ПОБУДОВА МОДЕЛІ СТРУКТУРИ ТЕКСТИЛЬНОГО ПАКУВАННЯ

В рамках вирішення актуальної науково-технічної задачі подальшого розвитку технології рідинної обробки ниток у пакуваннях викладено алгоритм побудови комп'ютерної моделі структури пакування на прикладі пакуванняхрестового намотування циліндричної форми, сформованого на циліндричному осерді задопомогою мотального барабанчика постійного кроку.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, текстильне пакування, хрестове намотування, міжвиткова взаємодія, траєкторія точки набігання, деформація нитки, контактна площадка.

В рамках решения актуальной научно-технической задачи дальнейшего развития технологии жидкостной обработки нитей в паковках предложен алгоритм построения компьютерной модели структуры паковки на примере паковки крестовой намотки цилиндрической формы, сформированной на цилиндрическом основании с помощью мотального барабанчика постоянного шага.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, текстильная упаковка, крестовая намотка, межвитковое взаимодействие, траектория точки набегания, деформация нити, контактная площадка.

Within the framework of decision of the actual research problem of the further development to technologies of the liquid processing the threads in package is stated technology of the building to computer model of the structure package on example package crusade winding of the cylindrical form, formed on cylindrical base by means of winding drum constant step.

Key words: computer modeling, textile packaging, cross winding, interturn interaction, the track point running on, thread deformation, contact area.

Вступ

Актуальність моделювання структури текстильних пакувань обумовлена потребами розвитку технології рідинної обробки ниток у пакуваннях. Існуюча технологія, створена більш ста років тому, за способом організації є масовою і найбільш енергозатратною у текстильній промисловості. В сучасних умовах одночасного зростання цін на енергоносії і вимог суспільства до співвідношення «ціна – якість» продукції і різноманітності її асортименту, така технологія вже не здатна забезпечувати конкурентоспроможність продукції за рахунок внутрішніх резервів. Тому прийшов час створення принципово нової технології, яка відповідає сучасним вимогам економічності і гнучкості.

Але для цього необхідно виявити причини вичерпання резервів існуючої технології, що потребує вивчення, в першу чергу, структури технологічного об'єкта – тіла пакування, – складність якогоробить необхідним використання такого потужного інструмента, як моделювання.

Всівідомі на сьогодні моделі структури пакування за призначенням поділяють на дві великі групи. Моделі першої групи призначені для вивчення процесів рідинної обробки, а другої групи розробляють спеціалісти з теорії намотування.

До першої групи належить, наприклад, робота С. А. Александрова и В. Б. Кльонова [1], присвячена побудові і дослідженню аналітичної моделі структури пакування. Недоліком моделі є відсутність у ній найважливішого компонента структури – нитки у напружено-деформованому стані.

У другій групі моделей нитка представлена математичним описом траєкторії точки набігання. Однак серед задач теорії намотування задача повного опису траєкторії точки набігання для всього тіла пакування відсутня.

Поставимо задачу викласти основні етапи побудови комп'ютерної моделі повної траєкторії точки набігання для всього тіла пакування з урахуванням напружено-деформованого стану нитки, і постановки комп'ютерного експерименту на прикладі пакування хрестового намотування циліндричної форми, сформованого на циліндричному осерді за допомогою мотального барабанчика постійного кроку.

Основні етапи побудови комп'ютерної моделі

В загальних рисах процес побудови комп'ютерної моделі включає пошук ключового елемента структури об'єкта, котрий здійснює лімітуючий вплив на технологічний процес обробки, математичний опис всіх елементів структури пакування, розробку алгоритмів їх взаємодії і написання відповідних програм, з наступною постановкою комп'ютерного експерименту та аналізом його результатів. Створена комп'ютерна модель потребує для роботи конкретних вихідних даних про деформаційні характеристики ниток, які можна отримати тільки методом прямого експерименту. За масштабом об'єкта дослідження цей експеримент, у порівнянні з комп'ютерним, є локальним.

Структурна декомпозиція технологічної системи формування структури пакування [2]. Побудова моделі спирається на уявлення про структуру пакування як складну систему. Тому першим етапом побудови моделі є структурна декомпозиція технологічної системи формування структури пакування.

За результатами декомпозиції пакування представлене як чотирьохрівнева ієрархічна структура «тіло пакування – нитка – пасмо – волокно». Тіло пакування складається із шарів, утворених прошарками. Кожний прошарок формується в процесі намотування із чотирьох компонентів траєкторії навівання нитки – правої спіралі, правого еліпсу, лівої спіралі, лівого еліпсу (рис. 1). При цьому кінець одного прошарку є одночасно початком наступного.



Рис. 1. Просторова крива одного прошарка траєкторії точки набігання

Кількість прошарків у шарі змінюється пропорційно його радіусу, завдяки чому досягається сталість поверхневої щільності заповнення шарів ниткою (рівнозаповнені шари)[3].

