньої стінки	1.2 мм
Ширина ліній внутрішньої стінки	1.2 мм
Товщина стінки	2.4 мм
Товщина ліній заповнення	1-1.2 мм
% заповнення	20
Фігура заповнення	гіроїд
Швидкість друку	60 мм/с
Швидкість друку заповнення	60 мм/с
Швидкість друку стінок	30-40 мм/с
Швидкість переміщення	100 мм/с

Друк на вказаних параметрах доволі швидкий та якісний зі збереженням заданої геометрії.

Підготовку моделі до друку здійснювали в слайсері Cura (рис. 6.22). Попередньо модель колодки було розділено на дві частини, які розміщуються на робочому полі друку поруч та друкуються одночасно.

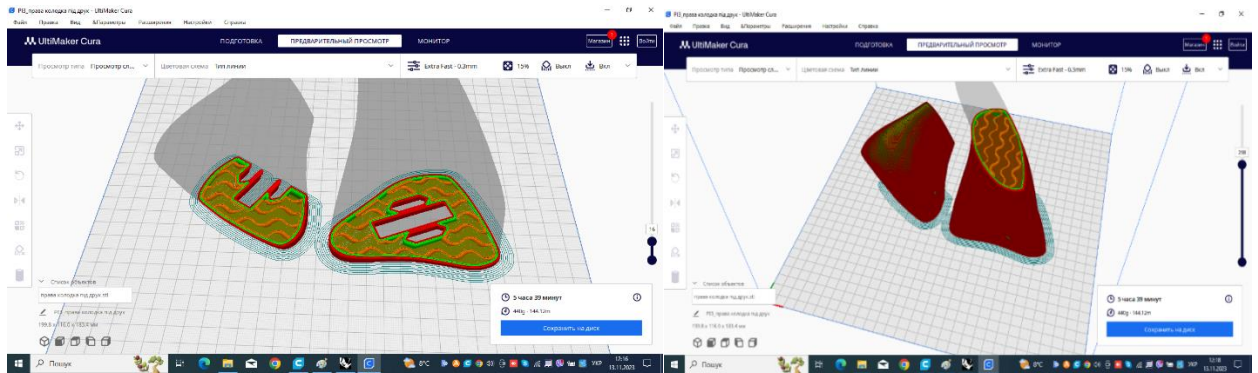


Рис. 6.22. Підготовка до друку в слайсері Cura.

Колодка друкувалась з двох частин, результат представлено на рис. 6.23.

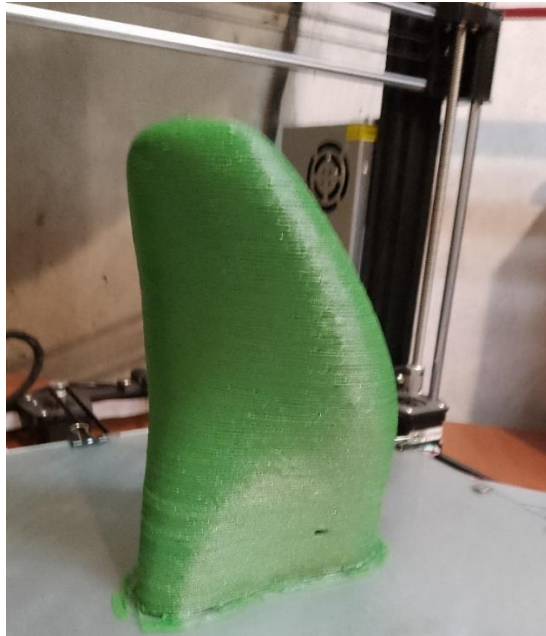


Рис. 6.23. Надрукована передня (носково-пучкова) частина колодки.

З'єднання частин колодок проводилося за допомоги так званого α -замка, який теж був надрукований на принтері (рис. 6.24).

