

<https://doi.org/DOI:10.30857/1813-6796.2020.5.3>

УДК 677.075. 3:
677.072.7+004.4

ЄЛІНА¹ Т.В., ГАЛАВСЬКА¹ Л.Є., МІКУЧІОНЕНЕ Д.²,
МІЛАШІУС Р.², БЕЗСМЕРТНА³ В.І.

¹ Київський національний університет технологій та дизайну

² Каунаський технологічний університет, Каунас, Литва

³ Інститут проблем матеріалознавства ім.І.М. Францевича НАН України

ОСОБЛИВОСТІ 3D МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ТРИКОТАЖУ У МАКСИМАЛЬНО РОЗТЯГНУТОМУ СТАНІ

Мета. Метою даного дослідження є розробка математичного забезпечення для засобів автоматизованої побудови тривимірних геометричних моделей трикотажу, що знаходиться у максимально напруженому стані внаслідок одновісного розтягу вздовж петельних стовпчиків або петельних рядів.

Методика. У процесі дослідження використано методи теоретичного аналізу, теорія сплайнів, методи тривимірного геометричного моделювання та параметризації, засоби комп'ютерної графіки, засоби програмування.

Результати. У ході роботи прийнято припущення, що у максимально розтягнутому стані дотична до осевої лінії петлі у точці переплетення розташована під кутом 45° до вертикальної лінії, орієнтованої вздовж петельного стовпчика. Запропоновано математичні вирази для визначення координат характерних точок петлі у тривимірному просторі. Розроблено алгоритм та програмна реалізація у якості окремого модуля програми Структура 3D, призначеного для створення моделей трикотажу у розтягнутому стані.

Для верифікації алгоритму виготовлено зразки кулірного трикотажу переплетення гладь на плосков'язальному обладнанні 8 класу з параарамідних і високомолекулярних поліетиленових ниток лінійної густини 58,8х2 текс та 44х3 текс відповідно. Визначено параметри петельної структури зразків в умовно-рівноважному стані та при максимальному одновісному розтягненні вздовж лінії петельного стовпчика та ряду. Розтяг випробуваних зразків виконано на машині KaoTieh KT-7010AZ. Максимально напружений стан зразків зафіксовано за допомогою мікроскопу Micro Capture Pro для подальшого визначення особливостей зміни параметрів структури трикотажу під дією деформації розтягу. Одержані значення параметрів петельної структури зразків використано у якості вихідних даних для побудови тривимірних моделей. Відхилення значення довжини сплайну, що представляє осеву лінію нитки в моделі петлі від довжини нитки в петлі, отриманого у ході аналізу зразків, не перевищує 5%.

Наукова новизна. Розроблено алгоритм автоматизованої побудови тривимірних моделей трикотажу переплетення гладь, що знаходиться у стані максимального одновісного розтягу вздовж петельних стовпчиків або петельних рядів.

Практична значимість. Створено окремий модуль програми Структура 3D для автоматичної побудови петлі трикотажу у напруженому стані під дією одновісного розтягу.

Ключові слова: трикотаж, деформації розтягу, мезомоделі, надміцна сировина, тривимірне моделювання.

Вступ. З бурхливим розвитком цифрових технологій у моделюванні фізичних процесів методи дослідження механічних властивостей трикотажу отримують нові перспективи. Багато дослідників та наукових шкіл працюють над розвитком систем тривимірного моделювання текстильних матеріалів, здатних забезпечити можливість проведення на достатньо високому рівні віртуальних експериментів та моделювання деформацій тканин та трикотажу. Розтяжність трикотажу є однією з його найбільш важливих характеристик, оскільки від неї залежить здатність виробу зберігати форму, комфортність експлуатації, можливість спрощення конструкції трикотажних виробів у порівнянні з аналогічними

виробами з інших текстильних матеріалів, виготовлення безшовного та малошовного трикотажного одягу. Функціональні властивості захисних трикотажних виробів напряму залежать від здатності матеріалів протистояти дії механічних руйнуючих факторів. У процесі розтягу кулірного трикотажу переплетення гладь відбуваються процеси розпрямлення зігнутих ділянок ниток, орієнтованих у напрямку розтягу та, на стадіях деформацій, що передують розриву, перетягування нитки з голкових та платинних дуг у палички остовів (розтяг вздовж петельних стовпчиків) та із паличок остовів у голкові та платинні дуги (розтяг вздовж петельних рядів). Для передачі особливостей такого перерозподілу у тривимірних мезомоделях трикотажу необхідно уточнення опису геометрії осрової лінії нитки та вибір форми та розміру перерізу для адекватної передачі властивостей у системах моделювання під час симуляції перевірки зразків на міцність. Такі розрахунки є особливо важливими при проєктуванні засобів індивідуального бронезахисту з надміцних ниток.

Постановка завдання. Активне вивчення процесу деформування трикотажу почалось з середини минулого століття та знайшло відображення у дослідженнях О.І. Коблякова [1], І.І. Шалова та Л.О. Кудлявіна [2], О.І. Далідовича [3] та ін. Застосування теорії гнучких пружних стержнів у задачах опису геометрії нитки в тканих та трикотажних структурах розглянуто у роботах Г. Ліфа [4], О.В. Труєвцева [5], В.П. Щербакова та Н.С. Скуланової [6] та ін. Але, якщо для більшості моделей минулого століття на перший план виходило питання прогнозування довжини нитки в структурі трикотажу на базі відомостей про її сировинний склад, геометричні та/або механічні характеристики та параметри процесу в'язання – з появою сучасного в'язального обладнання, що дозволяє виготовляти трикотаж з заданою довжиною нитки в петлі, акценти наукового пошуку дещо змістились. Розрахунково-аналітичні комплекси надають інженерам можливість проводити віртуальні експерименти за умови наявності відповідної теоретичної бази, що включає високу точність передачі геометрії нитки в тривимірних моделях трикотажу з одного боку та властивостей матеріалу і алгоритмів, що враховують особливості деформування трикотажу з іншого. Багато наукових робіт присвячено створенню комп'ютерних моделей трикотажної петлі [7], а протягом останніх років у наукових публікаціях активно обговорюються питання використання моделей мезо- та макrorівня у моделюванні деформацій трикотажу [8, 9, 10, 11, 12]. Модель трикотажу як незамкненої текстильної оболонки, що включає визначення енергії розтягнутого полотна, відштовхуючись від енергії зігнутої у петлю нитки, представлено у роботі [13]. Створенню тривимірної моделі та дослідженню механічних властивостей трикотажу ластик 1+1 з вертикальними та горизонтальними утоковими нитками з використанням програмного забезпечення Abaqus присвячено роботу [14]. У роботі [15] проведено комп'ютерне дослідження механічних характеристик трикотажу переплетення гладь з використанням мезомodelей та характеру напружень у зонах контакту ниток з застосуванням методу скінчених елементів. Моделювання розтяжності трикотажу переплетення гладь з використанням моделей мезо- та макrorівня розглянуто у роботі [16].

