

Київський національний університет  
технологій та дизайну

*О. П. Кизимчук*

**ТЕКСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ  
З ВІД'ЄМНИМ КОЕФІЦІЄНТОМ ПУАССОНА**

МОНОГРАФІЯ

Київ  
«Кафедра»

2015

УДК 677.025  
ББК 37.238  
К 38

*Рекомендовано до друку Вченою радою  
Київського національного університету технологій та дизайну  
(протокол № 4 від 24 червня 2015 р.)*

*Рецензенти:*

**Г. Б. Параска**, доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи Хмельницького національного університету;

**О. В. Чепелюк**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри дизайну Херсонського національного технічного університету.

Монографію видано за підтримки *Українського Фулбрайтівського кола, Програми імені Фулбрайта в Україні та Інституту міжнародної освіти*

**Кизимчук О. П.**

К 38 **Текстильні матеріали з від'ємним коефіцієнтом Пуассона:**  
монографія / О. П. Кизимчук. – К.: Кафедра, 2015. – 248 с. – Бібліогр. 282. –  
Лл. 145.

ISBN 978-617-7301-00-3

В основу монографії покладено наукову роботу в напрямку створення нового покоління текстильних матеріалів, які мають незвичну здатність розширюватися при розтягуванні на відміну від загальновідомої властивості звужуватися у переважній більшості текстильних матеріалів. Такі матеріали в світі отримали назву *аукзетик*, їх характеризують від'ємним значенням коефіцієнту Пуассона. У монографії наведено результати аналізу існуючих аукзетик-матеріалів та їхніх класифікацій, проаналізовано властивості та детально розглянуто основні структури. Автором розроблено основні наукові принципи створення трикотажних аукзетик-матеріалів.

Рекомендовано для широкого кола науковців та викладачів, аспірантів, магістрів та студентів профільних вищих навчальних закладів, інженерно-технічних працівників легкої промисловості

ISBN 978-617-7301-00-3

УДК 677.025  
ББК 37.238

© О. П. Кизимчук, 2015

## **Зміст**

Передмова .....	5
<b>1. АУКЗЕТИК-МАТЕРІАЛИ – НОВИЙ КЛАС ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ .....</b>	<b>8</b>
1.1. Визначення аукзетик-матеріалів та сфери їхнього застосування .....	8
1.2. Головні властивості аукзетик-матеріалів.....	18
1.3. Геометричні структури та моделі аукзетик-матеріалів ....	26
1.4. Текстиль – основа композиційних матеріалів .....	40
1.5. Текстильні аукзетик-матеріали.....	53
<b>2. НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ МАТЕРІАЛІВ З ВІД'ЄМНИМ КОЕФІЦІЄНТОМ ПУАССОНА .....</b>	<b>77</b>
2.1. Отримання чарунок гексагональної форми в основов'язаному трикотажі .....	77
2.2. Аукзетик-трикотаж на основі реентерабельної гексагональної чарунки .....	83
2.3. Теоретичний аналіз реентерабельної структури .....	93
2.4. Аукзетик-трикотаж на основі структури з ромбовидних решіток.....	103
2.5. Аукзетик-властивості основов'язаного трикотажу.....	108
2.6. Висновки по розділу .....	120
<b>3. ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ СТРУКТУРИ УТОКОВО-ФІЛЕЙНОГО ТРИКОТАЖУ .....</b>	<b>123</b>
3.1. Особливості введення утку в структуру основов'язаного трикотажу .....	123
3.2. Місце утокової нитки в структурі основов'язаного трикотажу при розташуванні утокових гребінок між ґрунтовими .....	125
3.3. Місце утокової нитки в структурі основов'язаного трикотажу при розташуванні утокових гребінок перед ґрунтовими .....	132
3.4. Моделювання структури основов'язаного трикотажу ...	139
3.5. Висновки по розділу .....	151

4. ПАРАМЕТРИ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТІ ФІЛЕЙНО-УТОКОВОГО ТРИКОТАЖУ .....	154
4.1. Об'єкти та методи дослідження.....	154
4.2. Вплив варіанту розташування утокової нитки в структурі основ'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення	155
4.2.1. Параметри структури.....	155
4.2.2. Розміри чарунок трикотажу .....	159
4.2.3. Розрахункові співвідношення розмірів.....	163
4.2.4. Розривальні характеристики .....	164
4.2.5. Повна деформація та її складові частини .....	166
4.3. Дослідження впливу рапорту філейного переплетення .	170
4.3.1. Параметри структури.....	170
4.3.2. Розміри чарунок трикотажу .....	183
4.3.3. Розрахункові співвідношення розмірів.....	194
4.3.4. Розривальні характеристики .....	199
4.3.5. Повна деформація та її складові частини .....	205
4.4. Висновки по розділу .....	220
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	224
Перелік посилань .....	229

## Передмова

За обсягом світового текстильного виробництва технічний текстиль займає особливе місце. Його значення для промисловості і життя людей важко переоцінити, оскільки немає жодної галузі економіки і побуту людини, де не використовували б текстильні матеріали технічного призначення. На сьогодні навіть складно визначити, який текстиль важливіший для нормального життєзабезпечення людини – побутовий чи технічний. Тому є зрозумілим повсякчас зростаючий інтерес фахівців-текстильників до проблеми розширення асортименту таких матеріалів, отримання виробів зі спеціальними властивостями і використання їх у різних галузях економіки. Поняття «технічний текстиль» є неоднозначним і включає щонайширший спектр продукції, що розрізняється за властивостями, призначенням, походженням сировини, яка використовується, і технологією виробництва.

Полотна з від'ємним коефіцієнтом Пуассона належать до класу екстраординарних матеріалів, які стають ширшими при їхньому розтягуванні. Ці матеріали займають все більше і важливіше місце в галузі технічного текстилю. Діапазон матеріалів та структур, які демонструють такі властивості, є доволі широким. Їх можна використовувати практично в усіх сферах діяльності, що зумовлює зростаючу цікавість до цього напрямку в усьому світі.

Що стосується текстильних матеріалів, які характеризуються від'ємністю коефіцієнту Пуассона при розтягненні, то головні дослідження проводять зараз у напрямку синтезу полімерів, з яких у подальшому отримують нитки та волокна для композиційних структур. Досліджень у напрямку створення матеріалів, які мали б такі властивості за рахунок структури текстильних матеріалів (тобто на макрорівні), дуже мало. Таким чином, розробка в'язаних структур, які здатні розширюватися при розтягненні, розглядають як перспективний напрямок наукових досліджень, на який звернені погляди науковців в усьому світі.

Метою пропонованого монографічного дослідження є розробка наукових основ створення текстильних матеріалів, які мають здатність розширюватися при їхньому розтягненні. Робота передбачає створення текстильних матеріалів, які мали б від'ємний

коефіцієнт Пуассона лише за рахунок будови матеріалів, а не за рахунок використання ниток та пряжі з відповідними властивостями.

У межах роботи автор вирішує наступні завдання:

- проектування та дослідження трикотажних матеріалів, які мають здатність розширюватися при їх розтягненні, з пряжі та ниток, які не мають такої здатності;
- розвиток фундаментальної теорії основов'язання в напрямку створення трикотажних матеріалів, які виявляють від'ємність коефіцієнту Пуассона при розтягненні;
- визначення основних технологічних факторів, які впливають на властивості розроблених структур, дослідження ступеню їхнього впливу та встановлення відповідних математичних залежностей;
- розробка математичних моделей структур основов'язаних матеріалів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробці наукових основ створення текстильних матеріалів із від'ємним коефіцієнтом Пуассона, які вироблені з пряжі та ниток, що не мають такої здатності. При цьому вперше теоретично створено та практично одержано основов'язаний трикотаж, який виявляє здатність до розширення при розтягуванні, що захищено Патентом США на винахід 8772187. На основі методу системного аналізу та глибоких теоретичних розрахунків виявлено геометричні структури аукзетик-матеріалів, які можуть бути реалізованими в текстильних матеріалах, зокрема трикотажних. Аналітично вирішено головне завдання – визначено структури основов'язаного трикотажу, які виявлятимуть аукзетик-властивості, та обрані переплетення, в яких можлива реалізація таких структур.

На основі методу геометричних моделей та теорії механіки нитки розроблено принципи утворення сітчастих структур з гексагональними отворами чарунок та їхнє видозмінення в процесі вироблення за рахунок введення високо розтяжної нитки у вигляді повздовжнього утоку. На підставі математичної обробки результатів дослідження параметрів структури, розмірів чарунок та фізико-механічних властивостей створених основов'язаних полотен отримано рівняння регресії другого порядку, які адекватно, з ймовірністю 0,95 описують залежності показників, які

досліджують, від рапорту філейного переплетення та варіанту розташування утокової нитки в структурі.

Теоретично визначено основні технологічні умови в'язання та параметри структури основов'язаних трикотажних матеріалів. Експериментально підтверджено правомірність застосування отриманих аналітичних рішень при виробленні матеріалів із від'ємним коефіцієнтом Пуассона

Роботу виконано в межах науково-дослідних робіт, які було проведено в Київському національному університеті технологій та дизайну: «Розробити шляхи технологічної трансформації трикотажної промисловості України та банк світових досягнень галузі» (рег. № 0109U002478 (2009–2010 рр.)), «Розробка і дослідження нового асортименту соціально-орієнтованих полімерних волокнистих матеріалів із застосуванням наноматеріалів» (рег. № 0110U002515 (2010–2011 рр.)), «Створити нові в'язані поліфункціональні текстильні матеріали, наукові основи їх проектування та раціональні технологічні процеси їх виробництва» (рег. № 0112U000267 (2012–2013 рр)).

Розробка структур та вироблення зразків трикотажних полотен відбувалися у співдружності з кафедрою матеріалів та текстилю Массачусетського університету в Дартмонті в межах наукового проекту Національного текстильного центру США «Formation and Performance of Auxetic Textiles» (NTC Project F06-MD09, 2007–2010 рр.). Дослідження за темою «Вироблення та дослідження трикотажних матеріалів з від'ємним коефіцієнтом Пуассона» було проведено у 2013–14 навч. році за грантом програми ім. Фулбрайта (США).

Автор щиро дякує рецензентам – докторам технічних наук, професорам Г. Б. Парасці та О. В. Чепелюк за допомогу у підготовці рукопису і буде вдячна всім, хто висловить свої зауваження та пропозиції щодо змісту монографії. Особлива подяка конкурсній комісії малих грантів Українського Фулбрайтівського Кола за підтримку у виданні цієї монографії.

# 1. АУКЗЕТИК-МАТЕРІАЛИ – НОВИЙ КЛАС ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

## 1.1. Визначення аукзетик-матеріалів та сфери їхнього застосування

У загальноприйнятному розумінні текстильні матеріали при розтягування зменшуються по ширині. Але це відбувається не завжди. Існують матеріали, які при розтягненні збільшуються по ширині (рис. 1.1). У 1991 році професор Кеннет Є. Еван з Університету Екстера (Великобританія) запропонував називати такі матеріали *аукзетик* (AUXETIC) [1]. Слово походить від грецького *auxetos* – той, що може розширюватися, зростати.

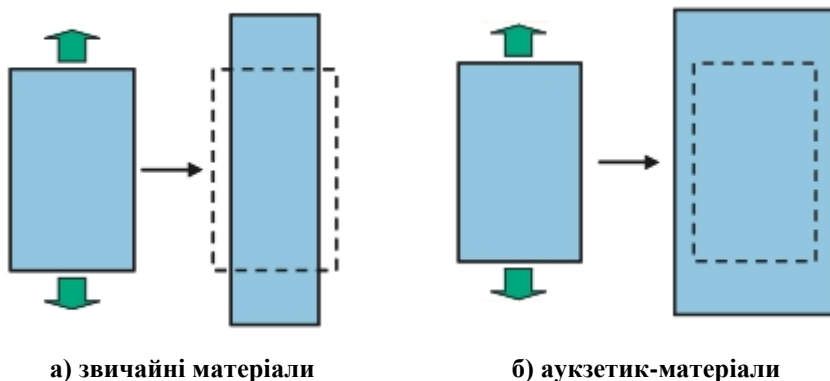


Рис. 1.1. Поведінка матеріалів при розтягненні

Початок досліджень у цьому напрямку можна віднести до 1987 року, коли Родерік Лейкс з Університету Айова виготовив полімерну піну з такими властивостями [2]. Він досяг цього відносно простим способом нагрівання та стискання звичайної піни [3]. З того часу було виготовлено цілий ряд синтетичних аукзетик-матеріалів, в тому числі композиційні матеріали з вуглеводного волокна [4], чарункові структури [5] та мікропористі полімери [6-8].

Аукзетик-матеріали використовують у різних галузях техніки та медицини і попит на них зростає з кожним роком [9, 10]. Використання таких матеріалів обґрунтовано, головним чином, від'ємним значенням коефіцієнту Пуассона, а також особливими властивостями: пружністю та опором розриву,



звукопоглинанням та демпфіруванням. Завдяки цьому їх вже застосовують у техніці, аерокосмічній галузі, у текстильних та захисних матеріалах, у біомедицині тощо (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1

**Використання аукзетик-матеріалів**

Галузь	Приклад
Текстиль	Аукзетик-волокна та нитки, функціональна тканина, ремені з індикацією напруги
Промисловість	Зміцнююча основа композиційних матеріалів, фільтри, пакувальні матеріали, звукопоглинаючі пристрої, подушки безпеки
Датчики	Гідротелефон, п'єзоелектричні пристрої та нанодатчики
Аерокосмічна галузь	Матеріали для антен та радіолокаційних станцій, основа конструкцій деталей літаків та космічних апаратів
Захист людини та навколишнього середовища	Захисні шоломи, захисний та куленепробивний одяг, захисні засоби ліктів та колін, пористі бар'єри та фільтри
Біомедицина	Різні види бандажів та бинтів, зубні стріпси та хірургічні нитки, штучні кровоносні судини, штучна шкіра та м'язи

При використанні аукзетик-матеріалів у текстильному виробництві можна досягнути ефекту «розумного текстилю», який має протизапальну та антиалергенну дію, здатність дозовано віддавати певні медичні препарати та не поглинати запахи [9]. Крім того, аукзетик-тканини зменшують тиск одягу на тіло людини, що зробить його зручнішим при носінні. Це ідея одягу, де один розмір відповідав би всім, що призведе до значного спрощення пакування валіз напередодні поїздки, а особливо для шанувальників туризму та спорту.

Аукзетик-нитки використовують і як швейні засоби. Головна мета швів – запобігти розпусканню або розв'язуванню. Вузол і сам шов розв'язують за прикладання навантажень за рахунок зменшення поперечника нитки або шнура. Якщо нитка буде виготовлена з аукзетик-матеріалів, при навантаженні вона розшириться і вузол затягнеться.

Аукзетик-волокна та текстильні матеріали на їхній основі є найбільш підходящим матеріалом для створення каркасу та

зміцнення композиційних матеріалів, які широко використовують у різних галузях техніки. Саме у цій сфері з кожним роком зростає попит на аукзетик-матеріали.

Полімерні аукзетик-матеріали широко використовують у системах фільтрації. Коли звичайний сіткоподібний матеріал розтягується, то отвори закриваються, тоді як в аукзетик-матеріалах вони збільшуються, а саме відкриваються. Це може відіграти суттєву роль на промисловому ринку фільтрувальних тканин. Як відомо, фільтри забруднюються, зменшуючи отвори, тобто вони потребують регулярного обслуговування і заміни. Однак якщо фільтр зроблено з аукзетик-матеріалу, розміри отворів можуть встановлюватися і підтримуватися лише простим збільшенням натягу.

Широкий простір для використання аукзетик-матеріалів для захисту при вибухах та на будівельних майданчиках при реконструкції будівель. Зазвичай понад 80% смертей та серйозних наслідків вибухів визвано віконними шибками та камінням, що летять. Завіси від вибухів допомогли б скоротити кількість та пом'якшити наслідки вибухів. Такий пристрій можна виготовити з аукзетик-сітки та використовувати у вигляді гардини. Зі збільшенням енергії вибуху вона буде збільшуватися у розмірах, захищаючи по більшій площині. Єдиний недолік – збільшення отворів, однак це веде до збереження цілісності матеріалів і можливості їхнього повторного використання, особливо якщо матеріали виготовлено з високоміцних волокон, таких як сталеве, титанове, вуглецеве або арамідне. Аукзетик-полімерні матеріали завдяки здатності поглинати енергію в комбінації з іншими матеріалами застосовують для особистого захисту: захисний шолом, рукавички та броньований жилет, наколінник та захисний пристрій для гомілки тощо.

Аукзетик-матеріали можна використовувати для вирішення повсякденних проблем. Наприклад, ремінь безпеки автомобіля... При нещасному випадку пасажира зазвичай кидає вперед, при цьому сила кидка дуже значна. При обмеженні цього руху ремінь розтягується і зазвичай стає тоншим. Тобто всі сили сконцентровані на меншій площі і створюють значний тиск на тіло людини, а, отже, можуть викликати внутрішні травми. Аукзетик-ремінь працює в

зворотному напрямку – при розтягненні він стає ширшим, тиск розповсюджується на більшу площу і будь-які ушкодження зменшуються.

Вантажні ремені повинні стискати вантаж, інакше він потенційно небезпечний та може призвести до великих втрат. Водночас коли ремінь занадто стиснутий, вантаж може бути пошкоджено. Розвиток аукузетик-матеріалів іде в напрямку зміни кольору у разі, якщо матеріали сильно стиснені або сильно натягнені.

Потенціал розвитку аукузетик-матеріалів полягає в створенні на їхній основі композиційних матеріалів для аерокосмічних систем [11], в основі чого закладено такі удосконалені властивості, як опір удару, поглинання енергії, комплексна кривизна поверхні та адаптована структура, яка здатна до розкладання [12].

Штучна кровоносна судина є типовим прикладом використання аукузетик-матеріалів у медицині. При збільшенні пульсу крові товщина стінок таких судин збільшується, на відміну від звичайних, в яких стінки потоншуються. Це підвищує опір судин розриву [13]. Інші потенційні сфери використання в медицині аукузетик-матеріалів передбачають: нитки для чищення зубів, хірургічні нитки, основи штучних м'язів тощо.

Аукузетик-зубні стріпси мають декілька суттєвих переваг. Перш за все за рахунок здатності до розширення вони відповідатимуть проміжкам між зубами на рівні ясен, що дає можливість поставляти фториди та ароматизатори безпосередньо до лінії ясен. Пориста природа аукузетик-матеріалу також допомогла б у видаленні залишків їжі, зробивши використання стріпсів більш ефективним.

Нещодавно зроблено перші прототипи інтелектуального шва. Загалом це – напівплетена система, що має стрижень, який може всмоктувати реагент, наприклад, хіміотерапевтичний. При розтягненні пряжі її зовнішня оболонка розширюється, відкриває низку пор і водночас стискає стрижень, що призводить до витискування реагенту (рис. 1.2). Наприклад, якщо реагент – вітамін Е, то це призведе до скорішого заживлення рани; антибіотики – до зняття болю тощо. Крім того використання таких ниток призводить до зняття болю при рухах, оскільки при розтягненні шва нитка в

поперечному розрізі буде збільшуватися, а не зменшуватися. Тобто використання аукутетик-ниток зменшить травми, які визвано самим швом – так звані розрізання шкіри як результат руху. Окрім того, при використанні таких медичних ниток їхня аукутетик-властивість закріплює волокна, мононитки або пряжу в місці, де вона розташовується під натягом (рис. 1.3).



Рис. 1.2. Нитки для медицини  
 а) напівплетена аукутетик-пряжа, яка має стрижень, що гарно всмоктує;  
 б) аукутетик-пряжа з олією грецького горіха;  
 в) аукутетик-пряжа під натягом, коли пори відкриваються.

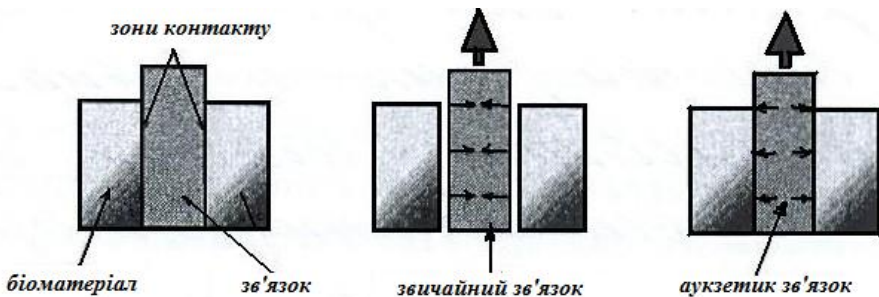


Рис. 1.3. «Замок» з аукутетик-матеріалу в структурі матриці

Аукутетик-властивість матеріалів використовують для створення «інтелегентних» бинтів [14], тобто бинтів, які здатні вивільняти корисний (анти-запах, антибактеріальний, протизапальний) реагент з пор монониток, які утворюють його структуру (рис. 1.4). Окрім того, такі бинти здатні розширюватися

при зростанні пухлини, не стискаючи її, а лише збільшуючи свою пористість.

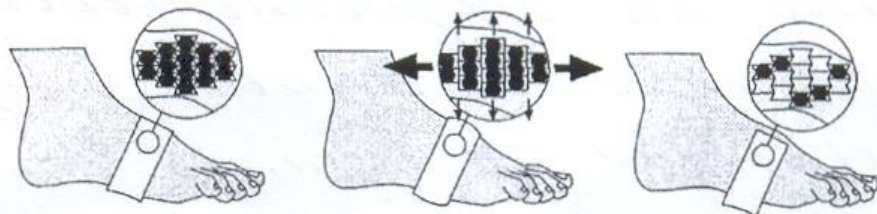


Рис. 1.4. Використання auxetic-матеріалів в «інтелегентному» бинті

Auxetic-принцип можна використовувати при виготовленні дешевих оптичних датчиків завдяки низькому об'ємному модулю, що робить їх більш чутливими до тиску [13]. Основний принцип полягає в тому, що навколо еластичного корду по гвинтовій лінії розташовується високо-розтяжний пористий матеріал (рис. 1.5). Це збуджує лінійний сигнал, який на 600% чутливіший, ніж від звичайних датчиків. Цей пристрій можна піддавати згинанню, розтягуванню, навантаженню та скручуванню, тому він підходить для використання в одязі та рукавицях. Це можна використати для контролю рухів тіла, наприклад, передачі сигналів від атлетів до коней на перегонах. Альтернативно їх можна використовувати в тканинах на лікарняних ліжках для зміни навантаження та положення пацієнтів на них.

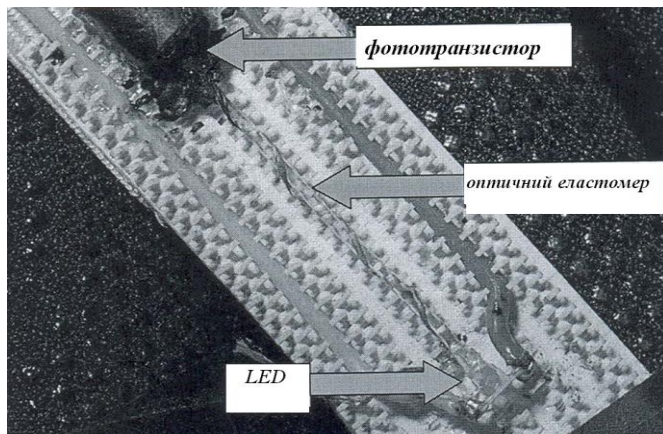


Рис. 1.5. Оптичний датчик

На сьогодні відкривають дедалі більше аспектів у використанні аукзетик-матеріалів, що сприяє подальшому розвитку досліджень у цьому напрямку [15]. Таким чином, аукзетик-матеріали можна використовувати практично в усіх сферах діяльності, що зумовлює зростаючу цікавість до них в усьому світі.

Головною характеристикою аукзетик-матеріалів є коефіцієнт Пуассона, який визначають як від'ємне відношення зміни поперечного розміру до зміни повздовжнього розміру матеріалу в напрямку навантаження [16] і знаходять за формулою:

$$\nu_{yx} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}, \quad (1.1)$$

де  $\varepsilon_x$  – відносне розширення полотна;

$\varepsilon_y$  – відносне видовження полотна.

Переважає більшість матеріалів у звичайному розумінні мають додатне значення коефіцієнту Пуассона, тобто вони звужуються при розтягненні. І тільки в аукзетик-матеріалах коефіцієнт Пуассона приймає від'ємне значення [1]. Відповідно до класичної теорії пружності, діапазон зміни показника від -1 до 0.5 для тривимірних ізотропних матеріалів та від -1 до 1 для двомірних ізотропних систем встановлено на основі термодинамічного підходу до розтягування [17]. Для анізотропних матеріалів значення коефіцієнту можуть змінюватися в ширших межах, ніж для ізотропних матеріалів [18]. Представлені межі варіювання коефіцієнту ілюструють можливість його від'ємного значення, що вказує на допустимість існування аукзетик-матеріалів.

