

М.Є. Скиба, к.т.н., проф.

Технологічний університет Поділля, м. Хмельницький

ПОСЛАБЛЕННЯ ВОЛОКОННОЇ СТРУКТУРИ НАТУРАЛЬНОЇ ШКІРИ ПРИ ДІЇ НАПРУЖЕНЬ ЗСУВУ ТА РОЗТЯГУ

Представлено аналітичне обґрунтування технологічних параметрів процесу розволокнення відходів натуральної шкіри. Розроблена універсальна математична модель розволокнення шкіряного матеріалу шляхом створення направленої об'ємного напруженого стану в ньому з певними параметрами.

1. Постановка проблеми в загальному вигляді

Використання відходів натуральної шкіри та комплекс питань переробки їх у різні вироби і матеріали після розмолу та розволокнення являє собою одну з самих актуальних проблем економіки України і країн європейської спільноти [1...6].

Тільки у виробництві взуття відходи натуральної шкіри від розкрою та вирубки складають більше 20 %. Одним з основних технологічних процесів переробки відходів натуральної шкіри є процес одержання шкіряних картонів шляхом розволокнення відходів шкіри у волоконну масу заданої якості. Як було показано в роботах [7, 8], шкіра має виключно складне і штучно невідтворюване переплетення волокон. Волокна шкіри не тільки тісно переплетені [9], але і певною мірою зрощені між собою таким чином, що всередині шкіри більшості випадків відсутні вільні кінці волокон [10]. Цим обумовлено те, що розволокнення шкіри передбачає попереднє послаблення шкіри до такого стану, після досягнення якого, вона легко розщеплюється на окремі структурні елементи (пучки, фібрили, мікрофібрили тощо).

Таким чином, розробка сучасних технологічних процесів та технічних засобів розволокнення відходів натуральної шкіри неможлива без вирішення питання про вплив напружено-деформованого стану, який формується технологічним обладнанням у шкірі, на процеси послаблення її волоконної структури.

2. Аналіз останніх досягнень в галузі наукових досліджень процесів послаблення і розволокнення шкіри

Розроблена структурно-механічна модель та метод визначення ефективних технологічних параметрів розволокнення шкіряних матеріалів [11] дозволили на основі подання волоконної структури шкіри у вигляді детермінованої композиційної структури певного виду кількісно описати зміну властивостей шкіряного матеріалу під дією силового поля. При цьому вдалося за відомими фізико-механічними властивостями шкіряних відходів та необхідними для одержання волокон технологічними параметрами процесу переробки передбачити діапазон технологічних деформацій, які повинні створити технологічне обладнання для початку послаблення волоконної структури шкіри і її розволокнення при одновісному [12] та двовісному розтягах [13]. В рамках розробленої раніше концепції механічної міцності структури шкіри [14] невирішеними залишаються питання про послаблення та розволокнення структури шкіри в умовах сумісної дії напружень розтягу та зсуву.

3. Мета роботи

Метою цієї роботи є визначення технологічних параметрів процесу послаблення і розволокнення структури шкіри при сумісній дії напружень розтягу та зсуву, що формуються технологічним обладнанням.

Досягнення цієї мети будемо здійснювати методом врахування послідовної взаємодії різних елементів структури шкіри шляхом встановлення функціональної залежності ефективних характеристик шкіри від її внутрішньої будови та технологічних параметрів послаблення і розволокнення структури шкіри.

4. Основний матеріал досліджень

Двохетапне здійснення процесу розволокнення шкіряних відходів дозволяє різко зменшити енергоємність технологічного процесу та підвищити якість одержаного волоконного матеріалу.

На першому етапі досягається послаблення структури шкіри шляхом створення в матеріалі складного напруженого стану, який дозволяє досягнути безобривного розволокнення по всьому об'єму шкіряної сировини. Найбільш повно цей ефект реалізується на прогресивному валковому обладнанні [14...16] прохідного типу. Використання валків гребінчастого профілю дозволяє залежно від співвідношення параметрів гребінки (крок, кути профілю, радіуси заокруглень профілю) формувати в матеріалі одночасно напруження стану та зсуву [15, 16]. Таке деформування матеріалу "особливим чином" дозволяє здійснювати послаблення структури шкіри з використанням ефекту зменшення міцності на зсув волоконної композиції при виникненні напружень зсуву в площині, що перпендикулярна до пучків [17]. При цьому матеріал піддається розтягу до величини граничної відносної деформації [11], що обумовлює випрямлення та орієнтування пучків волокон у напрямку технологічних навантажень. Випрямлення пучків волокон викликає зменшення звитості та петлистості волокон і як наслідок – зменшення зусиль, що утримують волокна в шкірі [18, 19], тобто це обумовлює зменшення енерговитрат для досягнення необхідного ефекту – забезпечення розволокнення за рахунок зменшення напружень однорідної взаємодії [11] між волокнами. Для інтенсифікації процесу послаблення структури шкіри матеріал піддається дії напружень зсуву.

Дія напружень зсуву на пучки волокон призводить не лише до їх взаємного зміщення, але і до повороту навколо осей пучків, що сприяє розриву залишкових спайок та склейок, які мають місце між окремими волокнами та пучками [19].

Внаслідок дії на матеріал комплексу напружень розтягу та зсуву структура шкіри ніби перетирається між поверхніми профільованих валків. При цьому шкіряний матеріал із волоконно-сітчастого матеріалу [19] з високими фізико-механічними властивостями перетворюється у структурований матеріал [20], що складається з майже випрямлених пучків волокон, майже не зв'язаних між собою. Після послаблення структури матеріал потрапляє в зону безпосереднього розділення на окремі пучки.