Перерозподіл нитки між окремими елементами структури трикотажу є процесом, що залежить від багатьох факторів та на даний момент не достатньо вивчений. Однак у максимально розтягнутому трикотажі, як справедливо зазначено у роботі [3], усе навантаження сприймають розпрямлені нитки та при розтягненні вздовж петельного

стовпчика міцність стовпчика трикотажу дорівнює міцності двох ниток (без урахування нахилу петельних паличок). Тому для забезпечення можливості прогнозування міцності трикотажу з використанням багаторівневого проєктування необхідно забезпечити високу точність передачі геометрії трикотажної петлі, що знаходиться у максимально розтягнутому стані.

З урахуванням вимог до геометричних об'єктів, що використовують у системах тривимірного моделювання для опису осьової лінії нитки в моделях трикотажної петлі [17] нами запропоновано використовувати для трикотажу, який знаходиться в умовно-рівноважному стані або в межах швидкооборотних деформацій, модель, описану в роботах [18, 19] та програмне забезпечення Структура 3D [20]. Однак для побудови моделей структури трикотажу у максимально розтягнутому стані опис геометрії осьової лінії нитки, що використано у моделі, потребує уточнення. Тому виникла необхідність доповнити алгоритм програми окремою гілкою для розрахунку конфігурації нитки у структурі трикотажу при максимальному одновісному розтягненні.

Результати досліджень. Алгоритм побудови осьової лінії нитки, запропонований нами у роботах [18, 19] передбачає можливість використання різних наборів вихідних даних. Осьова лінія нитки, зігнутої у петлю, подається у вигляді В-сплайну другого порядку. Спочатку на підставі даних про параметри структури трикотажу такі як: довжина нитки в петлі ℓ , петельний крок A , висота петельного ряду B , умовний діаметр нитки D_u , розрахунковий діаметр нитки D_p , товщина трикотажу M , кут нахилу петельної палички α (рис.1) та кут нахилу дотичної до осьової лінії нитки у точці переплетення γ , розраховуються координати характерних точок петлі, таких як точка вершини голкової дуги K , точка переплетення B , точка середини петельної палички T (рис.1). Приймається припущення, що петля є симетричною відносно вертикальної осі та дотичні у точках вершин голкової та платинної дуг належать площині, паралельній серединній поверхні полотна, та розташовані паралельно осі OX , орієнтація якої співпадає з напрямком петельних рядів. На підставі прийнятих припущень, вихідних даних розрахунку та загальних уявлень про конфігурацію нитки у структурі трикотажу, визначаються напрямки дотичних до осьової лінії нитки у характерних точках, координати яких розраховані на першому етапі роботи алгоритму. Просторові координати керівних вершин розраховуються як точки перетину дотичних до осьової лінії нитки у її характерних точках. Далі формується рівняння сплайну та визначається його довжина. Отримане значення довжини порівнюють зі значенням, введеним у вихідних даних. Якщо різниця перевищує 3% (задане значення допустимої похибки), відбувається корегування значення кута γ та повторення розрахунку. Оскільки внаслідок нерівномірності петельної структури точне визначення кутів α та γ неможливе, допускається варіювання значення кута нахилу дотичної у точці переплетення γ у межах обраного інтервалу для отримання побудованого за координатами керівних вершин.

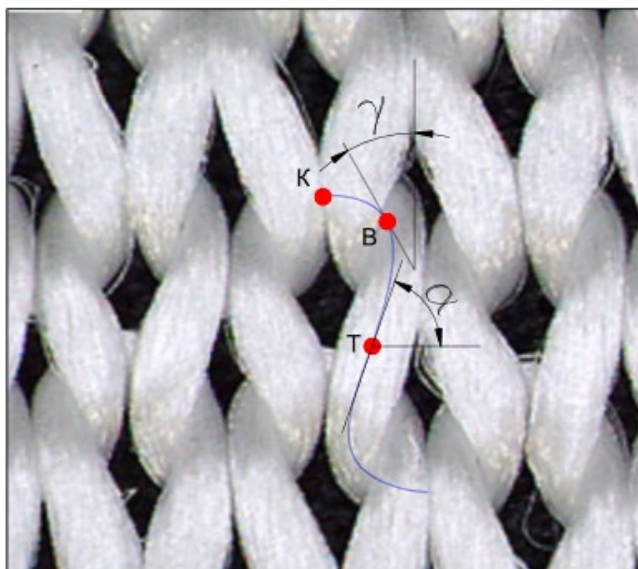


Рис. 1. Розташування характерних точок петлі на осьовій лінії нитки

В залежності від мети проєктування та сфери використання тривимірних моделей трикотажу, елементарні ділянки ниткової структури можуть бути подані як у вигляді оболонки (макромоделі), так і з деталізацією на рівні ниток або навіть окремих філаментів. На рис. 2 представлено петлю трикотажу переплетення гладь (а) та фрагмент петельного стовпчика (б), побудовані з деталізацією на рівні нитки з урахуванням зміни форми поперечного перерізу на окремих сегментах петлі.

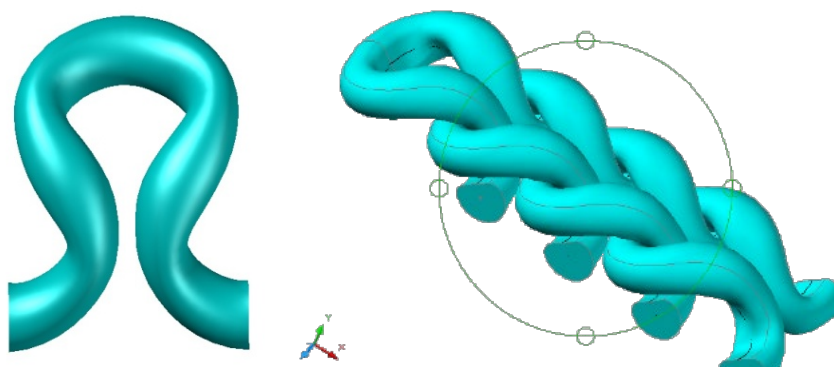


Рис. 2. Мезомодель трикотажу переплетення гладь, побудована з урахуванням зміни форми поперечного перерізу у програмі Структура 3D

Задачі моделювання міцності ниткових структур є особливо актуальними при проєктуванні захисного одягу, для якого використовують багатофіламентні надміцні нитки. Так, наприклад, параарамідна нитка Русар з підвищеними фізико-механічними властивостями складається з 300 філаментів [21], нитки Тварон 1000 та Тварон 2000 мають по 860 філаментів, тварон 2040 – 1000 філаментів, Кевлар – 670. Для створення моделей структури трикотажу з багатофіламентних ниток можна прийняти припущення про те, що елементарні нитки не змінюють свого взаємного положення при переході від одного перерізу до іншого, змінюючи лише відстань між сусідніми філаментами так як показано на рис. 3.

