



**МЕТОД ЗА КОМПЮТЪРНО МОДЕЛИРАНЕ НА
ПОВЕДЕНИЕТО
НА ХАВЛИЕНИ ТЪКАНИ ПРИ КОМПРЕСИЯ**
*доц. д-р инж. Николай Николов, доц. д-р инж. Диана Германова-
Кръстева*

**METHOD FOR COMPUTER MODELLING
OF TERRY FABRICS' COMPRESSION**
Nikolay Nikolov, Diana Germanova-Krasteva

***ABSTRACT:** A method for modelling of terry fabrics behaviour by compression is developed. It includes an approach and an algorithm for geometric and deformation modelling. A lot of experimental and simulation data are presented and discussed, as well as specific moments from the modelling process. A comparison and an analysis of the results obtained are carried out.*

***Key words:** terry fabrics, geometric model, simulation modelling, finite element method, softness*

Въведение

Един от основните качествени показатели на хавлиените тъкани е техният опип. Изследване, проведено от Cotton Incorporated Lifestyle Monitor, показва, че при закупуването на хавлиени изделия двата най-важни показателя при избор на кърпи за баня са мекотата – с 83% и сорбционната способност – с 82% (www.cottoninc.com).

Мекотата на една тъкан се оценява чрез степента ѝ на компресия при натиск, имитирайки потъването на пръстите в нея. От своя страна, поведението на тъканта при компресия може да бъде изследвано както апаратно с помощта на дебеломери или динамометри със специални клеми, така и чрез компютърна симулация.

За симулационно моделиране на поведението на хавлиената тъкан е необходимо създаването на достатъчно точен геометричен модел на



тъканта, както и правилно определяне и задаване на началните условия: материални константи, контакти между елементите, гранични условия, начин на замрежване и т.н.

Първите опити на авторите в областта на геометричното моделиране на хавлиени тъкани и симулирането на тяхното деформационно поведение при компресия вече са представени в (Николов, Германова-Кръстева, Канджикова, 2011, Nikolov et al, 2012). Това са и първите публикувани модели на тъкани с примкова структура.

В последните години по подобни теми работят Singh и Behera от катедра „Текстилни технологии“ на Индийския технологичен институт в Делхи. За съжаление те представят своите резултати единствено на конференции и пълният текст на докладите не е достъпен в интернет (Singh, Behera, 2010, 2012, 2013).

Цел

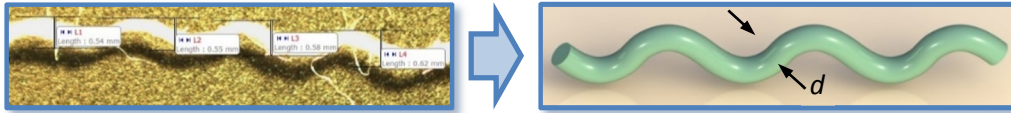
Целта на настоящото изследване е разработването на метод за компютърно моделиране на поведението на хавлиени тъкани при компресия, включващ подход и алгоритъм за геометрично и симулационно моделиране.

I. Геометрично моделиране

Геометричният модел се базира на предходните изследвания на авторите, но е усъвършенстван, като:

- са използвани сплайн-линии и за базовите нишки (в първоначалните варианти те се прилагат само за примковите нишки);
- са въведени допълни релации, позволяващи автоматична промяна на някои размери при изменение на други.

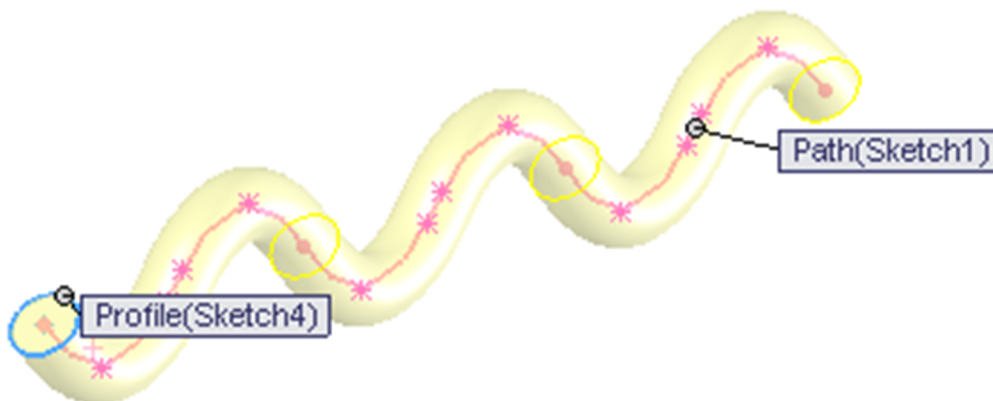
Привеждането на реалната нишка към плътен цилиндър с криволинейна ос и кръгло напречно сечение (Фиг.1) е идеализация, необходима за облекчаване на компютърното моделиране. В същото време, чрез промяна на условия диаметър и модула на еластичност на нишката могат да се моделират обемната плътност и промяната в коравината ѝ, съотв. да се влияе на поведението на тъканта при компресия. Затова правилното определяне на условните диаметри на нишките е от съществено значение за успешното моделиране на тъканите както в геометричен, така и в якостно-деформационен аспект. То се



