

УДК 675.023

## СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ВОЛОКНИСТОЇ БУДОВИ ДЕРМИ ШКУР ТВАРИН

В. І. ЛІЩУК, В. В. КОСТРИЦЬКИЙ, А. Г. ДАНИЛКОВИЧ

Київський національний університет технологій та дизайну

У роботі подано структурно-технологічну модель волокнистої структури дерми тварин за циклічної симетрії її структурних елементів та деформації. В основу моделі покладено тип структурної упаковки і форми волокон, які визначають ступінь об'ємного наповнення волокнами дерми напівфібрилярної структури колагену і коефіцієнт зв'язаності її структури

Метод моделювання є ефективним способом розробки нових і вдосконалення існуючих технологічних процесів. Досить важливим аспектом цієї проблеми є створення відповідної моделі, елементи якої адекватно реагували б на зміну параметрів технологічного процесу, спрямованого на руйнування природних зв'язків між елементами макро- і мікроструктури дерми, наслідком якого повинна бути її розпушеність, з урахуванням властивостей колагену дерми.

### **Об'єкти та методи дослідження**

Об'єктом дослідження цієї роботи є шкури тварин, насамперед, найпоширенішого виду – великої рогатої худоби різного віку, щільності й товщини.

### **Постановка завдання**

Розробка структурно-технологічної моделі упорядкованої структури дерми шкур тварин для визначення технологічно-ефективних параметрів їх лужної обробки та пошук властивостей дерми та окремих волокон залежно від орієнтації структурних елементів.

### **Результати та їх обговорення**

Розглянемо модель надфібрилярної структури (НФС) дерми, як необмежене в'язко-пружне ізотропне середовище зі структурою, утвореною пучками волокон однакової форми і розмірів, розташованих у кутах просторової решітки (рис. 1) [1, 2].

У реальній НФС дерми пучки волокон у більшості випадків мають геометрично неправильну форму [3–8], але у прийнятій структурно-технологічній моделі дерми вони мають форму еліпсоїда обертання діаметром  $D_n$  і довжиною  $L_n$ . Вид просторової решітки, довжина  $L_n$  і діаметр сфероїда  $D_n$  визначають взаємне розташування границь найближчих пучків волокон, що дає можливість оцінити ступінь їх взаємодії.

Як характеристики, які визначають наймовірніший тип просторової решітки та форму пучків колагенових волокон, які отримано в результаті технологічної обробки дерми, введемо поняття ступеня об'ємного наповнення дерми волокнами НФС колагену  $\zeta$

$$\zeta = \frac{V_0}{V_K} \quad (1)$$

та коефіцієнта зв'язаності структури  $k_z$ , де  $V_0$ ,  $V_K$  – об'єм волокон, який отримано внаслідок технологічної обробки елемента дерми, і загальний об'єм цього елемента шкіряного матеріалу.

Коефіцієнт зв'язаності структури дерми визначаємо як відношення вихідного діаметра пучка (сфероїда)  $D_n$  та відстані між умовними центрами пучків  $L_0$  (рис. 1), які розташовані у вузлах однієї із структурних упаковок, тобто  $k_z = D_n / L_0$ . З визначення випливає, що  $0 < k_z \leq 1$  і що завжди для реальних структур різних шкір  $D_n < L_0$ . Випадок, коли  $D_n = L_0$ , відповідає безперервній, монолітній структурі, для якої поняття технологічної обробки дерми не має сенсу. Введення коефіцієнта зв'язаності структури  $k_z$  дозволяє зв'язати геометричні структурні параметри ( $D_n$ ,  $L_0$ ) з ступенем об'ємного наповнення дерми волокнами НФС колагену. В [2] встановлено, що із зниженням коефіцієнта зв'язаності  $k_z$  зростає ступінь об'ємного наповнення дерми волокнами НФС колагену  $\zeta$ , та інтенсивність взаємодії основних структурних елементів.