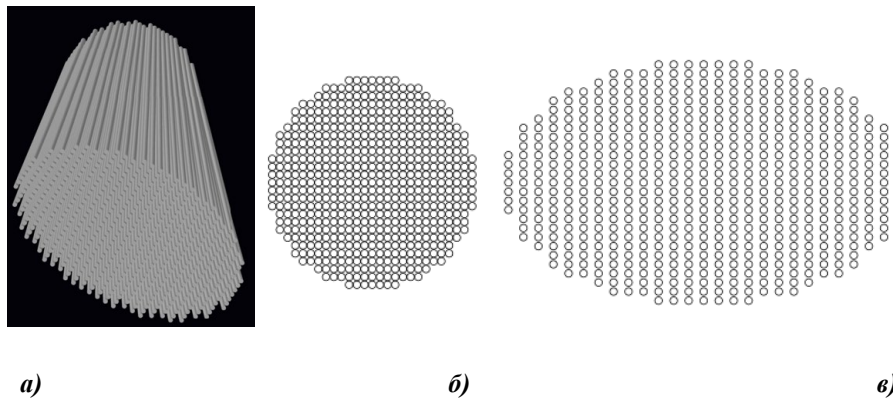


Рис. 3. Розподіл філаментів у перерізах нитки зі збереженням взаємного розташування

У роботі О.С. Далідовича [3] зв'язок між міцністю пряжі та зразка трикотажу переплетення гладь шириною 5 см запропоновано визначати за наступною формулою:

$$K_d = \frac{2 \cdot q \cdot N_c}{1000} [\text{кГ}], \quad (1)$$

де q – міцність нитки в Г;

N_c – щільність по горизонталі.

Розтяг трикотажу вздовж петельних стовпчиків супроводжується видовженням у напрямку розтягу та зменшенням лінійного розміру зразка вздовж петельних рядів (рис. 4а). Нитка, пров'язана у петлю здійснює опір розривним зусиллям силою q , орієнтованою вздовж петельних паличок. Його напрямок не співпадає з напрямком прикладених зусиль Q та може бути визначене з урахуванням кутів нахилу петельної палички [3].

$$Q = q \cdot \cos \varphi \cdot \cos \psi, \quad (2)$$

де φ – кут нахилу петельної палички до вісі петельного стовпчика;

ψ – кут нахилу петельної палички до площини полотна.

Зі зменшенням висоти петлі кути φ та ψ збільшуються, а сила опору Q – відповідно зменшується. Тому показники міцності на розрив для більш щільних структур є меншими порівняно зі зразками, виготовленими при більших рівнях глибини кулірування. З формул 1 та 2 можна записати вираз (3) для оцінки міцності на розрив сміжки трикотажу переплетення гладь шириною 5 см з урахуванням розташування петельної палички [3].

$$K_d = \frac{2 \cdot q \cdot N_c}{1000} \cos(\varphi + \psi). \quad (3)$$

Розтяг трикотажу по ширині супроводжується збільшенням ширини петельних стовпчиків та відстані між ними (рис. 4б). Тому опір розривним зусиллям розподіляється на ділянки нитки, орієнтовані вздовж петельних рядів (голкові та платинні дуги). Для визначення міцності по ширині у роботі [3] запропоновано використовувати вираз (4). При цьому рекомендовано визначати міцність нитки q при затискній довжині, що не перевищує 25 мм, оскільки відстань між точками фіксації нитки у структурі трикотажу дуже мала.

$$K_{ш} = \frac{q \cdot N_p}{1000}, \quad (4)$$

де N_p – щільність по вертикалі.

Як зазначено вище, для моделювання трикотажу переплетення гладь доцільно використовувати у якості вихідних даних такі значення як: довжина нитки в петлі ℓ , петельний крок A , висота петельного ряду B , товщина трикотажу M , умовний діаметр нитки D_u , та розрахунковий діаметр D_p . Причому для моделі трикотажу, максимально розтягнутого вздовж петельного ряду, $A=A_{\max}$, $B=B_{\min}$, а для моделі трикотажу, розтягнутого вздовж петельного стовпчика, $B=B_{\max}$, $A=A_{\min}$ (рис. 4). Ці дані можуть бути отримані експериментально або розраховані за відомими методиками [3 та ін.].

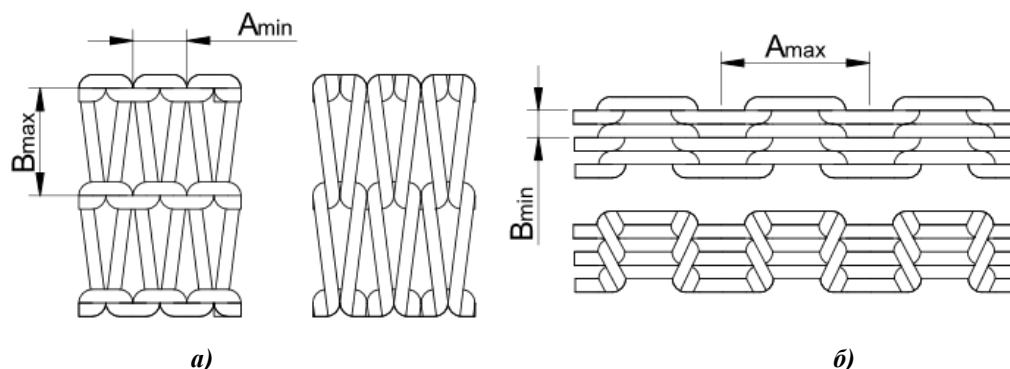


Рис. 4. Структура трикотажу переплетення гладь при максимальному розтязі вздовж петельних стовпчиків та петельних рядів

Як зазначено у роботі [18], при моделюванні у тривимірному середовищі, просторова лінія, що представляє у моделі осьову лінію нитки, повинна проходити через характерні точки, які лежать безпосередньо на центральній лінії пряжі та розташовані так, щоб у тривимірному просторі їхнє положення можна було визначити використовуючи традиційні уявлення про форму петлі. На (рис. 5) наведено схематичне зображення максимально розтягнутої вздовж петельного стовпчика петлі трикотажу переплетення гладь у проєкції на площину полотна та у проєкції на площину, яка проходить по центральній лінії петельного стовпчика та перпендикулярна площині полотна. Таке ж зображення для петлі гладі, розтягнутої вздовж петельного ряду, наведено на (рис. 6). Для опису конфігурації нитки на (рис. 5 та 6) крім точок K , B , T , показаних вище (рис. 1), наведено точки A та C – точки контакту ниток, що розташовані на перетині проєкцій на площину полотна осьових ліній двох переплєтених сегментів нитки, що належать суміжним петлям. Візуальний аналіз структури трикотажу переплетення гладь при максимальному одновісному розтягненні показав, що як при розтягненні у напрямку петельних стовпчиків, так і петельних рядів у точках переплетення нитки суміжних петель максимально щільно переплетені. У зоні переплетення нитка знаходиться у максимально стиснутому стані та її переріз у точці B (рис.1) може бути представлений як коло діаметр якого дорівнює умовному діаметру нитки (рис. 26). Оскільки проєкції перерізів ниток, що переплетені, на площину полотна однакові, можна прийняти припущення, що дотична до осьової лінії нитки у точці переплетення B розташовується під кутом $\gamma = 45^\circ$ до лінії, паралельній вісі OY (рис. 5 та 6).