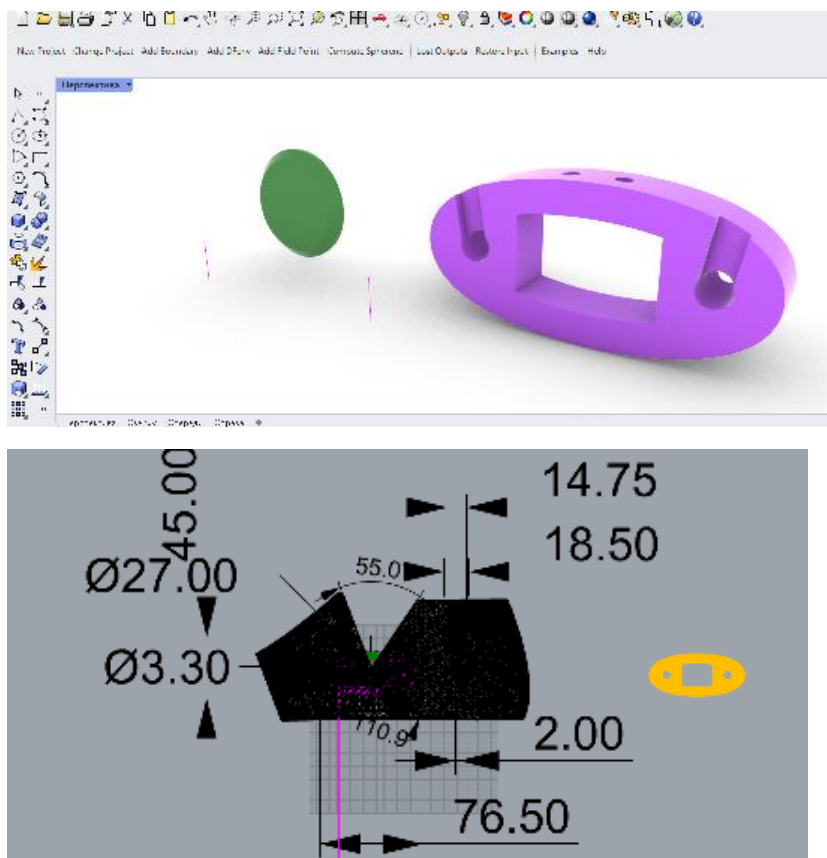


Рис. 6.24. Креслення колодки у Rhino та модель замка.

Висновки до розділу 6

Досліджено способи розпластування складної просторової форми взуттєвої колодки у різних САПР; обґрунтовано ефективність фрагментного розпластування бічної поверхні колодки за допомогою функціоналу САПР. Такий підхід дозволив досягти підвищеної точності побудови 2D-викрійок для верху взуття, забезпечити узгодженість між розгорткою та тривимірною формою колодки, а також оптимізувати процес проектування для різних способів формування верху.

Отримані результати дозволять реалізувати цифрову трансформацію взуттєвої галузі на основі CAD/CAM-систем та 3D-технологій та розширити можливості українських підприємств у напрямі екологічного, персоналізованого і високоякісного виробництва взуття.

ВИСНОВКИ

Сьогодні індустрія моди адаптується до нових викликів сьогодення, відходячи від тенденцій швидкої моди. Свідоме споживання та стала мода інтегруються в сучасний формат цивілізаційного розвитку, змушуючи споживачів переосмислювати ставлення до моди як такої та до формування власного гардеробу.

1. В результаті проведених досліджень вирішена науково-технічна проблема розробки ергономічної форми взуття в умовах промислового виробництва з урахуванням можливості кастомізації.

2. Визначені прогресивні вектори розвитку взуттєвої індустрії.

3. Досліджено та практично застосовано процес 3д сканування для кастомізації форми взуття

4. Розроблено нову базу моделей колодок з вдосконаленими параметрами на основі 3Д досліджень в умовах промислового виробництва Прайм Шуз .

5. Визначено два альтернативних підходи до кастомізації форми взуття в умовах взуттєвого підприємства: 1) Вибір моделі з розробленої бази колодок та адаптація до вимог замовника за кількома основними параметрами; 2) Індивідуальна розробка колодки на основі 3д копії стопи.

6. Удосконалено технологію виробництва взуття в умовах промислового виробництва Прайм Шуз (запропоновано застосування бортопрошивного способу кріплення підошви ниткою без клею без використання основної картонної устілки та обтяжно-затяжних операцій, мінімізуючи використання хімічних скріплювачів).

7. Досліджено різні способи розпластування 3Д форми колодки в 2Д розгортку: 1) Розпластування триангульованої сітки STL-файлу (в програмі Rhinoceros); 2) Розпластування Nurbs поверхні (Rhinoceros, PowerShape). Оптимальним виявилася функція розкатування об'ємної Nurbs поверхні на площину з налаштуванням опції глобальної мінімізації деформації по u та v напрямкам. Запропоновано фрагментарне розпластування поверхні складної

кривизни для підвищення точності розгортки у випадку конструкції взуття з відрізними деталями.

8. Запропоновано алгоритм розробки взуття трансформера з можливістю зміни повноти, конструкції верху та типу взуття. Таке взуття представляє собою конструкцію, в якій нижня частина є постійним елементом, а верх різної ширини чи дизайну може бути приєднаний та замінений на інший. Практична реалізація цієї ідеї зумовлена пошуком рішень для мобільної адаптації форми та дизайну виготовленого взуття до потреб споживачів.

Це також один зі способів вирішення проблеми недостатньої глибини стандартного взуття в тих випадках, коли людині необхідно вкладати в середину взуття розвантажувальну або коригуючу ортопедичну устілку.