Діапазон матеріалів та структур, які демонструють аукзетик-поведінку, можливо, значно більший, ніж можна очікувати на перший погляд. На схемі (рис. 1.6) відображено відомі на сьогодні аукзетик-матеріали. Фактично винайдено різноманіття натуральних аукзетик-матеріалів (наприклад, деякі типи шкір) та аукзетик-форм чотирьох головних класів матеріалів (металів, кераміки, полімерів та композитів) [9]. Також відомий аукзетик-ефект, який є результатом синтезу на молекулярному рівні.

Хоча, як доведено вже дуже давно, деякі матеріали натурального походження мають аукзетик-властивості: пірити

заліза [19], піролітичний графіт, каміння з мікротріщинами [20], миш'як [21], кадмій [22], губчаста речовина кістки [25], шкіра соска корови [24] та котяча шкіра [25], аукзетик-матеріали не привертати до себе увагу науковців аж до 1987 р. [2], коли було встановлено, що ізотропна аукзетик-піна може бути легко отримана зі звичайної чарунчастої піни. З того часу проводяться багато досліджень [26] в напрямку синтезу аукзетик-матеріалів, вивчення їхніх властивостей та поведінки в порівнянні зі звичайними матеріалами.

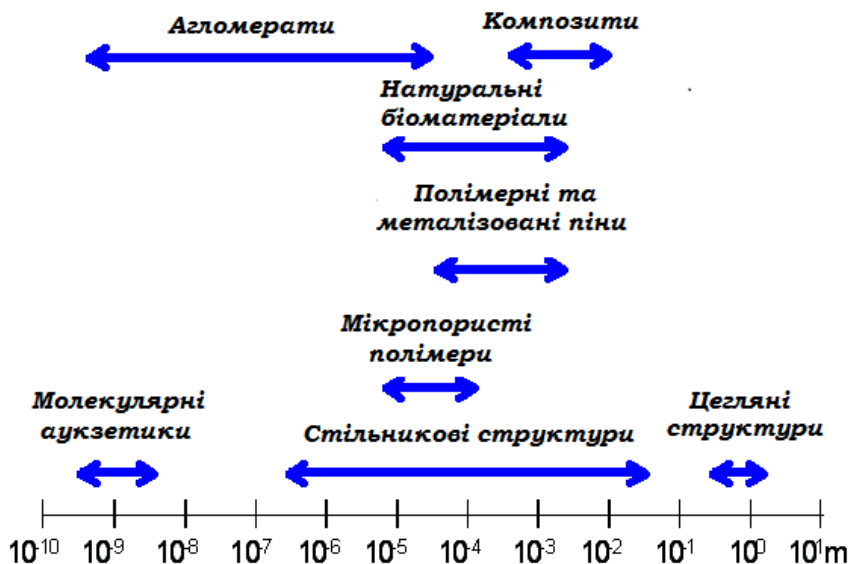


Рис. 1.6. Auxetic-матеріали

Встановлено [27], що від'ємне значення коефіцієнту Пуассона не залежить від шкали вимірювання, отже, аукзетик-поведінка матеріалів може бути досягнута як на рівні макроструктури, так і мікроструктури, і навіть на молекулярному рівні. На сьогодні широкий спектр аукзетик-матеріалів та структур винайдено, вироблено та синтезовано в межах від макроскопічного до молекулярного рівнів.

Провідне місце в цьому напрямку займають роботи зі створення аукзетик-полімерних матеріалів, які реалізовані у вигляді пін, волокон і навіть композиційних матеріалів. До них відносять

поліуретани (PU) [3,28,29], політетрафторетілен (PTFE) [6,7,30–32], поліетилен надвеликої молекулярної маси (UHMWPE) [33–37], поліпропілен (СТР) [8,38–43], нейлон [36], поліестер [44], рідкокристалічні полімери [45–47] та інші синтетичні молекулярні аукзетик-полімери [48–51]. Водночас розвивається і теорія отримання аукзетик-матеріалів на основі металічних, керамічних та інших неорганічних сполук та матеріалів [12,13,52].

Що стосується аукзетик-текстильних матеріалів, то головні дослідження проводять зараз у напрямку синтезу полімерів [53, 54], з яких у подальшому отримують нитки та волокна для композиційних структур. Прикладом такого синтезу є науковий проект, який виконувався в Школі полімерів, волокон та текстилю Технологічного Інституту Джорджії (США). Там синтезовано декілька полімерів, що мають бокові відгалуження (рис. 1.7), які під дією зусиль розтягування змінюють кут нахилу (рис. 1.8) до головного ланцюга [55–57]. Ці і подібні їм нитки та пряжу з успіхом можна застосовувати у трикотажному виробництві [58].

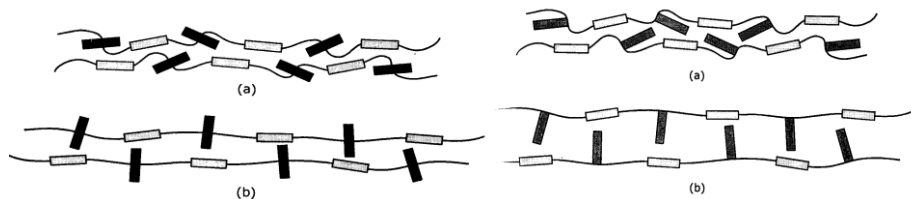


Рис. 1.7. Положення поперечних ланцюгів полімеру:  
а) в вільному стані та б) під дією розтягуючих зусиль

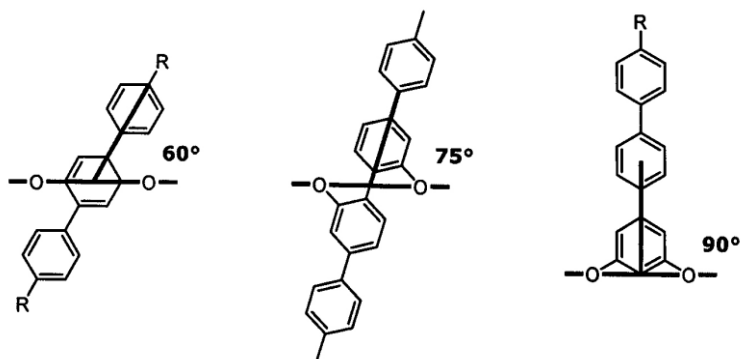


Рис. 1.8. Удосконалення зв'язків від бокового 1,4-феніліну та 2,2'-біфенілу до головного 1,3-ізофторату



Дослідження в напрямку створення матеріалів, які мали б аукзетик-властивості за рахунок структури текстильних матеріалів (тобто на макрорівні) дуже мало. Так, учені Університету Ексетера (Великобританія) отримали пряжу [59], яка складається з двох ниток: дуже жорсткої, практично нерозтяжної тонкої, та не жорсткої товстої, яка має незначне видовження при розтягненні. Вихідні нитки не мають аукзетик-властивостей. При цьому тонка нитка обкручена навколо товстої (рис. 1.9.а).

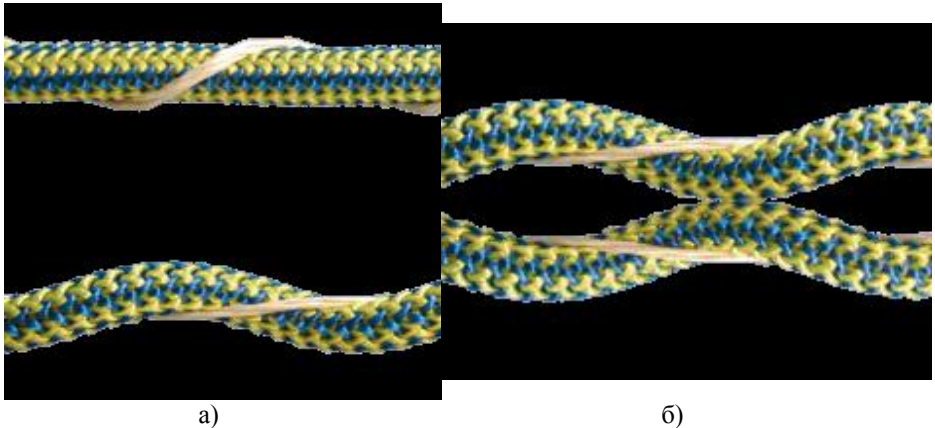


Рис. 1.9. Бікомпонентна пряжа з *auxetic* властивостями

При прикладенні зусиль до комплексної пряжі тонка жорстка нитка вирівнюється, а товста за рахунок своєї розтяжності розташовується навколо неї, що призводить до зростання загальної товщини матеріалу. Якщо використовувати комплексні пряжі протилежного скручування і розташовувати їх по чергово (рис. 1.9.б), то можна отримати полотна з аукзетик-властивостями.

У Відділенні матеріалів та текстилю Массачусетського університету Дартмунту виконували наукову роботу «Створення та властивості аукзетик-тканин» [60–62]. У результаті проведеної роботи створено трикотаажні матеріали [63], які мають від’ємний коефіцієнт Пуассона лише за рахунок макроструктури матеріалів, а не за рахунок використання ниток та пряжі з аукзетик-властивостями.

## 1.2. Головні властивості аукзетик-матеріалів

Як вказано вище, аукзетик-матеріали мають від'ємне значення коефіцієнту Пуассона, що визначає наявність у них низки незвичайних екстраординарних властивостей у порівнянні зі звичайними матеріалами. До таких властивостей слід віднести зростання модуля зсуву [64], опір продавлюванню [65–68], стійкість до утворення тріщини [2, 69], здатність поглинати енергію (ультразвукову, акустичну, демпфування) [70–72], наявність змінної пористості при розтягуванні [73–75], здатність до еліпсоїдального викривлення поверхні [76–77]. Нижче розглянуто деякі з цих властивостей [78], які визначають сфери застосування аукзетик матеріалів.

**Здатність до розрізування.** Аукзетик-ефект відіграє важливу роль при розкрої, механічні властивості таких структур впливають на експлуатаційні властивості. В класичній теорії пружності властивості матеріалів виражені чотирма константами: модулем Юнга ( $E$ ), модулем зсуву ( $G$ ), об'ємним модулем ( $K$ ), який є зворотним здатності до стиснення, та коефіцієнтом Пуассона ( $\nu$ ) [52]. Для ізотропних матеріалів ці константи зв'язані наступними рівняннями [79]:

$$G = E / (2 (1 + \nu)) \text{ та } K = E / (3 (1 - 2 \nu)) \quad (1.2)$$

або

$$G = 3K(1 - 2 \nu) / 2(1 + \nu) \text{ та } E = 2G(1 + \nu) = 3K(1 - 2 \nu). \quad (1.3)$$

У звичайних ізотропних матеріалів модуль Юнга практично вдвічі більший за модуль зсуву. Якщо коефіцієнт Пуассона дорівнює  $\nu=0,5$ , то об'ємний модуль значно перевищує модуль зсуву ( $G \ll K$ ) і такий матеріал визначають як не здатний до стиснення. Однак при зміні макроструктури, коли модуль Юнга  $E$  залишається постійним, а коефіцієнт Пуассона приймає від'ємне значення, змінюється співвідношення між  $K$  та  $G$ . При від'ємному значенні коефіцієнту Пуассона значення цих модулів наближаються і при  $\nu=-0,5$  вони дорівнюють один одному. Іншими словами, матеріал набуває високої здатності до стиснення при зростанні опору розрізанню. Водночас при  $\nu < -0.5$  модуль зсуву перевищує

модуль пружності [80, 81] і при  $\nu < -1$  маємо  $G \gg K$ . Таким чином, аукзетик-матеріали мають високий опір розриванню при зростанні здатності до формування [52].

Вирішуючи систему рівнянь (1.2) та (1.3) відносно коефіцієнту Пуассона, отримуємо [82]:

$$\nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)} \quad (1.4)$$

Графічне відображення даної залежності представлено на рис. 1.10

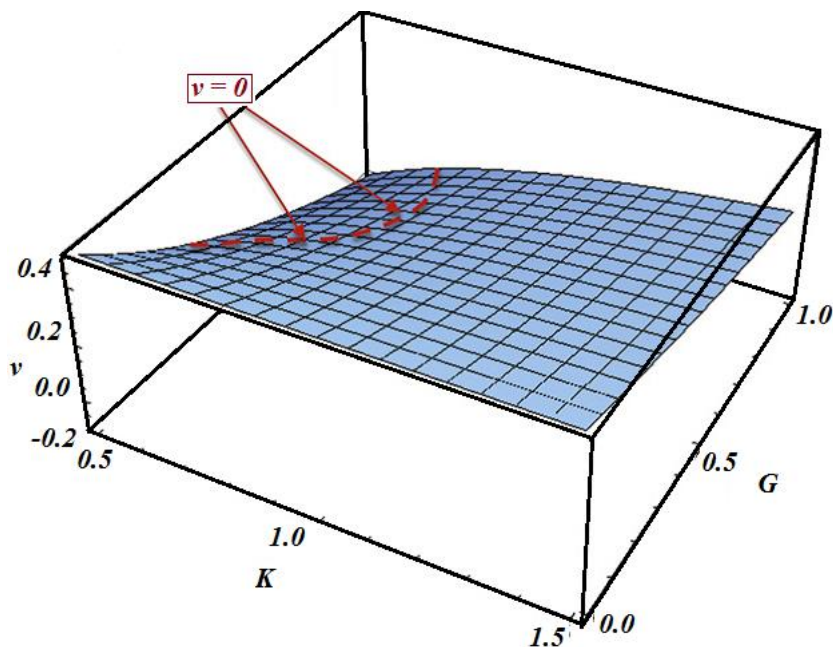
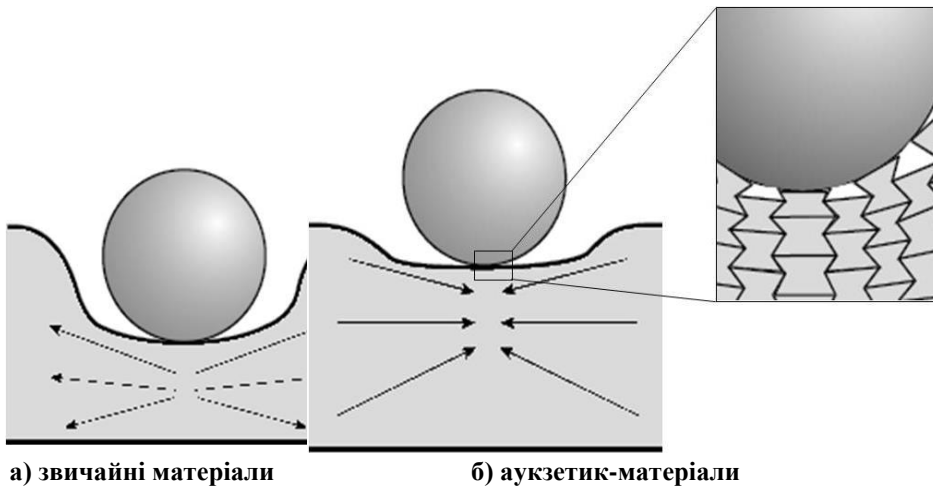


Рис. 1.10. Залежність коефіцієнту Пуассона від модулів зсуву ( $G$ ) та об'ємності ( $K$ )

**Поведінка матеріалів при продавлюванні.** Аукзетик-матеріали мають властивість опиратися продавлюванню через високий опір заглибленню. Коли на звичайний матеріал діє певна сила, вона стискає матеріал, внаслідок чого в матеріалі виникають

значні напруги, які перпендикулярні дії сили і спрямовані від точки прикладення сили (рис. 1.11.а). Якщо такою самою силою подіяти на аукзетик-матеріал, в ньому виникають напруги, які спрямовані до точки прикладення сили (рис. 1.11.б), внаслідок чого утворюється ділянка щільнішого матеріалу, який має стійкість до продавлювання. Дослідження [67] показали, що аукзетик-піни мають вищу розтяжність та меншу жорсткість, ніж звичайні піни, при одній і тій самій відносній щільності. Також було доведено [13], що в аукзетик-пінах утворюються зони підвищеної щільності як реакція на дію сили тиску.



а) звичайні матеріали                      б) аукзетик-матеріали  
Рис. 1.11. Поведінка матеріалів при продавлюванні

За класичною теорією еластичності [83], опір продавлюванню або твердість ізотропних матеріалів визначаються як :

$$H \sim [E/(1 - \nu^2)]^\gamma \quad (1.5)$$

де  $\gamma = 1$  – для стандартного тиску та  $\gamma = 2/3$  – для заглиблення Герца.

При заданому модулі Юнга  $E$  опір продавлюванню зростає зі збільшенням коефіцієнту Пуассона. При наближенні  $\nu$  до  $-1$  твердість прямує до нескінченності. Дослідження твердості проведені для великої кількості створених на цей час аукзетик-синтетичних матеріалів та її зростання відзначено в усьому різноманітті матеріалів: в полімерних та металічних пінах [65, 84],

в композитних ламінатах з вуглецевими волокнами [85] та мікропористих полімерах [86]. Так, наприклад, твердість мікропористого аукзетик-поліетилену надвисокої молекулярної маси була збільшена практично в 2 рази по відношенню до звичайного [86, 87]. Крім того, при проведенні досліджень за нижчого навантаження (наприклад, 10 ~ 100 Н) твердість матеріалу збільшилася майже у 8 разів при зміні коефіцієнту Пуассона від 0 до -0.8 [53, 84].

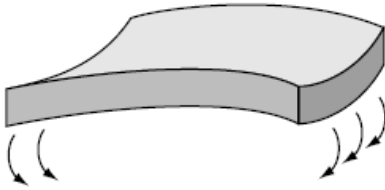
**Поведінка матеріалів при деформуванні.** В аукзетик-матеріалах модуль Юнга пов'язаний з коефіцієнтом постійного об'ємного стиснення, який показує співвідношення початкового об'єму матеріалу до остаточного об'єму. Однак вплив цього коефіцієнту на модуль Юнга матеріалу різний при стисненні та розтягуванні. При стисненні модуль Юнга збільшується зі збільшенням модуля об'ємного стиснення, водночас при навантаженні він зростає. Ця властивість дуже важлива, адже при виробленні аукзетик-пін найчастіше використовують тривимірне стиснення. Дослідження аукзетик-вуглецевих ламінатів при низькошвидкісній дії зусиль показали збільшення напруги практично на одну третину [88].

Однак проведені останніми роками дослідження [11] показали, що віджиг аукзетик-матеріалів зменшує модуль Юнга при зазначеному коефіцієнті об'ємного стиснення, отже, матеріал стає менш жорстким. Так, наприклад, аукзетик-мідна піна менш жорстка, ніж піна, з якої вона була отримана. У звичайної мідної піни властивості до стиснення та натягу практично однакові, водночас мідна аукзетик-піна ілюструє різні властивості при розтягуванні та стисненні. Така ж поведінка притаманна формуванню пластичних шарнірів ребер чарунок [81]. Таким чином, аукзетик-матеріали можна використовувати у моделюванні як еластичний матеріал.

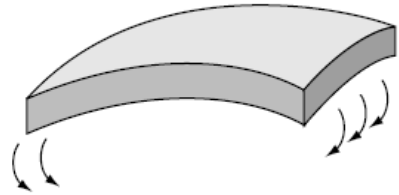
**Еліпсоподібна кривизна поверхні.** При згинанні матеріалу виникає викривлення поверхні як в повздовжньому, так і в поперечному напрямках (рис. 1.12). У матеріалів з додатнім коефіцієнтом Пуассона кривизна поверхні в поперечному напрямку спрямована в бік, який протилежний головному викривленню (рис.

1.12.а) [12]. Отримуємо так звану сідлоподібну форму поверхні (рис. 1.13.а).

У матеріалів з від'ємним значенням коефіцієнту Пуассона кривизна поверхні в усіх напрямках однакова (рис. 1.12.б), тобто відбувається тривимірне вигинання [83] – отримуємо випуклу еліпсоподібну форму (рис. 1.13.б). Слід відмітити, що при  $\nu=1$  форма поверхні буде циліндричною без вигину в поперечному напрямку, а при  $\nu=-1$  – сферичною [89]. Таким чином, аукзетик-матеріали придатні до формоутворення куполоподібних форм без додаткових навантажень у різних напрямках [76], що доводить їхню незамінність в автомобілебудуванні та аерокосмічній галузях.



а) сідлоподібне викривлення



б) еліпсоїдалне викривлення

Рис. 1.12. Форма поверхні



а) звичайні матеріали

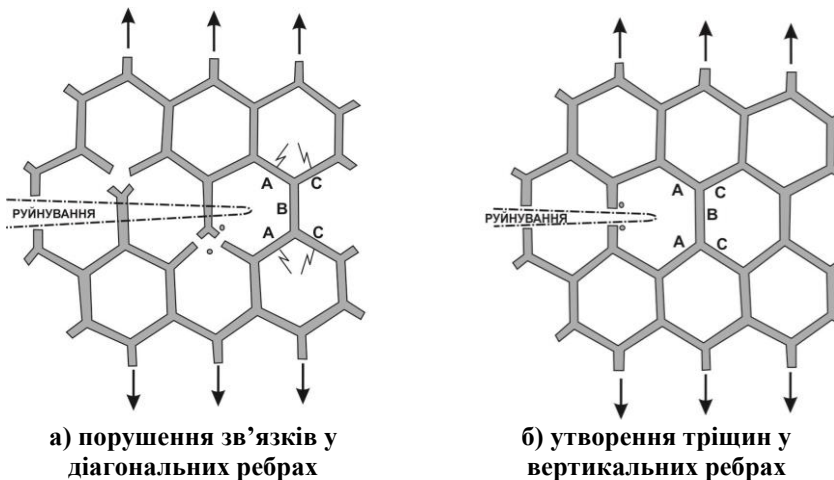


б) аукзетик-матеріали

Рис. 1.13. Поведінка матеріалів при формуванні

**Стійкість до утворення тріщин.** Аукзетик-матеріали, як і звичайні їх аналоги, при дії напруги поведуться як ламкоподібні матеріали. Руйнування відбувається різко, без попередніх ознак [81, 90]. У масштабі чарунки тріщина розповсюджується дискретним способом: за кожним наступним кроком тріщина збільшується на ширину однієї чарунки [91]. Злам у елементарній чарунці може

відбуватися двома шляхами [92]: руйнуванням зв'язків у діагональних ребрах чарунки під дією згинального моменту (рис. 1.14.а) та зломом вертикальних ребр чарунки під сукупною дією напруги та згинального моменту (рис. 1.14.б).



а) порушення зв'язків у діагональних ребрах

б) утворення тріщин у вертикальних ребрах

Рис. 1.14. Схема руйнування чарунок

Загальновідомо, що тріщини в матеріалі не можуть бути абсолютно гострими. Отже, їхнє вістря характеризується радіусом закруглення  $r_{tip}$ . Напругу, яка виникає у матеріалі на відстані  $r$  (для  $r > r_{tip}/2$ ) від тріщини, описано наступною залежністю [93]:

$$\sigma = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left( \frac{r_{tip}}{2r} \right), \quad (1.6)$$

де  $K_I$  – коефіцієнт інтенсивності напруги.

Сила, яка діє на ребро чарунки, може бути визначена як інтеграл по товщині  $t$  ребра, тобто

$$F = \int_{r_{tip}/2}^{r_{tip}/2+t} \left[ \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left( \frac{r_{tip}}{2r} \right) \right] r_{tip} dr. \quad (1.7)$$

Використовуючи ряд Тейлора, це рівняння у першому наближенні може бути представлено як:

$$F = 2,38K_I^* \frac{\sqrt{l}}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{t}{l} \right), \quad (1.8)$$

де  $K_I^*$  – коефіцієнт інтенсивності напруги звичайної піни  
 $l$  – довжина ребра.

Оскільки натяг в ребрах чарунки у матеріалах великої щільності незначний в порівнянні зі згинальними моментами, його не враховують. Напряга в ребрах чарунки, яка виникає внаслідок дії згинального моменту, становить

$$\sigma = 2,12 \frac{Fl}{t^3}. \quad (1.9)$$

Враховуючи рівняння (1.7), знаходимо, що напряга

$$\sigma = 5,05K_I^* \frac{l}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{l}{t} \right)^2. \quad (1.10)$$

Тріщина зростатиме, якщо  $\sigma = \sigma_f$ , де  $\sigma_f$  – міцність ребра чарунки до руйнування. Таким чином, тріщиностійкість звичайних пінок  $K_I^*$  може бути розрахована

$$K_I^* = 0,20 \sigma_f \sqrt{\pi l} \left( \frac{t}{l} \right)^2. \quad (1.11)$$

Оскільки  $\rho/\rho_s \sim \alpha(t/l)^n$ , то коефіцієнт інтенсивності напруги піни пропорційний нормалізованій щільності, тобто

$$\frac{K_I^*}{\sigma_f \sqrt{\pi l}} = 0,19 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right), \quad (1.12)$$

де  $\rho^*$  – щільність піни,  
 $\rho_s$  – щільність тіла, з якого піна зроблена,



$\alpha$  та  $n$  – константи.