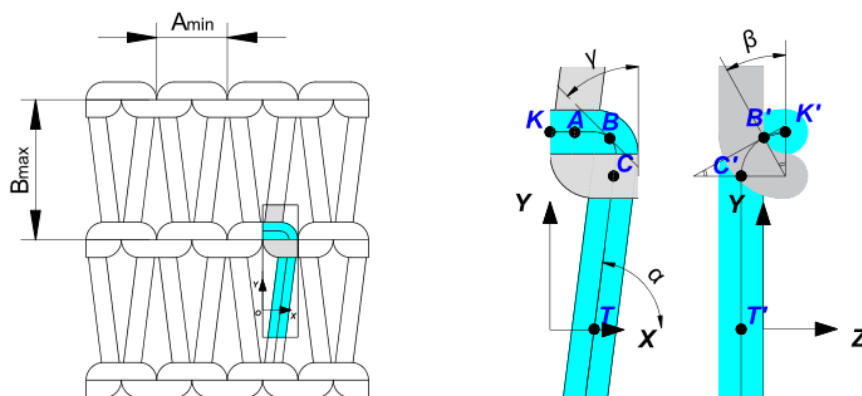


Рис. 5. Розташування характерних точок осрової лінії нитки петлі, максимально розтягнутої вздовж петельного стовпчика

Кут нахилу палички остову петлі α може бути розраховано за формулою (5):

$$\alpha = \arctg\left(\frac{B}{D_y}\right) \quad (5)$$

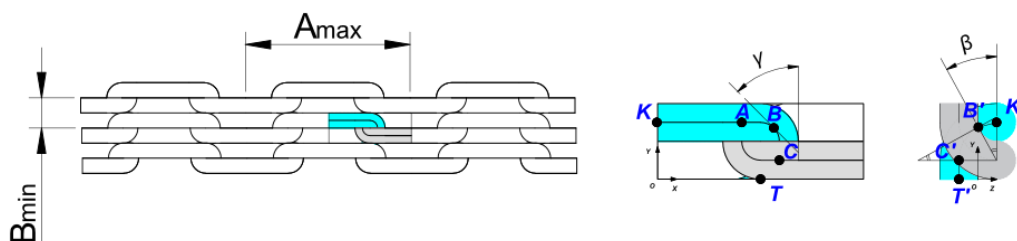


Рис. 6. Розташування характерних точок осрової лінії нитки петлі, максимально розтягнутої вздовж петельного ряду

У системі координат, розташованій так як показано на рис. 5, координати точок К (X_k, Y_k, Z_k), А (X_a, Y_a, Z_a), В (X_b, Y_b, Z_b), С (X_c, Y_c, Z_c), Т (X_t, Y_t, Z_t) можуть бути розраховані з урахуванням прийнятих припущень про симетричну форму петлі та відомі характеристики структури А, В, D_y , М. У таблиці 1 наведено математичні вирази для визначення координат характерних точок петлі в обраній системі координат.

Таблиця 1.

Математичні вирази для визначення координат характерних точок у системі координат петлі

Точка	Абсциса	Ордината	Апліката
К	$X_k = 0$	$Y_k = \frac{B + D_y}{2}$	$Z_k = \frac{D_y}{2}$
А	$X_a = \frac{A}{4} - \frac{D_y}{2} \left(1 + \frac{1}{\tan \alpha}\right)$	$Y_a = \frac{B + D_y}{2}$	$Z_a = \frac{D_y}{2}$
В	$X_b = \frac{A}{4} + \frac{D_y}{2} \cos \gamma$	$Y_b = \frac{B}{2} + \frac{D_y}{2} \sin \gamma$	$Z_b = 0$
С	$X_c = \frac{A}{4} + \frac{D_y}{2} \left(1 - \frac{1}{\tan \alpha}\right)$	$Y_c = \frac{B - D_y}{2}$	$Z_c = -\frac{D_y}{2}$
Т	$X_t = \frac{A}{4}$	$Y_t = 0$	$Z_t = -\frac{D_y}{2}$

Напрямок дотичних до точок K' , B' та T' у проекції на площину YOZ можна визначити наступним чином: проекція дотичної у точці K' вироджена у точку, проекція дотичної до осьової лінії нитки у точці B' розташована під кутом β до напрямку осі OX, та його легко визначити по теоремі косинусів, адже всі сторони трикутника $K'B'Q$ нам відомі, а проекція дотичної у точці T' проходить паралельно осі OY.

Даний алгоритм розрахунку дозволяє визначити координати характерних точок петлі та напрямки дотичних у цих точках. Це забезпечує можливість побудови B-сплайну, що відтворює осьову лінію нитки у системах тривимірного моделювання трикотажу. Оскільки у системах скінченно-елементного моделювання механічні властивості призначаються окремим об'єктам проєктування, у мезо-моделях, призначених для моделювання деформацій, доцільно використовувати переріз нитки у стисненому стані на всіх ділянках петлі.

Одержані у ході дослідження формули закладено у окремий модуль програми Структура 3D, призначений для моделювання трикотажу головних кулірних переплетень при максимальному одновісному розтязі. Для розробки тривимірних моделей трикотажу з сировини підвищеної міцності та перевірки їх адекватності виготовлено зразки кулірного трикотажу переплетень гладь на плосков'язальному обладнанні 8 класу з парамідиальних і поліетиленових ниток лінійної густини 58,8х2 текс та 44х3 текс відповідно. Визначено параметри петельної структури зразків в умовно-рівноважному стані та при максимальному одновісному розтягненні вздовж лінії петельного стовпчика та ряду. Розтяг випробуваних зразків виконано на розривній машині KaoTieh KT-7010AZ. Максимально напружений стан зразків зафіксовано за допомогою мікроскопа Micro Capture Pro для подальшого визначення особливостей параметрів структури трикотажу. Слід відзначити, петлі трикотажу з поліетиленові нитки майже рівномірної структури, окрім того, що один петельний ряд незначно менше іншого. Це пов'язано з особливостями переробки нитки в трикотажне полотно на плосков'язальному обладнанні типу ПВРК. На відміну від петель з поліетиленових ниток, петлі з парамідиальних ниток у рівноважному стані в одному петельному стовпчику нахилені зигзагоподібно, тобто один ряд петель нахилено вправо, а інший – вліво. Це знову таки пов'язано з фізико-механічними характеристиками ниток та особливістю їх переробки у трикотажне полотно на плоскофанговій машині, а точніше зворотно-поступальним напрямком руху каретки. При моделюванні прототипів трикотажних полотен слід враховувати особливості вищевказаних ниток, щоб для подальшого моделювання якісних властивостей полотен мінімізувати відхилення показників.

