

## Изпитване на кръглоплетен плат от гладка еднолицева плетка при двумерно многоциклово натоварване на опън в областта на малките опънови сили до гранично удължение: теоретична част

Даниела Софронова

**Абстракт:** В настоящия доклад обект на разглеждане е кръглоплетен плат от гладка еднолицева плетка, подложен на експериментално изследване при двумерно многоциклово натоварване на опън до гранично удължение. Изпитванията са проведени с кръстообразна форма на опитния образец при едновременно прилагане на сили на опън по бримков ред и бримков стълб, а снемането на хистерезисните криви е осъществено посредством многосензорна измервателна система. Дефинирани са основните параметри, които могат да бъдат извлечени от получените хистерезисни криви.

**Ключови думи:** изпитване, двумерно натоварване, малки опънови сили, гладка еднолицева плетка, гранично удължение

## Experimental Testing The Circular Knitted Fabric of Single Jersey by Biaxial Cycle Loading with Low Tensile Forces to Limit Extension: Theoretical Part

Daniela Sofronova

**Abstract:** In the present work a circular knitted fabric of single jersey is subjected, submitted to experimental study in two-dimensional cycle tensile load up to limit extension. Tests were carried out with a cruciform shape of the specimen while simultaneously applying tensile forces at the courses and the wales, as to capturing of hysteresis curves is accomplished via a multi-measuring system. The main parameters illustrating the mechanical behavior of structures in two-dimensional tensile load that can be derived from hysteresis curves are defined.

**Key words:** experimental testing, biaxial cycle loading, single jersey, limit extension

### Въведение

Кръглоплетените структури, получени от гладка еднолицева плетка, намират широко приложение при изработване на облекло: горно и долно, плетени аксесоари и чорапи. Много често при проектирането на плетените облекла като цяло се взимат данни, получени при експериментално изследване на механичното им поведение при едномерно полу- или едноциклово натоварване на опън и то при сили около  $10\text{ N}$ . Както е описано в [1], в процеса на експлоатация цялото или само част от плетивото се натоварва дву- и тримерно.

Въпреки, че за биаксиалното натоварване се говори още през 20-30-те години на миналия век [8], до днес все още стоят отворени въпроси, касаещи деформационното поведение на бримковите структури при такива натоварвания. Това от една страна се дължи на липсата на точно дефинирани условия за провеждане на подобни изпитвания, а от друга на сложното нелинейно и анизотропно поведение на плетивата. Първото е пряко свързано и с липсата на стандарти, описващи процедурите за осъществяване на подобни натоварвания за различни групи плетени изделия (за облекло, за медицинско и техническо предназначение). Ето защо, при изследване на формоустойчивостта, еластичността и разтегливостта на бримковите структури, е важно изпитванията да се провеждат при дву-

и/или тримерно многоциклово натоварване със сили, максимално близки до реално възникващите.

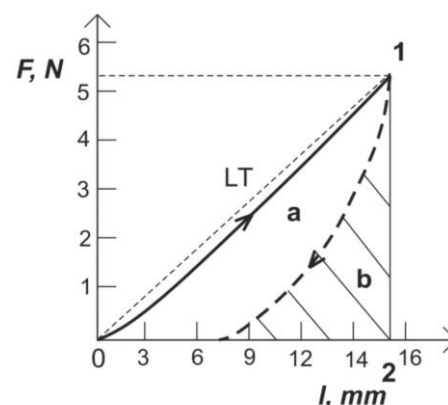
Целта на настоящия доклад е експериментално изследване на механичното поведение на кръглоплетен плат от гладка еднолицева плетка при двумерно многоциклово натоварване на опън до гранично удължение и определяне на основни параметри от получените хистерезисни криви. Работата е разделена на две отделни части, като тук ще бъдат теоретично описани параметрите, които могат да бъдат снемани от хистерезисните криви, а в [6] са поместени и анализирани подробно получените експериментални резултати.

### Теоретично описване на хистерезисните криви

Както е известно, за голяма част от текстилните площни материали, включително и плетените структури, е характерно, че при натоварване на опън и последващо разтоварване се наблюдава хистерезис. Хистерезисът е времево зависим, тъй като историята на протичащата деформация оказва влияние върху текущото вътрешно състояние на системата. Примерна хистерезисна крива е илюстрирана на фиг. 1.

Хистерезисът на площните текстилни материали е анализиран първо от Kawabata и колектив при огъване и срязване, а този при опън от сравнително малко учени, например Matsuo и Yamada [12]. Анализът на хистерезиса при натоварване на опън и последващо разтоварване е сериозен проблем в материалознанието въобще.