Оскільки міцність структурованого матеріалу значно нижча міцності окремих пучків волокон, то процес остаточного розволокнення проходить з меншими енерговитратами, швидше та з більш високою якістю одержання волоконної маси.

Використовуючи гіпотези і модель волоконної структури шкіри [11, 12, 13] у вигляді детермінованої композитної структури, утвореної пучками волокон просторово-криволінійної форми у вигляді ланцюгів, утворених з послідовно з'єднаних еліпсоподібних елементів з ефективними розмірами напівосей d_j і $c_j = l_0 2^{(j-1)}$, $j = 1, 2, 3, \dots, n$ (рис. 1).

Розглянемо модель волоконної структури шкіри, послабленої внаслідок дії попереднього розтягу в напрямку осі x_1 , яка піддається деформації поперечного зсуву під дією напружень $\alpha_{23}^0 \langle \sigma_{23} \rangle$ (рис. 1, б). При цьому в еліпсоподібному волокні виникає напружений стан:

$$\bar{T}_a = (\bar{e}_3 \bar{e}_3 - \bar{e}_2 \bar{e}_2) \alpha_{23}^0 \langle \sigma_{23} \rangle, \quad (1)$$

де α_{23}^0 – невідома стала, що характеризує рівень структурних напружень зсуву в еліпсоподібному волокні;

$\langle \sigma_{23} \rangle$ – середні технологічні напруження зсуву, що формуються обладнанням і призводять до послаблення структури шкіри;

$\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3$ – одиничні вектори декартової системи координат.

У криволінійній системі координат [12] тензор напружень сфероїдального волокна \bar{T}_a (2) виражається з урахуванням співвідношень між системами координат [7] як:

$$\bar{T}_a = \left[\bar{e}_u \bar{e}_u \alpha_u^a + \bar{e}_v \bar{e}_v \alpha_v^a + \bar{e}_\varphi \bar{e}_\varphi \alpha_\varphi^a + (\bar{e}_u \bar{e}_v + \bar{e}_v \bar{e}_u) \alpha_{uv}^a + \right. \\ \left. + (\bar{e}_v \bar{e}_\varphi + \bar{e}_\varphi \bar{e}_v) \alpha_{v\varphi}^a + (\bar{e}_u \bar{e}_\varphi + \bar{e}_\varphi \bar{e}_u) \alpha_{u\varphi}^a \right] \langle \sigma_{23} \rangle \quad (2)$$

де $\bar{e}_u, \bar{e}_v, \bar{e}_\varphi$ – направляючі вектори криволінійної системи [12].