9. Проведено експеримент з впровадження 3Д друку для виготовлення колодок в умовах промислового виробництва з урахуванням можливості кастомізації. Виготовили колодку зчленованої конструкції з двох частин, що з'єднуються між собою спеціальним замком.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз попиту та споживання товару, факторів, які визначають споживання товару. StudFiles.
<https://studfile.net/preview/2398216/page:3/>
2. Monografia Estatística | APICCAPS. APICCAPS.
<https://www.apiccaps.pt/publications/statistical-report/112.html>
3. Portuguese Shoes. APICCAPS.
https://www.apiccaps.pt/library/media_uploads/20231227.pdf
4. Вишнеvsька, А.М., Петренко, К.В. (2022). Вплив глобалізації на міграційні процеси у світі та Європі. Економічний вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут», № 23, 34-39
<https://doi.org/10.20535/2307-5651.23.2022.264626>
5. Іващук, І.О., Стахова, Н.В., Живко, М.А. (2022). Міжнародні міграційні процеси. Навчальний посібник. Тернопіль.: ЗУНУ. 204с.
6. Ashizawa, K., et al., (1997). Relative foot size and shape to general body size in Javanese, Filipinas and Japanese with special reference to habitual footwear types. *Annals of Human Biology*, 24 (2), 117–129.
<https://doi.org/10.1080/03014469700004862>
7. Voracek, M., et al., (2007). Sex differences in relative foot length and perceived attractiveness of female feet: relationships among anthropometry, physique, and preference ratings. *Perceptual and Motor Skills*, 104 (3 Pt 2), 1123–1138.
<http://dx.doi.org/10.2466/PMS.104.3.1123-1138>
8. Mauch, M., et al., (2008). Foot morphology of normal, underweight and overweight children. *International Journal of Obesity* (London), 32 (7), 1068–1075. <https://doi.org/10.1038/ijo.2008.52>
9. Hennig, E.M., (2002). The human foot during locomotion - Applied research for footwear, Wei Lun Public Lecture (10 October), Hong Kong: The Chinese University of Hong Kong; 350-357

10. Menz, H.B., Morris, M.E., (2005). Footwear characteristics and foot problems in older people. *Gerontology*, 51(5). 346–351. <https://doi.org/10.1159/000086373>
11. Frey, C, (2000). Foot health and footwear for women. *Clin Orthop Relat Res*, 32–44. <https://doi.org/10.1097/00003086-200003000-00005>
12. Naved, A., (2017). An Investigation into Shoe Style for prevention of Heel Pain. *Doctoral Treis. Tomas Bata University in Zlin*, 192
13. Wesley, V., Borthwick, A.M., Walker, J., (2007). Expert Group Criteria for the recognition of healthy footwear. *British Journal of Podiatry November*, 10(4): 127–133
14. Buades, J.M., Gonza'lez-Hidalgo, M., Perales, F.J., Ramis-Guarinos, S., Oliver, A. and Montiel, E., (2013). A fast geometric deformation method to adapt a foot to a platform. In: González Hidalgo, M., Mir Torres, A., Varona Gómez, J. (eds) *Deformation Models. Lecture Notes in Computational Vision and Biomechanics*, vol 7. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5446-1_5
15. Каптюрова, Д.О., Чертенко, Л.П., Білоус, П.В., Фоміна, О.О. (2023) Ергономічність як основа актуального дизайну в контексті вдосконалення взуття для українських військових. Вісник КНУТД ІМ № 2, с.31-39. <http://dx.doi.org/10.30857/2706-5898.2023.2.1>
16. Naved, A., (2017). An Investigation into Shoe Style for prevention of Heel Pain. *Doctoral Treis. Tomas Bata University in Zlin*, 192
17. Contributors to Wikimedia projects. Ergonomics - Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Ergonomics>
18. Учасники проектів Вікімедіа. Людський фактор – Вікіпедія. Вікіпедія. https://uk.wikipedia.org/wiki/Людський_фактор
19. ISO 6385:2016. Ergonomics principles in the design of work systems. Geneva: International Organization for Standardization, 2016. – 30 p.

20. Ergonomic Footwear: Choosing Shoes for Comfort and Support.
<https://www.antarnaad.net/blog/ergonomic-footwear-choosing-shoes-for-comfort-and-support>
21. Ергономічне спортивне взуття: комфорт та стиль. Товари для спорту Київ - Магазин спортивних товарів у Києві.
https://svitsportu.com.ua/ua/articles/78.ergonomika_i_stil_v_sportivnoy_obuvi
22. Wesley, V., Borthwick, A.M., Walker, J., (2007). Expert Group Criteria for the recognition of healthy footwear. *British Journal of Podiatry* November, 10(4): 127–133
23. ДСТУ 2157-93. Взуття. Терміни та визначення. – Чинний від 1994-07-01. – К.: Держспоживстандарт України, 1993. – 18 с.
24. ДСТУ 3835-98. Взуття спеціальне з верхом зі шкіри для захисту від механічного діяння. Загальні технічні умови. – Чинний від 1999-01-01. – К.: Держстандарт України, 1998. – 12 с.
25. Hertzberg, H. T. E. (1972). The human buttock in sitting: Pressures, patterns, and palliatives. *American Automobile Transactions*, SAE Technical Paper 720005, 39-47. <https://doi.org/10.4271/720005>.
26. Zhang, L., Helander, M. G., and Drury, C. G. (1996). Identifying factors of comfort and discomfort in sitting. *Human Factors*, 38(3), 377-389. <http://dx.doi.org/10.1518/001872096778701962>
27. Учасники проектів Вікімедіа. Дискомфорт – Вікіпедія. Вікіпедія. <https://uk.wikipedia.org/wiki/Дискомфорт>
28. Лецишин, М.М. (2021). Оцінювання ступеню комфортного тиску верху взуття на стопу споживача. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, №4(79). 114-122. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.4.13>
29. Kura, H., Luo, Z.P., Kitaoka, H.B. (2001). Mechanical behavior of the Lisfranc and dorsal cuneometatarsal ligaments, in vitro biomechanical study, *Jornal*