Фиг.1 Привеждане на реалната нишка към плътен цилиндър с криволинейна ос и условен диаметър

извършва както чрез преизчисляване от линейната плътност, така и чрез експериментално измерване.

Оформянето на профила на нишките е една от най-сложните задачи при геометричното моделиране. В CAD-системата нишката се моделира чрез транслация (екструдирание) на напречното сечение (кръг) по криволинейна ос (Фиг.2). Задачата по създаване на геометричен модел на нишката се свежда основно до изчертаването на нейната ос, която е сложна пространствена крива.



Фиг.2 Получаване на триизмерна нишка от сечение (профил) и ос (път)

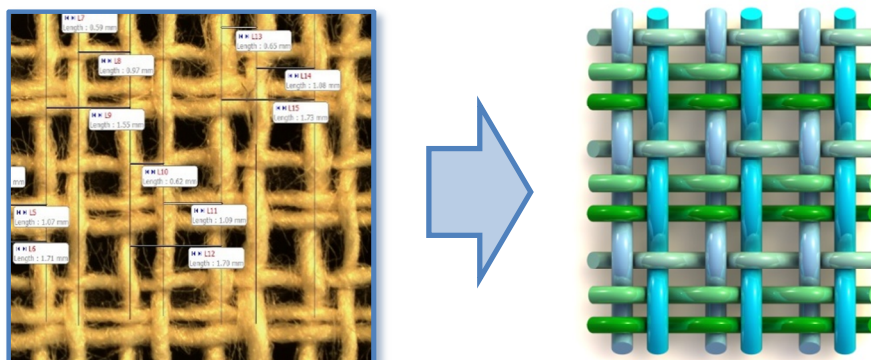
Създаването на геометричен модел включва две фази, всяка от които има специфични проблеми:

I Фаза: Геометрично моделиране на базовите нишки (основни и вътъчни);

II Фаза: Геометрично моделиране на примковите нишки.

Геометрично моделиране на базовите нишки

При геометричното моделиране на основата нишките (в случая две основни и три вътъчни) се сглобяват в повтор, като се позиционират на предварително измерени междуосеви разстояния в три взаимно перпендикулярни направления (Фиг.3).



Фиг.3 Геометрично моделиране на основата

След сглобяване обемите на нишките не бива да се пресичат помежду си, за да се дефинират коректно контактите между повърхностите при моделиране на деформационното им поведение.

Моделирането на всяка базова нишка протича в следната последователност:

1. Създава се двуизмерна скица на нейната ос (Фиг.4).

1.1. Нанасят се различни репери – оси, ограничаващи повтора и указващи положението на характерни равнини и съседни нишки.

1.2. Добавят се сеченията на нишките, които преминават през повтора в напречно направление. Тук могат да възникнат някои затруднения, тъй като много от нишките преминават през равнината на чертежа под ъгъл, при което сечението е елипса, чиито размери и положение на този начален етап не могат да се установят с голяма точност.

1.3. Построява се оста на нишката, която преминава покрай сеченията на напречните нишки на разстояние, равно на условния радиус на нишката.

При построяване на оста на нишката се моделира също формата ѝ между контактите и реперите. Тук изследователят има известна свобода, стига да се ръководи от две ограничения:

1) Дължината на нишката в повтора трябва да се получи равна на измерената.

2) Формата на моделираната ос трябва се доближава максимално до действителността. За целта нишката трябва внимателно да се изнищи от тъканта и при подходящо увеличение с помощта на микроскоп да се заснемат и измерят размерите ѝ (Фиг.1).