Таблиця 2.

Параметри петельної структури зразків трикотажу

Параметри петельної структури зразків трикотажу переплетення гладь, визначені експериментальним шляхом						Довжина сплайну	Відхилення
вид сировини зразка та напрямок розтягу	A, мм	B, мм	Dy, мм	M, мм	l, мм	Лs, мм	%
високомолекулярна поліетиленова нитка 44х2 текс; розтяг вздовж петельних стовпчиків	1,58	2,78	0,32	0,75	7,95	8,0	0,6
високомолекулярна поліетиленова нитка 44х2 текс; розтяг вздовж петельних рядів	3,46	0,85		0,82		7,8	1,8
параарамідна нитка 58,8х2 текс; розтяг вздовж петельних стовпчиків	1,28	2,43	0,32	0,75	7,74	7,35	5,0
параарамідна нитка 58,8х2 текс; розтяг вздовж петельних рядів	3,2	1		0,82		7,41	4,2

На рис. 7 наведено тривимірну модель та фотографічне зображення зразка трикотажу переплетення гладь з високомолекулярних поліетиленових ниток при максимальному розтязі вздовж петельних стовпчиків (рис. 7а) та рядів (рис. 7б). Форма перерізу нитки у моделі подана як коло з діаметром, що дорівнює діаметру нитки у максимально стисненому стані (Dy). Це зменшує рівень візуальної відповідності моделі до зразка, але виправдане з точки зору відповідності фізичного об'єму матеріалу нитки, що сприймає розривальне навантаження у механічних розрахунках.

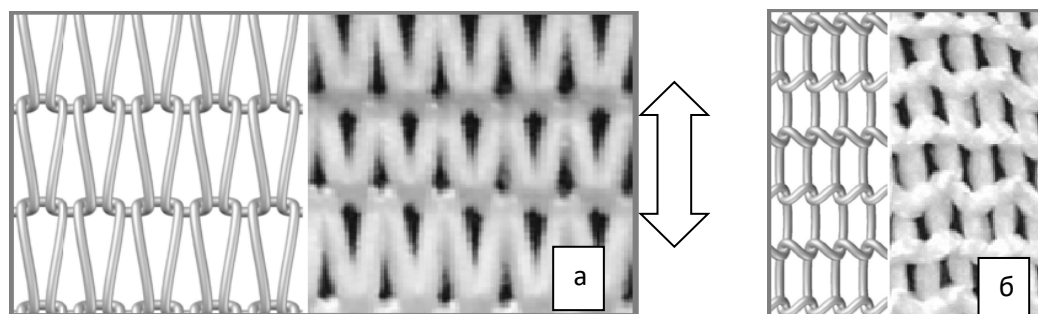


Рис. 7. Мезомодель та фото зразка трикотажу переплетення гладь з високомолекулярної поліетиленової нитки при максимальному розтязі вздовж петельних стовпчиків (а) та петельних рядів (б)

Слід зазначити, що для інших задач моделювання, таких як, наприклад, моделювання повітропроникності або світлопропускних властивостей трикотажу слід використовувати варіант побудови моделі з урахуванням зміни форми та розміру поперечного перерізу нитки вздовж осової лінії петлі. На рис. 8 наведено моделі з ідентичною геометрією осової лінії

нитки в петлі. Але у якості геометричного об'єкту, що використовується для формування перерізу нитки, у моделі, представленої на рис. 8а використано коло, діаметр якого відповідає діаметру нитки у максимально стиснутому стані (умовний діаметр нитки), а у моделі, представленої на рис. 8б використано різні геометричні об'єкти, такі як еліпс у точках К та Т, і коло у точці В.

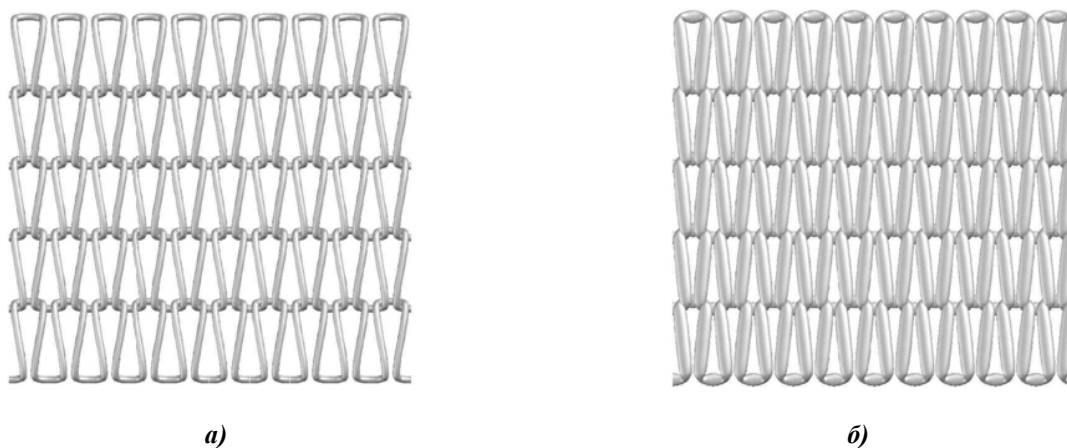


Рис. 8. Мезомодель зразка трикотажу переплетення гладь з високомолекулярної поліетиленової нитки, побудована з вибором незмінного діаметру поперечного перерізу нитки (а), та з урахуванням зміни форми та розміру перерізу у різних характерних точках петлі (б)

Під дією розтягуючих зусиль при навантаженнях, близьких до розривних, відбувається перерозподіл нитки у структурі трикотажу. Характер цього перерозподілу залежить від багатьох факторів, серед яких коефіцієнт тертя нитки, її жорсткість, пружність, розривне видовження, швидкість прикладання розтягуючого зусилля. У відповідності до прийнятих раніше припущень, при описі конфігурації нитки у структурі трикотажу ми відштовхувались від того, що петля гладі є не тільки симетричною відносно вертикальної осі, що проходить через вершину голкової дуги але й центральносиметричною відносно точки Т (середини петельної палички), а саме, платинна та голкова дуги є однаковими за формою та розмірами. Однак досить часто в реальних структурах перерозподіл нитки відбувається іншим чином (рис. 9).