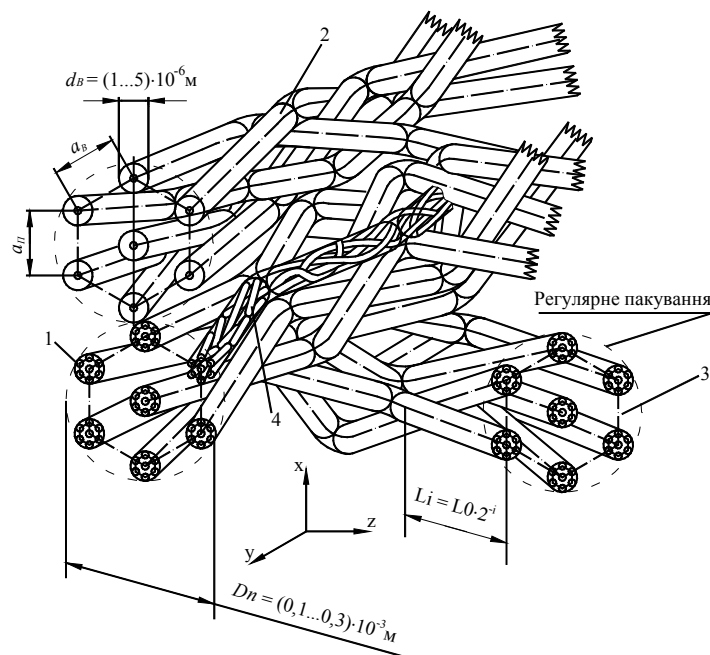


Рис. 1. Модель надфібрилярної структури натуральної шкіри: 1 – пучок волокон; 2 – елементарне волокно; 3 – міжволоконний простір; 4 – модель внутрішньої будови волокна

Прийнявши розглянуті вище гіпотези і моделі, як вихідні дані про характеристики структурних елементів дерми і, нехтуючи дисипативними явищами в структурних елементах, у першому наближенні моделюємо НФС дерми, як необмежене в'язкопружне ізотропне середовище. Структура середовища, утвореного еліпсоїдальними волокнами однакової форми, з ефективними розмірами, які підпорядковуються емпіричному розподілу  $W(\sigma_{max}, \epsilon_{max})$ , який проявляється при дії максимально технологічних напружень і граничних деформацій, які виникають в процесі переробки шкір.

Виходячи з того, що вся колагенова фаза зосереджена в пучках волокон, які мають мікрогетерогенну будову і характеризуються чергуванням мікрофібрилярних ділянок колагену і міжфібрилярної матриці, яка складається в основному з мукополісахаридів і, меншою мірою, із структурних глікопротеїнів [9, 10], моделюємо внутрішню будову пучків, як необмежене ізотропне в'язкопружне середовище, яке містить сфероїдальні колагенові утворення (морфози), менших розмірів, ніж вихідні пучки волокон, які розташовані у вузлах гексагональної щільної упаковки (рис. 1).

Прийнявши ступінь об'ємного наповнення волокон дерми, який відповідає ступеню об'ємного наповнення волокон всього шкіряного матеріалу, одержимо з рівняння (1), яке зв'язує ступінь об'ємного наповнення дерми волокнами НФС колагену з коефіцієнтом відносного об'ємного наповнення середовища  $\xi$  [11] та коефіцієнтом компактності решітки  $\mu$  [12]:

$$z^2 = x = k_c^3 m. \quad (2)$$

Значення ступеня наповнення волокнами дерми НФС колагену, у випадку граничних упаковок ( $k_c = 1$ ,  $\xi^2 = \xi = \mu$ ) позначимо  $\xi^*$ . При цьому упакування пучків волокон у кубічну решітку  $\xi^*$  становить 0,72, в об'ємноцентровану кубічну решітку – 0,82, у гранецентровану кубічну решітку – 0,86 і гексагональну решітку – 0,86.

Теоретичний ступінь об'ємного наповнення волокон дерми НФС колагену  $\xi$  має значення  $\xi^* = 0 \dots 0,86$ , тому модель НФС дерми у вигляді пучків колагенових волокон сфероїдальної форми, розташованих у вузлах просторової решітки, відповідає фібрилярній колагеновій структурі дерми при ступені об'ємного наповнення волокон, що не перевищує  $\xi^* < 0,86$ . Для розробки теорії технологічної обробки шкур тварин необхідно визначити ефективні властивості елементів структури дерми, розміри елементарних волокон і пучків, які є наслідком технологічної обробки шкур, а також визначити вид просторової упаковки волокон у пучку, який визначає циклічну симетрію структури дерми.