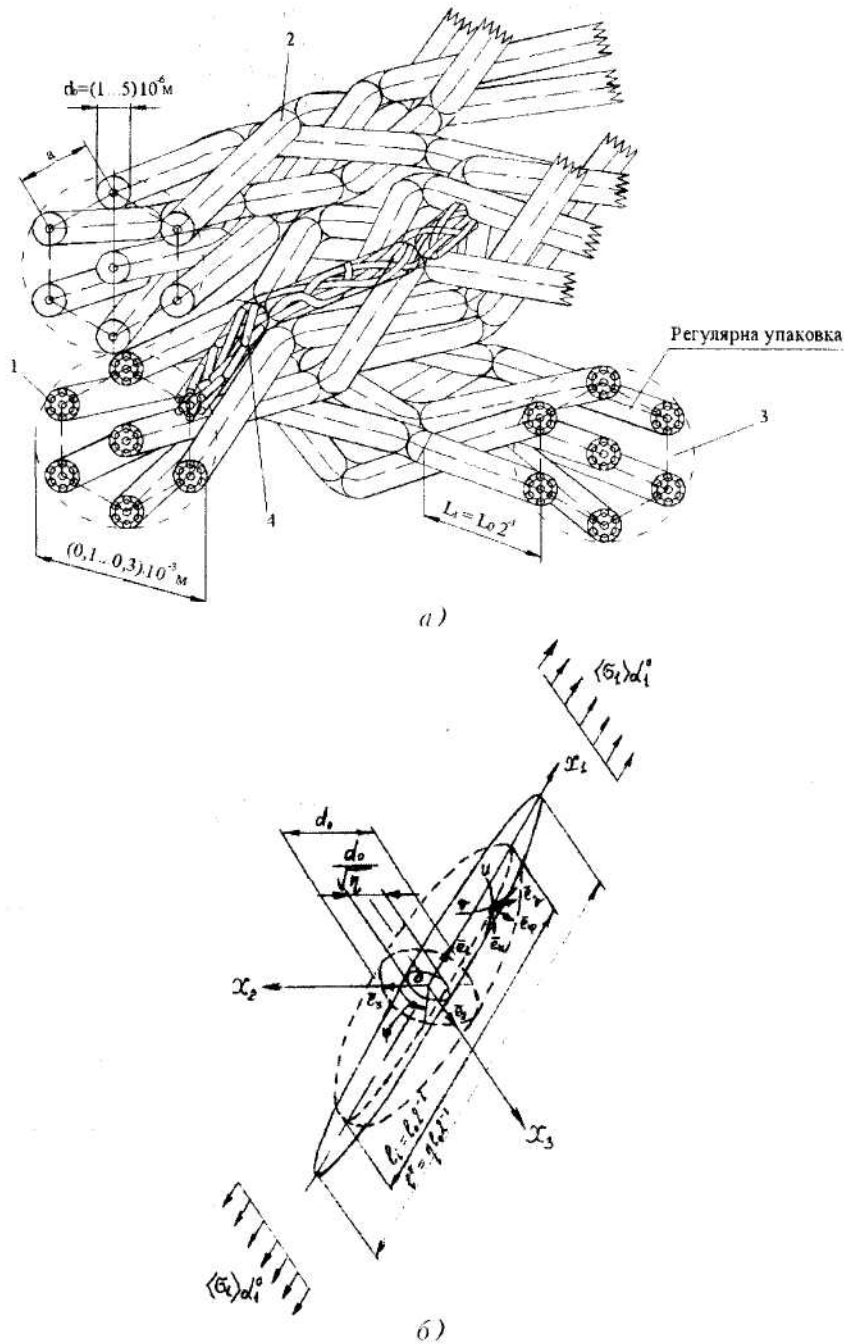


Рис. 1. Структурно-механічна модель волоконної структури шкіри. (а) та перетворення форми еліпсоїдального волокна під час послаблення структури (б):
 1 – пучок волокон; 2 – елементарне волокно з ефективною довжиною

$L_i = l_0 \cdot 2^i$, ($i = 1, 2, 3, \dots, n$); 3 – міжволоконний простір;
 4 – модель внутрішньої будови волокна

Вектор переміщень \bar{u}_σ для еліпсоподібного волокна виражається у декартовій системі координат як:

$$\bar{u}_\sigma = \left(\frac{1 + \nu_\sigma}{E_\sigma} d_{23}^\sigma + K \right) x_3 \bar{e}_2 \langle \sigma_{23} \rangle + \left(\frac{1 + \nu_\sigma}{E_\sigma} \alpha_{23}^\sigma - K \right) x_2 \bar{e}_3 \langle \sigma_{23} \rangle, \quad (3)$$

де ν_σ – коефіцієнт Пуасона для волокна;

E_σ – релаксаційний модуль волокна;

K – стала, що характеризує поворот волокна відносно осі x_1 як жорсткого тіла.

Поле напружень у міжволоконному просторі подамо у вигляді суми полів: однорідної взаємодії між еліпсоподібними волокнами, що утворюють структуру шкіри у вигляді гексогональної щільної упаковки та двох складових (селеноїдального та вихрових полів), які розсіюються на структурних елементах шкіри і спадають у міру віддалення від них.

Поле напружень однорідної взаємодії між волокнами у міжволоконному просторі у випадку поперечного зсуву напруженнями $\alpha_{22}^o \langle \sigma_{23} \rangle$ виражається у криволінійній системі координат [12] як:

$$\begin{aligned} \bar{T}_m^o = & \left[\bar{e}_u \bar{e}_u \alpha_u^o + \bar{e}_v \bar{e}_v \alpha_v^o + \bar{e}_\varphi \bar{e}_\varphi \alpha_\varphi^o + \right. \\ & \left. + (\bar{e}_v \bar{e}_\varphi + \bar{e}_\varphi \bar{e}_v) \alpha_{v\varphi}^o + (\bar{e}_v \bar{e}_u + \bar{e}_u \bar{e}_v) \alpha_{uv}^o \right] \langle \sigma_{23} \rangle \end{aligned} \quad (4)$$

Поле переміщень міжволоконного простору у випадку однорідної взаємодії виражається як:

$$\bar{u}_m^o = \frac{\alpha_{23}^o (1 + \nu_u)}{E_m} (x_2 \bar{e}_3 + x_3 \bar{e}_2) \langle \sigma_{23} \rangle, \quad (5)$$

де ν_u – коефіцієнт Пуасона міжволоконного простору;

E_m – релаксаційний модуль міжволоконного простору.

Компоненти вектора переміщень \bar{u}^* міжволоконного простору при дії селеноїдального розсіяного поля взаємодії, що задовольняє умову:

$$\text{div } \bar{u}^* = 0, \quad (6)$$

можна виразити такими функціями:

$$u_1^* + iu_3^* = \frac{\sqrt{\eta^2 l_o^2 2^{-2j} - \eta^{-1} \alpha_o^2} (1 + \nu_u)}{2 E_m} \langle \sigma_{23} \rangle M \times p_1^{(1)}(\cos \nu) Q_1^{(1)}(ch u) e^{-i\varphi}; \quad (7)$$

$$u_1^* = -\frac{\sqrt{\eta^2 l_o^2 2^{-2j} - \eta^{-1} \alpha_o^2} (1 + \nu_u)}{2 E_m} M \left[\frac{2(1 - \cos \nu)}{3 \sin^2 \nu} - \frac{\cos \nu}{3} \right] Q_1^{(2)}(ch u) \cos 2\varphi \langle \sigma_{23} \rangle; \quad (8)$$

$$u_2^* + iu_2^* = \frac{\sqrt{\eta^2 l_o^2 2^{-2j} - \eta^{-1} \alpha_o^2} (1 + \nu_u)}{2 E_m} \langle \sigma_{23} \rangle N \frac{1 - 8 \cos \nu + 6 \cos^2 \nu - \cos^4 \nu}{\sin^2 \nu} Q_1^{(3)}(ch u) e^{3i\varphi}; \quad (9)$$

$$u_2^* = -\frac{\sqrt{\eta^2 l_o^2 2^{-2j} - \eta^{-1} \alpha_o^2} (1 + \nu_u)}{2 E_m} \langle \sigma_{23} \rangle N \left[\frac{8(1 - \cos \nu)}{3 \sin^2 \nu} - 4 \cos \nu \right] Q_1^{(2)}(ch u) \cos 2\varphi, \quad (10)$$