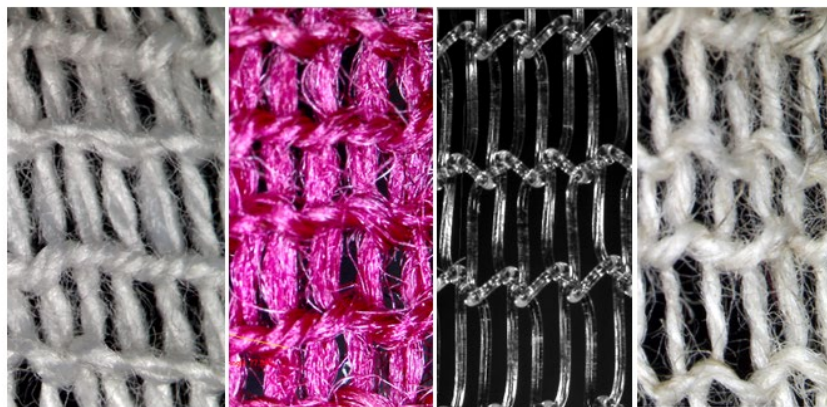


Рис. 9. Розтяг зразків трикотажу переплетення гладь по ширині при навантаженнях, близьких до розривних

З метою забезпечення можливості урахування у моделі відмінності ширини голкових та платинних дуг, у алгоритм введено коефіцієнт незбалансованості K_n , що являє собою відношення ширини остова у напруженому стані (Шо) до петельного кроку (A_{max}) трикотажу переплетення гладь. На рис. 10 наведено тривимірну модель та фотографічні зображення зразка трикотажу з параарамідної нитки, розтягнутого вздовж петельних стовпчиків (рис. 10а) та рядів (рис. 10б). Для побудови моделі, представленої на рис. 9б використано значення коефіцієнта незбалансованості структури $K_n=0,75$.

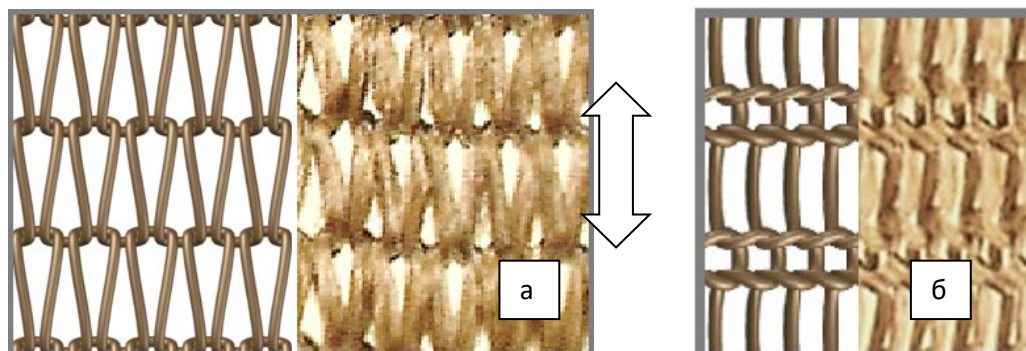


Рис. 10. Мезомодель та фото зразка трикотажу переплетення гладь з параарамідної нитки лінійної густини 58,8х2 текс при максимальному розтязі вздовж петельних стовпчиків (а) та петельних рядів (б)

Відхилення довжини сплайну, що представляє осьову лінію нитки, пров'язаної в петлю в тривимірній моделі від довжини нитки в петлі не перевищує 5%. Одержані тривимірні геометричні моделі структури трикотажу з високоміцних параарамідних та поліетиленових ниток можна вважати адекватними та рекомендувати їх для проведення віртуальних експериментів в комп'ютерних системах моделювання з визначення властивостей трикотажу.

Висновок: У ході дослідження розглянуто особливості моделювання деформацій кулірного трикотажу та запропоновано математичну модель трикотажу переплетення гладь у максимально напруженому стані внаслідок одновісного деформування у напрямку петельних рядів або петельних стовпчиків. У запропонованій моделі прийнято припущення, що у максимально напруженому стані напрямок дотичної до осової лінії нитки у точках переплетення дорівнює 45° , адже такі переплетення мають у своїй структурі однакові елементи, пров'язані з однієї нитки та підлягають однаковому стисканню, тому діаметри ниток, що огинаються, та тих, що їх огинають, є однакові. У роботі наведено математичний опис розрахунку координат характерних точок осової лінії нитки. Викладені положення реалізовано у програмному коді, написаному для автоматизації роботи зі створення 3D моделей кулірного трикотажу у середовищі AutoCAD на мові програмування AutoLisp.

Подяка. Робота виконувалась у рамках спільного українсько-литовського науково-дослідного проєкту «Трикотажні матеріали для засобів індивідуального захисту від механічних пошкоджень та дії полум'я (акронім - PERPROKNIT)» за підтримки Міністерства освіти і науки України та Наукової ради Литви.

Література

1. Кобляков А.И. Структура и механические свойства трикотажа. М.: Легкая индустрия, 1973. 240 с

References

1. Koblyakov, A.I. (1973). Struktura i mekhanicheskie svoystva trikotazha. [Structure and mechanical properties of knitwear] M.: Legkaya