Аналіз впливу неоднорідностей структури пакування на процес рідинної обробки виявив, що лімітуючою стадією процесу фарбування є стадія проникання часток барвника в ділянки контактних площадок перетинання витків. Цим пояснюється відносно великий час рідинної обробки пакувань –кілька годин, в той час як безперервна обробка тканин потребує кількох хвилин.

Відрізки двох витків (рис. 2), що перетинаються в контактній площадці під впливом сил міжвиткового тиску й пружності нитки, перебувають у стані динамічної рівноваги. У результаті поперечної деформації витків змінюється площа контактної площадки, а також величина міжцентрової відстані витків *a*. Перше приводить до локальної зміни пористості нитки, а друге – до зміни міжниткової пористості. Результати аналізу механізму впливу структури пакування на процес фарбування ниток з урахуванням її напруженодеформованого стану й перехідних явищ показують, що найбільш важкодоступними для барвника є волокна в зоні контактних площадок, розташовані в шарі на поверхні патрона й у торцевих ділянках, товщиною близько 10⁻² м.

Дослідження деформованого стану нитки методом локального експерименту. За допомогою спеціально розробленого й виготовленого лабораторного комплексу для вивчення поперечної деформації витків в окремо взятій контактній площадці побудовані експериментальні залежності ступеня поперечної деформації витків у контактній площадці від зусиль пережиму[4] й натягу [5] нитки, а також відносного подовження нитки від величини розтяжного зусилля.

Мікрофотографічне зображення ниток, які перетинаються у контактній площадці, деформованих зусиллям пережиму, представлений на рис. 3. В ході експерименту значення зусиль пережиму й натягу змінювали в межах 0,02...0,49 Н. Кут перетинання нитоку контактній площадці α = 24°, кількість повторних вимірів у кожній точці n = 5.

Встановлено, що сукупність експериментальних точок залежності відносної зміни поперечного розміру нитки від зусилля пережиму найбільш точно апроксимується сімейством статечних функцій виду

$$f(x,k) := a_k \cdot (x)^{b_k} + c_k , \qquad (1)$$

де х – значення зусилля пережиму Р;

k – порядковий номер кривої, що відповідає заданому значенню зусилля натягу Т;

a, b, c – постійні коефіцієнти, величини яких для кожного значення k зведені в табл. 1.



Рис. 2. Стан динамічної рівноваги сил у контактній площадці перетинання витків



Рис. 3. Мікрофотографічне зображення ниток у контактній площадці

Таблиця1

k	0	1	2	3	4	5	6
а	0,61	1,03	1,23	1,99	3,75	3,93	4,32
b	- 0,13	- 0,09	-0,07	- 0,05	- 0,03	- 0,03	- 0,03
с	- 0,30	- 0,71	-0,88	- 1,61	- 3,37	- 3,53	- 3,92

Значення коефіцієнтів апроксимуючої функції

Сукупність експериментальних точок відносної зміни поперечного розміру ниток, які перетинаються, від зусилля їхнього натягу для заданих значень зусилля пережиму Р апроксимована сімейством експонент виду

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{j}) := \mathbf{a}_{\mathbf{j}} \cdot \left(\mathbf{e}^{\mathbf{b}_{\mathbf{j}} \cdot \mathbf{x}} \right) + \mathbf{c}_{\mathbf{j}}, \qquad (2)$$

де х – значення зусилля натягу Т;

k – порядковий номер кривої, що відповідає заданому значенню зусилля пережиму Р;

a, b, c - постійні коефіцієнти, величини яких для кожного значення k представлені в табл. 2.

Процес подовження нитки залежно від величини розтяжного зусилля експериментально вивчали на макеті, в якому досліджувану нитку довжиною 0,29 м по черзі розтягували зусиллями в діапазоні 0 ... 0,49 Н.

Таблиця 2

(12)

Значення коефіцієнтів апроксимуючої функції

j	0	1	2	3	4	5	6
а	- 0,23	- 0,22	- 0,20	-0,18	- 0,17	- 0,16	- 0,15
b	- 3,95	- 4,33	- 4,80	- 4,61	- 4,65	- 5,19	- 5,16
с	0,93	0,81	0,71	0,62	0,57	0,53	0,50

Отримані результати апроксимовані експонентою

$$\mathcal{E}_0 = a_2 \cdot e^{b_2 \cdot t_0} + c_2, \tag{3}$$

де а2, b2, с2- постійні коефіцієнти.

 $a_2 = -0,024; b_2 = -12,752; c_2 = 0,024.$

Зворотна залежність зміни натягу нитки від її відносного подовження має вигляд

$$t_{nj} = \frac{1}{b_2} \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon_{\Sigma j} - c_2}{a_2}\right),\tag{4}$$

де Е-відносне подовження;

*a*₂, *b*₂, *c*₂ – постійні коефіцієнти.