де M, N – довільні сталі, які характеризують рівень структурних напружень, обумовлених селеноїдальним полем взаємодії;

$p_1(\cos \nu), p_1^{(1)}(\cos \nu)$ – приєднані функції Лежандра першого роду, першого ступеня, відповідно нульового та першого порядку [21];

$Q_1(ch u), Q_1^{(1)}(ch u), Q_1^{(2)}(ch u), Q_1^{(3)}(ch u)$ – приєднані функції Лежандра другого роду, першої степені, відповідно нульового, першого, другого та третього порядку [21].

$$p_1(\cos \nu) = \cos \nu; \quad p_1^{(1)}(\cos \nu) = -\sin \nu;$$

$$p_n^{(m)}(\cos \nu) = (-1)^m (1 - \cos^2 \nu)^{\frac{m}{2}} \frac{d^m p_n(\cos \nu)}{d(\cos \nu)^m};$$

$$m = 1, 2, 3, \dots, n;$$

$$Q_1(ch \nu) = \frac{ch \nu}{2} \ln \frac{ch \nu}{ch \nu + 1} + 1;$$

$$Q^{(m)}(ch \nu) = (ch^2 \nu - 1)^{\frac{m}{2}} \frac{d^m Q_m(ch \nu)}{d(ch \nu)^m}.$$

Вектор напружень \bar{W}_m^* на площині міжволоконного простору з нормаллю \bar{e}_u визначимо для першого розсіяного поля через переміщення (7–10), що задовольняють умову (6), із векторного рівняння [12]:

$$\bar{W}_m^* = \frac{E_m}{1 + \nu_u} \left[\bar{e}_u \left(\frac{\nu_u}{1 - 2\nu_u} \right) \text{div } \bar{u}_m^* + \left(\bar{e}_u, \text{grad } \bar{u}_m^* \right) + \frac{1}{2} \bar{e}_u \times \text{rot } \bar{u}_m^* \right]. \quad (12)$$

Оскільки як перше розсіяне поле вибрана вектор-функція переміщень, що відповідає умові (6), то рівняння (12) перетворимо до вигляду:

$$\vec{W}_m^* = \frac{E_m}{1 + \nu_m} \left[\frac{1}{H_u} \frac{\partial \vec{u}^*}{\partial u} + \frac{1}{2} \vec{e}_u \times \text{rot} \vec{u}_m^* \right], \quad (13)$$

де H_u, H_v, H_φ – коефіцієнти Ляме криволінійної системи координат [12].

Компоненти вектора напружень \vec{W}_m^* у випадку соленоїдального розсіяного поля (6) можуть бути одержані розкладом вектора напружень \vec{W}_m^* (13) по ортах локальної системи криволінійних координат [12] ($\vec{e}_u, \vec{e}_v, \vec{e}_\varphi$) на поверхні еліпсоїда обертання, співфокусного з волоконном (рис. 1, б), який обмежує міжволоконний простір, у вигляді:

$$\begin{aligned} \sigma_u^* &= \frac{E_m}{1 + \nu_m} \left[\vec{e}_u \frac{1}{H_u} \frac{\partial u_m^*}{\partial u} + \frac{1}{2} \vec{e}_u \left(\vec{e}_u \times \text{rot} \vec{u}_m^* \right) \right], \\ \sigma_v^* &= \frac{E_m}{1 + \nu_m} \left[\vec{e}_v \frac{1}{H_v} \frac{\partial u_m^*}{\partial u} + \frac{1}{2} \vec{e}_v \left(\vec{e}_u \times \text{rot} \vec{u}_m^* \right) \right], \\ \sigma_{u\varphi}^* &= \frac{E_m}{1 + \nu_m} \left[\vec{e}_\varphi \frac{1}{H_u} \frac{\partial u_m^*}{\partial u} + \frac{1}{2} \vec{e}_\varphi \left(\vec{e}_u \times \text{rot} \vec{u}_m^* \right) \right], \end{aligned} \quad (14)$$

де ротор векторного поля (6) $\text{rot} \vec{u}_m^*$ визначається виразом:

$$\text{rot} \vec{u}_m^* = \nabla \times \vec{u}_m^*, \quad (15)$$

де ∇ – оператор Гамільтона, що визначається як:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x_1} \vec{e}_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} \vec{e}_2 + \frac{\partial}{\partial x_3} \vec{e}_3. \quad (16)$$

Для визначення полів переміщень міжволоконного простору від другої компоненти загального поля напружень – вихрового розсіяного поля скористаємося методом Панковича-Нейбера [22]:

$$\vec{u}_m^{**} = \frac{1 + \nu_m}{E_m} \left[(3 - 4\nu_m) \vec{e}_1 B_1 - x_1 \text{grad} B_1 - \text{grad} B_0 \right], \quad (17)$$

де B_0, B_1 – функції Панковича-Нейбера, що визначаються з рівнянь:

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{\sqrt{\eta^2 l_0^2 2^{-2j} - \eta^{-1} \alpha_0^2}}{2} \left(2 \frac{1 - \cos \nu}{\sin^2 \nu} - \cos \nu \right) Q_1^{(1)}(ch u) \cos 2\varphi P\langle \sigma_{23} \rangle, \\ B_0 &= -\frac{\sqrt{\eta^2 l_0^2 2^{-2j} - \eta^{-1} \alpha_0^2}}{4} P\langle \sigma_{23} \rangle ch^2 u P_2^{(2)}(\cos 2\nu) Q_2^{(2)}(ch u) \cos 2\varphi. \end{aligned} \quad (18)$$

Сфероїдальні компоненти вектора переміщень ($u_u^{**}, u_v^{**}, u_\varphi^{**}$) поверхні міжволоконного простору, співфокусної еліпсоїдальному волокну, від дії вихрового розсіяного поля визначаються з розв'язку рівняння (17) з урахуванням співвідношень (11) і (18).