- Orthop Trauma, 15: 107-10, <https://doi.org/10.1097/00005131-200102000-00006>
30. Jahss, M.H., Kummer, F., Michelson, J.D. (1992). Investigations into the fat pads of the sole of the foot, *Foot & Ankle*, Vol.13, №5, 227-232. <https://doi.org/10.1177/107110079201300501>
 31. Dinato, R., Ribeiro, A., Butugan, M. et al. (2015). Biomechanical variables and perception of comfort in running shoes with different cushioning technologies. *Jornal of Science and Medicine in Sport*, 18, 93-97. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2013.12.003>
 32. Kacerova, I., Kurb, J., Horejsi, P., Kleinova J. (2022). Ergonomic Design of a Workplace Using Virtual Reality and a Motion Capture Suit. *Appl. Sci.*, 12, 2150. <https://doi.org/10.3390/app12042150>
 33. Fiedler, K.E., Stuijzand, W.J.A., Harlaar, J., Dekker, J., Beckerman, H. (2011). The effect of shoe lacing on plantar pressure distribution and in-shoe displacement of the foot in healthy participants. *Gait Posture* 33: 396-400. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.12.011>
 34. Dai, X.Q., Li, Y., Zhang, M., Cheung, J.T. (2006). Effect of sock on biomechanical responses of foot during walking. *Clin Biomech* 21: 314-321. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2005.10.002>
 35. Bergstraa, S.A., Kluitenberg, B., Dekker, R., Bredeweg, S.W., Postemac, K., Van den Heuvel, E.R., Hijmans, J.M., Sobhani, S. (2014). Running with a minimalist shoe increases plantar pressure in the forefoot region of healthy female runners. *Journal of Science and Medicine in Sport*, Jul;18(4):463-468. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2014.06.007>
 36. Chevalier, T. L., Hodgins, H., Chockalingam, N. (2010). Plantar pressure measurements using an in-shoe system and a pressure platform: A comparison. *Gait & Posture* 31, 397–399. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.11.016>

37. Goonetilleke, R. S. (1999). Footwear cushioning: relating objective and subjective measurements. *Human Factors*, Vol. 41, No. 2, 241–256.
<http://dx.doi.org/10.1518/001872099779591231>
38. ISO 7250-1:2008. Basic human body measurements for technological design — Part 1: Body measurement definitions and landmarks. – Geneva: International Organization for Standardization, 2008. – 19 p.
<https://www.iso.org/standard/41249.html>
39. Чертенко, Л.П., Кернеш, В.П., Смоленська, Б.І., Бондар, О.І. (2022). Шляхи підвищення рівня зручності взуття масового виробництва. Вісник КНУТД № 1, 20-27. <https://doi.org/10.30857/2706-5898.2022.1.1>
40. Капанджи, Неттер Ф. (2004); Атлас анатомії людини (переклад Цегельський А. А.). Львів: Наутілус. с. 592.
41. Umar, H., Idrees, W., Umar, W., Khalil, A., Rizvi, Z. (2022). "Impact of routine footwear on foot health: A study on plantar fasciitis, *J Family Med Prim Care.*, 11(7):3851-3855. https://doi.org/10.4103/jfmpe.jfmpe_637_21
42. Wilkinson, M., (2018). Feet and Footwear: Applying Biological Design and Mismatch Theory to Running Injuries, *International Journal of Sports and Exercise Medicine*, 4(2). <https://doi.org/10.23937/2469-5718/1510090>
43. Ghimouz, C., Kenné, J.P., Hof, L.A., (2023). On sustainable design and manufacturing for the footwear industry – Towards circular manufacturing, *Materials & Design*. Vol. 233. 112224.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112224>
44. Shaikh, S., Jamdade B., Arnab, C., (2023). Effects of Customized 3D-Printed Insoles in Patients with Foot-Related Musculoskeletal Ailments—A Survey-Based Study, *Prosthesis*, 5(2), 550-561.
<https://doi.org/10.3390/prosthesis5020038>
45. United Nations. Goal 9: Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialization and foster innovation.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/infrastructure-industrialization/>