Алгоритм розрахунку параметрів міжвиткової взаємодії [6]. Для опису процесів міжвиткової взаємодії у рівнозаповнених шарах в формулу А. П. Мінакова для розрахунку тиску витка *N_n* в *j*-ому шарі

$$N_{nj} = \frac{\iota_{0j}}{r_j} \cdot \sin^2 \beta \cdot \cos \lambda , \qquad (5)$$

де *t*_{0*j*} – намотувальний натяг нитки для *j*-го шару;

 r_i – радіус *j*-го шару;

 β – кут розкладки нитки;

 λ – кут конусності пакування,

введемо множник, чисельно рівний гі:

$$N_{slj} = N_{nj} \cdot r_j. \tag{6}$$

Тоді для циліндричного пакування

$$N_{sl\,i} = t_{0\,i} \cdot \sin^2 \beta \,. \tag{7}$$

Обчислимо радіус*j*-го шару, $j \in 0...(u - 1)$, де u – кількість шарів, поставивши у відповідність значенням *j* значення $s \in (u - 1)...0$. Тоді результуюче зусилля тиску N_1 , яке сприймає нитка в *j*-омушаріпід дією всіх наступних шарів,

$$N_{1j} = N_{slj} \cdot s \,. \tag{8}$$

Відносний поперечний розмір p_1 деформованої нитки при одночасному впливі зусилля пережиму N_1 і зусилля натягу t

$$p_1 = \xi(N_1, t),$$
 (9)

для *j*-го шару

$$p_{1j} = a_1 \cdot N_{1j}^{b_1} + c_1, \tag{10}$$

де *a*₁, *b*₁, *c*₁-коефіцієнти апроксимації, постійні для заданого значення натягу.

а

Знайдемо коефіцієнти апроксимації*а*, *b*, *c* для поточного значення натягу *t* методом лінійної інтерполяції коефіцієнтів *a*₁, *b*₁, *c*₁для найближчих відомих значень натягу:

 $\delta_i = 2 \cdot p_i \cdot d$,

$$=\psi(a_1,t); \ b=\psi(b_1,t); \ c=\psi(c_1,t).$$
(11)

Обчислимо товщину *j*-го шару δ

де *d* – діаметр нитки.

За формулою М. Д. Меньшиковой

$$d = A \cdot T + b , \tag{13}$$

де $A = 482 \cdot 10^{-5}$;

b = 0,092 для хлопчатобумажної пряжі;

T – лінійна щільність нитки, текс.

Тоді радіус намотування і-го шарупо завершенні процесу намотування всього пакування

$$r_{1j} = r_{1(j-1)} + \delta_j.$$
(14)

Тепер обчислимо радіус r_2 намотування в момент завершення формування поточного *j*-го шару. Для цього послідовно визначимо зусилля тиску N_2 в $i \in (j...0)$ шарах, що передують *j*-му шару

$$N_{2i} = N_s \cdot i \,, \tag{15}$$

а потім скористаємося формулами (9) – (14).

Це дозволяє обчислити величину радіального переміщення шарів Δr :

$$\Delta r_j = \frac{r_{2j} - r_{1j}}{r_0} \,. \tag{16}$$

Обчислимо відносне подовження витка нитки з вираження, отриманого шляхом геометричного аналізу положення витка в тілі пакування:

$$\varepsilon_j = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot \Delta r_j}{\cos \beta},\tag{17}$$

де k – коефіцієнт, що враховує сили тертя й зчеплення витків.

Початкове відносне подовження ε_0 визначимо з апроксимуючої залежності (3). Тоді результуюче відносне подовження $\varepsilon_{\Sigma} j$ -го шару

$$\mathcal{E}_{\Sigma i} = \mathcal{E}_0 - \mathcal{E}_i \,. \tag{18}$$

Обчислимо підсумковий пошаровий натяг нитки*t*_nз використанням отриманої в третьому розділі апроксимуючої залежності (4).

Оскільки отримані значення пошарового розподілу підсумкового натягу t_n відрізняються від вихідного натягу t_0 , далі заново перерахуємо радіус шарів так само, як це було зроблено вище.

Отримані співвідношення покладені в основу алгоритму пошарового розрахунку параметрів міжвиткової взаємодії. Алгоритм містить цикл обчислення радіуса кожного шару у фазі завершення процесу намотування всіх шарів пакування r_1 з керуючою змінною $j \in 0...(u-1)$, і вкладений у нього цикл обчислення радіуса у фазі завершення формування розглянутого шару r_2 з керуючою змінною $i \in (j...0)$. Далі в зовнішньому циклі обчислюють радіальне переміщення шару Δr , відносне подовження c_i нові значення натягу нитки t_n . Основні вхідні параметри алгоритму – початковий радіус пакування r_0 , число шарівu, кут розкладки нитки β , начальний натяг t_0 , лінійна густина нитки T, коефіцієнти апроксимуючих залежностей a1, b1, c1, a2, b2, c2. Головний вихідний параметр розглянутого алгоритму – вектор радіального розподілу шарівr, одночасно ϵ вхідним для алгоритму обчислення траєкторії точки набігання.

