

УДК 685.34.02

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.39343

АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ОБТІКАННЯ МАТЕРІАЛОМ КОЛОДКИ ПРИ ШНУРОВІЙ ЗАТЯЖЦІ ЗАГОТОВКИ ВЕРХУ ВЗУТТЯ

© Р. В. Росул, В. І. Хімич, М. С. Сідей

В роботі приведені принципи, підходи для прецизійного дослідження факторів, що впливають на якість формування верху взуття. Пропонується новий спосіб для розрахунку динаміки несталіх течій за допомогою методу маркерів і комірок, які будуються як кінцеві різності. Вирішена задача для визначення поля швидкостей і напружень з прикладеними граничними умовами з врахуванням переміщення часток матеріалу

Ключові слова: якість шнурової затяжки, формування, деформація матеріалу, обтікання, параметри напруга, маркери і осередки

The paper presents the principles, approaches for the precise study of factors affecting the quality of shoe upper forming. It is proposed a new method for calculating the dynamics of unstable flows using the method of markers and cells that are constructed as finite differences. It is solved the problem to determine the velocity field and the strain attached to them with the boundary conditions with movement of the particles of the material

Keywords: quality of tightening shoelaces, forming, deformation of the material, flow, strain parameters, markers and cells

1. Вступ

У статті розглядається спосіб прецизійного дослідження факторів, що впливають на якість формування деталей верху взуття при шнуровій затяжці верху. Пропонується новий спосіб для розрахунку динаміки несталіх течій за допомогою методу маркерів і комірок, які будуються як кінцеві різності на сітці фіксованих комірок.

В окремих галузях промисловості при розрахунку впливу технологічного зусилля на матеріал під дією інструменту, наприклад, при обробці деревини, гарячого металу широко застосовують загальні рівняння механіки суцільного середовища [1]. Враховуючи, що шкіра по своїй волокнистій структурі подібна до деревини і може розглядатись як суцільне середовище, припустимо, що задачу визначення напружень у шкірі верху теж можна рішити шляхом розв'язку рівнянь механіки суцільного середовища

З проведеного патентного пошуку і огляду технічної літератури [2–4] встановлено, що:

а) натуральні шкіри не підкоряються закону Гука;

б) аналітично визначити напруження при формуванні не можливо;

в) в попередніх дослідженнях процесу формування не було спроб визначення напруження ні аналітично, ні експериментально;

г) особливо важливо знати зону дії напруження розтягу.

2. Об'єкти та методи дослідження

Процес шнурової затяжки деталей верху взуття є окремим випадком операції формування. На даний час існують загальні принципи теорії формування при затягуванні заготовки шнуром і зовсім не представлено моделювання процесу обтікання матеріалом колодки. У такому разі є сенс розглянути способи і методи по дослідженню про-

цесу формування верху взуття гнучким силовим елементом.

Зокрема, закономірності, що характеризують процес формування м'яких матеріалів, ще мало досліджені. Відомо, що такі характеристики як технологічне зусилля та відносне видовження визначають формування і комфортність взуття. В зв'язку з цим виникає необхідність у визначенні залежності параметрів обладнання від характеристик елементів шнурової затяжки.

3. Літературний огляд

Якщо при обтяжно-затяжному способі деформація заготовки залежить від властивостей матеріалів, то при формуванні паралельними зовнішнім чи внутрішнім способами деформація заготовки постійна, оскільки формуючі інструменти доходять до певного кінцевого положення, тобто вона залежить від зменшення площі деталей при затяжці. Як показали дослідження [5, 6], для формування просторової заготовки матеріал достатньо розтягнути на 2–4 %. Але для створення формостійкого верху його необхідно розтягнути на 7–10 %. Лінійне зменшення розмірів деталей просторової заготовки більше ніж на 7–10 % при формуванні призведе до розриву швів.

Для дослідження співвідношення зусилля розтягу матеріалу заготовки і її деформації в різних ділянках під час шнурової затяжки застосовують переважно інструментальні методи – за допомогою спеціальних пристроїв до розтяжних машин та пристрої, що входять в силові схеми затяжних машин. Відомий пристрій для дослідження процесу шнурової затяжки заготовки верху взуття [7], що включає основу і розташовану на ній установчу призму для прикріплення опорної площини взуттєвої колодки з натягнутим на останню верхом взуття, по периметру якого введений гнучкий си-

ловий елемент. Він суміщений з напівавтоматом МК-6МА, який призначений для виконання шнурової затяжки деталей верху взуття із подальшим механізованим зав'язуванням кінців шнура. Однак цей пристрій не може застосовуватись для точного вимірювання деформації заготовки з таких причин:

- він призначений для безпосереднього здійснення виробничого процесу;
- пристрій не дає змоги послідовно змінювати та задавати величину навантаження на гнучкий силовий елемент;
- в його конструкції не передбачені вимірювальні пристрої для вимірювання та фіксування величини загальної деформації заготовки;
- пристрій не пристосований для вимірювання видовження матеріалу заготовки.