- 46.Chrobot, P., Faist, M., Gustavus, L., Martin, A., Stamm, A., Zah, R., Zollinger, M. (2018). Environmental Impact of the Global Apparel and Footwear Industries Study, Quantis 65p.
- 47.Global Industry Analysts, Inc. Footwear: Global Strategic Business Report. – San Jose, CA: Global Industry Analysts, Inc., 2023. <https://www.strategyr.com/market-report-footwear-forecasts-global-industry-analysts-inc.asp>.
48. Gómez-Hernández, J.-F., Davia-Aracil, M., Sanchez-Romero, J.-L., Jimeno-Morenilla, A. (2021). An approach to implement STEP-NC in the footwear industry, *Computers in Industry*, 125, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2020.103384>
- 49.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, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(2), 194-205. <http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2018.1550675>
- 50.Pech, M., & Vrchota, J. (2022). The product customization process in relation to Industry 4.0 and digitalization. *Processes*, 10(3), 539. <https://doi.org/10.3390/pr10030539>
- 51.Oliveira, N., Cunha, J., & Carvalho, H. (2019). Co-design and mass customization in the Portuguese footwear cluster: An exploratory study. *In CIRP Design*, 923-929. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.285>
- 52.Mandarić, M., Hunjet, A., & Vuković, D. (2022). The impact of fashion brand sustainability on consumer purchasing decisions. *Journal of Risk and Financial Management*, 15(4), 177. <https://doi.org/10.3390/jrfm15040176>
- 53.Polese, F., Ciasullo, M. V., Troisi, O., & Maione, G. (2019). Sustainability in footwear industry: A big data analysis. *Sinergie*, 37(1), 183–200. <http://dx.doi.org/10.7433/s108.2019.09>
- 54.João Pedro, B., António Dinis, M., Fernando, F., Mafalda, N., & Alexandra, L. (2018). The Generation Y's sustainability perceptions and consumption

- habits in the footwear industry in Portugal. In *Proceedings of the 18th AUTEX World Textile Conference*, Istanbul, Turkey.
55. Akter Munny, A., Ali, S. M., Kabir, G., Moktadir, M. A., Rahman, T., & Mahtab, Z. (2019). Enablers of social sustainability in the supply chain: An example of footwear industry from an emerging economy. *Sustainable Production and Consumption*, 20, 230–242.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.spc.2019.07.003>
 56. Marques, A., Guedes, G., & Ferreira, F. (2017). Leather wastes in the Portuguese footwear industry: New framework according to design principles and circular economy. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Natural Fibers: Advanced Materials for a Greener World*, 200. 303-308.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.043>
 57. Spahiu, T., Almeida, H., Ascenso, R., Vitorino, L., & Marto, A. (2021). Optimization of shoe sole design according to individual feet pressure maps. *Computers in Industry*, 125, 103375.
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103375>
 58. Materialise SAM – 3D Foot Scanning App. Materialise | 3D Printing Innovators. <https://www.materialise.com/en/healthcare/sam-scanning-app>
 59. University of Cambridge. New mobile phone app shows how well shoes will fit based on the 3D shape of the user's foot. Tech Xplore - Technology and Engineering news. <https://techxplore.com/news/2022-05-mobile-app-based-3d-user.html>
 60. Treleaven, P. (2004). Sizing us up – new 3-D body scanners are reshaping clothing, car seats, and more. *IEEE Spectrum*, 41(April), 28-32.
 61. Besliu, D. (2011). *Measurement devices for custom shoe manufacturing* (Master's thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada). 101 pages.
 62. Kouchi, M., Mochimaru, M., Tsuzuki, K., & Yokoi, T. (1999). Interobserver errors in anthropometry. *Journal of Human Ergology*, 28(1–2), 15–24.

63. Kouchi, M., & Mochimaru, M. (2011). Errors in landmarking and the evaluation of the accuracy of traditional and 3D anthropometry. *Applied Ergonomics*, 42(3), 518–527. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2010.09.011>
64. Robinette, K. M., & Daanen, H. A. M. (2006). Precision of the CAESAR scan-extracted measurements. *Applied Ergonomics*, 37(3), 259–265. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2005.07.009>
65. Liu, S., Chi, Y., Sanchez, S., & Stricker, D. (2011). Foot scanning and deformation estimation using time-of-flight cameras. *Footwear Science*, 3(1), 98–99.
66. 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(1), 19–27. <https://doi.org/10.1186/1757-1146-3-19>
67. Carroll, M., Annabell, M. E., & Rome, K. (2011). Reliability of capturing foot parameters using digital scanning and the neutral suspension casting technique. *Journal of Foot and Ankle Research*, 4(1), 9. <https://doi.org/10.1186/1757-1146-4-9>
68. Zhao, J., Xiong, S., Bu, Y., & Goonetilleke, R. S. (2008). Computerized girth determination for custom footwear manufacture. *Computers & Industrial Engineering*, 54(3), 359–373. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2007.07.015>
69. Grimmer, R., Eskofier, B., Schlarb, H., & Hornegger, J. (2011). Comparison and classification of 3D objects surface point clouds on the example of feet. *Machine Vision and Applications*, 22(2), 235–243. <http://dx.doi.org/10.1007/s00138-009-0230-y>
70. Robinette, K. M., Daanen, H., & Paquet, E. (1999). The CAESAR project: A 3-D surface anthropometry survey. In *Proceedings of the Second International Conference on 3D Imaging and Modelling* (pp. 380). Ottawa, Canada. <https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/IM.1999.805368>
71. Witana, C. P., Xiong, S., Zhao, J., & Goonetilleke, R. S. (2006). Foot measurements from three dimensional scans: A comparison and evaluation of