Тоді вектор напруження \vec{W}_m^* вихрового поля, що розсіюється на пучках волокон, для площини з нормаллю \vec{e}_u до поверхні міжволоконного простору, співфокусної з еліпсоїдальним волоконном ($u = u_0 = \text{const}$), визначиться з розв'язку векторного рівняння [12] через переміщення (17):

$$\vec{W}_m^* = \frac{E_m}{1 + \nu_m} \left[\vec{e}_u \left(\frac{\nu_m}{1 - 2\nu_m} \right) \text{div} \vec{u}_m^{**} + \frac{1}{H} \frac{\partial \vec{u}_m^{**}}{\partial u} + \frac{1}{2} \vec{e}_u \times \text{rot} \vec{u}_m^{**} \right]. \quad (19)$$

Розкладаючи вектор напружень \vec{W}_m^* (19) по ортам ($\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$) локальної системи криволінійних координат [12], одержимо компоненти $\sigma_u^{**}, \sigma_v^{**}, \sigma_\varphi^{**}$, що діють у міжволоконному просторі на поверхні еліпсоїда обертання ($u = u_0 = \text{const}$) у випадку другого розсіяного поля (17).

Використовуючи гіпотезу про однорідність і однотинність напружень при послабленні

структури шкіри [11], визначимо компоненти тензора напружень міжволоконного простору \bar{T} , як суму напружень однорідної взаємодії $\sigma_u^*, \sigma_v^*, \sigma_\phi^*$ (14) та напружень, що збуджуються вихровою компонентою загального поля взаємодії $\sigma_u^{**}, \sigma_v^{**}, \sigma_\phi^{**}$ (19) у вигляді:

$$\begin{aligned} \sigma_u^M &= \sigma_u^0 + \sigma_u^* + \sigma_u^{**}; \\ \sigma_v^M &= \sigma_v^0 + \sigma_v^* + \sigma_v^{**}; \\ \sigma_\phi^M &= \sigma_\phi^0 + \sigma_\phi^* + \sigma_\phi^{**}. \end{aligned} \tag{20}$$

Відповідні їм компоненти вектора переміщень міжволоконного простору \bar{u} на поверхні еліпсоїда, яка співфокусна з поверхнею еліпсоїдального волокна, подамо як суму компонентів вектора переміщень однорідної взаємодії u_u^0, u_v^0, u_ϕ^0 (5) першого соленоїдного розсіяного поля (6) u_u^*, u_v^*, u_ϕ^* (7-10) і вектора розсіяного поля (19) $u_u^{**}, u_v^{**}, u_\phi^{**}$ (17, 18) у вигляді:

$$\begin{aligned} u_u^M &= u_u^0 + u_u^* + u_u^{**}, \\ u_v^M &= u_v^0 + u_v^* + u_v^{**}, \\ u_\phi^M &= u_\phi^0 + u_\phi^* + u_\phi^{**}. \end{aligned} \tag{21}$$

Невідомі сталі $\alpha_{23}^0, \alpha_{23}^a, K, M, P, N$, що входять у рівняння (20), (21) визначаємо з крайових умов, для яких використовуються граничні співвідношення, при яких починається процес послаблення волоконної структури шкіри. Він виражається у порушенні неперервності полів напружень і переміщень на границі еліпсоїдального волокна та міжволоконного простору у вигляді:

$$u_u^a = u_u^M; \quad u_v^a = u_v^M; \quad u_\phi^a = u_\phi^M; \quad \sigma_u^a = \sigma_u^M; \quad \sigma_v^a = \sigma_v^M. \tag{22}$$

Розв'язавши краєві рівняння (20) і (21) з урахуванням (22), одержимо значення невідомих сталих $\alpha_{23}^a, K, M, P, N$, виражених через невідомі напруження однорідної взаємодії α_{23}^0 .

Для визначення напружень однорідної взаємодії α_{23}^0 , що діють між волокнами і попереджають їх взаємний поворот, використаємо перше представлення потенційної енергії послаблення волоконної структури при зсуві у площині x_2x_3 :

$$\langle \alpha_{23} \rangle \langle \gamma_{23} \rangle = \frac{1}{V^*} \int_{(S^*)} (\sigma_u^M u_u^M + \sigma_v^M u_v^M + \sigma_\phi^M u_\phi^M) H_\nu H_\phi d\nu d\phi, \tag{23}$$

де функції переміщень виражаються у вигляді:

$$\begin{aligned} u_u^M &= \langle \gamma_{23} \rangle \sqrt{\frac{\eta^2 I_0^2 2^{-2j} - \eta^{-1} \alpha_0^2}{4(sh^2 u_0 + \sin^2 \nu)}} ch u_0 sh u_0 \sin^2 \nu \sin 2\phi, \\ u_v^M &= \frac{\langle \gamma_{23} \rangle}{2} \sqrt{\frac{\eta^2 I_0^2 2^{-2j} - \eta^{-1} \alpha_0^2}{(sh^2 u_0 + \sin^2 \nu)}} sh^2 u_0 \cos \nu \sin \nu \sin 2\phi, \\ u_\phi^M &= \frac{\langle \gamma_{23} \rangle}{2} \sqrt{\eta^2 I_0^2 2^{-2j} - \eta^{-1} \alpha_0^2} sh u_0 \sin \nu \cos 2\phi. \end{aligned} \tag{24}$$