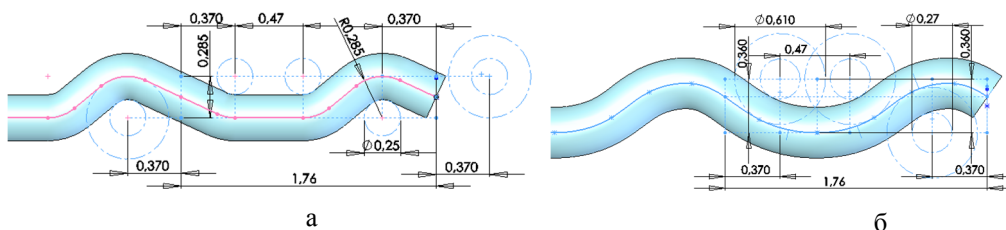
При създаването на двумерната скица на оста са възможни две техники:

1) Оста се получава като съвкупност от дъги и прави линии (Фиг.4а). Предполага се, че: нишката частично се огъва около контактуващата с нея напречна нишка, при което се получава дъга; нишката е опъната между две последователни зони на контакт, при което се получава права линия. Тази техника е използвана при предходните изследвания. Тя има два недостатъка:

- получената нишка има неестествена, неплавна форма;
- получаването на действителното вработване може да се осъществи само за сметка на корекция на междуосевите разстояния (правите линии не могат да променят дължината си).

2) Оста се получава като сплайн крива, съдържаща възли в местата с репери и контакти (Фиг.4б). Тази техника има редица предимства и е за предпочитане, защото:

- получават се плавни и естествени извивки;
- нагъването на нишката в повтора може плавно да се регулира, като от една страна се доближава до действителното, а от друга – може много



Фиг.4 Техники за геометрично моделиране на основни нишки

точно да се получи измереното вработване, без да се коригират междуосевите разстояния;

- оста на нишката в рамките на повтора се моделира само с една линия, която при тримерното екструдирание генерира една околна повърхнина. Това подобрява процеса на замрежване с крайни елементи.

1.4. Начертаната за един повтор ос се копира няколкократно, за да се получи желният брой повтори. Например, показаната на Фиг.3 структура съдържа 3×3 повтора;

2. Изчертава се напречното сечение – кръг с диаметър, равен на условия диаметър на нишката, върху равнина, перпендикулярна и минаваща през края на нишката.

3. Екстудира се напречното сечение по направление на оста, при което се получава триизмерното тяло на нишката (Фиг.2).

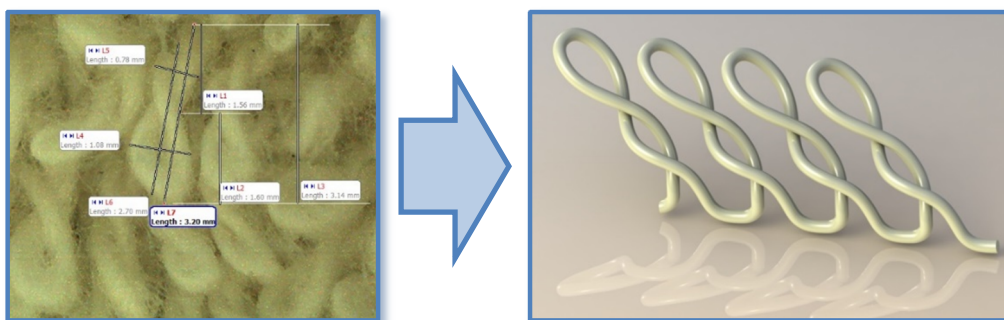
Създаденият по този начин модел на нишка има приблизителна форма, защото не е отчетено, че:

1) Контактите между нишките много често не са в равнината, в която се строи двуизмерната ос. Сглобяването на нишките, построени по описаната дотук технология води до колизии;

2) В повечето случаи оста на базовите нишки не е дву-, а е триизмерна. Нагъването по третото направление обаче е желателно да се пренебрегне, защото:

- в общия случай е много по-малко от нагъването по другите две направления;
- значително усложнява процеса на геометрично моделиране.

4. Сглобяват се всички нишки в основата, като се спазват измерените междуосеви разстояния по трите направления – Фиг.3.



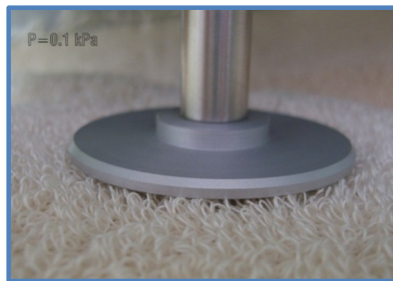
Фиг.5 Представителна форма и ориентация на примкова нишка

5. Прави се проверка за колизии. При наличие на такива, се анализират причините за взаимно проникване на нишките и се правят корекции в скиците на техните оси.

Геометрично моделиране на примковите нишки

При моделиране на примковите нишки трябва да се уточнят и някои допълнителни моменти:

1) Избор на представителна форма и ориентация на примките (Фиг.5). Причината е, че в следствие на заключителните обработки отделните примки много силно се различават помежду си както като форма, така и по разположение в пространството;



Фиг.6 Измерване на дебелината на хавлиена тъкан

2) Определяне на геометричните размери на примката. Водещи са два параметъра:

- *вработване* – може лесно и точно да се измери.
- *височина на примката в свободно състояние*. Варира в широки граници и не може да се измери точно. Затова с дигитален дебеломер се измерва дебелината на тъканта при много лек натиск от 0,1 kPa (Фиг.6), при което се получава представителна усреднена височина на примката. По-късно, след създаване на изчислителния модел, по обратен път се получава т.нар. „свободна“ височина, т.е. височина в ненатоварено състояние.