- different methods. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(7), 789–807. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ergon.2006.06.004>
72. Mall, N. A., Hardaker, W. M., Nunley, J. A., & Queen, R. M. (2007). The reliability and reproducibility of foot type measurements using a mirrored foot photo box and digital photography compared to caliper measurements. *Journal of Biomechanics*, 40(5), 1171–1176. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2006.04.021>
73. De Mits, S., Coorevits, P., De Clercq, D., & Elewaut, D. (2010). Reliability and validity of the Infoot 3D foot digitizer for normal healthy adults. *Footwear Science*, 2(2), 65–75. <http://dx.doi.org/10.1080/19424281003685694>
74. De Mits, S., Coorevits, P., De Clercq, D., & Elewaut, D. (2011). Reliability and validity of the INFOOT three-dimensional foot digitizer for patients with rheumatoid arthritis. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 101(3), 198–207. <https://doi.org/10.7547/1010198>
75. Noldner, L. K., & Edgar, H. J. H. (2013). 3D representation and analysis of entheses morphology. *American Journal of Physical Anthropology*, 152(3), 417–424. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22367>
76. Krauss, I., Grau, S., Mauch, M., Maiwald, C., & Horstmann, T. (2008). Sex-related differences in foot shape. *Ergonomics*, 51(11), 1693–1709. <https://doi.org/10.1080/00140130802376026>
77. Mauch, M., Grau, S., Krauss, I., Maiwald, C., & Horstmann, T. (2009). A new approach to children's footwear based on foot type classification. *Ergonomics*, 52(8), 999–1008. <https://doi.org/10.1080/00140130902803549>
78. Luo, G., Houston, V. L., Mussman, M., & Garbarini, M. (2009). Comparison of male and female foot shape. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 99(5), 383–390. <https://doi.org/10.7547/0990383>
79. Houston, V. L., Luo, G., Mason, C. P., & Mussman, M. (2006). Changes in male foot shape and size with weightbearing. *Journal of the American*

- Podiatric Medical Association*, 96(4), 330–343.
<https://doi.org/10.7547/0960330>
- 80.Xiong, S., Goonetilleke, R. S., Zhao, J., & Li, W. (2009). Foot deformations under different load-bearing conditions and their relationships to stature and body weight. *Anthropological Science*, 117(2), 77–78.
<http://dx.doi.org/10.1537/ase.070915>
- 81.Oladipo, G., Bob-Manuel, I., & Ezenatein, G. (2009). Quantitative comparison of foot anthropometry under different weight bearing conditions amongst Nigerians. *Internet Journal of Biological Anthropology*, 3(1).
- 82.Shi, N., Yi, S., Xiong, S., & Jiang, Z. (2009). A CAD system for shoe last customization. In *Proceedings of the International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*. 957–960.
<http://dx.doi.org/10.1109/CSO.2009.229>
- 83.Lord, M., Foulston, J., & Smith, P. J. (1991). Technical evaluation of a CAD system for orthopaedic shoe-upper design. *Journal of Engineering in Medicine*, 205(2), 109–115.
https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1991_205_276_02
- 84.Bao, H. P., Soundar, P., & Yang, T. (1994). Integrated approach to design and manufacture of shoe lasts for orthopaedic use. *Computers in Engineering*, 26(5), 411–421. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(94\)90074-4](https://doi.org/10.1016/0360-8352(94)90074-4)
- 85.Payne, C. (2007). Cost benefit comparison of plaster casts and optical scans of the foot for the manufacture of foot orthoses. *Australian Journal of Podiatric Medicine*, 41(2), 29–31.
- 86.Losito, J. M. (1996). Impression casting techniques. In R. Valmassy (Ed.), *Clinical biomechanics of the lower extremity*. 528.
- 87.Spahiu, T., Sarghie, B., Piperi, E., Shehi, E., & Agolli, A. (2016). Road-map for footwear production: 3D last scanning – 3D designing – industrial manufacturing. In *7th International Conference of Textile*, 10–11 November, Tirana, Albania.