Підставляючи у рівняння (23) значення функцій, переміщених із (24), значення напружень, що діють у міжволоконному просторі u_u^M, u_v^M, u_ϕ^M з (20) з урахуванням рівнянь (4), (14) і (19), інтегруючи рівняння (23) по ϕ від 0 до 2π і по ν від 0 до π , підставляючи вирази для сталих M, N, P та опускаючи досить громіздкі математичні перетворення, одержимо формулу для напруження однорідної взаємодії α_{23}^0 , виражену через діюче середнє технологічне напруження зсуву $\langle \sigma_{23} \rangle$, що формується технологічним обладнанням в процесі переробки і яке призводить до послаблення структури шкіри:

$$\alpha_{23}^0 = \frac{[(3-4\nu_m) + \xi(1-\nu_m)](l_0 - d_0^2) \langle \sigma_{23} \rangle [E_m(1+\nu_m) - E_n(1+\nu_n)]}{\left\{ (l_0 - d_0^2) [E_n(1+\nu_n) + 2E_m(1-2\nu_m)] + 2\xi l_0 [E_n(1-2\nu_n) - E_m(1-2\nu_m)] \right\}^*} \cdot \tag{25}$$

$$* \frac{1}{\left[E_n [(1+\nu_n) \beta_1^* + 2(1-3\nu_m) \beta_3^*] - 4E_m(1-2\nu_m) \beta_4^* + (1+\nu_m)(7-5\nu_m) [E_n(1+\nu_n)(\gamma_2^* - \gamma_1^*) + E_m(1+\nu_m)(\gamma_4^* - \gamma_3^*)] \right]}$$

де ξ – ступінь розволокнення [12];

γ_i^* і β_i^* – функції, які визначають зміну розмірів волокон від ступеня їх деформування η при поперечному розтягу, і які мають вигляд:

$$\begin{aligned} \gamma_1^* &= \frac{\ln \alpha}{2} - \frac{(\eta_2^3 l_0^2 2^{-2j} - 2d_0^2) \sqrt{\theta}}{\eta_2 l_0 2^{-(j+1)} d_0^2}; & \gamma_2^* = \gamma_3^* &= \frac{3 \ln \alpha}{2} + \frac{(\eta_2^3 l_0^2 2^{-2j} + 2d_0^2) \sqrt{\theta}}{\eta_2 l_0 2^{-(j+1)} d_0^2}; \\ \gamma_4^* &= \frac{\ln \alpha}{2} - \frac{(\eta_2^3 l_0^2 2^{-2j} + 2d_0^2) \sqrt{\theta}}{d_0^2 \sqrt{\theta}}; \\ \beta_1^* &= (5 - 4\nu_m) \left[\frac{\ln \alpha}{2} + \frac{\sqrt{\theta}}{\eta_2 l_0 2^{-(j+1)}} \right]; & \beta_3^* &= -\frac{(1 - 2\nu_m)}{2} \left[\frac{\ln \alpha}{2} + \frac{\sqrt{\theta}}{\eta_2 l_0 2^{-(j+1)}} \right]; \\ \beta_2^* = \beta_4^* &= -\left(\frac{7 + 4\nu_m}{4} \right) \ln \alpha - \frac{(1 + 4\nu_m) \eta_2 \sqrt{\eta l_0} 2^{-(j+1)}}{2d_0} - \frac{\sqrt{\theta}}{\eta_2 l_0 2^{-(j+1)}}; \\ \ln \alpha &= \ln \frac{\eta l_0 2^{-2(j+1)} - \sqrt{\eta_2^2 l_0^2 2^{-2j} - \eta_2^{-1} d_0^2}}{\eta l_0 2^{-(j+1)} + \sqrt{\eta_2^2 l_0^2 2^{-2j} - \eta_2^{-1} d_0^2}}; & \sqrt{\theta} &= \sqrt{\eta_2^2 l_0^2 2^{-2j} - \eta_2^{-1} d_0^2}. \end{aligned} \quad (26)$$

Підставляючи значення напружень однорідної взаємодії α_{23}^0 з (25) в рівняння (20) і (21) з урахуванням значень сталих M, N, P , одержимо розв'язок задачі про розволокнення структури шкіри при поперечному зсуві попередньо розтягнутого матеріалу.

Задаючись ефективним значенням ступеня розволокнення шкіри ξ при зсуві, визначаємо значення найбільш раціональних напружень $\sigma_u, \sigma_m, \sigma_{\varphi}$, переміщень u_u, u_v, u_φ , що призводять до порушення умови неперервності полів напружень та переміщень (22) на границі волокно-міжволоконного простору і викликають послаблення структури шкіри при відомих її фізико-механічних властивостях та заданому співвідношенні між ефективною довжиною і діаметром волокон.