3) Контакти на примката. Освен с нишките от основата, примката може да влезе в контакт както със себе си, така и със съседните примки.

Геометричното моделиране на примковата нишка протича в следната последователност:

1. Създава се триизмерна скица на оста с базова равнина, в която да се разположи частта от повтора, който контактува с основата – Фиг.7а.

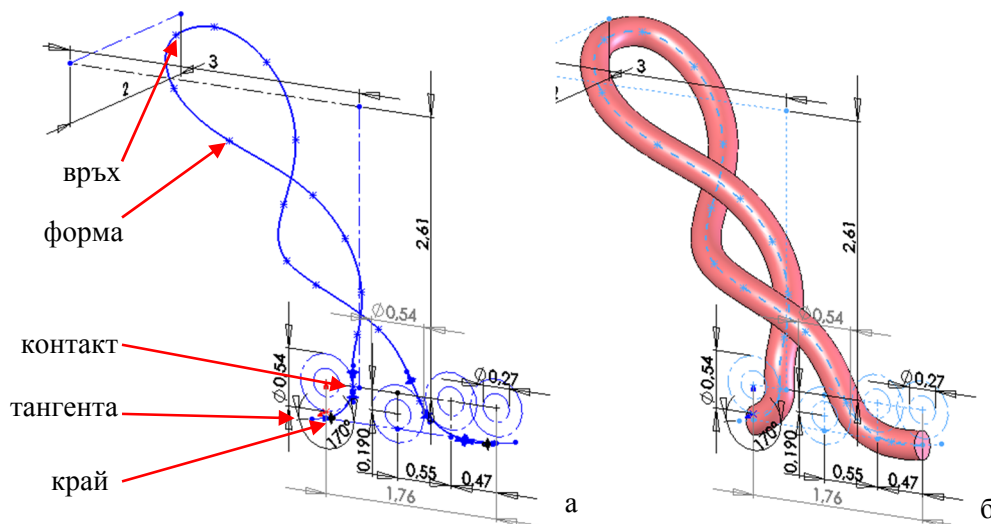
1.1. В базовата равнина се нанасят различните репери – оси, ограничаващи повтора и указващи положението на характерни равнини и съседни нишки.

1.2. Добавят се сеченията на нишките, които преминават през повтора в напречно направление. Възникват същите затруднения, каквито и при базовите нишки.

1.3. Добавя се точката, която условно маркира върха на примката. Нейните координати по трите направления зависят от направеното изследване за височината на примката в свободно състояние, както и от възприетото представително положение на примката в пространството.

1.4. Построява се оста на нишката като триизмерна сплайн-крива. Дефинират се три групи от възли, показани на Фиг.7а:

- *краищата на повтора и върха на примката.* Тангентите в двата края трябва да имат еднакво направление, за да се получи плавен преход към следващия повтор;
- *местата на предполагаем контакт* между примковата и вътъчните нишки. Оста преминава покрай сеченията на вътъчните нишки на разстояние, равно на условия радиус на примковата нишка. Тангентите към сплайна в тези възли трябва да са успоредни на тангентите към сеченията на вътъчните нишки;
- *възли, оформящи примката.* Техният брой и разположение зависи от формата на примката. При еднократно и многократно усукани примки често примката контактува със себе си в няколко зони. В този случай положението на някои от формообразуващите възли



Фиг.7 Скица и тяло на един повтор от примкова нишка

се избира така, че чрез тях да се контролират тези контакти и да се избегнат колизии.

В конкретния случай, за сполучливото геометрично построение на един повтор от примкова нишка с двойно усукана примка са използвани 19 възела. Получената примкова нишка е показана на Фиг.5 и Фиг.7б.

При моделиране формата на оста изследователят следва да спазва следните ограничения:

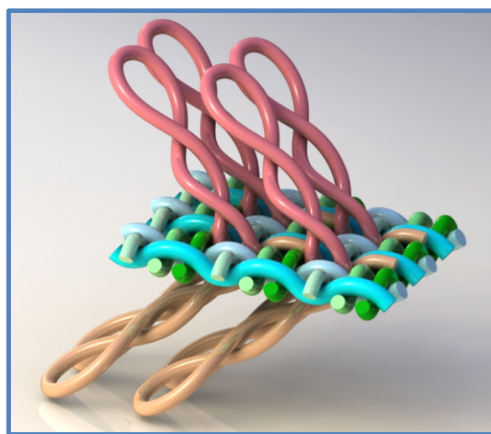
- 1) Дължината на нишката в повтора трябва да съответства на измерената;
- 2) Формата на оста не бива да поражда колизии;
- 3) Извивките трябва да са плавни и естествени, в противен случай се достига до геометрични дефекти при екструдирането (създаване на триизмерното тяло на нишката), а също и до нежелателни изкривявания на мрежата от крайни елементи, която се генерира при работа с изчислителния модел.