2. Шалов И.И., Кудрявин Л.А. Основы проектирования трикотажного производства с элементами САПР: Учеб. для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. М.: Легпромбытиздат, 1989. 288 с.
3. Далидович А. С. Основы теории вязания. М.: Легкая индустрия. 1970г. 432с.
4. Leaf, G.A.V. (1958). A property of a buckled elastic rod //British Journal of Applied Physics.— Vol.9. - №2.- P.71-72.
5. Труевцев А.В. Прикладная механика трикотажа: учебное пособие. - СПб.: СПГУТД, 2001.
6. Щербakov В.П., Скуланова Н.С. Основы теории деформирования и прочности текстильных материалов. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2008. — 268 с.
7. Chen X (Eds). (2010). Modelling and predicting textile behavior. Woodhead Publishing Series in Textiles: No 94. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC. 536 p.
8. Lomov, S., Dufort, V., Luca, P.D., I. Verpoest (2007). Meso-macro integration of modeling of stiffness of textile composites. Proceedings of 28th International Conference of SAMPE Europe, Porte de Versailles Expo, Paris, pp. 4003-4008.
9. Loginov, A., Grishanov, S., Harwood, R. (2002). Modelling the load-extension behavior of plain-knitted fabric. Part I: A unit-cell approach towards knitted-fabric mechanics. Journal of the Textile Institute, Vol. 93 (Part 1, No. 3), - P. 218-238.
10. Abghary, M. J., Nadoushan, R.J., Hasani, H. (2016). Simulation of the Spherical Deformation of Biaxial Weft-Knitted Fabrics Using Meso and Macro Models Fibers and Polymers 17(10):1702-1708
11. Qi, Y., Jiang, Y., Xiang, H., Qaseem, S., Li, X., Wang, M. (2020) Macro-geometric method based modeling of the uniaxial tensile properties of tri-axial knitted fabrics, The Journal of The Textile Institute, 111:10, 1502-1510
12. Kaldor, J., James, D.L., Marshner, S. (2008). Simulating knitted cloth at the yarn level. Proceedings of SIGGRAPH, Los Angeles, California. Vol. 27, p. 65.
13. Poincloux, S., Mokhtar, A.-B., Lechenault, F. (2018). Geometry and elasticity of a knitted fabric, Physical Review X8(2) 021075.
14. Abghary, M.J., Hasani, H., Nedoushan, R.J. (2017). Geometrical modeling for bi-axial weft-knitted fabrics based on rib structures. Indian Journal of Fiber & Textile Research Vol. 42, pp. 431-43
- industriya. 240 p. [in Russian].
2. Shalov, I.I. & Kudryavin, L.A. (1989). Osnovy proektirovaniya trikotazhnogo proizvodstva s elementami SAPR [Basics of designing knitwear production with CAD elements]: Ucheb. dlya vuzov. - 2-e izd., pererab. i dop. M.: Legprombytizdat, 288 p. [in Russian].
3. Dalidovich A. S. (1970). Osnovy teorii vyazaniya [Knitting Theory Basics]. M.: Legkaya industriya. 432p. [in Russian].
4. Leaf, G.A.V. (1958). A property of a buckled elastic rod //British Journal of Applied Physics.— Vol.9. - №2.- P.71-72.
5. Truevtsev, A.V. (2001). Prikladnaya mekhanika trikotazha: uchebnoe posobie [Applied knitwear mechanics]. - SPb.: SPGUTD, [in Russian].
6. Shcherbakov, V.P. & Skulanova, N.S. (2008). Osnovy teorii deformirovaniya i prochnosti tekstil'nykh materialov [Fundamentals of the theory of deformation and strength of textile materials]. – M.: MGTU im. A.N. Kosygina,— 268 p.
7. Chen, X (Eds). (2010). Modelling and predicting textile behavior. Woodhead Publishing Series in Textiles: No 94. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC. 536 p.
8. Lomov, S., Dufort, V., Luca, P.D. & I. Verpoest (2007). Meso-macro integration of modeling of stiffness of textile composites. Proceedings of 28th International Conference of SAMPE Europe, Porte de Versailles Expo, Paris, pp. 4003-4008.
9. Loginov, A., Grishanov, S., Harwood, R. (2002). Modelling the load-extension behavior of plain-knitted fabric. Part I: A unit-cell approach towards knitted-fabric mechanics. Journal of the Textile Institute, Vol. 93 (Part 1, No. 3), - P. 218-238.
10. Abghary, M. J., Nadoushan, R.J., Hasani, H. (2016). Simulation of the Spherical Deformation of Biaxial Weft-Knitted Fabrics Using Meso and Macro Models Fibers and Polymers 17(10):1702-1708
11. Qi, Y., Jiang, Y., Xiang, H., Qaseem, S., Li, X., Wang, M. (2020) Macro-geometric method based modeling of the uniaxial tensile properties of tri-axial knitted fabrics, The Journal of The Textile Institute, 111:10, 1502-1510
12. Kaldor, J., James, D.L., Marshner, S. (2008). Simulating knitted cloth at the yarn level. Proceedings of SIGGRAPH, Los Angeles, California.
13. Poincloux, S., Mokhtar, A.-B., Lechenault, F. (2018). Geometry and elasticity of a knitted fabric, Physical Review X8(2) 021075.
14. Abghary, M.J., Hasani, H., Nedoushan, R.J. (2017). Geometrical modeling for bi-axial weft-knitted fabrics based on rib structures. Indian Journal

15. Liu, D., Christe, D., Shakibajahromi, B., Knittel, Ch. Castaneda, N. Breen, D. Dion, G. Kontsos, A., (2017). On the role of material architecture in the mechanical behavior of knitted textiles, *International Journal of Solids and Structures*, Volume 109, pp. 101-111
16. Weeger, O., Sakhaei, A.H., Tan, Y., Quek, Y.H., Lee, T.L., Yeung, S., Kaijima, S., & Dunn, M. (2018). Nonlinear Multi-Scale Modelling, Simulation and Validation of 3D Knitted Textiles. *Applied Composite Materials*, 25, 797-810.
17. Ausheva N., Halavska L., Yelina T. (2013) Geometric representation features of textile yarn in the 3D modeling systems. Scientific Conference [«Unitech-13»], (Gabrovo, Bulgaria, 22-23 November, 2013). Iss. 3. P. 199–202.
18. Bobrova S., Ielina T., Beskin N., Bezsmertna V. and Halavska L. The use of 3D geometric models in special purpose knitwear design and predicting of its properties. *Vlákna a textil* (Fibres and Textiles). 2018. Vol. 25. № 2. P. 19–26.
19. Єліна Т.В., Боброва С.Ю., Галавська Л.Є., Дзикович Т.А. Автоматизоване проектування текстилю: навч. посіб. Київ: Кафедра, 2017. 280 с.
20. А.с. 46469 Україна. Комп'ютерна програма «Структура – 3D». /Єліна. Т. В., Галавська Л.Є. – заявка №46726 від 25.09.2012, опубл. 23.11.2012.
21. Никитина О.В. Разработка метода прогнозирования механических свойств параарамидных нитей после воздействия светопогоды. Автореф. дис. к.т.н. спец-ть. 05.19.01 – Материаловедение производств текстильной и лёгкой промышленности. Москва, - 2012
22. Sreprateep K, Bohez E L J., (2006). Computer aided modelling of fibre assemblies, *Computer-Aided Design & Applications*. — № 3(1–4). – P. 367 – 376.
23. Кудрявин Л.А., Шалов И.И. Основы технологии трикотажного производства: Учеб. пособие для вузов. М.: Легпромбытиздат, 1991. 496 с.
- of Fiber & Textile Research Vol. 42, pp. 431-43
15. Liu, D., Christe, D., Shakibajahromi, B., Knittel, Ch. Castaneda, N. Breen, D. Dion, G. Kontsos, A., (2017). On the role of material architecture in the mechanical behavior of knitted textiles, *International Journal of Solids and Structures*, Volume 109, pp. 101-111
24. Weeger, O., Sakhaei, A.H., Tan, Y., Quek, Y.H., Lee, T.L., Yeung, S., Kaijima, S., & Dunn, M. (2018). Nonlinear Multi-Scale Modelling, Simulation and Validation of 3D Knitted Textiles. *Applied Composite Materials*, 25, 797-810.
16. Ausheva N., Halavska L., Yelina T. (2013) Geometric representation features of textile yarn in the 3D modeling systems. Scientific Conference [«Unitech-13»], (Gabrovo, Bulgaria, 22-23 November, 2013). Iss. 3. P. 199–202.
17. Bobrova S., Ielina T., Beskin N., Bezsmertna V. and Halavska L. The use of 3D geometric models in special purpose knitwear design and predicting of its properties. *Vlákna a textil* (Fibres and Textiles). 2018. Vol. 25. № 2. P. 19–26.
18. Yelina T.V., Bobrova S.Yu, Galavska L.Ye, Dzykovich T.A. , (2017). Avtomatyzovane proektuvannia tekstyliu [Automated textile design]: navch. posib. Kyiv: Kafedra. 280 p. [in Ukrainian].
19. A.s. 46469 Ukraine. Computer program "Structure - 3D". / Yelina. TV, Halavska L.Ye. - application №46726 dated 25.09.2012, publ. 11/23/2012
20. Nikitina O. V. (2012) Development of a method for predicting the mechanical properties of para-aramid filaments after exposure to light weather. Author's abstract. dis. Ph.D. special. 05.19.01 - Materials science of textile and light industry production. Moscow, RF
21. Sreprateep K, Bohez E L J., (2006). Computer aided modelling of fibre assemblies, *Computer-Aided Design & Applications*. — № 3(1–4). – P. 367 – 376.
22. Kudryavin L.A., Shalov I.I. Osnovy tekhnologii trikotazhnogo proizvodstva: Ucheb. posobie dlya vuzov. M.: Legprombytizdat, 1991. 496 s. [Fundamentals of knitting technology]. [in Russian].