Познаването на механичното поведение на текстилните материали е изключително важно както в процесите на тяхното проектиране, така и при осъществяване на симулационно моделиране. Стремещът към последното се обяснява с навлизането на виртуалните игри, анимацията и желанието на потребителите за избор на възможно най-подходящ за тях модел облекло, без дори да е необходимо да се прави индивидуална проба. Стъпвайки върху съвременното развитие на компютърната техника по отношение на софтуерни продукти и повишаването на изчислителна мощност, в последните години се работи именно в следните направления: изграждане на компютърни 3D модели, 3D визуализиране на облеклото и симулации на драперията и пораждащите се напрежения и деформации. Но за тази цел трябва да се познава и да се изучи по-пълно механичното поведение на текстилните площни материали като цяло, и особено това на бримковите структури, за част от които е характерно, че губят своята формоустойчивост в течение на времето (цикли пране, сушене, носене) или пък причиняват налягане върху човешкото тяло по-голямо от допустимото, което пък е пряко свързано с комфорта и здравето на човека. Последното важи особено за чорапите в областта на ластика. Следователно при проектирането на облеклото въобще трябва да бъдат задоволени в максимална степен и двете изисквания: висока формоустойчивост и комфорт при носене.



Фиг. 1 Хистерезисна крива, характерна за плетените структури

### Параметри на хистерезисните криви

Основните параметри, които могат да бъдат изведени от хистерезисните криви и даващи представа за механичното поведение на бримковите структури при двумерно натоварване на опън, са:

- **Коефициент на пластичност по ред и стълб** - свързва се с промяната на размерите на опитните образци спрямо началните и дава информация за настъпилите остатъчни деформации по време на изпитването, т.е. при осъществяване на циклите натоварване-разтоварване.

$$\Pi_{\text{р.ст.}} = \frac{L_{\text{кр}} - L_{\text{н}}}{L_{\text{н}}} \quad (1)$$

Където:  $L_{\text{н}}$  е първоначалният размер на пробата, *mm*;

$L_{\text{кр}}$  – крайният размер на пробата, като  $L_{\text{кр}} = L_{\text{н}} + \Delta$ , *mm*;

$\Delta$  - абсолютното удължение след даден цикъл натоварване, *mm*.

Този параметър, въведен от Гиндев и Петров [7] през 1992 г. и наречен «*коефициент на условно-остатъчна деформация*», играе важна роля при конструирането на плетени облекла с различна степен на прилягане и би могъл да бъде получен директно от хистерезисните криви по ред и стълб, за разлика от едномерните изпитвания. Авторите са дали примерни стойности на коефициента като плетените структури са разделени в три основни групи: слабо-, средно- и силно деформируеми и неговите стойности варират от **0,02 ÷ 0,06**. Освен това, когато този параметър е определен от графики, получени при условия, близки до експлоатационните, се очаква да се получи основна конструкция, съобразена и отговаряща на реалното механично поведение на плетените облекла.

- **Загуба на сила** - загубата на сила дава информация за спада на силата на опън след първия цикъл при натоварване до гранично удължение.

$$F_{\text{рст.5}} = \frac{F_1 - F_5}{F_1} \quad (2)$$

Където:  $F_1$  и  $F_5$  са силите на натоварване до достигане на зададено удължение съответно след първия и примерно петия цикъл, *N*.

- **Хистерезисен коефициент** – чрез него се дефинира широчината на хистерезиса и по-точно показва какво е отношението на регистрираните сили в процеса на натоварване и разтоварване при точно зададено удължение.

$$H_5 = \frac{F_{\text{нат.5}}}{F_{\text{разт.5}}} \quad (3)$$

Където:  $F_{\text{нат.5}}$  и  $F_{\text{разт.5}}$  са опъновите сили съответно при натоварване и разтоварване в петия цикъл, *N*.

- **Работа *A* или енергия при натоварване до фиксирано удължение или сила** - площта под кривата при натоварване дава информация за извършената работа или енергия, която е необходима за достигане на зададено условие (сила или удължение). Колкото по-голяма е тя, толкова по-голямо количество енергия се използва за достигане на граничното удължение, т.е. структурата е по-малко разтеглива или е с по-голяма коравина, и обратно.

$$E_{оп} = \text{Площ}_a + \text{Площ}_b \quad (4)$$

$$A = \int_0^{l_1} f(l) \cdot dl \quad (5)$$

Където:  $A$  е извършената работа;

$l$  - абсолютно удължение;

$l_1$  – максимално достигнато или зададено абсолютно удължение;

Колкото площта е по-голяма при достигане до гранична сила, толкова структурата е с по-голяма разтегливост.