Подібні до (1.11) та (1.12) формули отримані і для аукзетик-пін [68], тому розглянемо їхні особливості для цих структур:

$$\frac{K_{IC}^*}{\sigma_f \sqrt{\pi l}} = 0,10 \frac{\sqrt{1 + \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)}}{1 + \cos 2\varphi} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right), \quad (1.13)$$

де  $K_{IC}^*$  – коефіцієнт інтенсивності напруги аукзетик-піни,

$\varphi$  – кут нахилу ребра чарунки, який пов'язаний з формою чарунки.

Відношення тріщиностійкостей аукзетик-піни та звичайної піни становить

$$\frac{K_{IC}^*}{K_I^*} = 0,53 \frac{\sqrt{1 + \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)}}{1 + \cos 2\varphi}. \quad (1.14)$$

Отже, у порівнянні зі звичайними матеріалами аукзетик-матеріали мають збільшену стійкість до утворення тріщини. Оскільки ця залежність встановлена для спрощеної моделі, для об'ємних коефіцієнтів стиснення 2,5 та вище результати можуть бути занадто оптимізовані, тому що аукзетик-матеріали мають складну нерегулярну структуру.

Експериментально встановлено [52], що тріщиностійкість є функцією коефіцієнту об'ємного стиснення. Так, у порівнянні з і звичайною поліестер-поліуретановою піною, стійкість до утворення тріщин аукзетик-піни більше у 1.7, 2.3 і 3.2 разів при зростанні коефіцієнту об'ємного стиснення до 2.0, 3.2 та 4.2, відповідно [81]. Крім того, при утворенні тріщини аукзетик-матеріал розширюється і закриває її при незначній дії розтягуючих зусиль. Іншими словами, аукзетик-матеріали мають високу стійкість до зламу.

**Поглинання енергії.** Аукзетик-матеріали у порівнянні зі звичайними матеріалами демонструють неперевершену здатність до поглинання енергії: надзвукової, акустичної та демпферної. Так, встановлено [70], що на всіх рівнях частот аукзетик-піна має значно

більшу здатність до поглинання звуків. Аукзетик-піна з меншими розмірами пор ефективніше поглинає звук в частотах вище 630 Гц [94], ніж піна з великими отворами.

Аукзетик-піна стійка до дії динамічних руйнівних навантажень, тоді як звичайна піна не виявляла пружності та стійкості до дії високої напруги [95]. Ця властивість аукзетик-матеріалів дозволяє широко використовувати їх як цілісні структурні елементи, які підлягають великим динамічним навантаженням [26].

**Змінна проникність.** При розтягуванні аукзетик-матеріалів збільшується їхня пористість. Ця унікальна властивість сприяє широкому використанню аукзетик-матеріалів у фільтрах різного виду та розміру фільтрувального елемента. Аукзетик-матеріали та структури на різному рівні (від нано- до макророзмірів ) здатні збільшувати розмір пор при одночасному розтягуванні [73], що сприяє ефективності фільтрації шляхом підтримання постійності розміру отворів при забрудненні та самоочищення фільтру. Крім того розмір пор – функція прикладеної напруги, що може існувати як «розумний» механізм [75].

Аукзетик-матеріали мають й інші бажані специфічні механічні властивості. [11, 26]

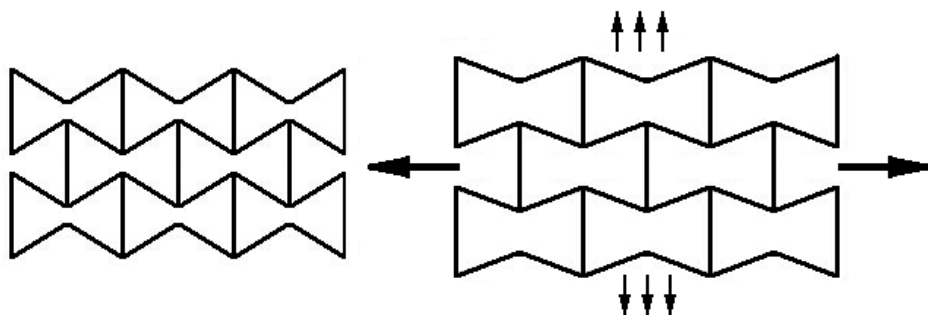
### **1.3. Геометричні структури та моделі аукзетик-матеріалів**

Різноманітні структури та моделі запропоновано для досягнення аукзетик-ефектів в матеріалах. Існує декілька підходів до класифікації аукзетик-матеріалів: за походженням матеріалу (природні, біологічні, синтезовані) [96]; за можливим технічним використанням (композиційні матеріали, пористі та гранульовані матеріали, кристалічні тіла, молекули тощо) [97]; за рівнем створення структури (макроскопічний, мезоскопічний, мікроскопічний, молекулярний тощо) [97]. Однак найбільш розповсюдженою є класифікація за принципом організації структури матеріалу та її механіки [82, 26]. За цим принципом головні аукзетик-структури можна розділити на наступні класи: реентерабельні дво- та тривимірні структури [92, 98–101], стрижневі структури [102–104], жорсткі та напівжорсткі обертові

структури (структури обертання) [27, 105–111], ламінати кутового згину [112, 113], тверді молекули [114–119] мікропористі полімери [6, 30, 36, 120] та рідкокристалічні полімери [45–47].

Ці геометричні структури дозволяють краще зрозуміти, які аукзетик-ефекти можна досягти [121], як такі матеріали будуть вироблені і які властивості можуть бути оптимізовані та прогнозовані. Нижче наведено систематизований огляд зазначених структур.

**Реентерабельні структури.** У цьому випадку реентерабельна означає таку структуру, у якої кут в багатокутнику більший за  $180^\circ$ , тобто маємо ребро, яке спрямовано усередину [82]. Вперше макроскопічну аукзетик-структуру представлено у вигляді стільників [92]. На рис. 1.15.а представлено плоску стільникову аукзетик-структуру, яка сформована зі видозмінених шестикутників. Теоретично при прикладенні одновісного навантаження діагональні ребра такої структури вирівнюються (рис. 1.15.б), що призводить до розширення матеріалу, тобто маємо аукзетик-ефект. Але в дійсності у більшості стільників такого типу відбувається згинання ребр, що є наслідком їхнього шарнірного кріплення та осевого розтягування. Однак згинання ребр також призводить до появи аукзетик-ефекту в стільниках такого типу [12].



а) у вільному стані

б) під одновісним натягом

Рис. 1.15. Геометрична модель плоскої структури з видозміненими стільниками

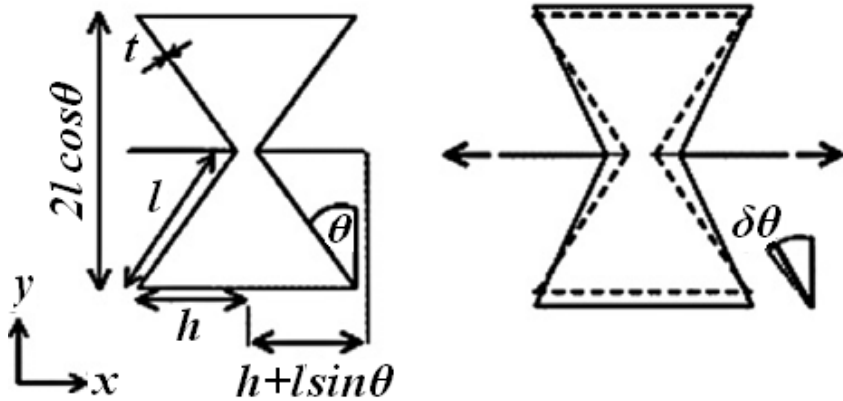


Рис. 1.16. Схема базової елементарної чарунки реєнтерабельної стільникової структури

Цю структуру (рис. 1.16) описують наступними значеннями коефіцієнту Пуассона та модуля Юнга [92]:

$$\nu_{12} = \frac{\sin \theta \left( \frac{h}{l} + \sin \theta \right)}{\cos^2 \theta} \quad \text{та} \quad \nu_{21} = \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta \left( \frac{h}{l} + \sin \theta \right)}, \quad (1.15)$$

$$E = k \frac{\left( \frac{h}{l} + \sin \theta \right)}{b \cos^3 \theta}, \quad (1.16)$$

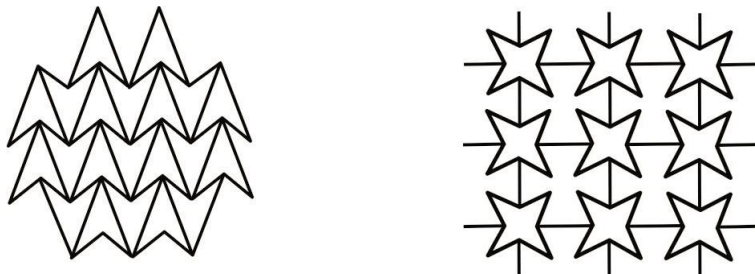
де  $h$ ,  $l$  та  $\theta$  – геометричні розміри чарунки (рис.1.16),  
 $b$  – глибина чарунки,  
а коефіцієнт  $k$  визначається за рівнянням

$$k = E_s b \left( \frac{t}{l} \right)^3, \quad (1.17)$$

де  $E_s$  – дійсний (внутрішній) модуль Юнга.

Аукзетик-ефекти можуть бути отримані і в інших видозмінених структурах. Так при одновісному розтягуванні

стільникових структур у вигляді подвійних стрілок (рис. 1.17.а) [122] або зірочок (рис. 1.17.б) [99, 101] відбудеться переміщення та вигин ребр елементарного стільника, що також є проявом аукзетик-властивості цих структур. Теоретично розроблені [123] структурно видозмінені шестикутні стільники (рис. 1.18), які мають кращі ізотропні властивості, ніж представлені на рис. 1.15.а завдяки своїй симетрії і в радіальних напрямках. Однак на сьогодні ще не створено матеріалів, які мали б таку структуру.



а) зі стільниками у вигляді стрілок    б) зі стільниками у вигляді зірочок  
Рис. 1.17. Геометрична модель плоскої стільникової структури

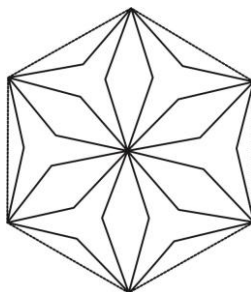
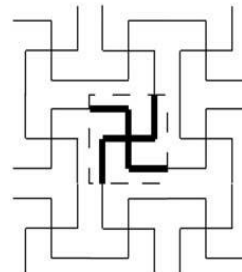
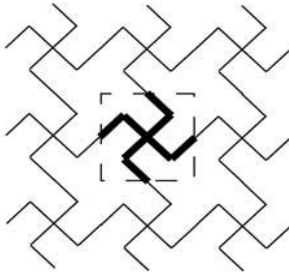
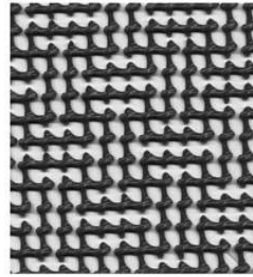
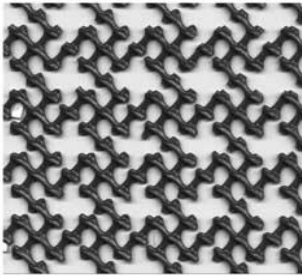


Рис. 1.18. Геометрична модель плоскої структури з шестикутними стільниками

Інші дві структури на основі видозмінених елементарних ланок сформовані з ромбовидних (рис. 1.19.а) та квадратних (рис. 1.19.б) решіток вилученням з них певних зв'язків. Аукзетик-ефект у таких структурах отримують шляхом обертання та розширення кожної сторони елементарної ланки. Проведений аналіз таких структур [53,124] показав, що структури з квадратними елементарними ланками демонструють більший аукзетик-ефект, ніж структури з ромбоподібними ланками.



а) з ромбоподібних решіток

б) з квадратних решіток

Рис. 1.19. Геометрична модель плоскої стільникової структури

Теоретичну ідеалізовану модель такої структури наведено на рис. 1.20. Принципові припущення при деформації наступні: кути між сторонами деформуються еластично; ніяка зміна довжин сторін не допустима; симетрія чарунок залишається при деформації. Розміри елементарної ланки такої структури визначають із наступних залежностей:

$$x = 2r \left( \frac{3}{2} + \cos(\zeta - \phi) \right) \quad y = 2r \left( \frac{3}{2} + \sin \phi \right), \quad (1.18)$$

де  $r$  – довжина ділянки,  $\phi$ ,  $\zeta$  - відповідні кути

Визначивши зміну розмірів (деформації) матеріалу при розтягненні як

$$\varepsilon_x = \frac{x_n - x_0}{x_0} = 4r \left( \frac{\cos(\zeta_0 - \phi_0 + \Delta\phi(k-1))}{\cos(\zeta_0 - \phi_0)} - 1 \right), \quad (1.19)$$

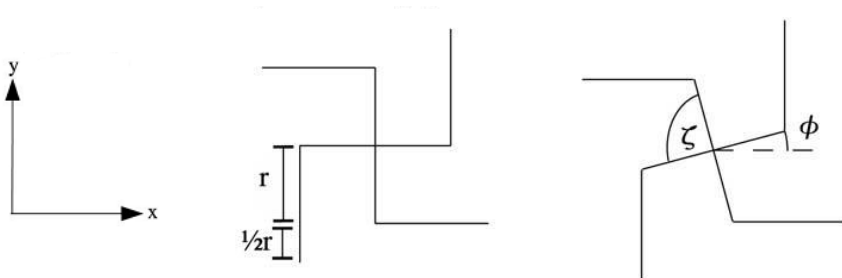


Рис. 1.20. Базова модель елементарної ланки структури з квадратних решіток

$$\text{та } \varepsilon_y = \frac{y_n - y_0}{y_0} = 4r \left( \frac{\sin \phi_n}{\sin \phi_0} - 1 \right), \quad (1.20)$$

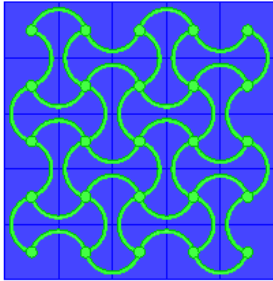
знаходять (1.1) коефіцієнт Пуассона.

$$v_{yx} = \frac{[\cos(\zeta_0 - \phi_0 + \Delta\phi(k-1)) - \cos(\zeta_0 - \phi_0)] \left( \frac{3}{2} + \sin \phi_0 \right)}{[\sin(\phi_0 + \Delta\phi) - \sin \phi_0] \left[ \frac{3}{2} + \cos(\zeta_0 - \phi_0) \right]}, \quad (1.21)$$

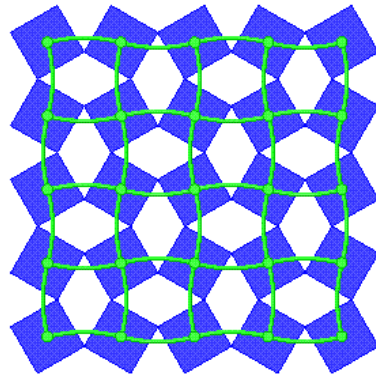
де  $k = \Delta\zeta / \Delta\phi$  – відношення деформацій кутів. Значення  $k=0$  припускає відсутність одночасної деформації.

Остання плоска аукзетик-структура сформована з синусоїдальних зв'язків (рис. 1.21), аукзетик-ефект якої оснований на перетворенні видозмінених ланок у прямокутні. Тонку пластину, зроблену на основі такої структури, використовують у медицині для дифузії препаратів [125]. Синусоїдальні зв'язки в таких структурах можуть бути замінені на прямолінійні.

Окрім плоских структур з видозміненими елементами, аукзетик-ефект можна отримати і при зміні тривимірних структур. Так, на рис. 1.22.а показано тривимірну елементарну ланку, яка при зміні положення її ребер (рис. 1.22.б) перетворюється в аукзетик-структуру [89].

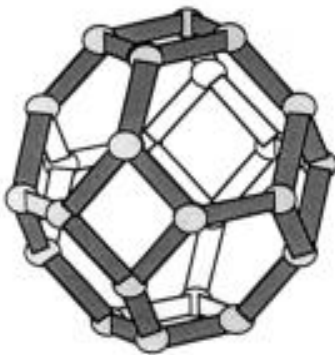


а) у вільному стані

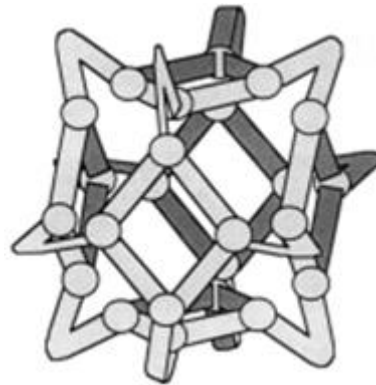


б) під одновісним натягом

Рис. 1.21. Геометрична модель плоскої структури з синусоїдальними зв'язками



а) звичайна



б) видозмінена

Рис. 1.22. Геометрична модель об'ємної структури

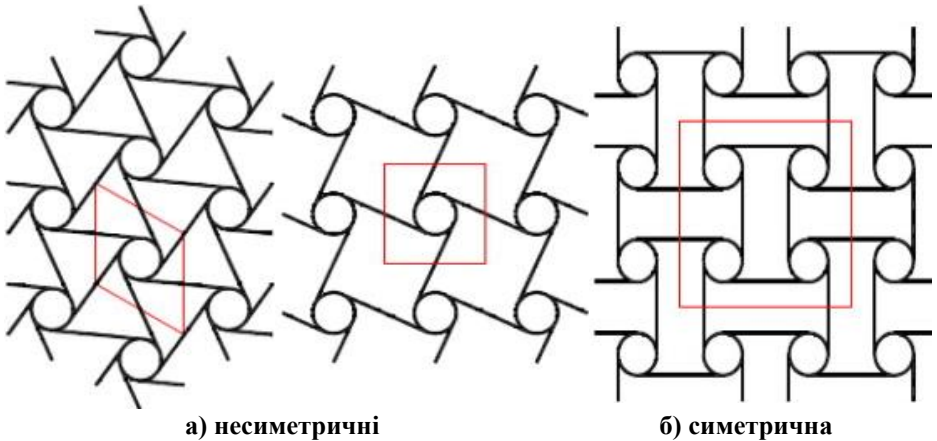
При дії розтягуючої напруги вздовж вертикальних ребр такої структури бокові ребра висовуватимуться назовні, розширюючи матеріал. І навпаки, при стисканні ребра надалі намагатимуться зігнутися до центру структури, зменшуючи елементарну ланку в усіх напрямках. Таку модель, завдяки простоті розуміння механізму, найчастіше використовують для пояснення процесів в аукзетик-пінах.

**Стрижневі структури** – інший вид структур, які використовують для створення аукзетик-стільників. У цьому виді структур елементарні ланки спочатку формують приєднанням



прямих елементів до центральних вузлів, які можуть бути як круглими (рис. 1.23.а), так і прямокутними (рис. 1.23.б), або іншої геометричної форми. Елементарні ланки зв'язують між собою. Аукзетик-ефекту досягають після прикладення навантаження в результаті обертання або розвертання стрижнів навколо вузлів.

У результаті теоретичних та експериментальних досліджень [102] встановлено, що коефіцієнт Пуассона матеріалів на основі такої структури наближається до -1. На відміну від інших аукзетик-матеріалів, ця структура може підтримувати високий аукзетик-ефект у широкому діапазоні деформації.



а) несиметричні  
б) симетрична  
Рис. 1.23. Геометричні моделі плоскої структури зі стрижневими стільниками

Встановлено [82], що стрижневі аукзетик-структури на сьогодні досліджують найбільше, особливо з точки зору механічних властивостей та можливості їхнього математичного опису. Аналітичний опис [102] такої структури полягає у визначенні деформації на основі законів механіки (рис. 1.24):

$$\begin{aligned}
 e &= r \sin \phi \\
 e_1 &= r \phi \cos \theta, \\
 e_2 &= r \phi \sin \theta
 \end{aligned}
 \tag{1.22}$$

де з невеликою похибкою приймається, що  $r \sin \phi \simeq r \phi$  та  $\theta = 30^\circ$ .

Якщо розглядати стрижневу структуру як балку товщиною  $t$ , то користуючись головними принципами опору матеріалів, отримуємо прогин

$$\phi = \frac{TL}{6E_s I}, \quad (1.23)$$

де момент інерції становить  $I = t^3 d / 12$ . Визначаємо навантаження:

$$T = \frac{E_s t^3 d}{2L}. \quad (1.24)$$

Деформації в цьому випадку становитимуть

$$\varepsilon_i = \phi \frac{r}{R}. \quad (1.25)$$

Визначивши відповідні деформації, знаходять (1.1) коефіцієнт Пуассона. На основі цієї теорії новий клас структур, названий як «мета-стрижневі» [126], знайшов свій подальший розвиток (рис. 1.25).

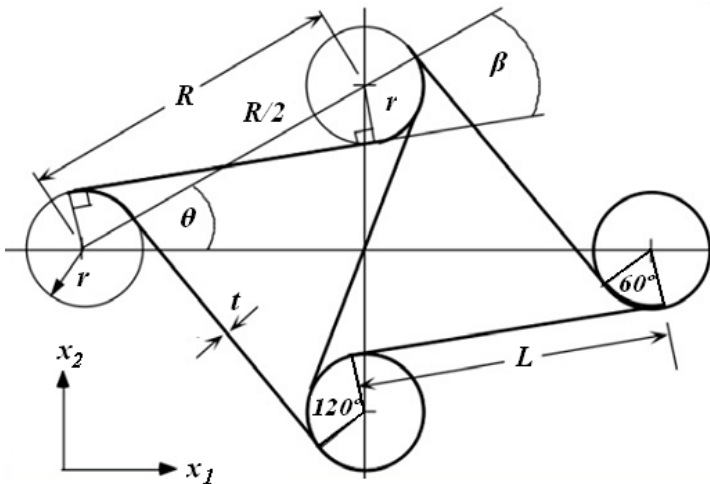
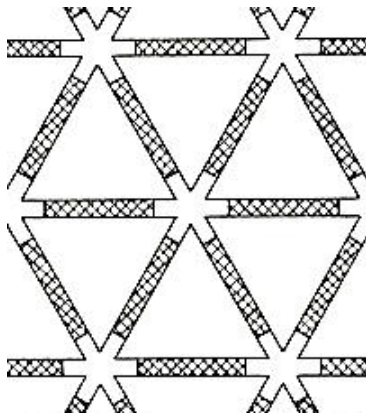
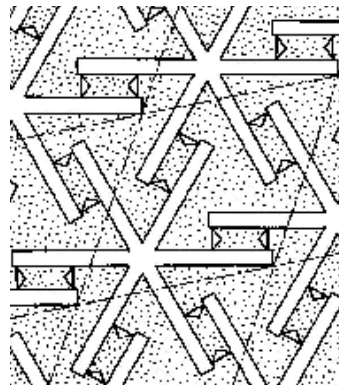


Рис. 1.24. Базова модель елементарної ланки стрижневої структури



а) конструкція



б) композиційний матеріал

Рис. 1.25. Геометричні моделі плоскої «мета-стрижневої» структури

У таких структурах одні й ті самі елементи (стандартні блоки) формують асиметричні або симетричні структури. Кількість зв'язків між блоками може бути різною, однак стандартними вважаються елементи з 3, 4 або 6 стрижнями. Очевидно, що аукзетик-ефекти залежать від форми вузла та довжини зв'язок.

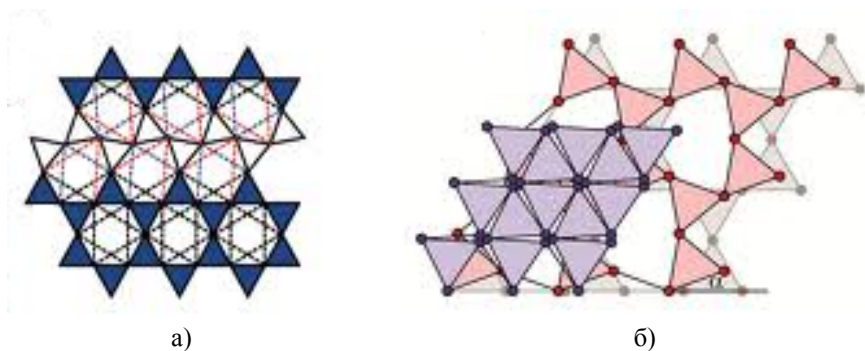
**Обертові структури (структури обертання).** Цей вид структур знайшов своє розповсюдження для досягнення аукзетик-ефекту в пінах [101] та сітчастих полімерах гіпотетичних наноструктур [107] шляхом поєднання трикутників (рис. 1.26) [108], квадратів (рис. 1.27) [107], прямокутників (рис. 1.28) [109] та тетраедрів [127] у певних вершинах. З'єднання може виконуватися шарнірно або за рахунок пружин. Аукзетик-ефект досягають обертанням трикутників, квадратів, прямокутників та тетраедрів при навантаженні.