У реальних структурах дерми волокна, які утворюють пучки, мають геометрично неправильну форму зі значними відхиленнями за розмірами [3–6, 13]. Припустимо, що вони у першому наближенні мають просторово-криволінійну форму напівзгнутото ланцюга, який складається із послідовно спряжених еліпсоїдальних елементів з ефективними розмірами напівосей  $d_i$  і  $c_i = l_0$  (рис. 2, а).

При цьому, для визначення ефективних технологічних параметрів обробки дерми, наприклад, технічного режиму тиску, швидкості дифузії технологічних розчинів в дерму тощо, розділимо криволінійну вісь волокна на безліч частин, кожену з яких будемо вважати далі відрізком прямої довжиною  $dl$ . Це дає можливість визначити компоненти тензора технологічних ефективних параметрів обробки дерми шляхом інтегрування ефективних технологічних параметрів обробки за довжиною траєкторії волокна таким чином:

$$C_{\alpha\beta\gamma\delta} = \sum_{n=1}^N \int_{L(n)} C_{\alpha\beta\gamma\delta}(n) \frac{F(n) \cdot dL(n)}{V}; \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^N \int_{L(n)} F(n) \cdot dL(n) = V;$$

$$C_{\alpha\beta\gamma\delta}(n) = C_{ijkl}(n) L_{i\alpha} L_{j\beta} L_{k\gamma} L_{l\delta},$$

де  $N$  – кількість траєкторій інтегрування, які розрізняються рівнянням траєкторії або властивостями волокна;  $F(n)$  – площа поперечного перерізу волокна в структурно-механічній моделі матеріалу;  $dL(n)$  – елементарна довжина розрахункового криволінійного елемента волокна;  $V$  – загальний об'єм упаковки, що визначає циклічну симетрію структури дерми;  $C_{ijkl}(n)$  – компонента тензора технологічних ефективних властивостей  $n$ -ї елементарної ділянки волокна в його головних осях симетрії властивостей;  $C_{\alpha\beta\gamma\delta}(n)$  – ті ж компоненти, але зведені до головних осей симетрії структури дерми;  $L_{i\alpha}$ ,  $L_{j\beta}$ ,  $L_{k\gamma}$ ,  $L_{l\delta}$  – косинуси кутів відповідно між осями  $i$  та  $\alpha$ ,  $j$  та  $\beta$ ,  $k$  та  $\gamma$ ,  $l$  та  $\delta$ ;  $i, j, k, l = 1, 2, 3$ ;  $\alpha, \beta, \gamma, \delta = x, y, z$ . Добуток  $F(n) \cdot dL(n)$  – визначає елементарний об'єм відрізка волокна.

Виконуючи математичну дію множення чисельника та знаменника в (3) на загальну довжину заданої ділянки траєкторії волокна  $L(n)$  у межах циклічного повторення елемента структури та враховуючи, що

$$\begin{aligned} F(n)L(n) &= V(n); \\ \frac{V(n)}{V} &= \frac{V_B(n)}{V_B}; \\ V_B &= V_B(1) + V_B(2) + V_B(3) + \dots + V_B(N), \end{aligned} \tag{4}$$

зведемо рівняння (4) до такого вигляду:

$$C_{\alpha\beta\gamma\delta} = \sum_{n=1}^N \frac{V_B(n)}{V_B} \int_{L(n)} C_{\alpha\beta\gamma\delta}(n) \frac{dL(n)}{L(n)}, \tag{5}$$

де  $V_B(n)$  – об'єм волокна  $n$ -ї траєкторії інтегрування;  $V_B$  – загальний об'єм волокна в упаковці, що визначає циклічну симетрію структури дерми.

Розглянемо рівняння траєкторії руху технологічного розчину по поверхні волокон при дифузії у параметричній формі:

$$x = x(t); \quad y = y(t); \quad z = z(t), \tag{6}$$

де  $t$  – структурний параметр, що визначає основну форму руху технологічного розчину по поверхні волокон під час дифузії в пучки.