Алгоритм обчислення траєкторії точки набігання [7; 8]. Побудуємо модель просторової кривої траєкторії точки набігання в межах усього тіла намотування зурахуванням міжвиткових деформаційних процесів. Крива складається із заданої кількості шарів *u*, кожний з яких містить *m* прошарків; кожний з прошарків містить послідовність із чотирьох елементарних компонентів.

Введемо позначення, сполучивши вісь симетрії циліндричної поверхні радіуса *r*, на якій лежить поточна крива, з віссю *OZ* просторової декартовой системи координат *OXYZ*. Початок координат помістимо в точку *O*, відстань якої від крайніх точок кривої становить $\pm z_m$. Площини $z = z_m$ и $z = -z_m$ відповідають торцевим поверхням пакування, а площиниz = k и z = -kвідокремлюють торцеві ділянки $[k, z_m]$ і $[-k, -z_m]$ від міжторцевого [-k, +k].

Розрахуємо положення точки k, виходячи із заданої висоти пакування $h = 2 \cdot z_m$, початкового радіуса намотування r_0 і кута розкладки нитки за формулою

$$k = z_m - r_0 \cdot tg\beta . \tag{19}$$

Привласнимо поточному шарові значення радіуса із вхідного вектора радіального положення шарів $r = r_i$, і обчислимо кількість прошарків *m* для поточного шару із точністюдо цілого числа:

$$m = \operatorname{trunc}\left(m_0 \cdot \frac{r}{r_0}\right),\tag{20}$$

де *m*₀ – початкове значення кількості прошарків у шарі;

r – радіус поточного шару.

Розрахуємо довжину компонента, виражену у кутових і лінійних одиницях. Позначимо кут повороту радіальної площини, в якій переміщується уздовж осі 0Z точка набігання щодо площини X0Z (рис. 7), як параметр φ . Тоді точку початку правої спіралі можемо позначити як φ_{sp0} , точку сполучення правої спіралі й початку правого еліпса, – як $\varphi_{spk} = \varphi_{ep0}$, точку сполучення правого еліпса й лівої спіралі – як $\varphi_{epk} = \varphi_{sm0}$, точку сполучення лівого еліпса – як φ_{emk} (рис. 1).

Задамо початкові значення змінних z_{sp0} и φ_{sp0} для правої спіралі

$$z_{\rm sp0} = -k, \ \varphi_{\rm sp0} = \varphi_{\rm emk} \ . \tag{21}$$

Обчислимо довжину правого спірального компонента траєкторії точки набігання на ділянціk - (-k) = 2k у кутових одиницях по формулі

$$\varphi_{sp} = \frac{2k}{r \cdot \mathrm{tg}\beta} \tag{22}$$

і положення кінцевої точки правої спіралі:

$$\varphi_{spk} = \varphi_{sp\,0} + \varphi_{sp} \,. \tag{23}$$

Довжина спірального компонента у лінійних одиницях

$$l_{sp} = \frac{2k}{\sin\beta} \,. \tag{24}$$

Спіральний компонент утворює у радіально-осьовій площині перетину тіла пакування, наприклад, площиниу = 0, сліди, число яких залежить від кількості перетинань. Призначимо збільшення параметра $\varphi = \varphi + 2 \cdot \pi$, попередньо задавши значення $\varphi = \varphi_0$ з початкових умов, і будемо повторювати збільшення доти, поки виконується умова $\varphi \leq \varphi_{spk} - 2 \cdot \pi$. При цьому на кожній ітерації будемо робити розрахунки координат слідів x_{sp} , y_{sp} , z_{sp} с використанням системи рівнянь:

$$\begin{cases} x_{sp} = r \cdot \cos \varphi; \\ y_{sp} = r \cdot \sin \varphi; \\ z_{sp} = r \cdot tg \beta \cdot \varphi. \end{cases}$$
(25)

Спіральний компонент у точці сполучення $\varphi_{spk} = \varphi_{ep0}$ плавно переходить у праву еліптичну лінію. Оскільки її опису, придатного для використання в моделі, у літературних джерелах не виявлено, нами складена система рівнянь циліндричної поверхні в параметричному виді й площини, що проходить через точки *A*, *B*, *C*, нормальний вектор якої становить кут β с віссю *OZ* (рис. 4).



Рис. 4. Перетинання площини еліпса із циліндричною поверхнею

$$\begin{cases} x_{ep} = r \cdot \cos \varphi; \\ y_{ep} = r \cdot \sin \varphi; \\ z_{ep} = tg\beta \cdot \left[y_{ep} \cdot \sin \left(\varphi_{ep0} + \frac{\varphi_{ep}}{2} \right) + x_{ep} \cdot \cos \left(\varphi_{ep0} + \frac{\varphi_{ep}}{2} \right) - r \right] + z_m. \end{cases}$$
(26)

Задамо початкові значення її параметрів

$$z_{\rm ep0} = k, \ \boldsymbol{\varphi}_{ep0} = \boldsymbol{\varphi}_{\rm spk} \tag{27}$$