88. Shi, N., Yi, S., Xiong, S., & Jiang, Z. (2009). A CAD system for shoe last customization. In *Proceedings of the International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*, Sanya, China. 957–960.
<http://dx.doi.org/10.1109/CSO.2009.229>
89. Lee, Y.-C., Lin, G., & Wang, M.-J. J. (2014). Comparing 3D foot scanning with conventional measurement methods. *Journal of Foot and Ankle Research*, 7(1), 44. <https://doi.org/10.1186/s13047-014-0044-7>
90. Payne, C. (2007). Cost benefit comparison of plaster casts and optical scans of the foot for the manufacture of foot orthoses. *Australian Journal of Podiatric Medicine*, 41(2), 29–31
91. Echeita, J. A., Hijmans, J. M., & Smits, S. (2016). Age-related differences in women's foot shape. *Maturitas*, 94, 64–69.
<https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2016.09.001>
92. Burns, S., Leese, G., & McMurdo, M. (2002). Older people and ill-fitting shoes. *Postgraduate Medical Journal*, 78(920), 344–346.
<https://doi.org/10.1136/pmj.78.920.344>
93. Anggoro, P. W., Anhony, A. A., Tauviquirrahman, M., Jamari, J., & Bayuseno, A. P. (2019). Reverse innovative design and manufacturing strategy for optimizing production time of customized orthotic insoles with CNC milling. *Journal of Physics: Conference Series*, 13(4), 20.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1517/1/012045>
94. Di Roma, A. (2017). Footwear design. The paradox of "tailored shoe" in the contemporary digital manufacturing systems. *The Design Journal*, 20(sup1), S2689–S2699. <https://doi.org/10.1080/14606925.2017.1352780>
95. Rout, N., Khandual, A., Zhang, Y. F., & Luximon, A. (2010). 3D foot scan to custom shoe last. *International Journal of Computer and Communication Technology*, 1(2), Article 3. <http://dx.doi.org/10.47893/IJCCT.2010.1030>
96. Xiong, S., Zhao, J., Jiang, Z., et al. (2010). A computer-aided design system for foot-feature-based shoe last customization. *International Journal of*

- Advanced Manufacturing Technology*, 46(1-2), 11–19.
<https://doi.org/10.1007/s00170-009-2087-7>
97. Costea, M., Mihai, A., & Seul, A. (2022). 3D modelling of customized lasts based on anthropometric data acquired from 3D foot scanning – One case study. *Leather and Footwear Journal*, 22(2), 87–100.
<https://doi.org/10.24264/lfj.22.2.2>
 98. Goonetilleke, R. S. (2013). *The science of footwear (Human factors and ergonomics)* (1st ed., 688 p.).
 99. Чертенко, Л. П., & Гопенко, А. В. (2017). Дослідження можливостей 3D САПР для проєктування поверхні взуттєвої колодки. *Вісник Хмельницького національного університету*, (3), 80–86. http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21CO M=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Vchnu_tekh_2017_3_18
 100. Wang, J., Zhang, H., Lu, G., & Liu, Z. (2011). Rapid parametric design methods for shoe-last customization. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(1-4), 173–186.
<https://doi.org/10.1007/s00170-010-3144-y>
 101. Driscu, M., & Costea, M. (2014). Shoe last shape customization. *Leather and Footwear Journal*, 14(3) <http://dx.doi.org/10.24264/lfj.14.3.4>
 102. Petcu, D. (2020). Pedorthic information modeling. *Proceedings of the Romanian Academy, Series B*, 22(2), 111–120.
 103. Chuanzhong, H., & Jun, Y. (2017). Grid generation on free-form surface using guideline advancing and surface flattening method. *Advances in Engineering Software*, 110, 98–109.
<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.04.003>.
 104. McCartney, J., Hinds, B., & Chong, K. (2005). Pattern flattening for orthotropic materials. *Computer-Aided Design*, 37(6), 631–644.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2004.09.006>

105. Li, J., Zhang, D., Lu, G., Peng, Y., Wen, X., & Sakaguti, Y. (2005). Flattening triangulating surfaces using a mass-spring model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25, 108–117. <https://doi.org/10.1007/s00170-003-1818-4>
106. Kim, S. H., & Shin, K. H. (2009). A method for deforming a surface model using guide surfaces in shoe design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42(1), 60–72. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1578-2>
107. Shi, N., Yi, S., Xiong, S., & Jiang, Z. (2009). A CAD system for shoe last customization. In *Proceedings of the International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization* (pp. 957–960). Sanya, China. <http://dx.doi.org/10.1109/CSO.2009.229>
108. WorldFootwear Reports. (2023). Digital prototyping: What tools are available for the footwear industry? <https://www.worldfootwear.com/news/digital-prototyping-what-tools-are-available-for-the-footwear-industry/9262.html>
109. How to 3D Print your own Shoe Lasts with Working Hinges - 3DShoemaker. 3DShoemaker. <https://3dshoemaker.com/how-to-3d-print-your-own-shoe-last-with-working-hinges/>
110. Amza, C., Zapciu, A., & Popescu, D. (2019). 3D-printed shoe last for bespoke shoe manufacturing. *MATEC Web of Conferences*. 04001, 6. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929004001>
111. Iacob, M. C., Popescu, D., Petcu, D., & Marinescu, R. (2023). Assessment of the flexural fatigue performance of 3D-printed foot orthoses made from different thermoplastic polyurethanes. *Applied Sciences*, 13(22), 12149. <https://doi.org/10.3390/app132212149>
112. Jurca, A., Žabkar, J., & Džeroski, S. (2019). Analysis of 1.2 million foot scans from North America, Europe and Asia. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55432-z>