1.5. Начертаната за един повтор ос се копира няколкократно, за да се получи желаният брой повтори. Например, показаната на Фиг.5 нишка има четири повтора.

2. Изчертава се напречното сечение – кръг с диаметър, равен на условия диаметър на нишката, върху равнина, перпендикулярна и минаваща през края на оста.

3. Екстудира се напречното сечение по направление на оста, при което те получава триизмерното тяло на нишката.

4. Примковите нишки се сглобяват с готовата основа, като се спазват измерените междуосеви разстояния по трите взаимно перпендикулярни направления.



Фиг.8 Геометричен модел на хавлиена тъкан

5. Прави се проверка за колизии. Анализират се причините за взаимно проникване и се правят корекции в скицата на оста на примковата нишка.

На Фиг.8 е показан готовият геометричен модел, сглобен във вариант 3×3 повтора на основата и 2×2 повтора на примковите нишки (поставен е един повтор примкови нишки по-малко, за да се осигури по-добра видимост на основната структура).

II. Симуляционно моделиране

Симуляционното моделиране на деформационното поведение на тъканите с примкова структура е заключителния етап, който освен че има своите особености, в значителна степен е функция и от правилното изграждане на геометричния модел. Поради тази причина етапите в симуляционното моделиране са много, а връзката с геометричното моделиране и измерването на структурните и якостно-деформационните характеристики – непрекъсната.

В настоящото изследване първоначалният изчислителен модел е базиран на геометричния модел, показан на Фиг.8, към който са добавени две притискащи плочи, успоредни на основата – Фиг.9а.

Стъпките в изграждането на модела са обобщени по-долу.

1. Геометричният модел се експортира директно от CAD-системата SolidWorks® в САЕ-системата ANSYS® Workbench™.

2. Задават се началните условия

2.1. Материални свойства:

2.1.1. *Модул на Юнг*: за стоманата и за памучната прежда;

2.1.2. *Коефициент на Поасон*: за стоманата и за памучната прежда;

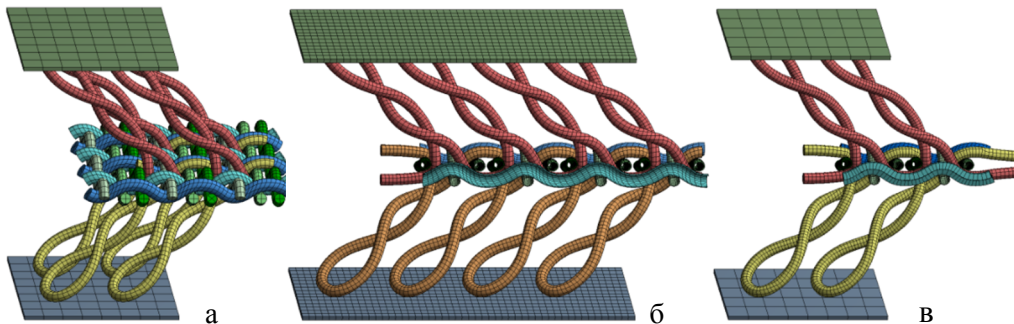
2.1.3. *Коефициенти на триене*: за памук/памук и за памук/стомана;

2.2. Дефиниране на връзките между отделните детайли. За модела от Фиг.9а са дефинирани общо 106 контакта, от които 8 са свързани с граничните условия (краищата на четирите примкови нишки), 4 са между примка и притискаща плоча, 4 дефинират контактите на всяка примкова нишка сама със себе си, а останалите 90 са между различните нишки.

3. Задават се граничните условия

3.1. Взаимодействие на основата с околната среда – въгъчните и базовите нишки се фиксират в краищата си.