Методи розрахунку і проектування заготовок верху взуття не забезпечують точні розміри і форму заготовок, які формуються методом шнурової затяжки. Відсутній аналітичний опис процесу обтікання матеріалом колодки.

4. Постановка задачі

При формуванні верху взуття методом шнурової затяжки дуже важливим є визначення швидкості будь якої частинки середовища, що знаходиться в зоні деформації матеріалу, та розв'язок рівняння зв'язку між компонентами тензорів напружень і швидкостей деформацій, який дає значення напруження, що виникає в матеріалі при його розтягуванні гнучким силовим елементом.

5. Формулювання цілі статті

Для формування просторової заготовки методом шнурової затяжки передбачається проведення моделювання зміни розмірів і положення основних ділянок заготовки та встановлення механізму цих змін, вибір оптимальних режимів цього процесу. Таким чином, завданням аналітичних досліджень процесу формування при шнуровій затяжці деталей верху взуття є математичне моделювання протікання даних процесів в режимі диференціації ε -зміщення (деформація), v -швидкості руху інструменту, σ -напруження.

6. Результати та їх обговорення

Поставлена задача досягається тим, що враховуючи, що шкіра по своїй волокнистій структурі подібна до деревини і може розглядатись як суцільне середовище, припустимо, що задачу визначення напружень у шкірі верху теж можна рішення шляхом розв'язку рівнянь механіки суцільного середовища, а саме рівнянь руху та нерозривності [8]

$$\begin{cases} \rho \cdot \frac{dv_x}{dt} = \rho \cdot X + \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right); \\ \rho \cdot \frac{dv_y}{dt} = \rho \cdot Y + \left(\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right); \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = 0, \quad (2)$$

де ρ – густина матеріалу, кг/м^3 ; $\rho \cdot \frac{dv_x}{dt}$, $\rho \cdot \frac{dv_y}{dt}$ – інерційні сили, що виникають при нерівномірному русі окремих частинок суцільного середовища, як наслідок нерівномірного руху відносно інструменту (колодки), Н;

X , Y – масові сили, Н;

$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x}$, $\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}$, $\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x}$, $\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y}$, – відповідно нормальні та дотичні складові тензору напружень, Па;

$\frac{\partial v_x}{\partial x}$, $\frac{\partial v_y}{\partial y}$ – швидкості руху частинок суцільного середовища, м/с.

Рівняння (1), (2) є основними для визначення поля швидкостей та напружень. Додамо до них граничні умови, приймаючи схему навантаження простою в якості вихідного посилання:

– густина матеріалу в процесі затягування не змінюється;

– швидкість затягування не змінюється і є сталою величиною;

– масовими силами X , Y нехтуємо, внаслідок того, що їх величини мають порівняно малі значення [8];

– деформація протікає при постійному об'ємі.

Задача вирішується з урахуванням реального переміщення частинок матеріалу під дією навантаження. При цьому вважаємо, що зовнішні сили викликають однозначну деформацію волокон шкіри.

Ллюшином А. А. [9], Алексієвим Ю. Н. [10] було встановлено, що при великих пластичних деформаціях у випадку простого навантаження направляючий тензор напружень співпадає з направляючим тензором швидкостей деформацій і має місце коефіцієнт жорсткості:

$$\mu_i = \frac{\sigma_i}{3 \cdot \varepsilon_i}. \quad (3)$$

Виходячи з (3) і вважаючи, що має місце плоский напружений стан, рівняння зв'язку між компонентами тензорів напружень і швидкостей деформацій можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \sigma + 2 \cdot \mu_i \cdot \varepsilon_{xx}, \\ \sigma_{yy} = \sigma + 2 \cdot \mu_i \cdot \varepsilon_{yy}, \\ \tau_{xy} = \mu_i \cdot \varepsilon_{xy}, \end{cases} \quad (4)$$

де σ – середнє напруження, Па; ε_{xx} , ε_{yy} – поздовжні і поперечні деформації матеріалу верху.