і розрахуємо кутову довжину еліптичного компонента

ſ

$$\varphi_{ep} = 2 \cdot \arccos\left(1 - \frac{r_0}{r}\right). \tag{28}$$

Тоді кутовий параметр кінцевої точки правого еліптичного компонента

$$\varphi_{epk} = \varphi_{ep0} + \varphi_{ep} \,, \tag{29}$$

а лінійна довжина правого еліптичного компонента

$$l_{ep} = r \cdot \int_{\varphi_{ep0}}^{\varphi_{epk}} \sqrt{\frac{\sin^2 \varphi}{\cos^2 \beta} + \cos^2 \varphi} d\varphi \,. \tag{30}$$

Обчислимо координати слідів еліптичної лінії x_{ep} , y_{ep} , z_{ep} на кожній ітерації збільшення параметра $\varphi = \varphi + 2 \cdot \pi$, поки дотримується умова $\varphi \leq \varphi_{epk} - 2\pi$.

Для розрахунку координат слідів третього компонента – лівої спіральної лінії, – виконаємо ті ж дії, що й у попередніх двох випадках, тобто задамо $z_{sm0} = k$, $\varphi_{sm0} = \varphi_{epk}$, обчислимо кутову довжину лівого спірального компонента $\varphi_{sm} = \frac{2k}{r \cdot \text{tg}\beta}$, значення кутового параметра кінцевої точки лівої спіралі $\varphi_{smk} = \varphi_{sm0} + \varphi_{sm}$ і лінійну довжину спірального компонента $l_{sm} = \frac{2k}{\sin \beta}$. Потім призначимо збільшення $\varphi = \varphi + 2 \cdot \pi$, яке будемо повторювати доти, поки дотримується умова $\varphi \leq \varphi_{smk} - 2 \cdot \pi$. На кожній ітерації будемо розраховувати значення координат x_{sm} , y_{sm} , z_{sm} по формулі

$$\begin{cases} x_{sm} = r \cdot \cos \varphi; \\ y_{sm} = r \cdot \sin \varphi; \\ z_{sm} = z_{sm} - r \cdot tg\beta \cdot (\varphi - \varphi_{sm0}). \end{cases}$$
(31)

Аналогічно обчислимо координати слідів траєкторії для четвертого компонента прошарка, – лівої еліптичної лінії. Задамо початкові значення параметрів $z_{em0} = -k$, $\varphi_{em0} = \varphi_{smk}$, розрахуємо кутову довжину

$$\varphi_{em} = 2 \cdot \arccos\left(1 - \frac{r_0}{r}\right),\tag{32}$$

кутове положення кінцевої точки $\varphi_{emk} = \varphi_{em0} + \varphi_{em}$ і його лінійну довжину

$$l_{em} = r \cdot \int_{\varphi_{em0}}^{\varphi_{emk}} \sqrt{\frac{\sin^2 \varphi}{\cos^2 \beta} + \cos^2 \varphi d\varphi}.$$
(33)

Призначимо збільшення параметра $\varphi = \varphi + 2 \cdot \pi$, перевіряючи виконання умови $\varphi \leq \varphi_{emk} - 2\pi$ і обчислюючи координати слідів x_{em} , y_{em} , z_{em} на кожній ітерації:

$$\begin{aligned} x_{em} &= r \cdot \cos \varphi; \\ y_{em} &= r \cdot \sin \varphi; \\ z_{em} &= -tg\beta \cdot \left[y_{em} \cdot \sin \left(\varphi_{em0} + \frac{\varphi_{em}}{2} \right) + x_{em} \cdot \cos \left(\varphi_{em0} + \frac{\varphi_{em}}{2} \right) - r \right] - z. \end{aligned}$$
(34)

Загальну довжину траєкторії точки набігання одного прошарку l_p визначимо як суму довжин траєкторій всіх компонентів прошарка $l_p = l_{sp} + l_{ep} + l_{sm} + l_{em}$. Отримані виразипокладені в основу алгоритму обчислення траєкторії точки набігання, що включає чотири послідовних цикли компонентів, вкладених у цикл прошарків з керуючою змінною $i \in 0...(m-1)$, де m – кількість прошарків у шарі, а цикл прошарків, у свою чергу, вкладений у цикл шарів, керуюча змінна якого *і*послідовно приймає значення від 0 до (u-1), где u – загальна кількість шарів у пакуванні. Алгоритм виконує також функцію пошарового розрахунку довжин компонентів траєкторії точки набігання l_{sp} , l_{ep} , l_{sm} , l_{em} і сумарних довжин у масштабах прошарка, шару й пакування в цілому.

Підсистема обробки й візуалізації результатів комп'ютерного моделювання [9] необхідна у зв'язку з відносно великим їхнім обсягом. Так, наприклад, для побудови графіка розподілу слідів траєкторії навівання нитки в перетині тіла пакування із числом шарів 120, прошарків – 75, у кожному з яких компоненти траєкторії перетинаються із січною площиною 5...6 разів, кількість точок досягає 50 тисяч при загальній кількості параметрів, переданих на вихід, 48. Розмір файлу даних текстового формату, що містять цю інформацію, досягає 10 мегабайт і більше. Підсистема включає алгоритми візуалізації розподілу слідів витків у перетині тіла пакування, розподілу слідів по ділянках у площині перетину пакування, розподілу щільності й інших параметрів по радіусу пакування, а також пошарової зміни параметрів міжвиткової взаємодії. За результатами виконаної вище роботи побудована загальна схема основних етапів комп'ютерного моделювання процесу формування структури пакування (рис. 5).