3.2. Взаимодействие на примковите нишки с околната среда (Фиг.10). Във всеки край на нишките се добавя еластично удължение със специално подбран модул на еластичност, като единият му край се допира до



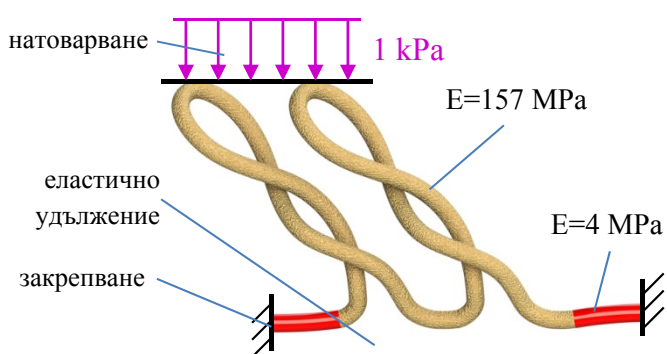
Фиг.9 Изчислителни модели с нанесена мрежа от крайни елементи

нишката, а другият е фиксиран в пространството. Това удължение представлява нишковиден елемент, който имитира деформационното поведение на съседен повтор. Еластичните удължения са показани на Фиг.9б и в, както и на Фиг.10.

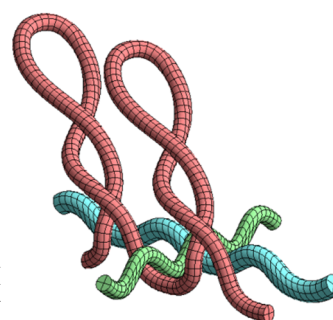
3.3. Взаимодействие на притискащите плочи с околната среда – на плочите се отнемат всички степени на свобода, с изключение на възможността да се преместват по направление, перпендикулярно на основата.

4. Замрежване

4.1. Задава се видът на крайните елементи (хексагонални), методът на замрежване, както и други настройки на замрежващия алгоритъм;



Фиг.10 Закрепване и натоварване на примкова нишка



Фиг.11 Замрежване на нишките



4.2. Задават се размерите на крайните елементи по детайли. За модела от Фиг.9а, средният повърхностен размер на крайните елементи е 0,12 mm за нишките и 0,5 mm – за притискащите плочи.

4.3. Замрежва се моделираната структура. Използваните в настоящето изследване модели са показани на Фиг.9.

На Фиг.11 в уголемен мащаб е представена мрежата на една вътъчна, една основна и една примкова нишка в сглобено състояние. За модела от Фиг.9а получената мрежа съдържа 6360 твърдотелни (solid) крайни елемента със 47990 възела, при което програмата автоматично генерира 162022 броя контактни елементи. За моделите от Фиг.9б и в са използвани по-гъсти мрежи. Поради по-малкият брой нишки и повтори обаче, при тези модели общият брой на крайните елементи не се увеличава.

В резултат на проведени изследвания е установено, че така описаната мрежа от крайни елементи има оптимална гъстота по отношение на точност на решението и необходимо изчислително време. Тя се характеризира със сравнително малък брой твърдотелни крайни елементи, равномерно разпределение на възлите по повърхността на нишките и минимално количество възли във вътрешността на нишките.

5. Задава се натоварването върху двете притискащи плочи – равномерно разпределено налягане от 1 kPa, показано на Фиг.10. Тъй като изчислителният алгоритъм прилага товара постепенно на стъпки, решението съдържа междинни резултати при налягания, по-малки от максималното. Това позволява лесно да се построи деформационна крива от симулационните резултати, която да се сравни с експериментално получената.

6. Настройва се солвърът (изчисляващият алгоритъм). За модела от Фиг.9а, решението протича на 27 стъпки, с общо 92 итерации, с минимален интервал между стъпките от 1/250 и максимален интервал от 1/15 от максималната стойност на товара. Слабите пружини са включени на автоматичен режим, а резултатите се записват на всяка итерация.

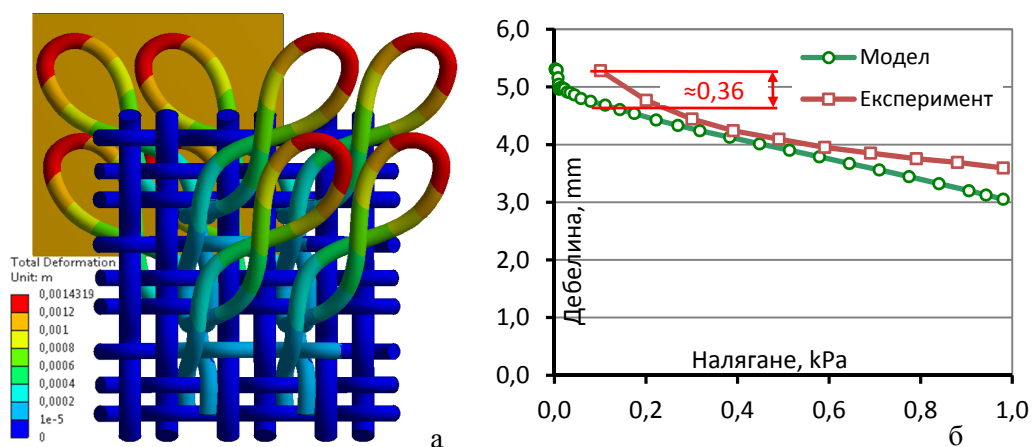
7. Решава се получената задача. При така описаните настройки, на компютър с 8 логически ядра и честота 4200 MHz, за модела от Фиг.9а решението отнема 5177 s.