113. Copeland, G., *The Foot Book: Relief for Overused, Abused & Ailing Feet* – October 7, 1997, 208 p.
114. Chertenko, L., Kernesh, V., Pervaia, N., & Lypskyi, T. (2021). The improved approach to the development of parameters for the inner shape of military boots. *Leather and Footwear Journal*, 21(4), 205–216. <http://dx.doi.org/10.24264/lfj.21.4.1>
115. Grasshopper. Grasshopper - algorithmic modeling for Rhino. <https://www.grasshopper3d.com/>
116. Chertenko, L., Kernesh, V., Parvaia, N., & Lypskyi, T. (2021). The improved approach to the development of parameters for the inner shape of military boots. *Revista de Pielarie Incaltaminte*, 21(4), 205–216. <http://dx.doi.org/10.24264/lfj.21.4.1>
117. Саломео А. Односторонній дисперсійний аналіз: розуміння, проведення та презентація. Блог Mind the Graph. <https://mindthegraph.com/blog/uk/одностороння-анова/>
118. Real Statistics. (n.d.). Studentized range Q table. <https://real-statistics.com/statistics-tables/studentized-range-q-table/>

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

У наукових виданнях, що проіндексовані в базі даних Scopus:

1. **Bondar, O.**, Chertenko, L., Spahiu, T., Shehi, E. Shoe customization in a mass-production mode. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2024, 19, doi:10.1177/15589250241239247 (Q2)
https://www.researchgate.net/publication/379084465_Shoe_customization_in_a_mass-production_mode
2. L. Chertenko, D. Kaptiurova, **O. Bondar** Improving the Footwear Ergonomics by Personalizing its Shape. ICAMS 2022 – 9 th International Conference on Advanced Materials and Systems, Bucharest, Romania, 26-28 October 2022, pp. 285–290, <https://doi.org/10.24264/icams-2022.III.5>
https://www.researchgate.net/publication/365723356_Improving_the_Footwear_Ergonomics_by_Personalizing_Its_Shape

У наукових фахових виданнях категорії Б:

3. Д. О. Каптюрова, Л. П. Чертенко, **О.І. Бондар**, О. Нос. Досконалення внутрішньої форми взуття з використанням сучасних прогресивних технологій // Вісник Хмельницького національного університету. Серія “Технічні науки”. - 2022. - № 6. - С. 102 – 110. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-102-110>
4. Л.П. Чертенко, В.П. Кернеш, Б.І. Смоленська, **О.І. Бондар**. Шляхи підвищення рівня зручності взуття масового виробництва // Індустрія моди №1, 2022, ст. 20-27.
https://www.researchgate.net/publication/362229705_WAYS_TO_INCREASE_THE_COMFORT_LEVEL_OF_THE_MASS_PRODUCTION_FOOTWEAR

Тези доповідей на конференціях міжнародного рівня:

5. D. Kaptiurova, L. Chertenko, **O. Bondar**. Usage of Additive Technologies for Orthopedic Footwear Manufacturing / Technical Scientific Conference of Undergraduate, Master and PhD Students, Technical University of Moldova (April 2024)
<http://repository.utm.md:8080/bitstream/handle/5014/28359/Conf-TehStiint-UTM-StudMastDoct-2024-V4-p2155-2158.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
6. Liliia Chertenko. Additive Technologies to Boost Development and Improve New Shapes of Footwear Products I am running a few minutes late; my previous meeting is running over. L.Chertenko, O. Udovenko, **O. Bondar**, T.Spahiu. Book of Abstracts of 15th Joint International Conference on Innovation in Clothing – Clotech, Dresden 2024
7. Liliia Chertenko. Development of Orthopedic Footwear for Orthoses on the Lower Limbs \ L.Chertenko¹, D. Kaptiurova¹, T.Spahiu, **O. Bondar** KyivTexFashion conference, Kyiv 2024
8. D. Kaptiurova, L. Chertenko, **O. Bondar**. Improvement of the shape and design of tactical footwear for the Ukrainian military. V-th International symposium creativity technology marketing 2023 Technical University of Moldova, 31 березня 2023, с. 213-215. https://ibn.idsi.md/sites/default/files/imag_file/213-214_11.pdf
9. L. Chertenko, D.Kaptiurova, **O. Bondar** "Practical Aspects of 3D Scanning Results Application in Shoe Last Design", Proc. of 3DBODY.TECH 2023 - 14th Int. Conf. and Exh. on 3D Body Scanning and Processing Technologies, Lugano, Switzerland, 17-18 Oct. 2023, #28, <https://doi.org/10.15221/23.28>.
10. Л. Чертенко, М. Матвеев, **О. Бондар**. Вдосконалення форми ергономічного взуття в контексті «sustainable fashion». Збірник тез доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції текстильних та фешн технологій KyivTex&Fashion, м. Київ, 19 жовтня 2023 року. – Київ : КНУТД, 2023. – С.246-249