Для встановлення технологічних найбільш раціональних деформацій зсуву $\langle \sigma_{23} \rangle$, що призводять до послаблення та розволокнення структури шкіри, скористаємось іншим представленням потенційної енергії розволокнення [12] у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\langle \sigma_{23} \rangle^2}{\sigma_{23}} &= \\ &= \frac{1}{V} \int_{(S)} \left[\frac{sh^2 u + \sin^2 \nu}{sh u \sin \nu} (-u_u'' ch^2 u \sin^2 \nu - u_v'' ch u \sin \nu \cos 2\varphi + u_\varphi'' \sin 2u \cos \varphi \sin \varphi) \right] d\nu \cdot d\varphi, \end{aligned} \quad (27)$$

де однорідні поля напружень представлені функціями виду:

$$\begin{aligned} \sigma_u'' &= -\frac{\langle \sigma_{23} \rangle}{(sh^2 u + \sin^2 \nu)} ch^2 u \sin^2 \nu \cos 2\varphi; \\ \sigma_m'' &= -\frac{\langle \sigma_{23} \rangle}{4(sh^2 u + \sin^2 \nu)} sh 2u \sin 2\nu \cos 2\varphi; \\ \sigma_{\varphi}'' &= \frac{\langle \sigma_{23} \rangle}{(sh^2 u + \sin^2 \nu)} ch u \sin \nu \sin 2\varphi, \end{aligned} \quad (28)$$

а поля переміщень u_u, u_v, u_φ представлені функціями:

$$\begin{aligned} u_u'' &= \sqrt{\frac{\eta^2 l_0^2 2^{-2j} - \eta^{-1} \alpha_0^2}{sh^2 u_0 + \sin^2 \nu}} (u_1'' sh u \cos \nu + u_2'' ch u \sin \nu \cos \varphi + u_3'' ch u \sin \nu \sin \varphi), \\ u_v'' &= \sqrt{\frac{\eta^2 l_0^2 2^{-2j} - \eta^{-1} \alpha_0^2}{sh^2 u_0 + \sin^2 \nu}} (-u_1'' ch u \sin \nu + u_2'' sh u \cos \nu \cos \varphi + u_3'' sh u \cos \nu \cos \varphi), \\ u_\varphi'' &= \sqrt{\frac{\eta^2 l_0^2 2^{-2j} - \eta^{-1} \alpha_0^2}{sh^2 u_0 + \sin^2 \nu}} (-u_2'' \sin \varphi + u_3'' \cos \varphi) sh u \sin \nu. \end{aligned} \quad (29)$$

Тут переміщення u_1^M, u_2^M, u_3^M визначаються сумою функцій (5, 7–10, 17). Підставляючи в рівняння (23) з врахуванням (27) значення однорідних полів напружень $\sigma_{ii}^M, \sigma_{ii}^M, \sigma_{ii}^M$ з (28); значень переміщень u_u^M, u_v^M, u_ϕ^M з (29) з урахуванням (5, 7–10, 17), інтегруючи (27) по ϕ від 0 до 2π і по v від 0 до π , підставляючи вирази для сталей M, N, P , записуючи у символічній формі для в'язкопружного середовища взаємозв'язок середніх напружень $\langle \sigma_{ik} \rangle$ та ефективних деформацій розволокнення $\langle \varepsilon_{pq} \rangle$ у вигляді:

$$\langle \sigma_{ik} \rangle = E_{ik,pq} \langle \varepsilon_{pq} \rangle, \tag{30}$$

порівнюючи праву частину рівнянь (27) і (30), розв'язуючи одержану систему рівнянь відносно $\langle \varepsilon_{pq} \rangle$, одержимо вираз для ефективної технологічної деформації зсуву $\langle \gamma_{23} \rangle$, що викликає найбільш раціональне послаблення попередньо витягнутої структури шкіри у наближенні однорідної взаємодії між волокнами:

$$\begin{aligned} \langle \gamma_{23} \rangle = & \frac{\alpha_{23}^0 2(1+v_M)}{E_M (l_0 - d_0 2^j)} \left\{ E_o (1+v_M) + 2E_M (1-2v_o) + 2\xi [E_o (1-v_M) - E_M (1-2v_o)] \right\} * \\ & * \left\{ E_o [(1+v_M)\beta_1^{**} + 2(1-3v_M)\beta_3^{**}] - 4E_M (1-2v_o)\beta_4^{**} + (1+v_M)(7-5v_M) \right. \\ & * \left. [E_o (1+v_M)(\gamma_2^{**} - \gamma_1^{**}) + E_M (1+v_o)(\gamma_4^{**} - \gamma_2^{**})] \right\}, \end{aligned} \tag{31}$$

де $\gamma_1^{**}, \dots, \gamma_4^{**}$ і $\beta_1^{**}, \dots, \beta_4^{**}$ – функції, що визначають залежність розмірів і форм волокон від ступеня витягування їх при розволокненні:

$$\begin{aligned} \gamma_1^{**} = \gamma_1^*; \quad \gamma_2^{**} = \gamma_2^*; \quad \gamma_4^{**} = \gamma_4^*; \quad \gamma_3^{**} = \gamma_3^* (3 - 4v_M); \\ \beta_1^{**} = (5 - 4v_M) \left[\frac{\ln a}{2} - \frac{\sqrt{6}}{\eta l_0 2^{(j+1)}} \right]; \\ \beta_2^{**} = \beta_2^*; \quad \beta_3^{**} = \beta_3^*; \quad \beta_4^{**} = \beta_1^{**}. \end{aligned} \tag{25}$$

Рівняння (31), з урахуванням (32), дозволяє при відомих фізико-механічних властивостях шкіри (E_o, v_o, E_M, v_M) і необхідних показниках якості волоконної маси (ефективних характеристик отриманих волокон l_0 і d_0) прогнозувати мінімальні значення технологічних деформацій зсуву, що створюються технологічним обладнанням при обробці попередньо розтягнутої шкіряної сировини, щоб почався процес послаблення волоконної структури і її розволокнення.