Механізм структури, яка утворена поєднанням трикутників і яку зазвичай називають зіркоподібною, представлено на рис. 1.29. Модуль Юнга цієї структури становить [128]:

$$E = \frac{4\sqrt{3}K_h}{a^2 \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) \right]}, \quad (1.26)$$

де  $a$  – довжина сторони;

$K_h$  – сила, яка необхідна для розкриття системи на кут  $\theta$ .



а) б)  
 Рис. 1.26. Геометрична модель обертової структури з трикутників

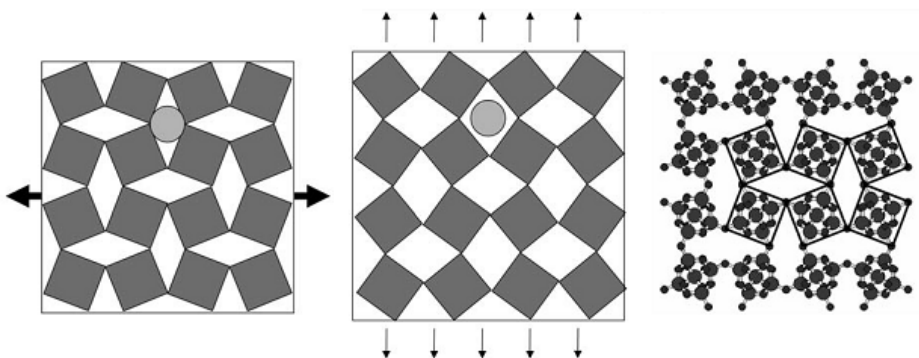


Рис. 1.27. Геометрична модель обертової структури з квадратів

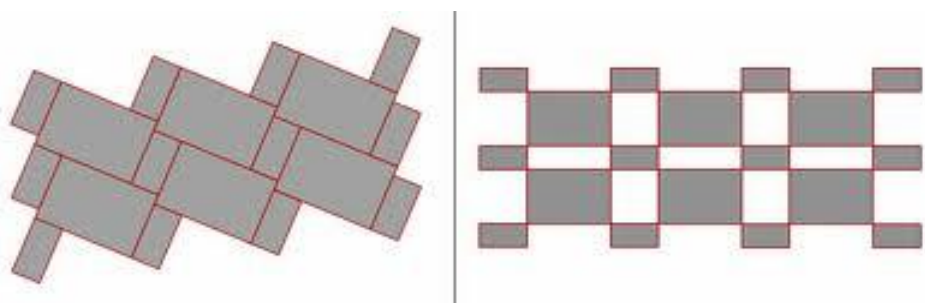


Рис. 1.28. Геометрична модель обертової структури з прямокутників

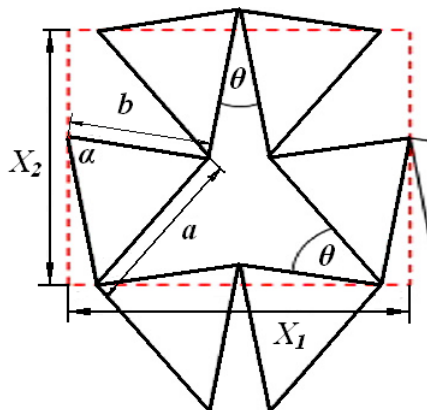


Рис. 1.29. Базова модель зіркоподібної структури, яка утворена трикутниками

Використовуючи основи тригонометрії, встановлюємо рівняння довжин

$$X_1 = 2b \sin\left(\alpha + \frac{\theta}{2}\right) + 2a \sin \frac{\theta}{2}, \quad (1.27)$$

$$X_2 = -2a \cos\left(\alpha + \frac{\theta}{2}\right). \quad (1.28)$$

У цій системі ні модуль Юнга, ні коефіцієнт Пуассона не залежать від напрямку прикладення зусилля, оскільки розвиток зіркоподібних структур відбувається в напрямку використання рівнобедрених трикутників. Для такої системи коефіцієнт Пуассона становить:

$$v_{21} = v_{12}^{-1} = \frac{b \cos\left(\alpha + \frac{\theta}{2}\right) + a \cos \frac{\theta}{2}}{b \sin\left(\alpha + \frac{\theta}{2}\right) \tan\left(2\alpha + \frac{\theta}{2}\right) + a \sin \frac{\theta}{2}}. \quad (1.29)$$

Отже, змінюючи довжину  $a$  та кут розкриття  $\theta$ , можна змінювати коефіцієнт Пуассона в широких межах.

При використанні для основи структури жорстких квадратів було побудовано модельну систему, досягнення якою від'ємного значення коефіцієнту Пуассона можливе за виконання наступної умови [97]:

$$CC_1^2 \operatorname{tg}^2(2\beta) + 4CC_2^2 + 16C_1C_2(2C_2 - C_1)A^2 < 0, \quad (1.30)$$

де  $C$  – потенціал, який визначає обертання часточок;

$C_1$  – жорсткість зв'язку, яка поєднує вершини часток;

$C_2$  – жорсткість зв'язку, яка поєднує центри мас часток;

$\beta$  – кут повертання системи координат;

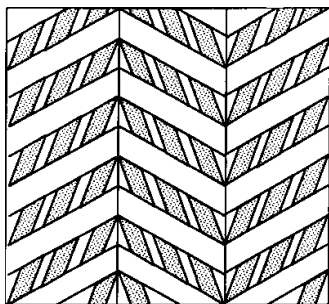
$A$  – коефіцієнт, який визначається за формулою  $A = \frac{\sqrt{2}}{2} a \sin \alpha$  ;

$a$  – розмір часток;

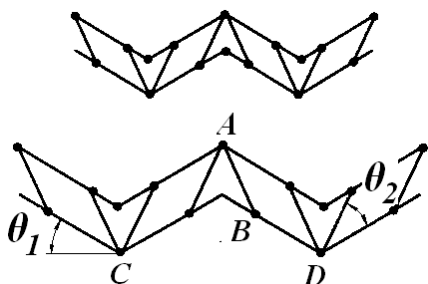
$\alpha$  – кут орієнтування часток.

**Ламінати кутового згину.** Для отримання аукзетик-властивостей в композиційних матеріалах було розроблено ламінати кутового згину [112,113,129]. Прикладом такої структури може бути двофазний композиційний матеріал [112], який складається з жорстких включень та піддатливої матриці (рис. 1.30.а). Заштрихованими ділянками показана піддатлива фаза, яка моделюється розтягуванням жорстких стержнів [129]. Це легко досягається за рахунок додаткового елемента, який переміщується всередині кожного стрижня, збільшуючи за потреби його довжину. Крім того, кожен зі стрижнів може бути замінено парою жорстких паралельних стрижнів, які скріплені двома трикутними зв'язками для запобігання ковзанню одного відносно іншого. Заповнення пустот, які сформовані стрижнями, пружним матеріалом призводить до утворення складної аукзетик-структури, характеристикою якої є параметри кутів  $\theta_1$  та  $\theta_2$ .

На рис. 1.30.б представлено геометричну модель, яка ілюструє деформацію такої структури. За дуже незначних деформацій зростання ширини АВ прямо пропорційне збільшенню довжини CD. Таким чином сандвіч-композиційні матеріали на базі таких структур матимуть аукзетик-властивості.



а) у вільному стані

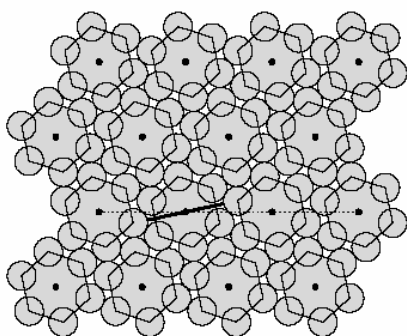


б) при одновісному навантаженні

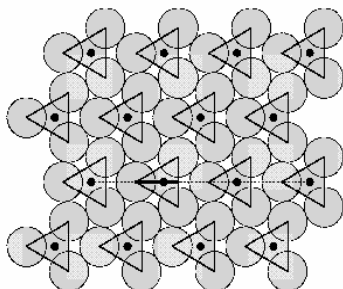
Рис. 1.30. Геометричні моделі плоскої структури з кутowymi згинами

**Жорсткі молекули.** Структури, основою яких є жорсткі "вільні" молекули [114–119], націлено на вибір такої міжмолекулярної взаємодії, яка забезпечує отримання термодинамічно стійкої еластичної ізотропної ауксетик-фази у системі взаємодії часток.

Так, «молекулярна» модель циклічного гексаедра (рис. 1.31) була отримана [114, 116] і доведено, що його фаза, в якій коефіцієнт Пуассона приймає від'ємне значення, термодинамічно стійка в широкому діапазоні щільності за плюсових температур. Від'ємне значення коефіцієнту Пуассона цієї системи, на відміну від інших, залежить лише від потенціалу міжмолекулярної взаємодії.



а) циклічний гексаедр

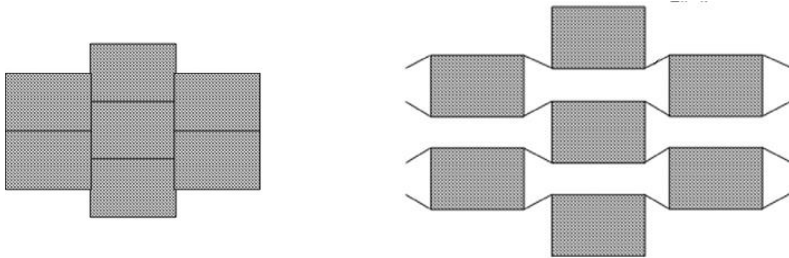


б) циклічний тример

Рис. 1.31. Геометрична структура з від'ємним коефіцієнтом Пуассона у щільному стані

**Мікропориста модель полімеру.** Особливості такого полімеру [6, 30] можна представити у вигляді простої плоскої

структури (рис. 1.32). Вона складається з прямокутних вузлів та пружних фібрил. Деформація такого матеріалу викликає два протилежних процеси: бокові зміщення вузлів та обертання фібрил, що в сукупності призводить до від'ємного значення коефіцієнту Пуассона.



а) у вільному стані

б) при одновісному навантаженні

Рис. 1.32. Геометрична модель мікропористої структури полімеру

**Рідкокристалічна модель полімеру** в загальному вигляді основана на використанні в якості шаблону реентерабельної макроскопічної структури. Аукзетик-поведінка таких моделей була прогнозована [51, 130], але вони не були отримані через складнощі у поперечних зв'язках. Групою науковців [45, 46] запропоновано шлях для реалізації такого рідкокристалічного полімеру (рис. 1.7). Цей рідкокристалічний полімер являє собою ланцюг з жорстких молекул (стрижні), які зв'язані гнучкими групами вздовж всієї довжини ланцюга. Гнучкі групи зв'язані зі стрижнями повністю або частково. У вільному стані всі стрижні орієнтовано вздовж ланцюга, а під дією розтягуючих зусиль відбувається поворот стрижнів, внаслідок чого проявляються аукзетик-властивості таких полімерів.

#### **1.4. Текстиль – основа композиційних матеріалів**

Композиційні матеріали виготовляють як мінімум з двох компонентів: матриці та елементів армування. Елементи армування забезпечують необхідні механічні властивості композиту (міцність, жорсткість тощо), а матрицю використовують для зв'язування і фіксації структур армування, яка забезпечує спільну роботу всіх елементів структури. Окремою великою групою зазвичай виділяють композити, в яких як елемент армування використано



волокнистий матеріал – текстильні композиційні матеріали [131]. Текстильні структури забезпечують необхідні механічні властивості, такі як тріщиностійкість та ударостійкість; смоли, що становлять матрицю цих композитів, використовують для забезпечення сили когезії.

Для використання в композиційних матеріалах розроблено та виготовлено різноманітні спеціальні типи волокон. Основні властивості сировини, які визначають їхнє використання – високі розривна міцність та модуль пружності. Серед відомих на сьогодні типів волокон найбільше використовують для зазначеного асортименту скловолокна, вуглецеві волокна, поліестер та поліамід високої міцності, а також арамідні волокна.

Різнорманітні текстильні матеріали та форми використовують як заготовки (преформи) та арматуру для композитів, а переваги текстильних композитів широко відомі і використовують для задоволення відповідних вимог. Найчастіше текстильні преформи класифікують за напрямком розташування армуючих волокон [132]: 1D, 2D, 2.5D або 3D. Одномірні преформи включають скручені і нескручені джгути волокон та пряжу. Загальноприйняті тканини та в'язані полотна вважають двомірними, а 2.5D тканини – це ворсові тканини, які також виробляються на звичайному ткацькому або в'язальному обладнанні з використанням додаткової системи ниток, які утворюють ворс.

Загалом, односпрямовані та 2D (двовісні) текстильні тканини є головними структурами, які використовують при створенні композитних матеріалів. Однак спостерігається тенденція до використання 3D-текстильних структур для створення новітніх композиційних матеріалів з поліпшеними властивостями. Тривимірні полотна виробляють сьогодні різноманітними методами – від ручного формування шарів волокон до автоматичних систем, за допомогою яких пряжа та волокна розташовуються в трьох напрямках для формування блочних або циліндричних структур. Після насичення смолою первинну структуру механічно вигинають для отримання необхідної форми. Найчастіше цей метод застосовують при виготовленні вуглецевих композиційних матеріалів, таких як компоненти сопел двигуна ракети та теплозахисних екранів.

Техніка звичайного 2D-ткацтва удосконалюється в напрямку можливості з'єднання додатковими нитками утокових та основних ниток у наскрізному напрямку (Z- напрямком) по товщині полотна, в результаті чого всі три системи ниток переплетені. За рахунок цього отримуємо так звану багатошарову 3D-тканину [133]. Окрім того, завдяки використанню спеціального процесу з'єднання шарів три ортогональних системи ниток можуть бути з'єднані разом, в результаті чого отримують так званий нетканий матеріал. Інші заготовки включають мультиаксіальні багатошарові полотна, структура яких складається з окремих односпрямованих шарів, що прокладені в різних напрямках і зшиті разом шляхом зшивання [134] або зв'язування.

Текстильна промисловість має широкі можливості для вироблення полотен та виробів заданої та близької до заданої форм із застосуванням високоефективних автоматизованих методів шиття, ткацтва, плетіння та в'язання. Завдяки можливості економії витрат і підвищення механічних характеристик, деякі з цих традиційних текстильних технологій застосовують для виробництва елементів армування новітніх полімерних композиційних матеріалів. Технологію трикотажу можна використати для виготовлення композиційних матеріалів заданої форми [135], однак на сьогодні вироблені лише дослідні зразки (Т- подібні з'єднувачі, конуси, труби з інтегрованим фланцем [136, 137] і двотаврові балки [138], лопасті реактивних двигунів [139, 140], наконечник обтічника для реактивного двигуна літака середнього розміру [139], а також медичні протези [142]) для демонстрації зазначеної можливості. Преформи з кулірного трикотажу знайшли застосування як імплантати пластинчастих кісток, де розширюваність заготовки використовують для адаптації її до відповідної кістки [143, 144]. Таке в'язання можливе на плосков'язальних кулірних машинах з контрольованим відбором голок і можливістю зміни структури трикотажу за рахунок переплетень [136, 139]. Для виготовлення 3D- (багатошарового) полотна заданої форми необхідні додаткові голечниці [138, 139]. Однак ця технологія не отримала поки що широкого застосування з огляду на високу вартість обладнання та необхідності розробки відповідного програмного забезпечення.

Використання тканих матеріалів при виробленні композиційних структур обмежується трьома їхніми головними недоліками [145]:

1. У процесі ткацтва при переплетенні ниток виникає їх вигин в площині, яка перпендикулярна площині полотна і саме тому весь потенціал міцності пряжі та ниток не може бути використаний при розтягуванні композиційного матеріалу, тобто характеристики міцності композитів знижуються.
2. Являючись двовимірними структурами, в яких пряжа зорієнтована під кутом  $0^\circ$  та  $90^\circ$ , ткани полотна протистоять навантаженням, які прикладаються в напрямку однієї з систем ниток. Навантаження, яке прикладено в будь-якому іншому напрямку, легко деформує структуру. Так зусилля зсуву, яке прикладено до структури, підсиленої тканим матеріалом, не сприймається елементом підсилення, в результаті чого відбувається руйнування.
3. Деякі високомодульні волокна надзвичайно крихкі і легко руйнуються в процесі ткацтва, що знижує експлуатаційні властивості тканин.

В'язання як кулірне, так і основов'язання є альтернативою ткацтва при отриманні більш пористих та податливих (гнучких) полотен. Використання трикотажних преформ було обмежено через їхню прогнозовану здатність до розширювання і нестабільність структури. Однак останнім часом їм приділяється все більше уваги завдяки їхній високій пластичності і здатності до формування 3D-форм [146]. Висока розширюваність, що перед цим вважалася недоліком, має переваги при виробництві складних композитних деталей [147]. На додаток, при використанні трикотажних структур в термопластичних і термореактивних армованих жорстких композитах такі преформи використовують для посилення еластомерів.

Трикотажний спосіб виробництва найкраще підходить для швидкого виготовлення елементів складної форми через низький опір деформації трикотажу [148]. Крім того, сучасні в'язальні машини адаптовано до використання різних типів волокон, включаючи скляні, вуглецеві, арамідні і навіть керамічні, для виробництва як плоских тканин, так і об'ємних форм. Заготовка

формується в міру необхідності і консолідується в композиційні матеріали шляхом використання відповідної рідкої формувальної смоли.

Очевидно, що використання заготовок, які вже мають відповідну форму, є вигідним завдяки мінімальним втратам матеріалу і скорочення часу виробництва [136]. Однак розробка і виготовлення трикотажної заготовки заданої форми може виявитися трудомістким і дорогим процесом, таким чином цей варіант може виявитися економічно неефективним в цілому.

У таких випадках плоске трикотажне полотно з високим показником здатності до формування/драпірування можна використовувати для створення заготовки необхідної форми з подальшим наповненням відповідним компонентом для отримання композиційного елемента конструкції [149].

Незважаючи на виняткову пластичність трикотажних композиційних матеріалів, вони мають дещо нижчі показники механічних властивостей в площині в порівнянні з більш традиційними композитами і матеріалами [150–154]. Це є результатом обмеженого використання жорстких волокон і зменшення міцності ниток у в'язаній структурі в результаті їх значного вигину. Крім того, під час процесу в'язання волокна та нитки дещо втрачають якість, що також може погіршити механічні властивості полотен [152].

Механічні властивості трикотажних композитів у площині, як правило, анізотропні [150,153, 155–158]. Це є результатом різної відносної орієнтації волокон в структурі трикотажного полотна [155,157], а отже, залежить як від структури трикотажу [150,156], так і від його параметрів, таких як щільність [154,159]. Структуру трикотажу можна контролювати не тільки під час вибору переплетення, але також шляхом вибору способів формування та їх кількості і, таким чином, змінювати відносну орієнтацію волокон перед просочуванням смолами [160]. Аналогічним чином властивості трикотажного композиту можна змінювати за допомогою маніпулювання такими параметрами, як довжина нитки в петлі або щільність в'язання [156]. Так, жорсткість при розтягуванні і міцність композитів, які армовані трикотажем переплетення міланський ластик, [160] збільшуються при

деформуванні. Крім того, механічні властивості при розтягуванні композитів, виготовлених із застосуванням переплетень міланський ластик, гладь та ластик, покращуються зі зменшенням довжини нитки в петлі та щільності в'язання. Одначе варто відзначити, що трикотажні композити набагато більш ізотропні при стисненні, ніж при розтягуванні [153, 160].

Комплекс властивостей структур трикотажу відображається і в негативному поведженні цих матеріалів. При розтягуванні недолік зазвичай виникає в результаті руйнування волокна в пряжі в точках контакту двох сусідніх петель в петельному стовпчику, які відповідають ділянкам високої концентрації напруги [153,155, 156,160]. Для багат шарового ламінату кінцевим негативним наслідком розтягнення зазвичай передує кілька тріщин у матриці [153]. Тріщини, які ініціюються порушенням зчеплення волокон у пряжі [161] і призводять до порушень рядків та стовпців трикотажних петель, розвиваються поступово з навантаженням, доки не відбудеться остаточний збій у необхідній щільності полотна [162].

Під дією стискаючого навантаження пряжа втрачає міцність на ділянці мінімального бічного опору – в площині палички трикотажні петлі. Справа в тому, що паличка петлі дуже часто вигинається, а не прямо протидіє подальшому вигину, тим самим викликаючи передчасне руйнування волокон [153, 160]. Цей вигин, який згодом викликає порушення зчеплення волокон у матриці, спостерігається макроскопічно у вигляді паралельних рядів тріщини вздовж осі навантаження [153].

Вигнутий характер трикотажної петлі має свої переваги з огляду на механічні властивості трикотажних композитів. Петельна структура таких волокнистих матеріалів гарантує, що трикотажні полотна легко витримують значні кількісні деформації під впливом зовнішньої сили. Їхня пластичність підвищує потенціал трикотажу для рентабельного виготовлення композитів складних і непередбачуваних форм. Ця перевага збільшується з можливістю утворення отворів в композиті ще в процесі в'язання або формування замість утворення їх шляхом вирізання (буріння) у готовому композиті. Напруга у безперервних нитках навколо отвору, який утворений в процесі в'язання, розповсюджується

рівномірно від отвору, що призводить до зміцнення виїмки [163] і власних властивостей [153,154], які є вищими, ніж для композитів із пробуреною свердловиною.

Тривимірний (3D) характер трикотажу також сприяє підвищенню стійкості композиційного матеріалу до утворення тріщин, яка є вищою, ніж у скляних препрегів та тканих термореактивних композитів [164]. Слід зазначити, що різниця у тріщиностійкості між трикотажними і тканими вуглецевими термопластичними композитами менш значна [165]. Тріщиностійкість покращується з кількістю шарів тканини, які використовують у композиційних матеріалах [166]. Варто відзначити, що пошкодження від удару з'являється як ділянка щільних і складних масивів тріщин на поверхні впливу, водночас як на іншому боці вона характеризується безліччю матриць мікротріщин, які генерують в радіальному напрямку від пошкодженої зони. Таким чином зона пошкодження набуває форми трапеції, що зазвичай спостерігається у шаруватих препрегів [167]. Після дії ударних навантажень міцність на стиск трикотажних композитних ламінатів зменшується у відповідності до розміру зони ушкодження, яка, в свою чергу, збільшується пропорційно енергії удару [153].

Як вже згадувалося раніше, петельний характер структури трикотажу впливає на якість трикотажних композитів, які за певними характеристиками поступаються іншим конструкційним матеріалам. Помірного поліпшення міцності і жорсткості трикотажних композиційних матеріалів можна досягнути з включенням протяжок до базової структури [151].

Більш ефективним способом підвищення властивостей трикотажного композита у площині є введення практично прямих, невивгнутих ниток у структуру трикотажу [152,157,168,169]. Ці прямі нитки (волокна) вводять під час в'язання як утокові в структуру кулірного або основов'язаного трикотажу. Таким чином отримуємо матеріал, в якому забезпечується оптимальне поєднання поліпшених механічних властивостей (у зв'язку з наявністю прямих волокон) і гарної здатності до формування (за рахунок структури трикотажу) [170,171]. Надалі за рахунок введених ниток можна змінювати анізотропію трикотажних композитів відповідно до

конкретних вимог. Тоді як міцність на розрив, жорсткість і здатність до поглинання енергії трикотажних композитів дуже залежать від вмісту волокна, встановлено [155,157,169], що за постійної об'ємної частки волокна введення утоківих ниток у структуру може значно поліпшити властивості матеріалів за умови, що нитки не завиті та гарно орієнтовані.

Кулірний трикотаж з поперечними утковими нитками виготовляють на плосков'язальних машинах, які мають пристрій для безперервної і поступової подачі ниток безпосередньо до голечниці перед кожною петлетвірною системою таким чином, щоб нитка була замкнена всередині петлі. Останніми роками [172,173] виготовлено низку багатошарових багатівісних кулірних полотен з поперечними і повздовжніми утковими нитками. Ці трикотажні полотна виготовляють на модифікованій плосков'язальній машині, яка має додаткові нитководи для прокладання уткової нитки поперек полотна та спеціальні гребінки для введення повздовжніх ниток. На сьогодні немає практичної можливості ввести уткову нитку по діагоналі кулірного полотна, проте теоретично це можливо досягти. Такі багатошарові кулірні трикотажні полотна в принципі дуже схожі на основов'язані аналоги. Крім того, в процесі виготовлення кулірного трикотажу пряжа та нитки витримують менші навантаження [173], ніж при основов'язанні, а форма майбутньої заготовки може бути надана безпосередньо в процесі в'язання.