Визначимо диференціал дуги  $dL(n)$ :

$$dL(n) = \sqrt{\left[\frac{dx_{(n)}}{dt}\right]^2 + \left[\frac{dy_{(n)}}{dt}\right]^2 + \left[\frac{dz_{(n)}}{dt}\right]^2} \cdot dt_{(n)}, \tag{7}$$

де  $\frac{dx_{(n)}}{dt}$ ,  $\frac{dy_{(n)}}{dt}$ ,  $\frac{dz_{(n)}}{dt}$  – похідні координат  $x(n)$ ,  $y(n)$ ,  $z(n)$  за параметром  $t$ .

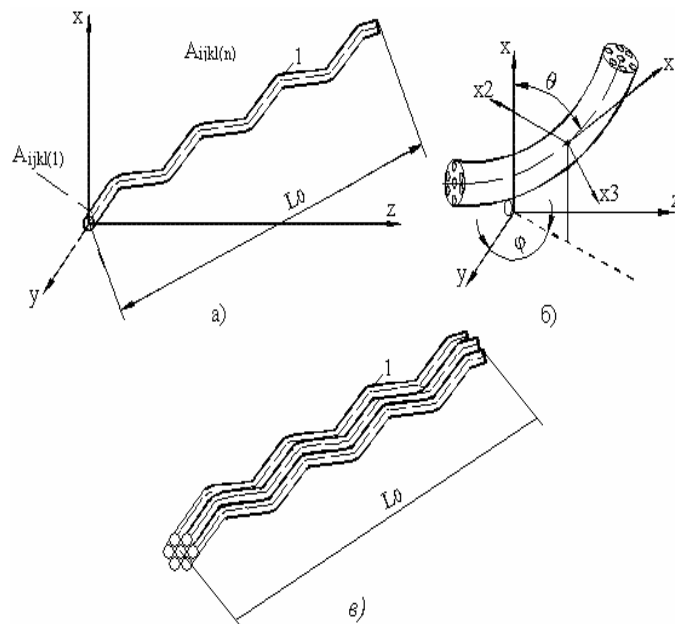


Рис. 1. Модель вторинного волокна *a* в криволінійній системі координат *b* і пучка волокон *v* дерми шкур

Тоді довжина траєкторії волокна  $L(n)$  у межах циклічного повторення елемента структури дерми визначається рівнянням:

$$L(n) = \int_{t_1(n)}^{t_2(n)} \sqrt{\left[\frac{dx(n)}{dt}\right]^2 + \left[\frac{dy(n)}{dt}\right]^2 + \left[\frac{dz(n)}{dt}\right]^2} \cdot dL, \quad (8)$$

На рис. 2, б відрізок криволінійного волокна в головних вісях симетрії дерми  $x, y, z$ . Змінний напрямок траєкторії волокна суміщений з віссю  $x_1$ , що є дотичною до траєкторії. Площина  $x_2, x_3$  є площиною ізоτροпії властивостей волокна, так що компоненти тензора технологічних ефективних властивостей  $C_{ijkl}(n)$  не залежать від конкретної орієнтації осей  $x_2$  і  $x_3$ .

Це припущення дозволяє спростити матрицю напрямних косинусів  $L_{i\alpha}$ , якщо допустити  $L_{2x} = 0$ . Тоді для рис. 2б будемо мати:

$$\begin{aligned} L_{1x} &= \cos \theta; & L_{1y} &= \sin \theta \cos \varphi; \\ L_{1z} &= \sin \theta \sin \varphi; & L_{2y} &= \sin \varphi; \\ L_{2z} &= -\cos \varphi; & L_{3x} &= -\sin \theta; \\ L_{3y} &= \cos \theta \cos \varphi; & L_{3z} &= \cos \theta \sin \varphi. \end{aligned} \quad (9)$$

Для моделі, зображеної на рис. 2б можна встановити взаємозв'язок між складовими напрямних косинусів (9) та похідними координат  $x, y, z$  за параметром  $t$ . Внаслідок цього отримуємо:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \frac{\frac{dx}{dt}}{\sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}}; & \cos \varphi &= \frac{\frac{dy}{dt}}{\sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}}; \\ \sin \theta &= \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2}{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}}; & \sin \varphi &= \frac{\frac{dz}{dt}}{\sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}}, \end{aligned} \quad (10)$$

де  $0 < \theta < \pi, 0 < \varphi < 2\pi$  – кути орієнтації криволінійної ділянки траєкторії волокна.