Швидкості деформацій тут рівні:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial v_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}. \quad (5)$$

Приймаючи ці рівняння (3)–(5) щодо деформування шкіри і перетворюючи рівняння руху, отримуємо:

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \mu_i \cdot \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) + 2 \cdot \frac{\partial \mu_i}{\partial x} \cdot \frac{dv_x}{dx} + \frac{\partial \mu_i}{\partial x} \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = \frac{\partial \sigma}{\partial y} + \mu_i \cdot \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) + 2 \cdot \frac{\partial \mu_i}{\partial y} \cdot \frac{dv_y}{dy} + \frac{\partial \mu_i}{\partial x} \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \end{cases} \quad (6)$$

Згідно припущення, $v=const$. Тоді система рівнянь (6) прийме вигляд:

$$\begin{cases} \rho \left(v_x \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \mu_i \cdot \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) + 2 \cdot \frac{\partial \mu_i}{\partial x} \cdot \frac{dv_x}{dx} + \frac{\partial \mu_i}{\partial x} \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \\ \rho \left(v_x \cdot \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = \frac{\partial \sigma}{\partial y} + \mu_i \cdot \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) + 2 \cdot \frac{\partial \mu_i}{\partial y} \cdot \frac{dv_y}{dy} + \frac{\partial \mu_i}{\partial x} \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \end{cases} \quad (7)$$

Враховуючи низьку теплопровідність шкіри [11] рівняння (7) можна записати наступним чином:

$$\begin{cases} \rho \left(v_x \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \mu_i \cdot \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) \\ \rho \left(v_x \cdot \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = \frac{\partial \sigma}{\partial y} + \mu_i \cdot \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (8)$$

Як видно, визначення σ може бути вирішено, якщо відоме поле швидкостей переміщення частинок матеріалу під час деформування.

Також отримано вираз для потенціалу швидкостей і функції течії:

$$\phi = v_{зам} \cdot \left(x + \frac{m \cdot (2 \cdot m - 1) \cdot b^2 \cdot x}{x^2 + y^2} \right); \quad (9)$$

$$w = v_{зам} \cdot \left(y - \frac{m \cdot (2 \cdot m - 1) \cdot b^2 \cdot x}{x^2 + y^2} \right); \quad (10)$$

де $m = \frac{\pi}{2 \cdot (\pi - a)}$, a – товщина фрикційної діафрагми,

b – ширина затяжної кромки.

Швидкості через потенціал швидкостей і функцію току виражається наступним чином:

$$v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v_y = \frac{\partial \phi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}; \quad (11)$$

Продиференціювавши рівняння (9), (10) відповідно (11) і враховуючи зворотність руху, тобто вважаючи колодку нерухомою, а матеріал верху таким, що рухається зі швидкістю $v_{зам}$, отримуємо вираз для поля швидкостей частинок заготовки, яка формується за допомогою шнура:

$$v_x = v_{зам} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot (x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \right), \quad v_y = -v_{зам} \cdot \frac{2 \cdot n \cdot x \cdot y}{(x^2 + y^2)^2}. \quad (12)$$

де $n = m(2m-1) b^2$.

Метод маркерів і комірок являє собою чисельний підхід для розрахунку динаміки несталих течій в'язкої нестисливої рідини у порожнині литвевій прес-форми, для визначення плинину металу при його об'ємному деформуванні, а також для вирішення ряду інших технічних задач У ньому використовується кінцево-різницева схема для рішення рівнянь, що описують той чи інший процес.

Метод комірок є різновидом сіткових методів. Методом кінцевих різниць присвячена велика кількість наукової літератури, у яких докладно розглянуті питання теорії та побудови різницевих схем, методи рішення систем алгебраїчних рівнянь тощо.

У методі маркерів і комірок всі диференціальні рівняння та граничні умови записуються у кінцевих різницях на сітці фіксованих комірок, яка покриває локально перетин матеріалу в області формування матеріалу. Час виконання умов також розбивається на кінцеве число інтервалів – через деяку кількість однакових часових кроків. Обчислення на кожному кроці здійснюються за наступною схемою:

а) на початку часового етапу викорис-товуються всі необхідні дані про комірки та координати маркерів – з початкових умов, або з результатів обчислень попереднього етапу;

б) розв'язуються основні рівняння з заданими граничними умовами для області, що містить маркери, тобто визначаються видовження і напруження у кожній розрахунковій комірці;

в) здійснюється черговий крок за часом і всі обчислення повторюються знову вже для нової області, і так далі, до останньої комірки.