Альтернативою кулірним трикотажним полотнам з утковими нитками є введення утоківих ниток в структуру основов'язаних трикотажних полотен на рашель-машинах [168, 174]. Такі полотна мають типову основов'язану структуру, в якій між петельними стовпчиками розташовують нитки практично без вигинів в площини. Повздовжні уткові нитки фіксують у структурі за допомогою протяжок петель основного переплетення. Поперечні уткові нитки в структуру основов'язаного полотна вводять за допомогою спеціального нитководу, який може прокладати нитки на всю ширину полотна [171]. При цьому основов'язані полотна мають більшу гнучкість до використання в якості утоківих різного типу та кількості ниток, які водночас прокладаються і необхідні для

отримання оптимального полотна з точки зору витрат і продуктивності [168].

Технологія основ'язання широко використовували для введення як поперечного утоку смуги термопластичної плівки при виробництві так званого спліт-трикотажу [171,175]. Спліт-трикотаж було винайдено для створення досить великих проміжків між прямими скляними плівками, особливо в біаксіально армованих композитах. Розвиток цих тканин спрямовано на високу швидкість техніки та великі обсяги виробництва композитних компонентів. Смужки поліпропіленової і поліетилен-терефталатної плівки використовують замість волокон, щоб зберегти низьку вартість і звести до мінімуму крутіння уткових ниток, які виникають через невідповідність у коефіцієнтах теплового розширення між термопластиком і склом. Отримання необхідної форми здійснюється за загальновідомими технологіями. Однак, залежно від ступеня нагріву, такі композити мають дещо нижчі механічні властивості [176] при значно вищій пористості і менш рівномірному розподілу волокон [177]. При цьому спліт-трикотажні композити мають властивості розтягнення і вигину, що практично аналогічні властивостям еквівалентних тканих композитів [177]. Незважаючи на те, що уткові нитки абсолютно прямі і без вигинів, такі полотна все ще залишаються двомірними структурами і протистоять навантаженням лише в двох напрямках.

З іншого боку, трикотажні петлі можна використовувати лише для скріплення ниток (пряжі), які розташовують під різними кутами, в результаті чого отримуємо мультиаксіальні багат шарові основ'язані полотна (стільнікові) [178]. Механічні властивості таких композитів значно кращі, ніж звичайних трикотажних композитів, проте спостерігається значне зниження їхньої здатності до формування.

Переваги мультиаксіальних тканин є наступними:

- зменшення кількості шарів матеріалу та оптимізація процесу вироблення композиту;
- армування композиційного матеріалу в різних напрямках;
- скорочення витрат смоли до 20–30%: за рахунок відсутності переплетення ниток досягається щільніше укладання пряжі та менший опір течії зв'язуючого;



- скорочення кінцевої ваги композита до 50%.

Існують три основні типи обладнання для виробництва мультиаксіальних полотен [179]: Karl Mayer, Liba (Corcentra) і Малімо (Maschinenbau). Головний принцип системи Карл Майер полягає у прокладанні поперечних утокових ниток за допомогою спеціальних спрямовуючих, які мають обертальний рух, що дозволяє розташовувати утокові нитки в структурі з відхиленням від осі на кут між  $30^\circ$  і  $60^\circ$  [180]. Слід зазначити, що полотна, які отримані з використанням цієї методики, мають відносно відкриту сітчасту структуру [181].

За допомогою системи Ліба [181, 182] отримують полотна, в яких утокові нитки для армування прокладено в чотирьох напрямках: вздовж ( $0^\circ$ ) і поперек ( $90^\circ$ ) полотна, а також під кутами  $30^\circ$  і  $60^\circ$  [181, 183]. Також як один або кілька шарів можуть застосовувати неткані полотна, скломат, плівку та інші матеріали. У базовому варіанті установка має 3 утокові системи з подаванням ґрунтових ниток, одним пристроєм подачі повздовжніх утокових ниток та пристроєм для подавання нетканого полотна знизу. Можливим є розширення установки до 7 універсальних утокових систем. Шари нетканого матеріалу або скловолоконної крихти можна прокладати на лівій або правій стороні полотна або між шарами утокових ниток.

Ця багатошарова конструкція з'єднується основов'язаним переплетенням, внаслідок чого можуть виникати перекоси, вигин ниток у товщині і утворюватися незначні отвори [184]. Для усунення цього недоліку пазові голки працюють за принципом крокуючих голок, який полягає в горизонтальному русі фонтури з пазовими голками додатково до звичайного руху вгору-вниз у фазі проколу. Після скидання петель голечниця повертається в своє вихідне положення.

У системі Малімо паралельні утокові нитки прокладають за допомогою спрямовуючої каретки [182], яка безперервно рухається з одного краю полотна до іншого, що може призвести до незначного, залежно від щільності утоку [180] відхилення  $2^\circ$ – $5^\circ$  [185], в орієнтації утокової нитки під  $90^\circ$ . Решту волокон розташовують під кутом  $0^\circ$ – $80^\circ$ , залежно від вимог, за допомогою спеціальних спрямовуючих. Незважаючи на можливі відхилення від

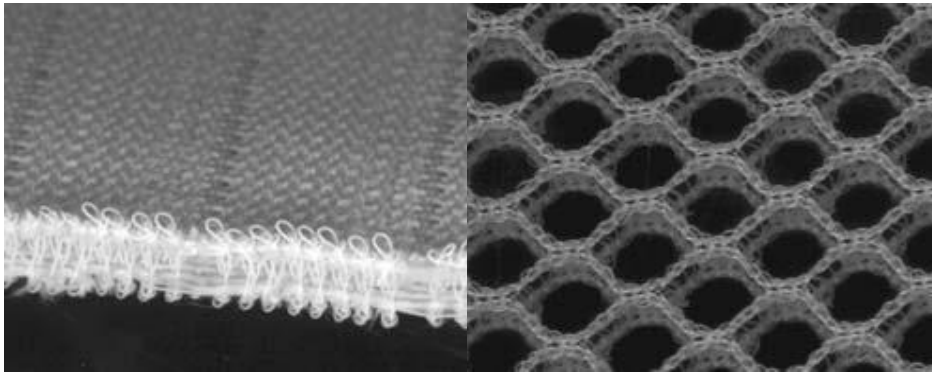
2° до 8° відносно 45° [179], цей механізм дозволяє досягнути зигзагоподібне положення ниток, а також інші моделі армування в мультиаксіальній тканині [183, 185]. Як і в системі Ліба, об'єднані шари волокон утримуються разом за допомогою трикотажно́ї структури. Однак, на відміну від системи Ліба, система Малімо дозволяє контролювати отвори між нитками, які виникають під час в'язання. Тим не менше, ці отвори можуть сприяти захопленню повітря [150] і утворенню великих збагачених смолою поверхонь [184] під час консолідації.

Основні переваги, які послужили поштовхом для розвитку мультиаксіальних тканин, є наступними: на відміну від багат шарових тканин заготовок, матеріал має рентабельне неаксіальне зміцнення; водночас він дає можливість значно знизити собівартість продукції за рахунок короткострокового формування заготовки [186]. Крім того, перевага основов'язаних полотен перед тканими полягає в тому, що утокові нитки в полотні лежать рівно, а не переплетені. Таким чином, основов'язані матеріали можуть сприймати розтягуючі зусилля вже при незначних подовженнях. Затримка сприйняття зусиль розтягування, яка існує у тканин у результаті переплетення, зводиться до мінімуму.

Окремою групою серед текстильних заготовок для композиційних матеріалів виділяють так звані сандвіч-структури. Виробництво 3D-трикотажних сандвіч-преформ є відносно новим напрямком [180,187-190]. 3D-трикотажні преформи мають два зовнішні шари, які інтегрально з'єднані між собою за допомогою додаткових ниток. Вони можуть бути як закритими, так і відкритими (рис. 1.33) Їхнє застосування розширюється не тільки завдяки кращим властивостям та економічній ефективності, але й у зв'язку з кращими здатністю до формування і можливістю поглинання енергії.

Ці заготовки виробляють на подвійних рашель-машинах, на кожній з голечниць якої два зовнішні шари в'язуються водночас. При цьому є можливим вироблення різних переплетень на різних голечницях, тобто зовнішні шари за необхідності можуть мати різну структуру. Пряжа подається в зону в'язання за допомогою двох гребінок, які періодично подають її до різних голечниць, в

результаті чого зовнішні полотна з'єднуються між собою. Таким чином, ворсові волокна є частиною зовнішніх шарів, що сприяє інтегруванню властивості зовнішніх шарів у сандвіч-структуру. Крім того, не потрібна додаткова фіксація цих волокон у структурі, що значно знижує загальну вартість таких сандвіч-структур [187, 188, 190]. 3D-трикотажні сандвіч-структури, як і очікується, мають вищу здатність до формування, ніж багато інших традиційних сандвіч- матеріалів, зокрема 3D-інтегровані ткани сандвіч-панелі [190].



**а. закрита**

**б. відкрита**

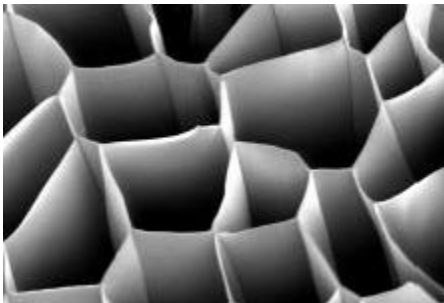
**Рис. 1.33. 3D-трикотажні сандвіч-преформи**

Дослідні роботи з цього напрямку показали, що властивості тиску та вигину дуже залежать від властивостей поверхневого шару, на які, в свою чергу, впливають структура чарунок, ступінь просочення смолою і щільності ворсу [187]. На додаток, щільність композитів і орієнтація волокон, яка є функцією напрямку навантаження і яка може бути змінена шляхом деформації заготовки, впливають на міцність на вигин синтезованих композитів [188]. У порівнянні зі спіненими матеріалами, 3D-трикотажні сандвіч-структури співставні з поліметилакрилимидною піною за жорсткістю на згин і міцністю на стиск та до полістиролу за здатністю поглинання енергії [187].

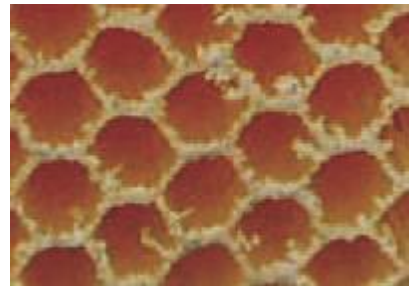
Останніми роками науковці та розробники все більше уваги приділяють 3D-стільниковим конструкціям [191]. Загальна структура стільника складається з масиву гексагональних чарунок. Чарункова структура утворюється з шести сторін. Вільні стіни

належать до автономних сторін, тоді як з'єднані сторони мають бути з'єднані разом для утворення чарунчастого поперечного перерізу. Параметри, які використовуються для опису чарунки: кут відкриття, товщина і довжина сторін, а також її висота.

3D-стільникові структури, які існують в природі, починаючи від колючок дикобраза до стебла очерету, мають багато особливостей, які важливі при використанні композитів у багатьох сферах [192]. Композити, які виготовлені з текстильної арматури 3D-стільникового типу, суперлегкі, об'ємні та міцні, а також мають високу енергопоглинаючу здатність [193]. Є багато природних і сконструйованих 3D-стільникових структур. Відповідно до форм стільникової структури, вони можуть бути розділені (рис. 1.34) на регулярні (де кожна клітинка є симетричною по горизонталі і вертикалі) і нерегулярні. 3D-стільникова структура може розрізнятися за кількістю чарунк в його більш довгій або коротшій колонці.



**а. нерегулярна**



**б. регулярна**

**Рис. 1.34. Регулярність стільникоподібної структури**

Стільникові конструкції можуть бути виготовлені різними способами, але перевагу надають текстильним структурам завдяки їхній легкій вазі і безперервності волокон упродовж усієї структури [194, 195]. Багато досліджень механічних властивостей 3D-стільникових конструкцій проведено останніми роками, в тому числі дослідження відновлення після стиснення і міцності структури як в площині, так і по товщині [196–198]. Було зроблено висновок [199], що найважливі застосування чарункових структур, включаючи стільники, є пристрої для поглинання енергії і в якості основних сандвіч-панелей.

Асортимент та сфери використання таких і подібних їм матеріалів можна значно розширити за рахунок використання аукзетик-матеріалів.

### **1.5. Текстильні аукзетик-матеріали**

Новим напрямком створення аукзетик-матеріалів є виробництво аукзетик-текстильних матеріалів зі звичайних ниток [200]. Цей спосіб має суттєві переваги, які пов'язані з вилученням стадій заключної обробки матеріалів або обробки нетрадиційними методами, тобто дозволяє економити кошти, які необхідні на ці переходи [201].

Як вказано в п.1.1, гвинтову аукзетик-пряжу отримують шляхом поєднання двох волокнистих компонентів у подвійній спіралі [202]. Для оптимального функціонування цієї пряжі запропоновано використати компоненти, які відрізняються модулем пружності та діаметром. Більш товща пряжа (серцевина) низького модуля пружності обкручується тонкою жорсткою пряжею. У врівноваженому стані діаметр комплексної нитки практично дорівнює діаметру серцевини. При прикладенні зусилля в поздовжньому напрямку жорстка пряжа, яка обкручена навколо товстої серцевини, вирівнюється. Внаслідок невеликої жорсткості серцевина зміщується в поперечному напрямку, значно збільшуючи діаметр комплексної нитки. При повному випрямленні пряжі обкручування маємо максимальний аукзетик-ефект – пряжі міняються місцями.

Після зняття навантаження внаслідок власних сил пружності обидві пряжі повертаються у початковий стан за умови, що не була перевищена межа пружності. Аукзетик-ефект можна контролювати шляхом вибору діаметра та виду ниток, умов скручування, а також величини навантаження, яке прикладається [203]. Перевага такої комплексної пряжі полягає як в простоті її отримання шляхом скручування двох компонентів, так й у відносній легкості її подальшого використання.

Геометричні параметри гвинтової аукзетик-пряжі представлено на рис. 1.35. Початкові діаметри серцевини та нитки обкручування визначено як  $D_c$  та  $D_w$  відповідно, а ефективний діаметр комплексної пряжі –  $D_e$ . Частота обкручування може

визначатися як кутом нахилу нитки обкручування  $\theta$ , так і кроком обкручування  $\lambda$ . Зазвичай через простоту практичного вимірювання досліджується крок обкручування, на підставі чого визначається кут нахилу.

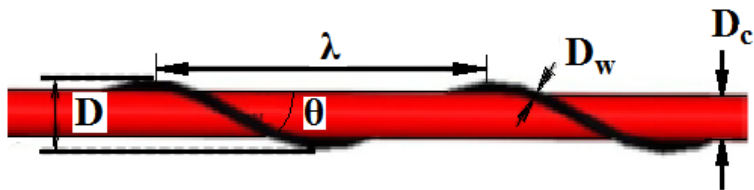


Рис. 1.35. Геометричні параметри гвинтової аукзетик-пряжі

Використовуючи основи тригонометрії, отримано [203] взаємозв'язок

$$\lambda = \frac{\pi(D_c + D_w)}{\operatorname{tg} \theta}. \quad (1.31)$$

Це рівняння дозволяє розрахувати необхідний крок обкручування для заданих параметрів ниток, які використовують для виробництва пряжі, та необхідного/бажаного кута обкручування, що використовується у виробничому процесі для отримання заданої геометрії комплексної пряжі. Напруга в нитках залежно від прикладеного навантаження розраховується виходячи з площ поперечників ниток за нульової деформації. У цьому випадку переріз серцевини приймається круглим, а нитки обкручування – еліптичним. Таким чином, площа поперечників визначається за формулами:

$$A_c = \frac{\pi D_c^2}{4} \quad \text{та} \quad A_w = \frac{\pi D_w^2}{\cos \theta}. \quad (1.32)$$

У процесі розтягування під дією напруги змінюється положення ниток, а, відповідно, й змінюються їхні перерізи: переріз серцевини приймає еліптичну форму, а переріз нитки обкручування навпаки – круглу. Коефіцієнт Пуассона такої пряжі визначається за формулою [204]:

$$v = - \frac{(D_e + D_{e0})/D_{e0}}{(L + L_0)/L_0}, \quad (1.33)$$

де  $D_e$  – ефективний діаметр гвинтової аукзетик-пряжі при розтягуванні, мм;

$D_{e0}$  – ефективний діаметр гвинтової аукзетик-пряжі у вільному стані, мм;

$L$  – довжина гвинтової аукзетик-пряжі при розтягуванні, мм;

$L_0$  – довжина гвинтової аукзетик-пряжі у вільному стані, мм.

Докладний параметричний аналіз пряжі проведено на дослідних зразках, що представлено в роботі [205]. Було використано чисельні методи для вивчення впливу властивостей матеріалу і геометрії гвинтової аукзетик-пряжі на процес її розтягування. На додаток був визначений вплив конструкції компонентів комплексної пряжі на коефіцієнт Пуассона та встановлено залежності аукзетик-фаз від напруги розтягування. Встановлено [203], що вихідний кут обкручування є головним фактором, який визначає аукзетик-поведінку гвинтової аукзетик-пряжі з огляду як на величину коефіцієнту Пуассона, так і діапазону деформації, в якому він приймає від’ємне значення.

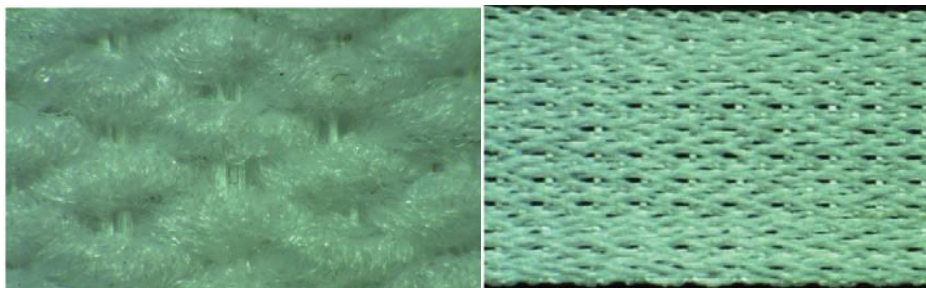
У роботі [203] детально описано обладнання та методики для практичного отримання пряжі з акцентом на більш жорсткі пряжі для використання при більш високому модулі пружності у композитах.

Джуліан Райт та інші [205] спроектували та дослідили гвинтові аукзетик-пряжі, що мають низьку жорсткість або модуль пружності при розтягуванні, а отже, їх можна використовувати для медичного застосування, особливо для бинтів, компресійних виробів та підтримуючого одягу з динамічною жорсткістю, а також у виготовленні модного одягу. Ці гвинтові аукзетик-нитки особливо добре підходять для використання у тканинах, хоча можуть використовуватися і у трикотажному виробництві. Вузькі тканини полотняного переплетення, які вироблені з використанням розробленої пряжі, демонструють потовщення при розтягуваннях, що є свідченням від’ємності коефіцієнта Пуассона поза площиною тканини [204]. Шанахан зі співаторами [206] також виявили

аукзетик-ефект в товщині тканини. Вони повідомили про теоретичну аукзетик-поведінку, яка присутня в ефективній товщині тканини внаслідок геометричного ефекту тканної структури і модуля ниток.

Міллер та інші [207] виготовили гвинтові аукзетик-пряжі і використали їх у простих тканих структурах для виробництва аукзетик-текстилю, який в подальшому був використаний для виготовлення аукзетик-композиту з низьким модулем за стандартними технологіями виробництва. Як показано на прикладах вище, об'єднання двох або більше багатОВОЛОКОННИХ конструкції відповідним чином забезпечує отримання аукзетик-структур.

Хук [208] запатентував тканину пористу тканину, яка містить в якості основи безліч пар сусідніх гвинтових аукзетик-ниток із дзеркальним розміщенням спіралей. Утокові волокна, що з'єднують основні нитки, можуть бути аукзетик або ні. Гвинтові аукзетик-нитки, які забезпечують збільшення ефективного діаметра композиційної нитки під напругою, тим самим надають тканинам ефект розкриття пор (рис. 1.36).



**а. у звичайному стані**

**б. при розтягненні**

**Рис. 1.36. Тканий матеріал з гвинтовою аукзетик-пряжею як ниткою основи**

Аукзетик-пряжу, яка має коефіцієнт Пуассона  $-1,5$ , використовували як основні нитки при виробленні тканин [205]. Виявлено вплив кута охоплення на властивості пряжі та ефект відкриття пор у тканині; встановлено, що коефіцієнт Пуассона тканини досягає  $-0,1$  і може бути збільшений за рахунок використання цієї пряжі як уток, а також шляхом створення 3D-ефектів.



При виборі відповідних матеріалів і геометрії ниток серцевини та обкручування для гвинтової аукзетик-пряжі та структури тканини можна розробити систему, яка показує залежність модуля пружності при розтягуванні і коефіцієнта Пуассона від деформації. Крім того встановлено [204, 208], що аукзетик-нитки та тканини з них змінюють колір у процесі розтягування, що дозволяє використовувати їх як індикатори напруги, наприклад, в бандажних виробках. Ефект відкриття пор також застосовують у фільтрації, коли масштабування навантаження розтягнення або стиснення служить інструментом зміни розміру отворів з метою контролю процесу [207, 209].

Хук [208] також застосував такі волокна при виготовленні пористого матеріалу, який використаний для розсіювання енергії від вибухів. Пористий матеріал, який містить безліч шарів з аукзетик-пряжі, робить можливим ефективне розсіювання енергії крізь шари і порожнечі між ними, які зростають при збільшенні енергії вибуху, що значно пом'якшує вибуховий ефект. Інша можлива сфера застосування аукзетик-текстильних матеріалів полягає в здатності вивільнення певних речовин, наприклад, антиперспірантів, які містяться в порах матеріалу і виділяються при розтягуванні одягу внаслідок відкриття пор [200]. Інші можливі речовини, які може містити пористий матеріал, представлено широким спектром антибактеріальних, протигрибкових, противірусних агентів тощо [204].

У порівнянні з патентом [207], в якому описана плоска текстильна структура, що утворена з двокомпонентної пряжі, в роботах [59, 210] представлено композитні матеріали і структури, які виявляють від'ємність коефіцієнту Пуассона і утворені з аналогічної пряжі з додатковою основною ниткою при мінімальному рапорті обкручування. Основна нитка має бути аукзетик. Структура може також включати в себе матричні компоненти, які контактують з усіма іншими компонентами композиційного матеріалу і підсилюють аукзетик-ефект матеріалу. Як стверджують автори, такий аукзетик-матеріал відносно легко виготовити у відповідності до необхідних структури та властивостей, при цьому він має значний (коефіцієнт Пуассона від 0 до -5) і керований аукзетик-ефект. Таку структуру можна

використовувати при розробці складних форм, які застосовують для забезпечення енерго- та звукопоглинання.

Візуально схожі до описаної [208] структури можуть виявити аукзетик-ефект у результаті інших зовнішніх факторів, а саме псевдорозтягуючого зусилля, яке створено шляхом змочування. Лі зі співавторами [211] описали аукзетик-волокна, що складаються з двох компонентів, одним з яких є чутлива до вологи нитка: вона збігається, коли знаходиться в контакті з вологою. Тому аукзетик-ефект може бути викликано при одночасному впливі деформації і вологи, або одним з цих двох факторів. Матриця з аукзетик-волокон створює ткану структуру таким же чином, як запропоновано у роботі [208], де пара сусідніх волокон має протилежний напрямок спіралей.

Гі та Хью [212] нещодавно представили інноваційну тривимірну структуру матеріалу з від'ємним коефіцієнтом Пуассона для армування композиту [213]. Запропонована 3D-структура складається з трьох систем ниток: ниток основи, утокових ниток та з'єднувальних ниток (рис. 1.37.а). Утокові нитки і нитки основи не переплетені. Для формування комплексної структури тканини вони по черзі розміщуються вздовж двох ортогональних напрямків тканини і зв'язані з'єднувальною ниткою по товщині.