Отримані рівняння (5) і (8) при врахуванні співвідношень (9) та (10) дозволяють описати ефективні властивості дерми та окремих волокон, які одержані внаслідок технологічної обробки дерми залежно від напрямку переважної орієнтації пучка, числа траєкторії інтегрування, етапів технологічної обробки дерми первинного волокна, виду регулярної упаковки, що визначає циклічну симетрію структури дерми.

При цьому слід враховувати значення технологічних ефективних властивостей шкір тварин, що обробляються, у напрямку їх головних осей симетрії  $C_{ijkl}$ .

### Висновки

Розроблена структурно-технологічна модель волокнистої структури дерми шкір тварин за циклічної симетрії структурних елементів дерми та її деформації.

Проведені теоретичні викладки показали, що, у першому наближенні, неупорядкована будова дерми шкур тварин волокнистої надфібрилярної структури колагену може бути представлена моделлю упорядкованої структури, утвореної пучками волокон однакової форми і розмірів, розташованих у кутах просторової решітки для використання під час розробки чи вдосконалення технології лужної обробки шкіряної сировини.

Тип структурної упаковки, а також тип і форму волокон, що покладені в основу моделі, визначають такі показники, як ступінь об'ємного наповнення волокнами дерми НФС колагену, і коефіцієнт зв'язаності її структури.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Скиба М.Є. Структурно-механічна модель та метод визначення раціональних параметрів розволокнення натуральних шкіряних матеріалів // Вісник Технологічного університету Поділля, Технічні науки, 2002, № 4, ч.1, с.192–199.
2. Вацулик Я. Н. Физические следствия морфологических изменений структуры коллагена кожи // Кожевенно-обувная промышленность. – 1995. – № 7. – с. 30 – 33.
3. Усилов В.А., Кутьин В.А., Михайлов А.Н. Исследование волокнистой макроструктуры шкур крупного рогатого скота. Сообщение 1 // Известия вузов. Технология легкой промышленности.– 1964.– № 4.– с.40–46.
4. Кутьин В.А. Характер связей между волокнами кожи // Известия вузов. Текстильная промышленность.– 1961.– № 1.– с.58–67.
5. Кутьин В.А. Предел прочности и межволоконные связи кожи // Известия вузов. Технология легкой промышленности.– 1959.– № 4.– с.33–50.
6. Усилов В.А., Кутьин В.А., Михайлов А.Н. Исследование волокнистой макроструктуры шкур крупного рогатого скота. Сообщение 2 // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 1966.– №3.– с.79–92.
7. Соколов С.И. Физико-химия коллагена и его производных. – М.: Гизлегпром, 1937. – 248 с.
8. Усилов В.А., Чернов Н.В. Зависимости между пределом прочности кожи и пучков волокон при деформации растяжения // Научные труды МТИЛП.– 1962.– Вып. 26.– с.114–117.
9. Wassermann F. The intercellular components of connective tissue: origin, structure and interrelationship of fibers and ground substance // *Ergebn. Anat. Entwickle. Gesch.*– 1956.– Bd 35.– s. 240– 333.
10. Beyersdorfer K. Gegenseitige Anziehung gleicher Strukturelemente bei Kollagen-Fibrillen und Trichocysten // *Ztschr. Naturforschg.*– 1950.– Bd 6b.– s. 57– 60.
11. Кострицкий В.В. Основы структурной теории ориентацией вытяжки аморфно-кристаллических полимеров// *Механика композиционных материалов*, 1991, № 6, с. 969–980.
12. Келли А., Гровс Г. Кристаллография и дефекты в кристаллах. М.: Мир, 1974. – 496 с.
13. Материаловедение изделий из кожи / Ю.П. Зыбин, А.А. Авилов, Ю.М. Гвоздев, Н.В. Чернов. – М.: Легкая индустрия, 1968. – 381 с.

Надійшли 02.11.2009