Постановка комп'ютерного експеримента і аналіз одержаних результатів

Всі алгоритми, розглянуті вище, реалізовані у вигляді спеціально написаних пакетів програм. Перший пакет містить дві основні програми ядра моделі й призначений для відтворення процесу формування на стадії намотування циліндричного пакування на циліндричній основі за допомогою мотального барабанчика постійного кроку. Призначення другого пакета полягає в обробці й візуалізації тих даних, які напрацьовує ядро моделі в процесікомп'ютерного експерименту.

В ході комп'ютерного експерименту здійснено моделювання структури пакування з метою дослідження впливу чотирьох факторів – початкового натягуt, кута розкладки β , лінійної густини нитки T і початкового радіуса намотування r_0 , – кожний з яких піддавали варіюванню на трьох рівнях.

Результати комп'ютерного експерименту являють собою набір графічних залежностей: візуалізації розподілу слідів траєкторії нитки в перетині пакування; пошарового розподілу параметрів міжвиткової взаємодії; розподілу маси нитки, обсягу й щільності шарів у радіальному напрямку тіла пакування, а також графіків зміни середньої густини тіла пакування при зміні досліджуваного параметра.

Розглянемо результати моделювання впливу попереднього натягу нитки на структуру пакування, одержані для наступних умов: рівні варіювання натягу нитки t = 0,03; 0,05; 0,10 H; лінійна густина нитки $T = 29,4 \times 2$ г/км; кут розкладки нитки $\beta = 0,209$ рад; початковий радіус пакування $r_0 = 45 \cdot 10^{-3}$ м; кількість шарів u = 120; початкова кількість прошарків $m_0 = 75$; коефіцієнт тертя й зчеплення витків k = 0,004; коефіцієнти апроксимуючих залежностей: $a_1 = -0,784$; $b_1 = 0,228$; $c_1 = 1,037$; $a_2 = -0,024$; $b_2 = -12,752$; $c_2 = 0,024$; $a_4 = -0,224$; $b_4 = -4,140$; $c_4 = 0,821$.



Рис. 5. Основні етапи комп'ютерного моделювання процесу формування структури пакування

Одержані дані піддані аналізу й оцінці як з позиції адекватності моделі реальній структурі пакування, так і з позиції вибору параметрів намотування, найбільш сприятливих для рідинної обробки.

Графічні залежності пошарового розподілу параметрів міжвиткової взаємодії. Встановлено, що форма кривих пошарової зміни параметрів міжвиткової взаємодії (рис. 6), для яких існують аналоги в літературних джерелах, –тиску між шарами, тиску на патрон, радіального переміщення, підсумкового натягу, – добре з ними погоджуються [1].



Рис. 6. Графічні залежності пошарового розподілу параметрів міжвиткової взаємодії для початкового натягу нитки $t_1 = 0,03$ H (пунктир), $t_2 = 0,05$ H (суцільна лінія), $t_3 = 0,10$ H (штрихова лінія)

Це підтверджує адекватність реальному процесу тієї частини алгоритму комп'ютерної моделі, яка призначена для обчислення параметрів міжвиткової взаємодії.

Всі криві тісно пов'язані між собою, оскільки кожна із них описує свій бік, своє явище, одного загального процесу міжвиткової взаємодії. Однак кривізміни поперечного розміру нитки по радіусу пакуванняє унікальними, оскільки їх аналогів в доступних авторуінформаційних джерелахвиявитине вдалося.

Явище тискуміжшарами породжує явище поперечної деформації нитки в структурі пакування. Величина деформації пересічної в контактному майданчику пари витків виражена через поперечний розмірнитки. Мінімальний поперечний розмір деформованої нитки, який не перевищуєу відносних одиницях половини вихідного розміру, має місце в шарі на поверхні патрона. Потім поперечний розмір починає рости, причому швидкість росту спочатку трохи убуває, а потім, навпаки, починає швидко зростати й досягає максимуму на поверхні тіла пакування, де відносний поперечний розмір нитки наближається до одиниці. Положення кривих на графіку залежить від попереднього натягу нитки, характер залежності складний. Точка зміни знака кривизни кривих деформації нитки відповідає точці перегину кривих міжвиткового тиску. Складна форма кривих пояснюється конкурентним характером впливу на процес поперечної деформації нитки одночасно декількох факторів, таких як зусилля пережиму й зусилля натягу.