а. у звичайному стані

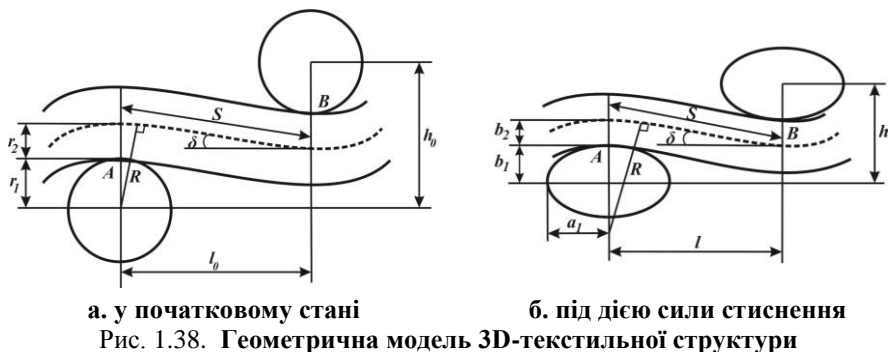
б. при стисненні

Рис. 1.37 Тривимірна (3D) текстильна структура з від'ємним коефіцієнтом Пуассона

Для отримання полотен з від'ємним коефіцієнтом Пуассона в напрямку утоку нитки основи пробираються через одну і розташовуються в сусідніх шарах зі зміщенням на половину товщини пражі. При стисненні в напрямку товщини тканини (рис.

1.37.б) утокові нитки вигинаються, що призводить до усадки структури в утокових напрямках. Водночас нитки основи залишаються прямими, в результаті чого розмір зразка в напрямку основи залишається незмінним. Таким чином, коефіцієнт Пуассона при стисненні цієї структури матиме від’ємне значення в напрямку утоку і нульове – в напрямку основи.

Структура була виготовлена шляхом об’єднання технологій нетканих матеріалів та в’язання [212]. Чотири зразки тканини з різними діаметрами ниток основи вперше було виготовлено вручну. Надалі експериментально було оцінено значення коефіцієнту Пуассона при стисненні в напрямку товщини тканини. Автори запропонували геометричну модель (рис. 1.38) для теоретичного розрахунку коефіцієнту Пуассона цих тканин.



Для спрощення її побудови на підставі аналізу структури вироблених зразків тривимірного текстильного матеріалу в початковому стані і під час випробування на стиск було зроблено наступні припущення:

1. З’єднувальна пряжа не має ніякого впливу на аукзетик-ефект структури і може бути виключена з геометричного аналізу. Довжини обох ниток (основи і утоку) залишаються постійними при стисненні. Між нитками утоку і основи відсутнє прослизання в точках їхнього контакту під час стиснення.
2. У початковому стані перетини як ниток основи, так і утоку є круглими, а під дією сили стиснення змінюються на еліптичну. Водночас ділянки поперечного перерізу залишаються незмінними.

3. Нитки основи завдяки їхній високій жорсткості завжди абсолютно рівні як в початковому стані, так і в процесі стиснення.
4. Утокові нитки не є абсолютно прямими: їхні середні лінії формуються прямими ділянками і частинами кіл (еліптичних кривих), які з'єднані між собою таким чином, що прямі ділянки збігаються з дотичними до кола (еліпсу) в точках контакту.

Грунтуючись на цих припущеннях, з аналізу геометричної моделі виведено [212] систему рівнянь для визначення параметрів  $l_0$ ,  $h_0$ ,  $l$  і  $h$ , відповідно:

$$\left. \begin{aligned} l_0 &= 2(r_1 + r_2) \sin \theta_0 + [S - 2(r_1 + r_2) \theta_0] \cos \theta_0, \\ h_0 &= 2(r_1 + r_2) \cos \theta_0 - [S - 2(r_1 + r_2) \theta_0] \sin \theta_0, \\ l &= 2R \sin \theta + [S - 2R \theta] \cos \theta, \\ h &= 2R \cos \theta + [S - 2R \theta] \sin \theta - 2R + 2b, \end{aligned} \right\} \quad (1.34)$$

де  $r_1$  і  $r_2$  – початкові радіуси ниток основи і утку відповідно;

$\theta_0$  і  $\theta$  – кути нахилу прямої лінії утокової нитки в початковому стані і при стисненні відповідно;

$S$  – довжина утокової нитки, яка залишається постійною під час стиснення;

$R$  – радіус еліптичної кривої утокової нитки;

$b$  – сума малих радіусів  $b_1$  та  $b_2$  еліптичного перерізу ниток основи та утку відповідно.

Коефіцієнт Пуассона структури в напрямку утку можна розрахувати за рівнянням [212]:

$$v = -\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_h} = -\frac{(l - l_0)/l_0}{(h - h_0)/h_0}. \quad (1.35)$$

Порівняльний аналіз розрахункових і експериментальних даних показав добре співставлення результатів. Дослідження показали [212], що спроектовані 3D-тканини виявляють аукзетик-ефект при стисненні в результаті унікальної особливості структури до концентрації під дією стискаючого навантаження з метою кращого опору навантаженню. Ця особливість робить таку 3D-структуру тканини дуже привабливою для потенційного

застосування в багатьох галузях: в автомобільній та авіакосмічній галузях промисловості, у засобах захисту та спортивному обладнанні, де захист від продавлювання є необхідною властивістю.

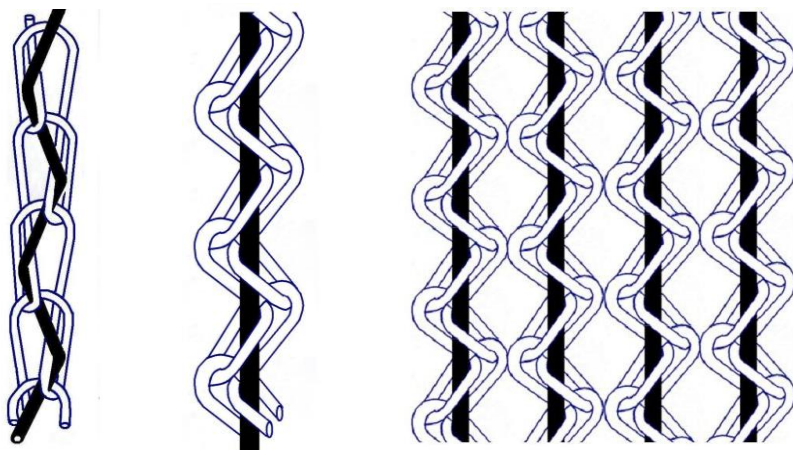
Для вироблення текстильних матеріалів, які мають від'ємний коефіцієнт Пуассона, можна використовувати і звичайні пряжу і нитки, хоча пряжа з аукзетик-властивостями також може використовуватися для їхнього виробництва. Переважна більшість розроблених аукзетик-текстильних матеріалів з пряжі, яка сама по собі не є аукзетик, є трикотажними структурами. Адже процес в'язання є найбільш універсальним методом, який забезпечує різноманітність структур. Існуючі на сьогодні аукзетик-трикотажні матеріали створені на базі як кулірних, так і основов'язаних переплетень.

Угболує зі співавторами [214] використали концепцію, яка розроблена Хуком [210], і створили декілька основов'язаних структур, в яких повздовжня утокова нитка вв'язується за рапортом у переплетення ланцюжок і обвиває протяжки петель (рис. 1.39.а). Утокова нитка закріплюється між протяжкою та остовом петлі. Як утокову нитку використовують жорстку тонку нитку, тоді як для переплетення ланцюжок – товсту нежорстку пряжу. При розтягуванні такого ланцюжка утокова нитка випрямляється, а петлі ланцюжка внаслідок малої жорсткості нитки видовжуються і нахилиються (рис. 1.39.б).

Поєднання кількох таких ланцюжків у певному порядку (рис. 1.39.в) дозволяє створити основов'язане полотно з високими аукзетик-властивостями. Однак для цього необхідно в структуру трикотажу ввести додаткові нитки, наприклад, утокові в поперечному напрямку, що значно впливає на властивості, які проектуються.

Автори [214] розробили основов'язані аукзетик-реентерабельної структури з ромбовидних решіток з вилученими зв'язками, подібні до геометричної моделі (рис.1.21), яку запропонував Сміт [53]. Для її реалізації в основов'язаному трикотажі пропонують використовувати утокові переплетення. Отримані результати [214, 215] показали, що основов'язані полотна, які мають таку структуру, виявляють від'ємність коефіцієнту Пуассона при розтягуванні, тобто є аукзетик. Представлена

теоретична модель реентерабельної структури послужила також основою для науковців [124], які виготовили матеріал з регулярної пластикової сітки точно такої ж мікроструктури.



а. у звичайному стані

б. при розтягненні

в. аукзетик трикотаж

Рис. 1.39. Структура основ'язаного трикотажу на базі переплетення ланцюжок

Останніми роками розроблено та досліджено аукзетик-видозмінені гексагональні основ'язані структури [63, 216, 217], для вироблення яких в структуру базового філейного переплетення в якості повздовжнього утоку вводиться високоеластична нитка для забезпечення необхідної конфігурації отворів після релаксації. Введений високоеластичний компонент впливає на геометричні параметри отворів, які в поєднанні з власними співвідношеннями розмірів сторін визначають від'ємність коефіцієнту Пуассона трикотажу. Зазначено, що аукзетик-властивості залежать від взаємодії вертикальних і горизонтальних ребр чарунок у в'язаній структурі.

Старбак зі співавторами [218] запатентували аукзетик-основ'язані текстильні структури, які складаються з подвійних стрілок або видозмінених трикутників. Як вказувалося вище, така структура матеріалу (рис. 1.17.а) також призводить до аукзетик-ефекту. Коефіцієнт Пуассона визначали при розтягуванні матеріалу під кутом  $-45^\circ$  і  $45^\circ$  до напрямку основи. Його від'ємність  $\epsilon$

результатом деформування стрілок до правильних трикутників унаслідок шарнірного з'єднання між ребрами. У 2010 році Ананд з колегами [219] подали другий, більш детальний патент на цю ж саму тему.

Для реалізації такого текстильного матеріалу його структура повинна мати два компоненти [220]: так званий аукзетик-компонент, що включає форми, які забезпечують аукзетик-властивості, і стабілізуючий компонент, який відновлює тканину після деформації. При цьому аукзетик-компонент повинен мати порівняно вищий модуль жорсткості, ніж стабілізуючий.

У початковій структурі (рис. 1.40.а) роль стабілізуючого компонента виконувало переплетення ланцюжок з відкритими петлями при повному набірні передньої гребінки еластомерними нитками, а аукзетик-компонент формувався двома утоковими гребінками, які були набрані частково поліестеровими мононитками, що прокладали нитки за певним рапортом. Однак дослідження полотен, вироблених на в'язальній машині 18 класу, показали, що структура не має чітко виражених реентерабельних трикутників, як передбачалося. Тому в розроблену структуру ввели додатковий стабілізуючий компонент (передня гребінка) – еластомерну нитку, яка утворювала переплетення трико з закритими петлями при неповному (через одну вушковину) набірні гребінки (рис. 1.40.б).

У результаті отримано більш стабільну по ширині і довжині трикотажну структуру, однак її елементарна ланка все ще не є чітко вираженим реентерабельним трикутником. У наступній структурі (рис. 1.40.в) для забезпечення більшої стабільності в точках з'єднання (в місцях шарнірного кріплення) нитку, яка формує основу трикутників (задня гребінка), прокладали не як утокову, а робили кладку на голку, формуючи при цьому закриті петлі.

Більш ізотропну структуру отримуємо при взаємній роботі гребінок за графічним записом, який представлено на рис. 1.40.г. На відміну від попередніх структур, при прокладанні стабілізуючого компоненту (2 гребінка) використовували не переплетення ланцюжок, а переплетення трико при неповному набірні гребінки. Кладка ниток відбувалася дзеркально кладці передньої гребінки, при цьому в рапорті чергувалися відкриті і закриті петлі.

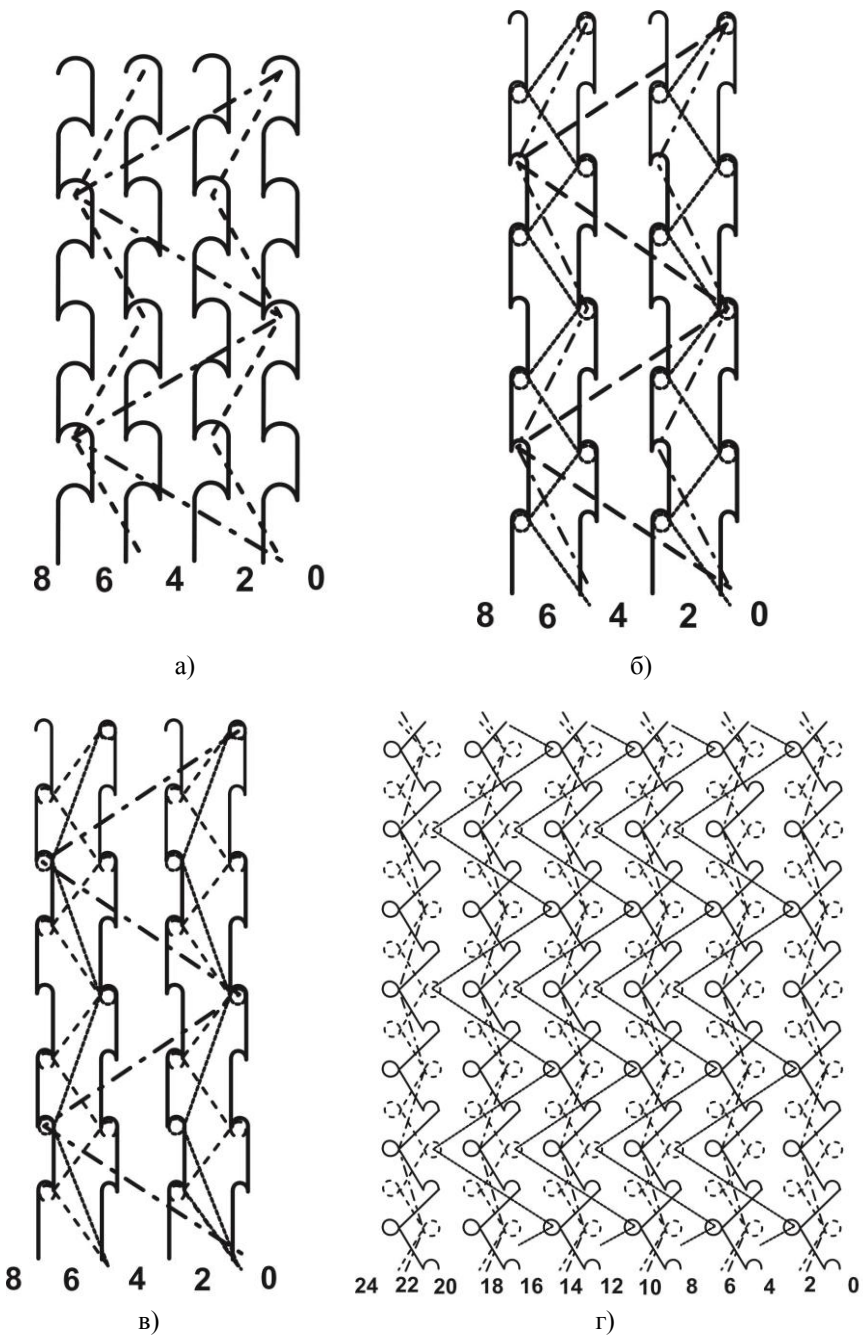
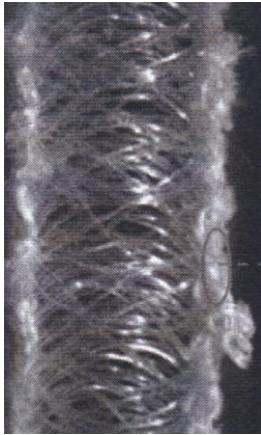


Рис. 1.40. Графічні записи аукзетик-основов'язаного трикотажу, який має елементарну ланку у вигляді реентерабельних трикутників

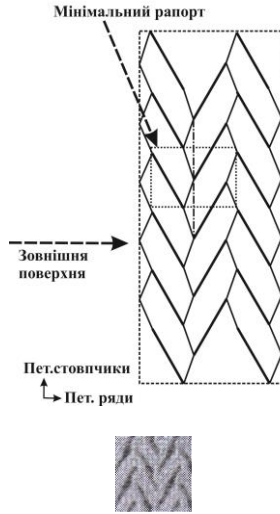


Науковці Алдерсон [220] та Ананд [219] дослідили, що розроблений трикотаж, окрім того що має від'ємний коефіцієнт Пуассона на першому етапі розтягування, може розтягуватися далі при незначній зміні в ширині. Характеристики отриманих матеріалів було визначено в результаті взаємодії компонентів, які утворюють переплетення, і відносних властивостей волокон цих двох компонентів. Вважається, що модуль жорсткості матеріалу визначається і регулюється за рахунок модуля стабілізуючого компонента. Оптичний мікроскопічний аналіз показав, що для повного розуміння механізму поведінки матеріалу необхідно розробити узагальнену модель механізму деформації. Ймовірно, моделі, які засновані на шарнірному кріпленні, згинанні і розтягуванні компонентів структури, більш прийнятні, хоча паралельно з ними також відбувається інші процеси, такі як, наприклад, тертя волокон [220].

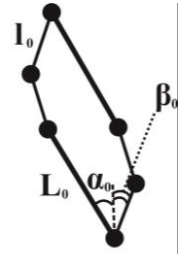
Інший напрямок у створенні аукзетик-основов'язаних матеріалів запропоновано у Гонконгському політехнічному університеті. Вонг зі співавторами [221] розробили та виготовили аукзетик-полотно на основі 3D-основов'язаної структури, в якій два зовнішні шари трикотажу поєднані між собою за допомогою додаткової системи ниток, що створює додатковий середній шар необхідної товщини (рис.1.41.а). На відміну від звичайної 3D-структури в аукзетик-матеріалі петлі в зовнішніх шарах повинні формувати шестикутники, які розташовуються під кутом як до петельних рядів, так і до петельних стовпчиків (рис.1.41 в та г). Шестикутні чарунки сформовані ребрами двох різних довжин і товщин: довгими товстими і короткими тонкими. На рис.1.41 в представлено схему елементарної ланки, на якій позначено головні геометричні параметри в початковому стані: довжини короткої  $l_0$  та довгої сторін  $L_0$ , кути нахилу довгої  $\alpha_0$  та короткої сторін  $\beta_0$  до вертикалі. Для отримання такої структури трикотажне полотно, яке вироблено на двофонтурній машині з використанням шести гребінок, піддавали додатковому процесу термофіксації. В результаті отримано низку основов'язаних полотен з різними значеннями кутів нахилу ребер чарунки. В результаті проведених досліджень визначено, що аукзетик-властивості розроблених полотен виявляються при розтягуванні як вздовж, так і поперек полотна.



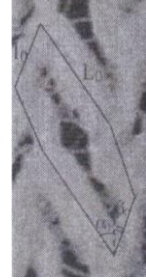
а) переріз



б) геометрія зовнішнього шару



в) елементарна ланка



г) контурні лінії

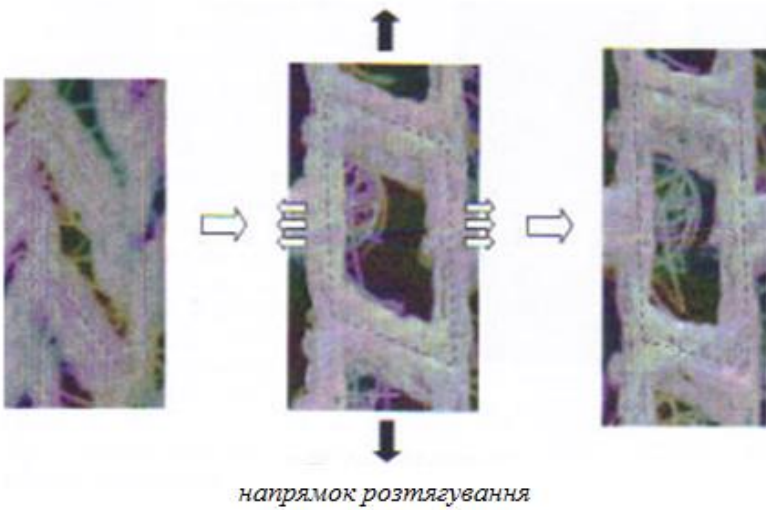


Рис. 1.42. Процес розтягування вздовж петельних рядів

Аналіз структури проводили шляхом дослідження форми та розміру елементарної ланки в процесі розтягнення. При розтягуванні вздовж петельних рядів (поперек полотна) короткі сторони шестикутника спочатку розпрямляються, а потім витягуються в напрямку розтягування (рис. 1.42). Таким чином, подовження полотна при розтягуванні залежить від зміни довжини короткої сторони чарунки. Водночас довгі сторони чарунки спочатку розвертаються і розташовуються перпендикулярно до напрямку розтягування, внаслідок чого зростає ширина полотна, а потім скорочуються, що призводить до поступового зменшення ширини. Таким чином, поперечна деформація залежить від спільної дії двох факторів: зміни довжини і кута нахилу довгих сторін шестикутної чарунки.

За основу геометричного моделювання процесу розтягування вздовж петельних рядів та прогнозування коефіцієнту Пуассона авторами обрано паралелограм (рис. 1.43), а вздовж петельних стовпчиків – шестикутник (рис. 1.44).

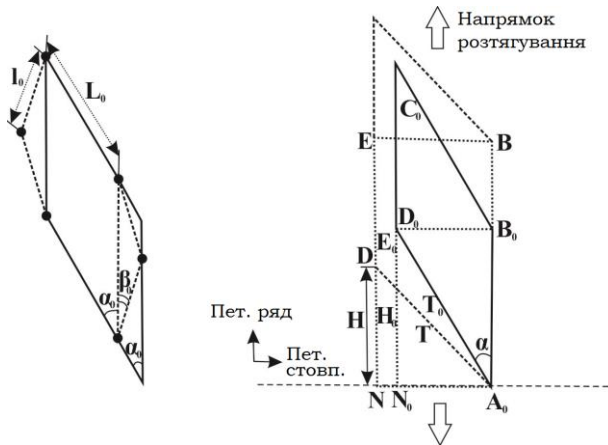


Рис. 1.43. Геометрична модель процесу розтягування вздовж петельних рядів

При цьому ними зроблено наступні припущення:

1) всі шестикутні елементарні ланки в початковому стані мають однакову форму та розміри і в процесі розтягування поведуться однаково;

2) при розтягуванні вздовж петельних стовпчиків шестикутна чарунка зберігає свою шестикутну форму, а при розтягуванні вздовж петельних рядів деформація шестикутника може бути представлена як деформація відповідного паралелограма.

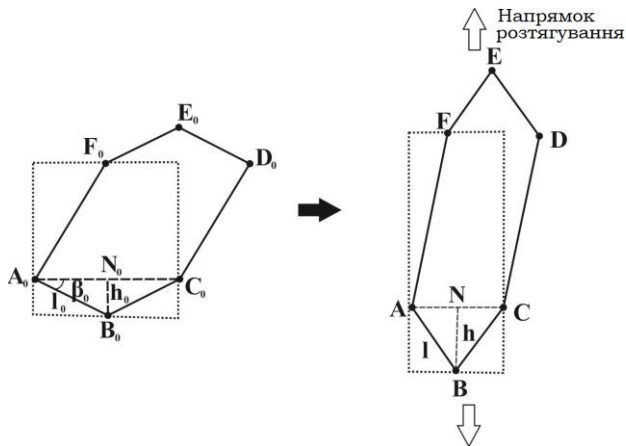


Рис. 1.44. Геометрична модель процесу розтягування вздовж петельних стовпчиків

У результаті моделювання процесу розтягування та відповідного математичного перетворення отримано формулу для визначення коефіцієнту Пуассона запропонованої основов'язаної структури:

– при розтягуванні вздовж петельних рядів

$$v_{yx} = \frac{\sin \alpha_0 - \sqrt{(1 - 0,83 \varepsilon_a^{1,73})^2 - \cos^2 \alpha_0 (1 - \varepsilon_a)^2}}{\varepsilon_a \sin \alpha_0}; \quad (1.36)$$

– при розтягуванні вздовж петельних стовпчиків

$$v_{xy} = \frac{\cos \beta_0 - \sqrt{(1 + 0,062 \varepsilon_a)^2 - \sin^2 \beta_0 (1 + 1,867 \varepsilon_a^{2,55})^2}}{\varepsilon_a \cos \beta_0}, \quad (1.37)$$

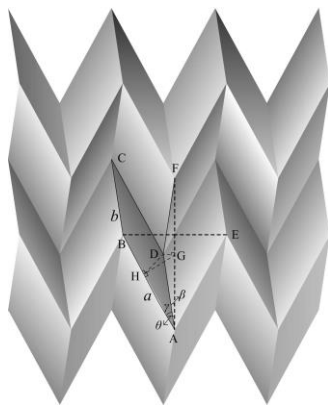
де  $\varepsilon_a$  – відносне видовження в напрямку розтягування.