HALAVSKA L. Ye.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6994-6641>

Scopus Author ID: 57191413261

Department of Textile Technology and Design,
Kyiv National University of Technologies and Design,
Ukraine

BEZSMERTNA V.I.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2247-6718>

MIKUCIONIENE D.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2219-2643>

Scopus Author ID: 11439797000

Faculty of Mechanical Engineering and Design,
Kaunas University of Technology, Lithuania

YELINA T. V.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9310-0582>

Scopus Author ID: 57203861122

Scopus Author ID: 57203866865
Department of Composite Materials,
Frantsevykh Institute for Problems of Material Sciences
of NAS of Ukraine,
Ukraine

Department of Textile Technology and Design,
Kyiv National University of Technologies and Design,
Ukraine

MILASIUŠ R.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1803-6795>
Scopus Author ID: 6603217403
Faculty of Mechanical Engineering and Design,
Kaunas University of Technology, Lithuania

**ОСОБЕННОСТИ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ТРИКОТАЖА
В МАКСИМАЛЬНО РАСТЯНУТОМ СОСТОЯНИИ**
**ЕЛИНА Т.В.¹, ГАЛАВСКАЯ Л.Е.¹, МИКУЧИОНЕНЕ Д.², МИЛАШИУС Р.²,
БЕЗСМЕРТНАЯ В.И.³**

¹Киевский национальный университет технологий и дизайна

²Каунасский технологический университет, Литва

³Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины

Цель. Целью данного исследования является разработка математического обеспечения для средств автоматизированного построения трехмерных геометрических моделей трикотажа, находящегося в максимально напряженном состоянии вследствие одноосного растяжения вдоль петельных столбиков или петельных рядов.

Методика. В процессе исследования использованы методы теоретического анализа, теория сплайнов, методы трехмерного геометрического моделирования и параметризации, средства компьютерной графики, средства программирования.

Результаты. В ходе работы принято предположение, что в максимально растянутом состоянии касательная к осевой линии петли в точке переплетения расположена под углом 45° к вертикальной линии, ориентированной вдоль петельного столбика. Предложены математические выражения для определения координат характерных точек петли в трехмерном пространстве. Разработан алгоритм и его программная реализация в качестве отдельного модуля программы Структура 3D, предназначенного для создания моделей трикотажа в растянутом состоянии.

Для верификации алгоритма на плосковязальном оборудовании 8 класса изготовлены образцы кулирного трикотажа переплетения гладь из параарамидных и высокомолекулярных полиэтиленовых нитей линейной плотности 58,8х2 текс и 44х3 текс соответственно. Определены параметры петельной структуры образцов в условно-равновесном состоянии и при максимальном одноосном растяжении вдоль линии петельного столбика и ряда. Растяжение образцов выполнено на машине KaoTieh KT-7010AZ. Максимально напряженное состояние образцов зафиксировано с помощью микроскопа Micro Capture Pro для дальнейшего определения особенностей изменения параметров структуры трикотажа под действием деформации растяжения. Полученные значения параметров петельной структуры образцов использованы в качестве исходных данных для построения трехмерных моделей. Отклонение значения длины сплайна, представляющий осевую линию нити в модели петли от длины нити в петле, полученного в ходе анализа образцов не превышает 5%.

Научная новизна. Разработан алгоритм автоматизированного построения трехмерных моделей трикотажа переплетения гладь, находящегося в состоянии максимального одноосного растяжения вдоль петельных столбиков или петельных рядов.

Практическая значимость. Создан отдельный модуль программы Структура 3D для автоматического построения петли трикотажа в напряженном состоянии под действием одноосного растяжения.

Ключевые слова: трикотаж, деформации растяжения, мезомодели, высокопрочные нити, трехмерное моделирование.

3D SIMULATION OF KNITTED STRUCTURE IN THE MAXIMUM STRETCHED STATE

YELINA T.V.¹, HALAVSKA L.YE¹, MIKUCIONIENE D.², MILASIUS R.²,
BEZSMERTNA V.I.³

¹ Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine,

² Kaunas University of Technology, Lithuania

³ Frantsevykh Institute for Problems of Material Sciences of NAS of Ukraine

Purpose. The study aims at the development mathematical basics for software for automated construction of three-dimensional geometric models of knitwear in the most stretched state due to uniaxial stretching along the wale or course direction.

Methodology. The research methods of theoretical analysis, spline theory, methods of three-dimensional geometric modeling and parameterization, computer graphics tools, programming tools were used.

Findings. During the research, it was assumed that in the maximally stretched state, the tangent to the centerline of the loop at the interlacing point is located at an angle of 45° to the vertical line oriented along the wale direction. Mathematical expressions are proposed for determining the co-ordinates of the characteristic points of the loop in three-dimensional space. An algorithm and its software implementation have been developed as a separate module of the Structure 3D program, designed to create models of knitwear in a stretched state.

To verify the algorithm, samples of weft knitted fabrics were made with a 8th gauge flat-bed knitting machine of para-aramid and high-molecular polyethylene threads of linear density 58.8x2 tex and 44x3 tex, respectively. The parameters of the loop structure of the samples in dry-relaxed state and under maximum uniaxial stretching along the wale and the course directions. Tensile testing of specimens was performed on the machine KaoTieh KT-7010AZ. The maximum stress state of the samples was recorded using a Micro Capture Pro microscope to further determine the changes of the loop structure parameters under the action of tensile deformation. The obtained values of the the loop structure parameters of the samples were used as input data for the construction of three-dimensional models. The deviation of the value of the length of the spline representing the centerline of the thread in the loop model from the length of the thread in the loop obtained during the analysis of the samples does not exceed 5%.

Scientific novelty. An algorithm for the automated construction of 3D models of knitted structures, undergoing maximum deformations coursed by uniaxial tension along the wales or course directions, has been developed.

Practical value. A separate module of the 3D Structure program has been created for the automated construction of a knitted loop undergoing maximal stretching under has been developed.

Keywords: knitwear, tensile deformations, meso-models, high-strength threads, 3D modeling.