- **Работа или енергия при разтоварване** - аналогично на работа при натоварване, енергията при процеса разтоварване показва способността на изследваната структура да се възвърне в първоначално положение или загубата на вложената енергия.

$$A' = - \int_{l_1}^0 f'(l) \cdot dl \quad (6)$$

- **Линейност на кривата  $LT$**  - линейността на кривата е параметър, свързан с отклонението на получената крива при натоварване от права линия, която от своя страна е характерна при протичане на линейна деформация (например при натоварване на пружина). От означенията, илюстрирани на фиг. 1,  $LT$  би могло да се дефинира чрез следната зависимост:

$$LT = \frac{A}{A_{0\epsilon_1 f(\epsilon_1)}} \quad (7)$$

$$A_{0\epsilon_1 f(\epsilon_1)} = \frac{f(\epsilon_1) \cdot \epsilon_1}{2} \quad (8)$$

Тези уравнения показват още, че максималното удължение е правопрпорционално на енергията при натоварване и обратнопропорционално на линейността, т.е. колкото удължението е по-малко при еднаква сила, толкова  $LT$  е по-висока и следователно структурата е по-стабилна и се характеризира с по-голяма възвръщаемост при разтоварване. В този случай не са достигнати пластичните деформации и тя запазва своята форма и геометрични размери.

- **Степен на възстановяване след опън  $RT$  или динамична работа на възстановяване  $A_e$**  - степента на възстановяване показва относителното количество енергия, останало в изследваната структура при процесите натоварване-разтоварване или способността на площния текстилен материал да възвърне или доближи в максимална степен до първоначалното си състояние след прилагане на сили на опън.

$$RT = \frac{A'}{A} \cdot 100, \% \quad (9)$$

$$A_e = \frac{A'}{A} \cdot 100, \% \quad (10)$$

Колкото  $RT$  е с по-висока стойност, толкова структурата е по-стабилна и след разтоварване тя се възвръща до първоначалната си форма и размери. Или колкото е по-малка разликата в площите под хистерезисната крива при процесите на натоварване и разтоварване, толкова степента на възстановяване е по-голяма.

- **Коефициент на съотношение на силите по ред и стълб за съответния цикъл** - за отразяване на анизотропното поведение на бримковите структури би могло да се въведе коефициент, даващ отношението на достигнатите максимални сили по ред и стълб при осъществяване на двумерно натоварване до гранично удължение по ред и стълб, и би могъл да се изчисли за всеки проведен цикъл.

$$K_F^1 = \frac{F_{\text{max,стълб}}^1}{F_{\text{max,ред}}^1} \quad (11)$$

Във формула (11) е показано изчисляването на коефициента за 1-ви цикъл.

- **Коефициент на съотношение на абсолютните удължения по ред и стълб за съответния цикъл** - подобно на горния коефициент, може да се въведе и коефициент на съотношение на удълженията (относителни или абсолютни) по ред и стълб при двумерно натоварване до гранична сила.

$$K_L^1 = \frac{L_{\text{ред},1}}{L_{\text{стълб},1}} \quad (12)$$

Примерно изчисляване на този коефициент за 1-ви цикъл е илюстриран чрез формула (12).

- **Корелационни функции, описващи отделните цикли** – при осъществяване на двумерно многоциклово натоварване до гранично удължение е важно да се проследи как се променя съотношението на силите по бримков ред и бримков стълб за всеки цикъл. Тези функции биха могли да бъдат използвани в случаите, когато е необходимо да се получат силите по двете направления, но се знае изменението само на едната група сили.

#### **Метод за теоретично описване на зависимостта напрежение-деформация**

В литературата най-широко приложим метод за теоретично описване на хистерезисните криви е „методът на линеаризирането“ (“linearizing method”), въведен от Kawabata още през 1980 год., но тогава не е направено достатъчно проучване на неговата валидност [10]. В своята същност този метод е заимстван от линейната теория на еластичността и може да се прилага за почти всички видове текстилни изделия, които се характеризират със

нелинейност и анизотропност. Връзката напрежение-деформация се линеаризира първо чрез използване на трансформирана или преобразувана деформация като например:

$$e_i = \epsilon_i^n \quad (14)$$

Където:  $e_i$  е преобразуваната деформацията като  $i = 1,2$ ;

$\epsilon_i$  – деформацията;

$n$  – константа;

След това напрежението лесно се изразява посредством линейно уравнение с  $e_i$ . Този метод е проверен от други автори [16], които установяват, че той има значителен капацитет за предсказване или описване на двумерното деформационно поведение на текстилните материали и то със задоволителна точност, но не и при плетива с различни видове плетки, характеризирани се с различни механично поведение.

За подобряване на точността на метода е възможно в някои случаи да се извършва линеаризиране на връзката напрежение-деформация в две или повече зони от деформацията, или с други думи казано, линеаризирането да се извършва на стъпки.