Рис. 7. Розподіл слідів траєкторії точки набігання уперетині тіла пакування для трьох значеньпочаткового натягу нитки: а) t₁=0,03 H; б) t₂=0,05 H; в) t₃=0,10 H

Розподіл слідів траєкторії точки набігання у площині перетину тіла пакування. На рис. 7 представлено три графічні залежності розподілу слідів траєкторії точки набігання в площині перетину тіла пакування для трьох значень початкового натягу нитки $t_1 = 0,03$ H, $t_2 = 0,05$ H и $t_3 = 0,10$ H. Із рис. 7 видно, що найбільшою радіальною рівномірністю розподілу слідів характеризуеться перетин пакування, сформованої при мінімальному початковому натягу $t_1 = 0,03$ H (рис. 7, а), хочаі помітно, що щільність плавно убуває знизу

нагору, тобто від поверхні патрона до периферії. Цю закономірність порушують лише шари зі стрічковим намотуванням різного ступеня виразності, періодично розподілені в радіальному напрямку що є характерною рисою намотування із застосуванням мотальногобарабанчика. При цьому максимальний радіус намотування склав $r1_{\text{max}} = 101 \cdot 10^{-3}$ м. У міру росту початкового натягу до значення $t_2 = 0,05$ H (див. рис. 7, б) відмінність між щільністю центральних (у поверхні патрона) і периферійних шарів помітно зростає, а максимальний радіус при незмінній кількості шарів зменшується до $r2_{\text{max}} = 95 \cdot 10^{-3}$ м. Це пояснюється ростом міжслойних тисків і, отже, більшими деформаціями поперечного переріза нитки в контактних площадках перетинання витків.

Подальший ріст початкового натягу нитки, що навивається, до $t_3 = 0,10$ H, як видно із рис. 7, в, приводитьдоще більшої різниціщільності периферійного й центрального шарів, при цьому в шарах поблизу поверхні патрона з'являються добре виражені ущільнення, періодично розподілені в осьовому напрямку пакування. Поява ущільнених ділянок поблизу поверхні патрона свідчить про значні деформаційні процеси поперечного перерізу нитки в них як у результаті взаємодії витків між собою, так і з перфорованою поверхнею патрона, що має негативне значення для результатів рідинної обробки пакувань.

Таким чином, графік розподілу слідів траєкторії нитки в радіально-осьовому перетині тіла пакування дозволяє візуально оцінити рівномірність пошарового й осьового розподілу щільності, однак лише на якісному рівні.

Пошаровий розподіл параметрів структури пакування. Методом комп'ютерного моделювання вперше одержані графічні залежності, що відображають пошаровий розподіл маси, обсягу й щільності шарів, а також залежність середньої густини намотування пакування від величини початкового натягу нитки (рис. 8). Характер кривих підтверджує коректність роботи моделі в режимі варіювання початкового натягу ниткиз урахуванням тих обмежень, які були зроблені при побудові моделі. Графік розподілу обсягу шарів будують, послідовно обчислюючи обсяг кожного шару. Характерною рисою всіх кривих графіка є змінна швидкість росту обсягу шарів залежно від номера, яка різко зростає для периферійних шарів. Це пояснюється зменшенням міжслойного тиску у периферійних шарах і, отже, ростом товщини цих шарів.



 $t_1 = 0,03$ Н (пунктир), $t_2 = 0,05$ Н (суцільна лінія), $t_3 = 0,10$ Н (штрихова)

Як видно із графіка, найбільш сильний вплив початкового натягу на розподіл обсягу спостерігається для середніх шарів. Це можна пояснити в такий спосіб. У процесі намотування під дією зростаючого тиску між шарами й у результаті деформації поперечного переріза нитки в контактних площадках перетинання витків відбувається радіальне переміщення шарів. Цей процес найбільш сильно виражений у середніх шарах, оскільки на них здійснюється вплив усіх периферійних шарів. Графік пошарового розподілу об'ємної щільності у тілі пакування одержують діленням маси кожного шару на його обсяг. Форма кривих розподілу щільності схожа з формою кривих, отриманих аналітичним шляхом іншими авторами, і мають характерний вигляд, обумовлений пошаровим убуванням щільності зі змінною швидкістю.

Із графіка видно, що щільність шарів поблизу поверхні патрона максимальна й залежить від величини початкового натягу нитки. Крім того, на кривих видні ділянки, що чергуються, різної швидкості зміни щільності.

На першій ділянці, найбільшій для натягу $t_1 = 0,03$ Н, щільність убуває відносно швидко майже за лінійним законом, потім, на наступній ділянці, швидкість зменшується, після чого зі зростаючою швидкістю, що перевищує швидкість на першій ділянці, досягає мінімального значення. Із графіка видно, що для середніх шарів, залежно від початкового натягу нитки, діапазон зміни щільності становить 370...490 кг/м³, що добре узгоджується зі значеннями середньої щільності в практиці намотування пакувань.