8. Визуализация и анализ на резултатите от първоначалния модел

Резултатите от пресмятането с първоначалния модел са визуализирани по три начина:

1) Деформиране на модела (total deformation) във вид *изображение* – Фиг.12а. От тази фигура става ясно, че дори в максимално деформирано състояние, съседните редове примки не влизат в контакт един с друг. Причина за този недостатък е идеализираната форма на примките и отсъствието на завласеност в геометричния модел. Във всички случаи, при спазване на измереното вработване и избраните представителна форма и размери на примката, моделирането на повече от един ред примки е излишно. Затова в окончателния модел е използвана геометрия, съдържаща само един ред примкови нишки.

2) *Деформационна крива*, съдържаща стойности на дебелината на тъканта във функция на натоварването – Фиг. 12б. Тя е особено полезна, тъй като позволява директно сравняване с експериментално получена крива и оценка на точността на модела. При това тази оценка може да се прави поотделно за всеки момент от деформирането и да се търсят причините за евентуални разминавания.



Фиг.12 Представяне на резултатите от симулацията

3) *Видео*, показващо процеса на деформиране с увеличаване на натоварването. Това видео показва друга, сходна слабост на модела – плавните и гладки форми, както и контактите на нишките само в отделни точки, водят до минимално триене и позволяват твърде лесно преместване (плъзгане) на нишките една спрямо друга.

Както се вижда от Фиг. 12б, разликите между модел и експеримент на този първоначален етап не са големи. Основната необходима корекция,

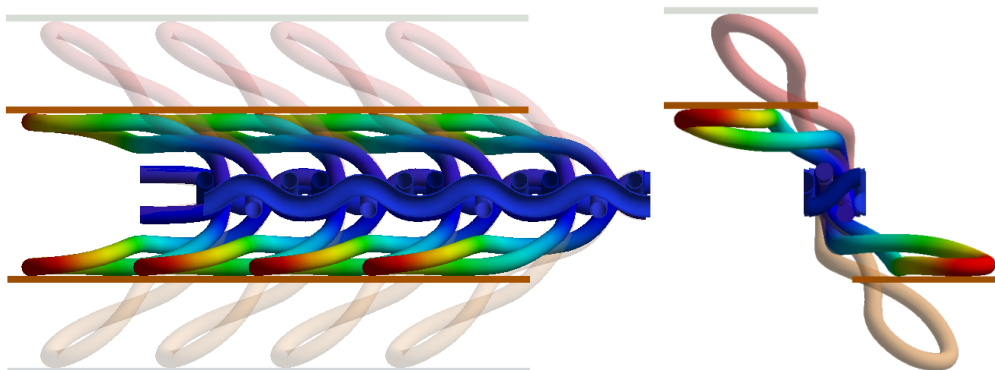
която следва да се направи, е на височината на примките в свободно състояние, която от тази крива лесно може да се установи.

9. Кorigира се първоначалният модел

9.1. *Геометричен модел.* В конкретния случай е необходима корекция в свободната височина на примката с +0,36 mm, видно от Фиг.12б.

9.2. *Конфигурация на геометричния модел.* След анализа на Фиг.12а броят на повтори от 2×2 е променен на 4×1, при което се получава моделът от Фиг.9б. Този модел е показан на Фиг.12 в две проекции - в свободно и в максимално деформирано състояние.

От Фиг.13 става ясно, че четирите примки се деформират на практика еднакво. Това означава, от една страна, че са подбрани подходящи гранични условия, при което външните примки се деформират еднакво с вътрешните, а от друга страна, че моделирането на четири повтора не е необходимо. Достатъчно е да се моделират два повтора, с което ще се онагледят контактите между две съседни примки, при получаване на същата точност на модела.



Фиг.13 Свободно и максимално деформирано състояние на модел с 4×1 повтора

За окончателен вариант на изчислителния модел е избрана конфигурацията с 2×1 повтора, показана на Фиг.9в. Конфигурацията е опростена допълнително, като основата по направление на вътъка не е моделирана за цял повтор, а само от оста на първа базова основна до оста на втора базова основна нишка, с което се редуцира мрежата от крайни елементи, намалява се количеството контакти и се печели изчислително време, без на практика да се губи от точността на решението.