### Заклучение

В заключение може да се обобщи, че в настоящия доклад са изяснени и теоретично формулирани основните параметри, които могат да бъдат определени от хистерезисните криви. Всеки един от тях би могъл да бъде използван при проектирането и симулационното изследване на различни видове плетени структури. Разгледан е също методът на линеаризирането на Kawabata, който е прилаган често от различни автори и ще бъде по-подробно анализиран и проверен в бъдещата работа на автора.

### Литература

1. Софронова, Д., Създаване на нова методика за изпитване на плетени платове при двумерно и пасивно тримерно натоварване на опъване, *Сборник доклади от XIII-та Общотекстилна конференция' 2014 „Иновации в текстила и облеклото“*, 2014, с. 207-222.
2. Софронова, Д., Софронов, Я., Гендов, Хр., Стоилов, Т., Разработване на нов метод за изпитване на плетени платове на двумерно и пасивно тримерно многоциклово натоварване с малки опънови сили, *Сборник доклади от XIII-та Общотекстилна конференция'2014 Иновации в текстила и облеклото*, 2014, с. 194-206.
3. Софронова, Д., Софронов, Я., Гендов, Хр., Разработване на софтуер за управление на двигателите и сензорната система на стенд за двумерно многоциклово натоварване, *Сборник доклади от XIX-та Научна конференция с международно участие ЕМФ' 2014*, 2014, с.193-202.
4. Софронова, Д., Разработване на методика и устройство за изследване на анизотропното поведение на бримкови структури, Дисертация за получаване на ОНС «доктор», 2015.
5. Софронова, Д., Изпитване на кръглоплетен плат от гладка еднолицева плетка при двумерно многоциклово натоварване на опън в областта на малките опънови сили до гранична сила, *Сборник доклади от XX-та Научна конференция с международно участие ЕМФ' 2015*, 2015, предадена за печат.
6. Софронова, Д., Изпитване на кръглоплетен плат от гладка еднолицева плетка при двумерно многоциклово натоварване на опън в областта на малките опънови сили до гранично удължение: експериментални резултати, , *Сборник доклади от XX-та Научна конференция с международно участие ЕМФ' 2015*, 2015, предадена за печат.

7. Гиндев, Г., Х. Петров, Моделиране и конструиране на облеклото, Техника, София, 1992.
8. Apparatus and method for biaxial tensile testing of membrane materials, Patent US 6487902 B1.
9. Escarpita, D., D. Cardenas, H. Elizalde et al., Biaxial Tensile Strength Characterization of Textile Composite Materials, Book „Composites and Their Properties“, Chapter 5, ISBN 978-953-51-0711-8, 2012.
10. Kageyama, M., S. Kawabata, M. Niwa, The Validity of a “Linearizing Method” for Predicting the Biaxial-extension Properties of Fabrics, The Journal of The Textile Institute, Vol. 79, 1988, pp. 543-567.
11. Lecompte, D., A. Smits, H. Sol, J. Vantomme, D. Van Hemerijck, Mixed numerical–experimental technique for orthotropic parameter identification using biaxial tensile tests on cruciform specimens, International Journal of Solids and Structures, Vol. 44, 2007, p. 1643-1565.
12. Lomov, S., Ph. Boisse, E. Deluucker, et al., Full-field strain measurement in textile deformability studies, Composite, Part A, Vol. 39, 2008, p. 1232-1244.
13. Matsuo, M., Yamada, T., Hysteresis of Tensile load – Strain Route of Knitted Fabrics under Extension and Recovery Processes Estimated by Strain History, *Textile Research Journal*, Vol. 79, 2009, pp. 275-284.
14. Smits, A., D. Van Hemerijck, T. Philippidis, A. Cardon, Design of a cruciform specimen for biaxial testing of fibre reinforced composite laminates, Composite Science and Technology, Vol. 66, 2006, p. 964-975.
15. Varadaraju, R., J. Srinivasan, Prediction of Certain Low Stress Mechanical Properties of Knitted Fabrics from Their Structural Parameters, Journal of Engineered Fibers and Fabrics, Vol. 10, p. 11, 2015.
16. Yamada, T., N. Ito, M. Matsuo, Mechanical Properties of Knitted Fabrics Under Uniaxial and Strip Biaxial Extension as Estimated by a Linearizing Method, *Textile Research Journal*, Vol. 73, 2003, pp. 985-997.
17. Zouani, A., Bui-Quoc, T., Bernard, M., 1996. A proposed device for biaxial tensile fatigue testing. Fatigue and Fracture, ASME PVP-323, vol. 1, pp. 331–339.

ас. д-р Даниела Софронова, Технически университет – София, катедра „Текстилна техника“, бул. „Климент Охридски“ 8, каб. 4247, тел.: 02 965 39 21,  
E-mail: [dcholeva@tu-sofia.bg](mailto:dcholeva@tu-sofia.bg)