На рис. 8 представлений графік зміни*середньоїщільності тіла пакування* залежно від величини початкового натягу. Вихідними даними для побудови графіка є відомості про довжину нитки й обсяг тіла пакування, що обчислюються ядром моделі. Із графіка видно, що зростання початкового натягу нитки в процесі намотування приводить до росту середньої щільності сформованого тіла пакування: початковому натягу 0,03 Н відповідає середня щільність 350 кг/м³, 0,05 Н – 385 кг/м³, 0,10 Н – 438 кг/м³, при цьомушвидкість зростання, у міру росту початкового натягу, убуває, про що свідчить зменшення кута нахилу графічної залежності на ділянці 0,05…0,10 Н у порівнянні з ділянкою 0,03…0,05 Н. Ці характеристики повністю відповідають показникам, одержуваним у практиці намотування пакувань, призначених для рідинної обробки.

Таким чином, аналіз представлених вище результатів комп'ютерного експерименту й порівняння їх з окремими характеристиками, відомими з літературних джерел і практики намотування пакувань, дозволяє зробити висновок про коректність роботи алгоритму ядра моделі в режимі варіювання початкового натягу нитки, що навивається, у межах тих обмежень, які були зроблені при розробці алгоритму моделі.

Висновки

1. Викладені основні етапи побудови комп'ютерної моделі повної траєкторії точки набігання для тіла пакування з урахуванням напружено-деформованого стану нитки на прикладі пакування хрестового намотування циліндричної форми, сформованого на циліндричному осерді за допомогою мотального барабанчика постійного кроку.

2. Здійснено повний математичний опис безперервної просторової кривої траєкторії навівання нитки в обсязі всього тіла пакування з урахуванням поперечної деформації нитки в контактних площадках перетинання витків, що дозволило обчислити координати слідів траєкторії нитки в площині перетину тіла пакування, характер розподілу яких має вирішальний вплив на результати рідинної обробки

3. Показана роль експериментальних даних про залежність ступеня поперечної деформації нитки в контактній площадці перетинання витків від зусиль пережиму й натягу, для побудови тієї частини комп'ютерної моделі, яка відтворює процеси міжвиткової взаємодії.

4. Побудована комп'ютерна модель пошарового розрахунку параметрів міжвиткової взаємодії й обчислення траєкторії точки набігання в процесі намотування.

5. Пов'язано результати, одержані для рівня нитки, з інтегральним параметром оцінки структури тіла пакування, застосовуваним у виробничих умовах, – середньою густиною намотування: методом комп'ютерного моделювання одержані характеристики пошарового розподілу маси нитки, обсягу й щільності, а також зміни середньої густини тіла пакування у функції технологічних параметрів процеса намотування – початкового натягу, лінійної густини нитки, кута розкладки й початкового радіуса намотування.

6. Підтверджено коректність принципів, покладених в основу побудови комп'ютерної моделі: по результатам комп'ютерного експерименту одержані кількісні характеристики пошарового розподілу в тілі пакування параметрів міжвиткової взаємодії – міжвиткового тиску, радіального переміщення, підсумкового натягу й тиску на патрон, – які добре збігаються з відомими результатами аналітичного моделювання і експерименту.

ЛІТЕРАТУРА

- 1. Александров С. А. Формирование ткацких паковок / С. А. Александров, В. Б. Кленов. М. : Легкая индустрия, 1976. 120 с.
- 2. Сыс В. Б. Структурная декомпозиция технологической системы формирования паковок // Проблемы лёгкой и текстильной промышленности Украины. 2002. № 6. С. 127–131.
- 3. Сыс В. Б. Послойное заполнение прослойков нитью в компьютерной модели паковки // Проблемы лёгкой и текстильной промышленности Украины. 2003. № 7. С. 96–98.
- Сыс В. Б. Деформация пересекающихся нитей в контактной площадке: зависимость величины деформации от усилия пережима нитей // Проблемы лёгкой и текстильной промышленности Украины. – 2004. – № 1(8). – С. 128–130.
- 5. Сыс В. Б. Зависимость поперечной деформации пересекающихся нитей от усилия их натяжения // Проблемы лёгкой и текстильной промышленности Украины. 2004. № 2(9). С. 91–95.
- Сыс В. Б. Алгоритм послойного расчёта параметров межвиткового взаимодействия в компьютерной модели структуры паковки // Проблемы легкой и текстильной промышленности Украины. – 2005. – № 1(10). – С. 142–150.
- Сыс В. Б. Алгоритм вычисления траектории точки набегания в компьютерной модели структуры паковки // Проблемы легкой и текстильной промышленности Украины. – 2006. – № 1(11). – С. 88–96.

- Сыс В. Б. Вычисление структурных характеристик в компьютерной модели паковки // Вестник Херсонского государственного технического университета. 2004. № 2(20). С. 200–204.
 Сыс В. Б. Подсистема обработки и визуализации результатов компьютерного моделирования структуры паковки // Вестник Херсонск. гос. тех. ун-та. 2005. № 3(23). С. 164–167.

Рецензенти: Фісун М. Т., д.т.н., професор; Кондратенко Ю. П., д.т.н., професор

© Сис В. Б., 2010

Стаття надійшла до редколегії 17.11.2010 р.