5. Висновки та перспективи подальших досліджень

1. Розглянута в системній постановці задача про послаблення волоконної структури шкіри при дії напружень зсуву на попередньо розтягнутий матеріал.

2. Запропонована модель і розглянутий механізм послаблення волоконної структури шкіри при дії поперечного зсуву.

3. Аналітичний розв'язок поставленої задачі отриманий методом послідовного врахування взаємодії різних рівнів структурних елементів волоконного середовища шляхом встановлення залежностей ефективних характеристик технологічного процесу послаблення структури шкіри від її фізико-механічних властивостей та якісних показників, які потрібно одержати для матеріалу, що одержується в процесі переробки шкіряної сировини.

Одержані аналітичні залежності дозволяють перейти до проектування технологічного обладнання та визначення технологічних параметрів процесу розволокнення натуральної шкіри з врахуванням її реальної будови та фізико-механічних властивостей.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Шарагин Н.С., Авидов А.М. Переработка отходов кожевенного производства – технологический и экономический аспекты проблемы // Кожевенно-обувная

- промышленность. – 1993. – № 8. – С. 24–25.
2. *Гайдук В.В.* Неизбежные отходы и реальные доходы // Кожевенно-обувная промышленность. – 1994. – № 3–4. – С. 17–18.
 3. *Чуркин В.И.* Химико-технологические методы утилизации кожевенной стружки: экономика и экология // Кожевенно-обувная промышленность. – 1998. – № 1. – С. 40–48.
 4. *Ytrtwig K.* Production and Application // Bonded Leather. – 1998. – № 9. – P. 181–186.
 5. *Erickson Paul R.* Wet blue stabings the green solution // World Leather. – 1997. – № 7. – P. 57–69.
 6. *Zahn H.* StanzaЯfdllen, für die production von Lederfaster – werkstoffen // SchuhTechn. Int. – 1995. – № 5–6. – P. 54–59.
 7. *Михайлов А.Н.* Коллаген кожного покрова и основы его переработки. – М.: Легкая индустрия, 1971. – 468 с.
 8. *Шестакова И.С.* Структура и свойства коллагена. – М.: Химия, 1968. – 418 с.
 9. *Павлов С.А.* Химия и физика высокомолекулярных соединений в производстве искусственной кожи, кожи и меха. – М.: Химия, 1966. – 525 с.
 10. *Вацулик Я.* Физические следствия морфологических изменений структурны коллагена кожи // Кожевенно-обувная промышленность, 1995. – № 7. – С. 30–53.
 11. *Скиба М.Є.* Структурно-механічна модель та метод визначення раціональних параметрів розволокнення шкіряних матеріалів // Вісник Технологічного університету Поділля / Технічні науки. – 2002. – № 4. – Ч. 1. – С. 192–199.
 12. *Скиба М.Є.* Визначення ефективних параметрів послаблення волоконної структури при розтягу // Вісник Технологічного університету Поділля / Технічні науки. – 2002. – № 6. – С. 263–273.
 13. *Скиба М.Є.* Послаблення волоконної структури при двоосному деформуванні // Вісник Технологічного університету Поділля / Технічні науки. – 2003. – № 1. – Ч. 1. – С. 7–13.
 14. *Скиба Н.Е., Гуменюк А.Б., Пискорский Г.А.* К вопросу о концентрации механической прочности структуры кожи // Депонирована ВИНТИ, 02.10.1995. – № 2223 – Ук.95.
 15. Патент України №26337. Спосіб розволокнення натуральних шкір та пристрій його здійснення / М.Є. Скиба, О.Б. Гуменюк, Г.А. Пискорський – Опубліковано 30.08.1999. – Бюлетень № 5.
 16. Патент Российской Федерации № 2061049. Способ разволокнения натуральных кож и устройство для его осуществления / А.Б. Гуменюк, Г.А. Пискорский, Н.Е. Скиба – Опубліковано 27.05.1996. – Бюл. № 15.
 17. *Нильсен Л.* Механические свойства полимеров и полимерных композиций. – М.: Химия. – 1978. – 312 с.
 18. *Боркан М.С., Кострюкова Л.И.* Применение кожевенного волокна в производстве обувных картонов. – Л.: Гизлегпром, 1959. – 132 с.
 19. *Михайлов А.Н.* Химия и физика коллагена кожного покрова. – М.: Легкая индустрия, 1980. – 232 с.
 20. *Чурсин В.И., Илюхина О.А.* Влияние режима обработки на деформационные свойства дермы // Кожевенно-обувная промышленность. – 1995. – № 7. – С. 30–33.
 21. *Гобсон Е.В.* Теория сферических и эллипсоидальных функций. – М.: Иностранная литература. – 1952. – 476 с.
 22. *Ванин Г.А.* Новый метод учета взаимодействия в теории композиционных систем // Доклады АН УССР. – Серия А. – № 4. – С. 321–324.

СКИБА Микола Єгорович – кандидат технічних наук, професор, ректор Технологічного університету Поділля, м. Хмельницький.

Наукові інтереси:

– розволокнення відходів натуральної шкіри.

Тел. р.: (8-0382) 72-80-76.

E-mail: patent_1@beta.tup.km.ua

Подано 18.05.2003