Отже, поєднання дизайну і прогресу в розробці аукзетик-структур з технологією трикотажного виробництва дозволяє

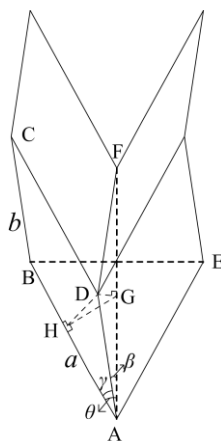
виробляти основ'язаний аукзетик-трикотаж зі звичайних волокон. Проте, як відомо, трикотаж зі звичайних волокон може успішно вироблятися на плосков'язальних кулірних машинах. Технологія в'язання на цих машинах, на відміну від основ'язальних і круглов'язальних, забезпечує високу гнучкість процесу і широкий спектр в'язаних структури.

Лю зі співавторами [222] виробили кулірні аукзетик-трикотажні полотна на основі структури паралелограмів однакових форм і розмірів, які поєднані один з одним таким чином, що формують тривимірний зигзаг. При розтягуванні таких полотен як вздовж, так і поперек полотна кожний з паралелограмів змінює своє положення в просторі, намагаючись розташуватися в площині полотна, в результаті чого збільшуються розміри в обох напрямках водночас. Слід зауважити, що в процесі розтягування як форма, так і розміри паралелограмів залишаються незмінними.

Тоді як в основ'язаних полотнах відтворюються відомі аукзетик-структури, в кулірних трикотажних матеріалах спроектовано нову геометричну модель (рис. 1.45.а) аукзетик-структури та механізму її деформації. Таку геометричну модель запропоновано [223] називати "розкриття складеної конструкції".



а) тривимірна структура



б) елементарна ланка

Рис. 1.45. Геометрична модель "розкриття складеної конструкції"

Аналітичний аналіз впливу параметрів структури на коефіцієнт Пуассона цієї моделі проведено [222] на підставі схеми

елементарної ланки (рис. 1.45.б). Прийнято, що незмінними параметрами в процесі розтягування є  $AB = CD = a$ ,  $AD = BC = b$ ,  $\angle BAD = \angle BCD = \gamma$ ,  $\angle BAF = \theta$  та  $\angle DAF = \beta$ . Визначено два крайні положення структури: закрита при  $BE = 0$ , коли кути  $\theta = 0$  та  $\beta = \gamma$ , і розкрита при  $AF = 2b$ , тоді кути  $\theta = \gamma$  та  $\beta = 0$ . Коефіцієнти Пуассона такої структури визначають за співвідношеннями:

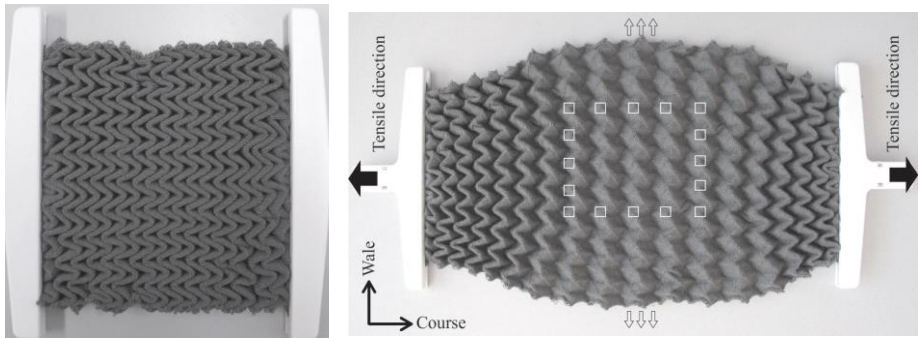
$$\left. \begin{aligned}
 v_{BE} &= -\frac{(AF - AF_0)/AF_0}{(BE - BE_0)/BE_0} = -\frac{\frac{\cos\theta_0}{\sin\theta_0} - 1}{\frac{\cos\theta}{\sin\theta} - 1} \\
 v_{AF} &= -\frac{(BE - BE_0)/BE_0}{(AF - AF_0)/AF_0} = -\frac{\frac{\sin\theta}{\cos\theta} - 1}{\frac{\sin\theta_0}{\cos\theta_0} - 1}
 \end{aligned} \right\} (\theta \in [0, \gamma]) \quad (1.38)$$

Аналіз отриманих рівнянь показує [222], що головним фактором, який визначає від'ємність коефіцієнту Пуассону такої структури, є кут розкриття, при цьому лінійні розміри паралелограмів не мають значення.

Трикотажні полотна, які отримано за такою моделлю (рис. 1.46), є суцільними без простору між паралелограмами, які необхідні для розширення полотна з метою досягнення аукзетик-ефекту. Візерунок трикотажу створено на базі двовиворотної гладі, в рапорті якого чергуються у зигзагоподібному розташуванні лицьові та виворотні петлі. За рахунок цього в структурі трикотажу виникає невірноваженість, наслідком якої є вигин певних частин після релаксації.

Під дією зовнішньої напруги в напрямку петельних рядів тривимірна структура розпрямляється, в результаті чого збільшуються розміри всієї конструкції в обох напрямках: як вздовж петельних рядів, так і вздовж петельних стовпчиків. Коефіцієнт Пуассона зменшується при збільшенні деформації і досягає  $-0,5$  рівня. Практично підтверджено [222], що основним структурним параметром, який впливає на аукзетик-ефект, є кут розкриття в початковому стані. Структури, які більш тісно складені, тобто

мають менший кут розкриття, при розтягуванні мають більш високі від'ємні значення коефіцієнту Пуассона.



**а. у звичайному стані**

**б. при розтягненні**

**Рис. 1.46. Кулірні трикотажні полотна з зигзагоподібним розташуванням ромбів**

Таким чином, межа здатності трикотажу до вигинання через структурну нерівновагу має принциповий вплив на аукзетик-ефект усіх видів складених конструкцій. Дослідження показують, що технологія вироблення трикотажу на плосков'язальних машинах може забезпечити простий, але дуже ефективний спосіб виготовлення аукзетик-полотен зі звичайних ниток. Кулірний трикотаж, який має від'ємний коефіцієнт Пуассона, має широкий потенціал застосування в різних галузях, таких як функціональний та спортивний одяг, медична галузь і навіть сучасний модний повсякденний одяг [223].

Бугай та ін. [224] також досліджували трикотаж з зигзагоподібним чергуванням лицьових та виворотних петель. Головну увагу в своїх дослідженнях вони приділяли вивченню впливу сировини і довжини нитки в петлі на аукзетик-ефект. Були використані два типи звичайних (не аукзетик) ниток з позитивним коефіцієнтом Пуассона: акрилові і бавовна, а також три різні значення щільності трикотажу. Результати показують, що довжина нитки в петлі впливає на аукзетик-ефект складених конструкцій. Зниження показника зменшує значення початкових кутів складених конструкцій і водночас дозволяє виробляти більш жорсткий трикотаж, який зберігає свою форму і, отже, краще демонструє вищий аукзетик-ефект. Що стосується впливу сировини, то

результати дослідження показали вищий аукзетик-ефект у трикотажу з акрилової пряжі.

У Люблянському університеті проведено подальші дослідження зигзагоподібних структур [225], в яких досліджено вплив рапорту переплетення на значення коефіцієнту Пуассона. Як показують результати [226], чисельні співвідношення між лицьовими та виворотними петлями як в ряді, так і в стовпчику рапорту мають істотний вплив на здатність до складання кулірного трикотажу, який вироблено на базі двовиворотних переплетень.

Ху та ін. [227] розробили декілька варіанти рапортів, які були використані для створення нових видів аукзетик-кульрірних трикотажних матеріалів. Вони удосконалили (доповнили) складені структури Лю та ін. [222] двома іншими взаємними розташуваннями (чергуваннями) лицьових і виворотних петель. Перша структура у вигляді прямокутників (рис. 1.47.а) виявляє аукзетик-ефект тільки при розтягненні вздовж петельних рядів і тільки на першому етапі розтягування (до 120%) з подальшим зменшенням показника. Інша структура у вигляді горизонтальних і вертикальних смуг (рис. 1.47.б) виявляє аукзетик-ефект у двох напрямках, але він зменшується зі збільшенням осьової деформації.

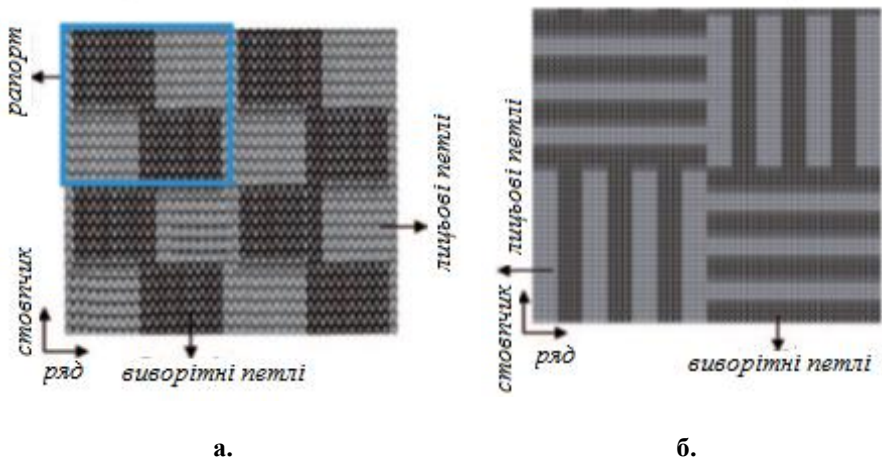


Рис. 1.47. Схеми візерунків кульрірних аукзетик-трикотажних полотен

Дарья Рант зі співавторами [228] розробили низку структур кульрірних трикотажних полотен на базі двовиворотних переплетень,



які подібні до кірки авокадо (рис. 1.48). Проведені дослідження виявили потенціал цих структур до аукзетик-ефекту. Слід також зазначити, що при розтягуванні складаних структур усіх варіантів рапортів відбувається значне зменшення товщини трикотажу.



Рис. 1.48. Кулірні аукзетик-трикотажні полотна з ефектом «кірки авокадо»

У роботі Ху [227] також представлено принципово інші структури, які утворені на плосков'язальній кулірній машині способом часткового в'язання: обертаючий прямокутник і реентерабельний шестикутник.

У результаті проведеного теоретичного аналізу геометричної моделі обертової структури, яка отримана з однакових прямокутників, встановлено формулу для визначення коефіцієнту Пуассона такої структури:

$$v = \frac{[a(\sin \alpha_0 - \sin \alpha) + b(\cos \alpha_0 - \cos \alpha)](a \cos \alpha_0 + b \sin \alpha_0)}{[a(\cos \alpha_0 - \cos \alpha) + b(\sin \alpha_0 - \sin \alpha)](a \sin \alpha_0 + b \cos \alpha_0)}, \quad (1.39)$$

де  $a$  і  $b$  – відповідно довжина і висота чотирикутника,

$\alpha_0$  і  $\alpha$  – половина кута між двома сусідніми чотирикутниками в напрямку розтягування в звичайному стані і при розтягненні.

При цьому величина осьової деформації визначається за формулою:

$$\varepsilon_a = \frac{a \cos \alpha + b \sin \alpha}{a \cos \alpha_0 + b \sin \alpha_0} - 1. \quad (1.40)$$

Трикотажну структуру з обертових прямокутників (рис. 1.49) отримано на базі переплетення інтерлок, оскільки воно є

найстабільнішим з огляду на збереження форми і розмірів, а також спрощує процес утворення початкового ряду при частковому в'язанні. Для в'язання початкового ряду елементарної ланки і попередження розпускання при закритті петель використовували еластичну гумову нитку. Таким чином, вона з'єднувала сусідні блоки в напрямку петельного ряду і посилювала здатність структури до відновлення після зняття розтягуючого навантаження.



**а. в звичайному стані**

**б. при розтягненні**

**Рис. 1.49. Кулірне аукзетик-трикотажне полотно на основі обертових прямокутників**

Експериментально встановлено, що на відміну від теоретичних розрахунків, структура з обертових прямокутників виявляє аукзетик-ефект лише при розтягненні вздовж петельних рядів. Доведено, що жорсткі прямокутники, які можуть бути легко змінені в паралелограми під навантаженням; еластична нитка, яка використовується для з'єднання блоків; ефект прослизання, який виникає між нитками і сприяє перерозподілу пряжі між сусідніми петлями, все це теоретично впливає на значення коефіцієнту Пуассона таких структур. Особливість структури трикотажу обмежує обертання навколо сполучних точок через петельні зв'язки і водночас забезпечує структуру складовими, які легко можуть деформуватися під дією навантаження.

Для розрахунку реентерабельних гексагональних структур Ху та ін. [227] запропонували власну формулу, яку було отримано в результаті спрощеного аналітичного аналізу елементарної ланки

$$v = \frac{b \sin \theta_0 (\cos \theta_0 - \cos \theta)}{(a - b \cos \theta_0) (\sin \theta_0 - \sin \theta)}, \quad (1.41)$$

де  $a$  і  $b$  – довжини відповідно вертикальної і нахиленої сторони шестикутника,

$\theta_0$  і  $\theta$  – кути між вертикальною і нахиленою сторонами шестикутника в звичайному стані і при розтягненні.

При цьому величину осьової деформації визначають за формулою:

$$\varepsilon_a = \frac{\sin \theta}{\sin \theta_0} - 1. \quad (1.41)$$

Розробниками на плосков'язальній машині було виготовлено два варіанти кулірних трикотажних полотен на базі реентерабельних шестикутників: реальна та умовна.

Реальну структуру (рис. 1.50) виробляли з використанням двох методів: зсуву та інтарзії. Зигзагоподібну форму сторін надавали в процесі зсуву задньої голечниці то в одну, то в іншу сторони при виготовленні переплетення фанг. Техніку інтарзії застосовували для вироблення кожної з зигзагоподібних сторін окремою пряжею. З'єднуючі сторони чарунок утворювали методом неповного в'язання переплетенням інтерлок з автоматичним закриттям петель останнього ряду зв'язки.



а. у звичайному стані

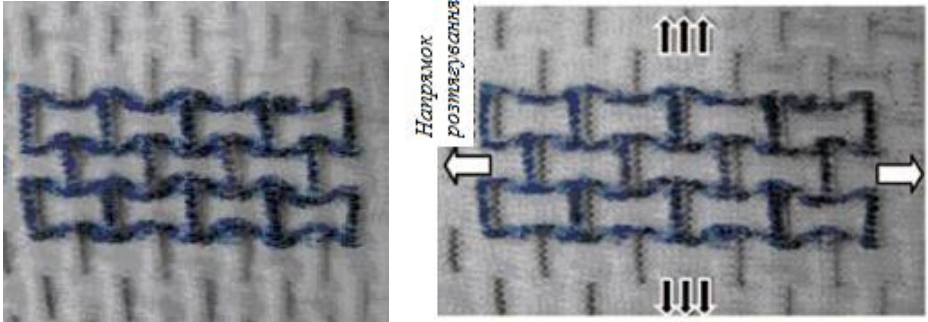


б. при розтягненні

Рис. 1.50. Кулірне аукзетик-трикотажне полотно на основі реального реентерабельного шестикутника

Умовну структуру (рис. 1.51) вироблено з використанням секційних рельєфних ребер в комбінації з введенням еластичної

пряжі. На відміну від інших реентерабельних гексагональних структур це полотно не має наскрізних отворів. Реальні і умовні реентерабельні гексагональні структури, які є подібними, виявляють аукзетик-ефект тільки при розтягуванні в напрямку петельних стовпчиків.



**а. у звичайному стані** **б. при розтягненні**  
Рис. 1.51. Кулірне аукзетик-трикотажне полотно на основі умовного реентерабельного шестикутника

## **2. НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ МАТЕРІАЛІВ З ВІД'ЄМНИМ КОЕФІЦІЄНТОМ ПУАССОНА**

### **2.1. Отримання чарунок гексагональної форми в основов'язаному трикотажі**

Сіткоподібні текстильні структури – це матеріали, яким надають найбільшу перевагу у виробництві композитів. Головною перевагою основов'язання є його багатогранність та висока продуктивність, що найбільше підходить для виготовлення сіток. Фактично ніяка інша технологія не може відповідати основов'язанню у виготовленні сіткоподібних матеріалів і різноманіттю їхніх структур. Сітчастий основов'язаний трикотаж виробляють на основов'язальній машині з однією або з двома голечницями з використанням як звичайних, так і кіперних кладок ниток. Залежно від кількості використаних гребінок, їхнього взаємного розташування, набирання ниток у заправці та їх поєднання утворюють чарунки різні за розміром, геометричною конфігурацією та взаємним розташуванням. Тому за правильного вибору переплетення та сировини можна зв'язати сітки з прямокутною, ромбовидною, шестикутною або практично круглою формою чарунок. [229].

Слід зазначити, що при виробництві сіток найбільше використовують трикотаж філейного переплетення – основов'язаний трикотаж, в якому відсутній зв'язок між сусідніми петельними стовпчиками в одному чи кількох рядах поспіль [231]. За кількістю гребінок, що використовують у в'язанні, трикотаж філейних переплетень можна класифікувати на [232]: одногоребінковий, двогребінковий та тригребінковий. Професори Л. О. Кудрявін та І. І. Шалов [231] запропонували класифікувати трикотаж філейних переплетень залежно від кількості гребінок, які беруть участь у в'язанні, їхніх заправок та кладок на такі види: найпростіші, прості, комбіновані та складні.

Трикотаж філейного переплетення виготовляють на основов'язальних машинах з однієї або декількох систем ниток при симетричній або несиметричній кладках. Отвори в філейному трикотажі зазвичай утворюються по стовпчиках з поворотними петлями при неповному набиранні гребінок. Симетричні отвори

отримують при дзеркальній кладці ниток двома гребінками, при цьому нитки однієї гребінки доповнюють іншу і на всіх голках утворюються петлі.

Наприклад, трикотаж, який показано на рис. 2.1, сформовано з двох систем ниток при частковому ( $| \cdot | \cdot |$ ) набиранні гребінок [233]. Обидві гребінки виконують кладку комбінованим переплетенням, в рапорті якого чергуються ряди трико та атласу, симетрично на сусідніх голках. Після в'язання та релаксації чарунки такого сітчастого полотна набувають форму шестикутника [234].

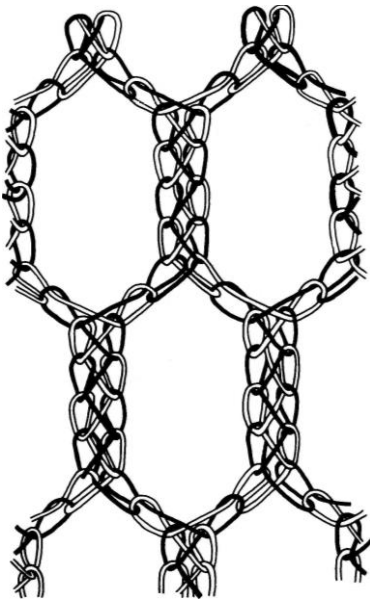


Рис. 2.1. Філейний трикотаж з гексагональними отворами

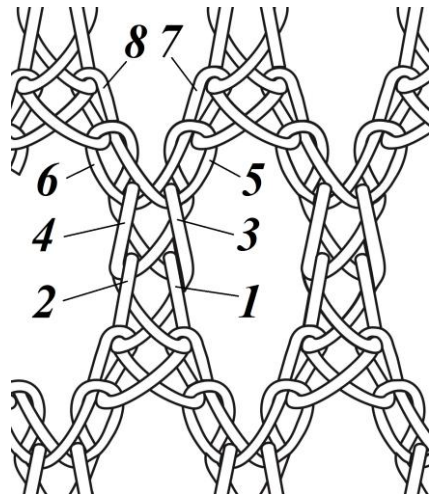


Рис. 2.2. Форма петель

Чарунка складається з вертикальних ділянок, які утворені закритими петлями переплетення трико, та нахилених ділянок, які утворені закритою та відкритою петлями трико переплетення атлас. Нахилені ділянки розташовані під кутом до вертикалі. Розглянемо, якої форми і розташування в структурі трикотажу набувають петлі цього філейного переплетення, і за рахунок чого чарунка набуває гексагональної форми. Розміри і форма одинарних петель основ'язаного переплетення залежать, за інших рівних умов, від виду петлі, взаємного розміщення остова й протяжки петлі і

довжини протяжки, що детально розглянуто в монографії професора Ф. А. Моїсеєнко [235]. Значно впливає на форму та розмір петлі, а отже, на їх розташування у структурі, механіка нитки, тобто її жорсткість та пружність, міцність та розтяжність тощо.

Для виготовлення трикотажу, який утворено чергуванням в рапорті переплетення рядів трико та атласу трикової кладки, одна гребінка утворює закриті петлі трико 1, 4 та 5 з одностороннім розташуванням протяжок та відкриту петлю трико 8 з двостороннім розташуванням протяжок (рис. 2.2). При цьому друга гребінка виконує симетричну кладку, аналогічно утворюючи закриті петлі трико 2, 3 та 6 та кладки відкриту петлю трико 7.

Нахилу остова петель 1 попереднього петельного ряду перешкоджає петля 3 наступного петельного ряду. Виникаючі сили тиску остовів петель 1 врівноважуються силами реакції паличок остовів петель 3. Тому в площині полотна не відбувається спільного нахилу остовів обох петель, як в односторонніх переплетеннях. Але протяжка петлі 1 входить в петлю 2 і тим самим розгортає в площині остови цих петель назустріч один одному, так що в фронтальній площині буде видно лише по одній з паличок остовів петель 1 і 2. Петлі 3 і 4 мають нахилитися аналогічно петлям 1 і 2, адже над ними також знаходяться петлі з одностороннім розташуванням протяжок. Отже, закриті петлі трико 1, 2 та 3, 4 розміщуються у структурі трикотажу філейного переплетення вертикально.

Над закритими петлями трико 5 і 6 знаходяться відкриті петлі з двосторонніми протяжками, тому за нахилу та зсуву остовів цих петель з одностороннім розташуванням протяжок щодо петель 3 і 4, відповідно, рівновага зазначених сил порушується, а саме: при повздовжньому розміщенні остова петлі 3 і 4 сили реакції остова петель 5 і 6 зміщуються у напрямку, зворотному розташуванню вихідних протяжок. Сили пружності нитки, що виникають у результаті згину її в цій площині, прагнуть нахилити остови петель відносно їхніх основ на лицьову сторону трикотажу. Отже, остови закритих петель трико 5 і 6 розташовуються у структурі трикотажу філейного переплетення нахилено (діагонально).

У відкритих петлях 7 і 8 із двостороннім розташуванням протяжок сили, що викликають нахил петель, урівноважуються при меншому нахилі остова петель, не викликаючи повороту їх щодо поздовжньої осі. Тому ці петлі нахилиються у той же бік, що і відповідні їм попередні петлі 5 і 6, мають менший нахил в площині полотна і не повертаються з площини полотна. Тобто остови петель 7 і 8 у структурі філейного трикотажу також розміщуються діагонально.

Розмір чарунки залежить, перш за все, від класу машини та лінійної густини нитки, а також від технологічних параметрів в'язання (натягу ниток основи та сили відтягування полотна). Таким чином, на одній машині можна виготовляти полотна філейних переплетень з різним розміром чарунок змінюючи лише параметри в'язання. Однак, довжини ділянок чарунки залежатимуть також від кількості рядів петель, які утворюють цю ділянку [236].

Отже, збільшити розмір чарунки можливо за рахунок введення в рапорт переплетення рядів трико та ланцюжка. Збільшення кількості рядів трико в рапорті подовжує вертикальну сторону, всі петлі якої є закритими петлями трико з одностороннім розташуванням протяжок. Таким чином всі вони розташовуватимуться в структурі вертикально без нахилу, аналогічно петлям 1–4. Подовження діагональної сторони чарунки, і тим самим розширення та видовження чарунки, є можливим за рахунок введення в структуру трикотажу філейного переплетення попереднього варіанту додаткових петель ланцюжка, які розташовуватимуться над нахиленими петлями трико, внаслідок чого і самі нахилитимуться під тим же кутом до вертикалі.

Таким чином, для того щоб отримати вертикальні та діагональні сторони шестикутної структури, тобто гексагональну форму чарунки основов'язаного трикотажу філейного переплетення, необхідно дотримуватися наступних умов [237]:

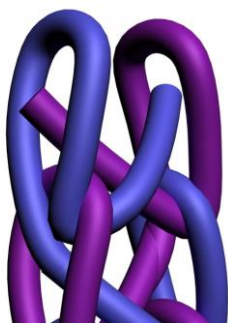
1. Стільникові структури можна отримати на машинах як із однією, так і з двома голочницями при використанні як мінімум двох гребінок, які набрані частково і виконують симетричну кладку ниток на голки для забезпечення симетричності стільника.