9.3. *Начални и гранични условия.* Направени са следните корекции:

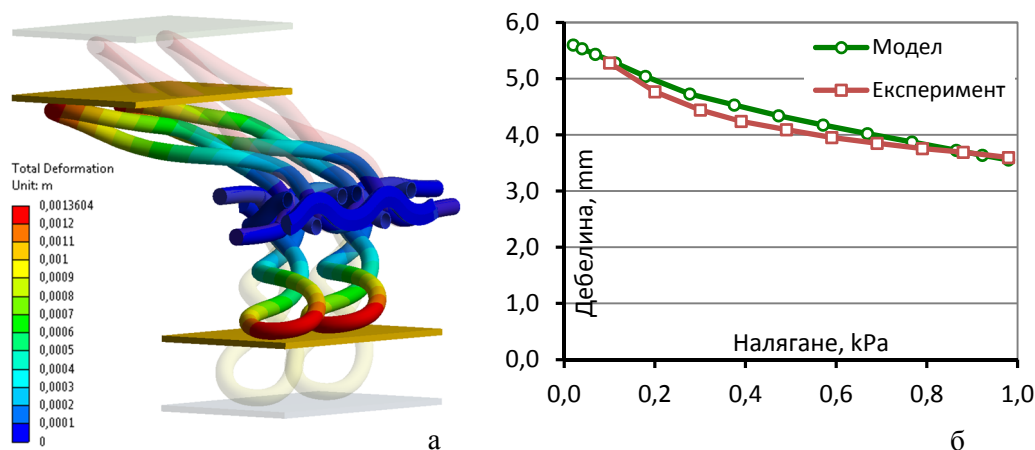
9.3.1. Настроени са еластичните удължения – крайната им дължина е 1 mm, а модулът им на еластичност – 4 МРа.

9.3.2. Премахнати са контактите между базови и вътъчни нишки, поради малката им дължина и обстоятелството, че вътъчните нишки са фиксирани в краищата. С цел икономия на изчислителен ресурс, всички нишки в основата са моделирани като черупки.

9.4. *Замрежване.* Опростяването на геометрията позволява да се повиши гъстотата на мрежата, без да се увеличи общият брой крайни елементи. За да се повиши точността на пресмятане в зоните с контакт, средната повърхностна гъстота на мрежата е променена до 0,07 mm за основните нишки (базови и примкови), и до 0,04 mm – за вътъчните.

Окончателният геометричен модел, показан на Фиг.9в, съдържа 5174 твърдотелни крайни елемента с 21933 възела, както и 78150 броя контактни елементи. Времето за пресмятане е 3103 s. Краткото време за пресмятане с този модел (около 52 min за описаната по-горе компютърна конфигурация), го прави удобен за практическо приложение, за симулиране на различни варианти в геометрията, материалите и обработките.

На Фиг. 14 са показани резултатите от пресмятане с окончателния модел. Постигнато е отлично съвпадение в двата края на деформационната крива и много добро съвпадение в останалата част. Максималното отклонение е 6.1%.



Фиг.14 Резултати от модела 2×1 повтора



Заклучение

Предложен е метод за геометрично моделиране на хавлиена тъкан и симулационно моделиране на нейното поведение при компресия. Правилността на метода се доказва от постигнатото много добро съвпадение между експериментални данни и симулация.

Ключът към успешното приложение на метода е съчетанието от използване на минимална геометрична конфигурация, което значително облекчава и съкращава изчислителния процес, с прецизна и задълбочена подготвителна работа по отношение на измерване на необходимите параметри на действителната тъкан.

Основен недостатък на представения метод е елиминирането на взаимодействията между нишките, породени от тяхната завласеност. Големият набор от участващи параметри, както и корекциите, които се правят след създаване на първоначалния изчислителен модел, позволяват да се намали ефектът от този недостатък.

References

1. Nikolov N., D. Germanova-Krasteva, G. Kandzhikova (2012), Development of a 3D Model of Terry Fabric, *International Journal of Clothing Science and Technology*, Volume 24, Issue 4, pp. 237-250.
2. Singh J. P., B. K. Behera (2010), Compression behaviour of pile structures, *39th Textile Research Symposium*, Indian Institute of Technology Delhi, 16-18th December.
3. Singh J. P., B. K. Behera (2012), Prediction of loop geometry for terry fabric using mathematical and FEM modeling, *STRUTEX 2012*, Technical University of Liberec, 3-5 December.
4. Singh J. P., B. K. Behera (2013), Design of loop geometry for improved performance of Terry Fabric, *1st International conference on innovative textiles*, CET-Bhubaneswar, 12-13 April.
5. www.cottoninc.com/corporate/Pressroom/Lifestyle-Monitor, 22.08.2014.
6. Nikolov N., D. Germanova-Krasteva, G. Kandzhikova (2011), Computational Model for Softness Assessment of Pile Fabrics Applying the Finite Element Method, Sozopol, 17-20 September, Vol. II, pp. 168-174, *International Scientific Conference of the Faculty of Machine and Power Engineering*.