Диференціальні рівняння руху і граничні умови записуються на сітці прямокутних комірок розміром $h \times h$, що покриває локально переріз матеріалу. Вигляд сітки встановлюється в залежності від геометричних параметрів заготовки та колодки. Типова сітка комірок представлена на рис. 1. Для кожного вузла сітки, що знаходиться в області занурення, визначаються три незалежні змінні ϵ -зміщення (деформація), v -швидкість руху інструменту, σ -напруження.

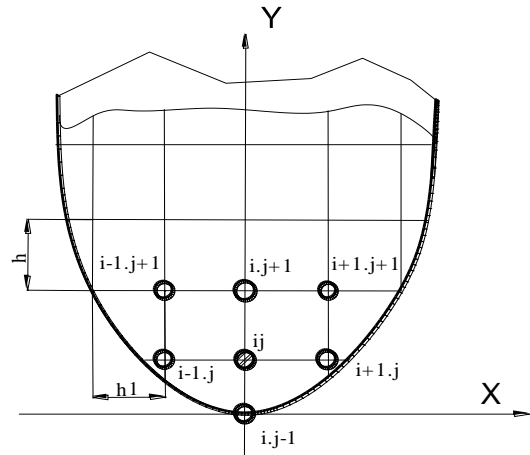


Рис. 1. Схема сітки фіксованих комірок перетину ділянки заготовки в області обтікання колодки матеріалом заготовки

Використовуючи праці науковців [12], а також прийняті раніше позначення $\varepsilon=v_x$, $i=v_y$, перепишемо диференційні рівняння руху (8), що описують процес обтікання колодки матеріалом заготовки, у кінцево-різницевої формі, замінюючи диференційні оператори їхніми різницевиими аналогами:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \cdot \left(U_{ij} \cdot \frac{U_{ij} - U_{i-1,j}}{h} + v_{ij} \cdot \frac{U_{ij} - U_{i,j-1}}{h_i} \right) &= \\ = \frac{\sigma_{ij} - \sigma_{i-1,j}}{h} + \mu \left(\frac{U_{i+1,j} - 2 \cdot U_{ij} + U_{i-1,j}}{h^2} + \frac{U_{i,j+1} - 2 \cdot U_{ij} + U_{i,j-1}}{h_i^2} \right); & (13) \\ \rho \cdot \left(U_{ij} \cdot \frac{U_{ij} - U_{i-1,j}}{h} + v_{ij} \cdot \frac{U_{ij} - U_{i,j-1}}{h_i} \right) &= \\ = \frac{\sigma_{ij} - \sigma_{i-1,j}}{h} + \mu \left(\frac{U_{i+1,j} - 2 \cdot v_{ij} + v_{i-1,j}}{h^2} + \frac{v_{i,j+1} - 2 \cdot v_{ij} + v_{i,j-1}}{h_i^2} \right). & \end{aligned} \right.$$

Отримана система рівнянь (13) дозволяє крок за кроком по комірках розрахувати напруження, які виникають у матеріалі верху в різні проміжки часу при шнуровій зтяжці.

7. Висновки

Таким чином, моделювання процесу обтікання матеріалом колодки дає можливість краще і більш точніше дослідити параметри, що впливають на якість шнурової зтяжки деталей верху взуття. Запропоновано новий спосіб для розрахунку динаміки несталіх течій за допомогою методу маркерів і комірок, які будуються як кінцеві різності на сітці фіксованих комірок. Вирішено задачу розрахунку впливу технологічного зусилля на матеріал під дією інструменту шляхом розв'язку рівнянь механіки суцільного середовища.

8. Перспективи подальших розвідок

Для подальших досліджень, потрібно врахувати положення гнучкого силового елемента відносно сліду колодки при зтяжці заготовки верху взуття.

Література

1. Кононенко, В. Г. Импульсная обработка металов давлением [Текст] / В. Г. Кононенко, К. И. Зайцев // Харьковский авиационный институт. – 1970. – Вып. 2. – С. 15–39.
2. Чернов, Н. В. Технология кожи. Ч. 1 [Текст] / Н. В. Чернов. – М.: Гизлегпром. 1937. – 237 с.
3. Зурабян, К. М. Материаловедение в производстве изделий легкой промышленности [Текст]: учебник / К. М. Зурабян, Б. Я. Краснов, Я. И. Пустыльник. – М.: Наука, 2003. – 384 с.
4. Лебедев, В. С. Технологические процессы машин и аппаратов в производствах бытового обслуживания: Учебник для вузов [Текст] / В. С. Лебедев. – М.: Легпромбытгиздат, 1991. – 336 с.
5. Skyba, M. The Change of Leather Features Under the Influence of Force Field (Proceedings Volume 1. – The

Eleventh World Congress in Mechanism and Mashine Science) [Text] / M. Skyba. – China, 2004. – p. 376–380.

6. Lewis, T. B. Dynamic Mechanical Property Particulate-Filled Composites [Text] / T. B. Lewis, L. E. Nilen // Journal of Applied Polymer Science. – 1970. – Vol. 14, Issue 6. – P. 1449–1458. doi: 10.1002/app.1970.070140604

7. Тонковид, Л. А. Исследования процесса фрикционного формирования заготовок верха обуви с помощью диафрагмы [Текст] / Л. А. Тонковид, Х. Г. Магомедов // Изв. вузов. Техн. лег. пром-сти. – 1982. – № 3. – С. 77–81.

8. Кононенко, В. Г. Исследование процесса импульсной безотходной резки древесины [Текст] / В. Г. Кононенко, Г. Ф. Аристов // Харьковский авиационный институт. – 1970. – Вып. 2. – С. 97–109.

9. Илюшин, А. А. Пластичность [Текст] / А. А. Илюшин. – М.: АН СССР, 1963. – 253 с.

10. Алексеев, Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов [Текст] / Ю. Н. Алексеев. – Х.: ХГУ, 1958. – 182 с.

11. Илюшин, А. А. Механика сплошной среды [Текст] / А. А. Илюшин. – М.: МГУ, 1971. – 247 с.

12. Синюк, О. М. Вдосконалення пресс-форм для лиття деталей взуття [Текст]: дис. ... канд. техн. наук 05.05.10 / О. М. Синюк. – К.: КНУТД, 2002. – 157 с.

References

1. Kononenko, V., Zaitsev, K. (1970). Pulse treatment of metals pressure. Kharkiv, Ukraine, 2, 15–39.
2. Chernov, N. (1937). Leather technology. Moscow, Russia: Gizlegprom. Part 1, 237.
3. Zurabyan, K., Krasnov, B., Pustyl'nik, Y. (2003). Materials science in the light industry: Textbook for Universities. Moscow, Russia: Nauka, 384.
4. Lebedev, V. (1991). Technological processes of machines and devices in the production of consumer services: Text-book for Universities. Moscow, USSR: Legprombytizdat, 336.
5. Skyba, M. (2004). The Change of leather features under the influence of force field. The Eleventh World Congress in Mechanism and Mashine Science. China, 376–380.
6. Lewis, T., Nilsen, L., Lewis, T. (1970). Dynamic mechanical property particulate-filled composites. Journal of Applied Polymer Science, 14 (6), 1449–1458. doi: 10.1002/app.1970.070140604
7. Tonkovid, L. (1982). Study of the process of formation of the friction shoe uppers blanks using the diaphragm. News universities, 3, 77–81.
8. Kononenko, V., Aristov, G. (1970). Investigation of the process of pulse-waste cutting wood. Kharkiv, Ukraine, 2, 97–109.
9. Ilyushin, A. (1963). Ductility. Moscow, USSR. 253.
10. Alekseev, Y. (1958). Questions plastic flow of metals. Kharkiv, USSR. 182.
11. Ilyushin, A. (1971). Continuum mechanics. Moscow, USSR. 247.
12. Sinyuk, A. (2002). Improvement press molds for casting footwear components. Kyiv, Ukraine. 157.

Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Жигуц Ю. Ю.
Дата надходження рукопису 25.02.2015

Росул Руслан Васильович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра проектування взуття і механіко-технологічних процесів, Мукачівський державний університет, вул. Ужгородська, 26, м. Мукачево, Україна, 89600, E-mail: rosulrv@rambler.ru

Хімич Валентин Іванович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра проектування взуття і механіко-технологічних процесів, Мукачівський державний університет, вул. Ужгородська, 26, м. Мукачево, Україна, 89600, E-mail: valentinekh@rambler.ru

Сідей Марія Степанівна, кафедра проектування взуття і механіко-технологічних процесів, Мукачівський державний університет, вул. Ужгородська, 26, м. Мукачево, Україна, 89600, E-mail: rosulrv@rambler.ru