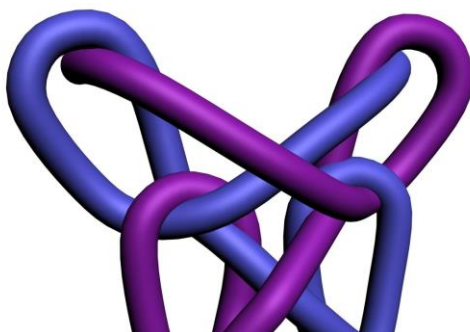
2. Рекомендованим переплетенням є філейне, в рапорті якого чергуються ряди петель трико та ланцюжка, при використанні як мінімум двох гребінок, які набрані частково і виконують симетричну кладку ниток на голки.
3. У головці петлі вихідна протяжка накладається на вхідну, якщо в наступному петельному ряді петля є закритою. Вхідна і вихідна протяжки в головці петлі розташовуються одна біля одної, якщо в наступному петельному ряді петля є відкритою.
4. Якщо над закритою петлею трико в наступному петельному ряді розташовується також закрита петля трико з ниток іншої гребінки, то така петля розташовується в полотні вертикально формуючи вертикальну сторону чарунки.
5. Якщо над закритою петлею трико розташовується відкрита петля трико або петля ланцюжка, то вони нахиляються відносно вертикальної вісі формуючи діагональну сторону чарунки.
6. Якщо в рапорті переплетення непарна кількість відкритих петель ланцюжка, то наступною за ними буде закрита петля трико. Якщо в рапорті переплетення парна кількість відкритих петель ланцюжка, то наступною за ними буде відкрита петля трико.
7. Петлі трико, які пров'язуються в наступному за петлями ланцюжка ряді рапорту, незалежно від їхнього типу (закрита чи відкрита) нахиляються відносно вертикальної вісі.
8. Збільшення кількості рядів трико в рапорті переплетення призводить до видовження чарунки, водночас збільшення кількості рядів ланцюжка сприяє її одночасному видовженню і розширенню.

У результаті детального аналізу структури філейного трикотажу, який утворено чергуванням петель трико та ланцюжка, в рапорті встановлено, що за формою та розмірами петлі, які утворюють гексагональні чарунки, можна розділити на наступні види:

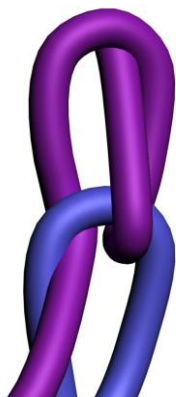
- І вид (рис. 2.3.а) – закриті петлі трико з одностороннім розташуванням протяжок, які розміщуються у структурі трикотажу філейного переплетення вертикально (в напрямку в'язання);



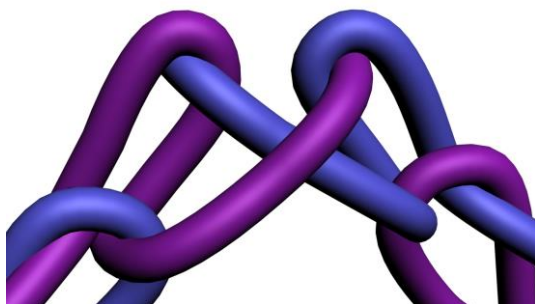
а. I



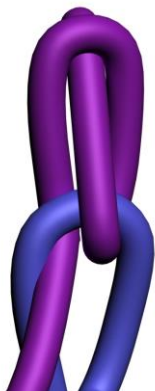
б. II



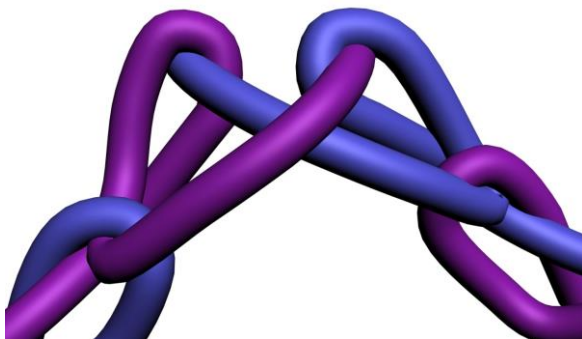
в. VI



г. III



д. V



ж. IV

Рис. 2.3. Види петель в трикотажі з гексагональними чарунками

- II вид (рис. 2.3.б) – закриті петлі трико з одностороннім розташуванням протяжок, які нахиляються у напрямку, протилежному нахилу вихідної протяжки;
- III вид (рис. 2.3.в) – відкриті петлі трико з двостороннім розташуванням протяжок, які нахиляються у напрямку вихідної протяжки;
- IV вид (рис. 2.3.ж) – закриті петлі трико з одностороннім розташуванням протяжок, які нахиляються у напрямку вихідної протяжки;
- V вид (рис. 2.3.д) – відкриті петлі ланцюжка, які розташовуються під кутом до напрямку вязання (аналогічно остовам петель попереднього ряду), і в голівці яких розміщується один діаметр нитки;
- VI вид (рис. 2.3.г) – відкриті петлі ланцюжка, розташовуються під кутом до напрямку вязання та відрізняються дзеркальним відображенням вхідної та вихідної протяжок, і в голівці яких розміщується два діаметри нитки.

## 2.2. Аукзетик-трикотаж на основі реентерабельної гексагональної чарунки

Гексагональна будова чарунок у матеріалах [53] передбачає позитивний коефіцієнт Пуассона при їхньому розтягненні. Однак незначна зміна конфігурації сторін чарунки призводить до того, що ця структура перетворюється в реентерабельну (рис. 2.4), яка має аукзетик-властивості.

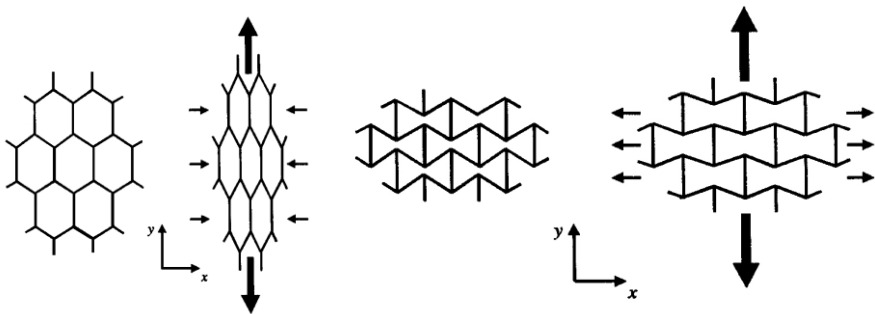


Рис. 2.4. Аукзетик-ефект як результат зміни конфігурації чарунок

Наприклад, трикотаж, який показано на рис. 2.1, при розтягненні як вздовж петельних стовпчиків, так і вздовж петельних рядів буде зменшуватися по ширині. При розтягненні нахилені ділянки чарунки будуть вирівнюватися в напрямку розтягнення, внаслідок чого вертикальні ділянки наблизяться.

Для створення аукзетик-матеріалів необхідно змінити положення нахилених ділянок так, як показано на рис. 2.5. Тобто частина петельного стовпчика, яка формує нахилену ділянку, повинна вигнутися в напрямку, зворотному в'язанню, в результаті чого отримаємо реентерабельну гексагональну чарунку. При розтягненні такої структури ці ділянки намагатимуться розташуватися в напрямку розтягування, внаслідок чого на першому етапі (до моменту коли нахилені ділянки розташуються в структурі горизонтально) збільшується відстань між вертикальними ділянками чарунки в напрямку, перпендикулярному розтягуванню. Таким чином, ця структура проявлятиме аукзетик-властивості.

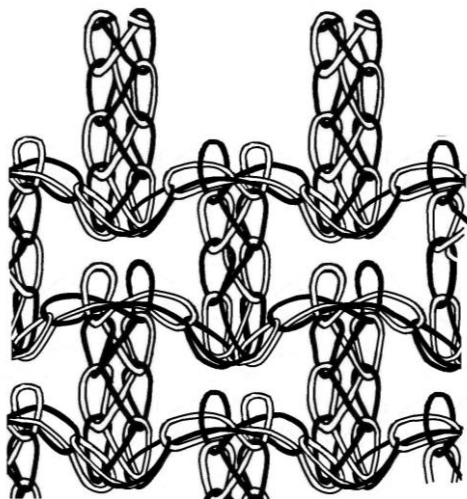


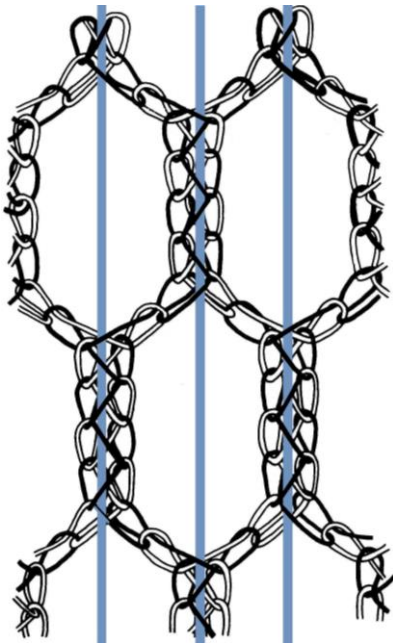
Рис. 2.5. Структура філейного трикотажу зі зміненою формою чарунки

Для досягнення такого результату потрібно в базову структуру філейного трикотажу ввести додаткову нитку у вигляді повздовжнього утоку (рис. 2.6.a). Утокова нитка розташується між остовами та протяжками петель трико, які створюють вертикальну

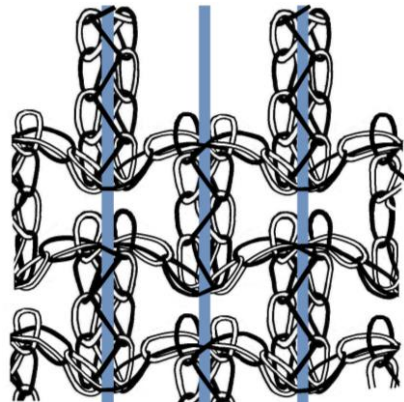
сторону чарунки, а в інших рядах рапорту розташується всередині чарунки, поєднуючи дві вертикальні сторони в повздовжньому напрямку. Утокова нитка повинна бути еластомерною (високорозтяжною) і подаватися у зону в'язання під значним натягом, забезпечуючи її витягування на 100% і більше. Після релаксації напруг, скорочуючись, еластомерна нитка надаватиме чарункам необхідну конфігурацію (рис. 2.6.б) і для забезпечення надійності закріплення в структурі трикотажу може обвивати протяжки петель.

Як представлено вище (п.1.3), коефіцієнт Пуассона цієї структури (1.15) залежить від довжин вертикальної та нахиленої сторін, а також від кута нахилу ділянки до горизонталі.

У представленому основов'язаному трикотажі довжини ділянок передбачається змінювати за рахунок варіювання кількості рядів трико та ланцюжка в рапорті філейного переплетення, а кут нахилу ділянки до горизонталі – за рахунок вхідного натягу еластомерної нитки.



а) під натягом



б) після релаксації напруг

Рис. 2.6. Структура утоково-філейного трикотажу з аузетик-властивостями

Для експериментального підтвердження викладених вище теоретичних положень на основов'язальній машині 10 класу [238] з поліетилентерефталатної нитки лінійною густиною 27,8 текс як ґрунтової та поліуретанової нитки пневмоз'єднаної з поліетилентерефталатною ниткою 16,7 текс як утокової нитки вироблено зразки трикотажу утоково-філейного переплетення. Для дослідження впливу високорозтяжного компонента використовували два види поліуретанової нитки: 4,4 та 7,8 текс. Набирання чотирьох вушкових гребінок нитками основ є частковим (через вушковину). Кількість рядів петель трико, які створюють вертикальну сторону чарунки, варіювали від 3 до 7, а кількість рядів петель ланцюжка, які подовжують нахилену сторону чарунки, змінювали від 1 до 3. Для дослідження впливу варіанту розташування утокової нитки в структурі обрано варіанти (рис. 2.7), в яких вона обвиває протяжки петель трико однієї або іншої ґрунтової гребінки в двох сусідніх рядах.

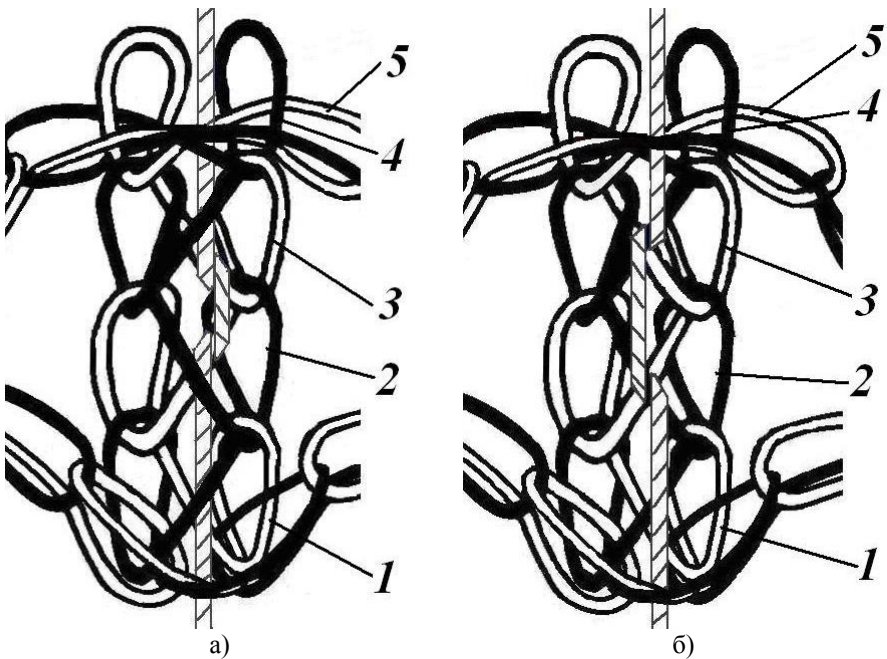


Рис. 2.7. Розташування утокової нитки в структурі трикотажу

Аналіз структури трикотажу, рапорт якого має 5 рядів трико, показав [239], що в першому варіанті прокладання (рис. 2.7.а) утокова нитка розташується наступним чином:

- в ряді 1 знаходиться між протяжками петель трико різних гребінок;
- в рядах 2 та 3 обплітає протяжки петель з ниток першої гребінки (білі нитки) і знаходиться перед протяжками петель (на лицьовій стороні трикотажу) з ниток другої гребінки (чорні нитки);
- в ряді 4 знаходиться між протяжками петель трико різних гребінок;
- в ряді 5 знаходиться перед протяжками петель трико обох гребінок (на лицьовій стороні трикотажу). При цьому остови петель трико останнього ряду нахилиються і утворюють частину діагональної сторони чарунки;
- в наступних рядах рапорту розташовується між двома вертикальними сторонами чарунки у вигляді повздовжнього утоку.

У другому варіанті прокладання (рис. 2.7.б) утокова нитка розташується наступним чином:

- в ряді 1 знаходиться за протяжками петель трико обох гребінок (на виворітній стороні трикотажу);
- в рядах 2 та 3 обплітає протяжки петель з ниток другої гребінки і виходить на виворітну сторону трикотажу;
- в ряді 4 знаходиться за протяжками петель трико обох гребінок (на виворітній стороні трикотажу);
- в ряді 5 знаходиться перед протяжками петель трико обох гребінок (на лицьовій стороні трикотажу);
- в наступних рядах рапорту розташовується між двома вертикальними сторонами чарунки без зв'язування в структуру трикотажа.

У трикотажі, рапорт якого має 3 ряди трико, утокова нитка розташована як в рядах 2–4, описаних вище. У трикотажі, рапорт якого має 7 рядів трико, в першому та останньому рядах зв'язки утокова нитка знаходиться на лицьовій стороні трикотажу, а в інших рядах вона розташована аналогічно описаному для трикотажу, рапорт якого має 5 рядів трико.

Таким чином, головна відмінність введення утокової нитки в структуру трикотажу полягає в тому, що в першому варіанті вона розташовується між протяжками петель трико (рис. 2.7.а), а в другому варіанті частково виходить на виворітний бік полотна (рис. 2.7.б).

У результаті проведеного дослідження структури трикотажу встановлено [240], що полотна всіх вироблених варіантів мають видозмінену гексагональну форму чарунки. Сторона чарунки, яка утворена петлями ланцюжка, розташовується практично горизонтально або з незначним вигином всередину чарунки залежно від варіанту рапорту переплетення та лінійної густини поліуретанового компоненту. Таким чином, підтверджується можливість зміни конфігурації чарунки філейного трикотажу за рахунок введення високорозтяжної утокової нитки.

Головними показниками, які визначають структуру трикотажу філейних переплетень, є форма та розміри його чарунок. Аналіз зразків полотен виявив, що у полотен, в рапорті яких 3 або 5 рядів трико, форма чарунки не залежить від варіанту введення утокової нитки. При цьому сторони чарунки, які утворені петлями трико зі взаємоперехрещеними протяжками, розташовуються вертикально, а сторони чарунки, утворені петлями ланцюжка – практично горизонтально. Водночас залежність форми чарунки від варіанту введення утокової нитки спостерігається у варіантах трикотажу, рапорт яких має 7 рядів трико [239]. Для першого варіанту розташування утокової нитки ділянки чарунки, які утворені петлями трико зі взаємоперехрещеними протяжками, розташовуються в полотні вертикально. Для другого ж варіанту розташування утоку ці ж ділянки чарунки нахилиються в площині трикотажу, змінюючи тим самим розміри та конфігурацію чарунки. Довжини нитки в петлях та довжина утоку досліджуваних варіантів переплетень не залежать від виду переплетення ґрунту, а залежать лише від вхідних параметрів в'язання. Оскільки вхідний натяг ниток та сила відтягування полотна залишалися незмінними, то і довжини ниток для всіх варіантів практично однакові і становлять: для полотен з поліуретановою ниткою 4,4 текс середня довжина нитки в петлі філейного переплетення становить 6,67 мм, а утоку 1,97 мм; для полотен з поліуретановою ниткою 7,8 текс середня довжина



нитки в петлі філейного переплетення становить 6,57 мм, а утоку 2,01 мм. Таким чином, можна констатувати [241], що лінійна густина поліуретанового компонента утокової нитки також не впливає на довжини ниток ні утоку, ні в петлі ґрунтового переплетення. Середня довжина нитки в петлі філейного переплетення становить  $6,62 \pm 0,05$  мм, а утоку  $1,99 \pm 0,02$  мм.

З метою визначення впливу варіанту введення та лінійної густини поліуретанового компоненту утокової нитки на структуру трикотажу було досліджено головні параметри трикотажу комбінованих переплетень та розміри елементарної чарунки. На підставі математичної обробки експериментальних даних за планом Коно2 отримано рівняння регресії (таблиця 2.1), які адекватно, з ймовірністю 0,95 описують залежності параметрів від рапорту філейного переплетення.

Аналіз отриманих рівнянь показує, що кількість петельних стовпчиків та кількість петельних рядів на 100 мм трикотажу залежить від кількості рядів як трико, так і ланцюжка, однак цей вплив є різним.

Так, щільність по горизонталі ( $N_{ст}$ ) зменшується зі збільшенням рядів ланцюжка і зменшенням рядів трико в рапорті і не залежать від лінійної густини поліуретанового компоненту утокової нитки, що підтверджується відповідними рівняннями (таблиця 2.1). Вплив варіанту введення утокової нитки на показник є незначним і проявляє себе лише при використанні утокової нитки з поліуретановим стрижнем 4,4 текс. Так, у полотен, в рапорті яких 7 рядів трико, спостерігається значне зниження кількості петельних стовпчиків на 100 мм.

Водночас щільність по вертикалі ( $N_p$ ) збільшується зі збільшенням кількості рядів як трико, так і ланцюжка в рапорті філейного переплетення. Слід зазначити, що при використанні як утоку нитки з поліуретановим компонентом 7,8 текс спостерігається зростання (до 35 %) показників щільності по вертикалі за практично однакових показників щільності по горизонталі, що може бути свідченням більшої релаксації поліуретанової нитки.

Вплив рапорту філейного переплетення на товщину трикотажу утоково-філейного переплетення виявлено лише у

## Рівняння регресії в кодованих значеннях змінних

Показник, який досліджується	Варіант введення утокової нитки/ лінійна густина поліуретанового компоненту			
	а		б	
	4,4 текс	7,8 текс	4,4 текс	7,8 текс
Кількість петельних стовпчиків на 100 мм	$Y_{Ncr} = 191,1 - 15,5x_1 - 21,1x_2 - 21,0x_1^2$	$Y_{Ncr} = 32,4 + 2,6x_1 - 2,9x_2$	$Y_{Ncr} = 30,0 - 2,8x_2 + 2,9x_1x_2$	$Y_{Ncr} = 31,0 + 2,0x_1 - 3,1x_2$
Кількість петельних рядів на 100 мм	$Y_{Np} = 158, 2 + 17,6x_1 + 19,6x_2$	$Y_{Np} = 188,1 + 9,1x_2$	$Y_{Np} = 164,5 + 19,1x_1 + 15,6x_1^2 - 21,2x_2^2 -$	$Y_{Np} = 174,1 + 14,0x_2 - 7,5x_1x_2$
Товщина полотна	$Y_M = 0,90$	$Y_M = 0,96$	$Y_M = 0,99$	$Y_M = 0,93 + 0,11x_1$
Поверхнева густина полотна	$Y_{ms} = 191,05 - 15,46x_1 - 21,09x_2 - 21,04x_1^2$	$Y_{ms} = 176,41 - 25,09x_2$	$Y_{ms} = 151,19 + 36,54x_1 - 20,43x_2 + 36,73x_1^2 - 17,27x_2^2 -$	$Y_{ms} = 174,18 + 5,39x_1 - 24,62x_2 - 7,49x_1x_2$
Довжина вертикальної сторони	$Y_{a1} = 5,82 + 1,30x_1 + 0,78x_2$	$Y_{a1} = 5,62 + 1,78x_1 + 0,56x_2$	$Y_{a1} = 5,82 + 1,38x_1$	$Y_{a1} = 4,94 + 1,18x_1$
Довжина діагональної сторони	$Y_{a2} = 3,98 + 0,60x_2$	$Y_{a2} = 3,55 + 0,67x_2$	$Y_{a2} = 4,38 + 0,87x_2$	$Y_{a2} = 3,71 + 0,76x_2$
Крок чарунки по горизонталі	$Y_{tr} = 7,13 - 0,44x_1 + 1,02x_2$	$Y_{tr} = 7,55 - 0,83x_1 + 1,19x_2$	$Y_{tr} = 6,78 + 1,27x_2$	$Y_{tr} = 6,44 + 1,12x_2 + x_1^2$
Крок чарунки по вертикалі	$Y_{tb} = 3,50 + 0,87x_1$	$Y_{tb} = 2,37 + 0,54x_1 + 0,37x_2$	$Y_{tb} = 4^2 + 19 + 0,71x_1 - 0,87x_1,$	$Y_{tb} = 3,11 + 0,82x_1$

варіанта б розташування утокової нитки при використанні поліуретанової нитки лінійною густиною 7,8 текс (таблиця 2.1).

У цьому випадку товщина трикотажу зростає зі збільшенням кількості рядів трико, які утворюють вертикальну сторону чарунки. Це можна пояснити тим, що в цих полотнах вертикальна ділянка чарунки вигинається в площині, яка перпендикулярна площині полотна, і збільшує тим самим товщину. Товщина трикотажу інших досліджуваних варіантів практично не залежить від рапорту ґрунтового переплетення.

Слід зазначити, що на поверхневу густину полотна впливає як кількість рядів трико, так і кількість рядів ланцюжка в рапорті ґрунтового філейного переплетення (таблиця 2.1). При цьому лінійна густина поліуретанового компонента утокової нитки практично не впливає на показник через незначне значення в порівнянні з лінійною густиною ґрунтової нитки та нитки обплетення. Вплив варіанту введення утокової нитки також незначний і пов'язаний, в першу чергу, зі зміною щільності полотна.

Експериментальні дані та отримані на їхній підставі математичні залежності підтверджують відомий факт, що довжини сторін чарунок залежать від відповідної кількості рядів трико та ланцюжка в рапорті. Лише для першого варіанту прокладання утокової нитки спостерігається незначний вплив на довжину вертикальної сторони кількості рядів ланцюжка в рапорті. Такий вплив можна пояснити зміною форми та положення остова петлі трико останнього ряду зв'язки зі збільшенням довжини діагональної ділянки. Впливу варіанту введення і лінійної густини поліуретанового компоненту утокової нитки на показники не виявлено.

Проведені дослідження показали, що ширини вертикальної та нахиленої сторін чарунки у всіх полотен практично однакові, тобто вони не залежать ні від рапорту філейного переплетення, ні від лінійної густини поліуретанової нитки в складі утокової, ні від варіанту введення утокової нитки в структуру полотна.

Крок чарунки по горизонталі визначається відстанню між двома сусідніми зв'язками, тобто він безпосередньо пов'язаний з кількістю петельних стовпчиків на 100 мм. Отримані рівняння (таблиця 2.1) математично описують залежність показника як від

кількості рядів трико, так і від кількості рядів ланцюжка в рапорті філейного переплетення. Слід відмітити практично однакові значення показника для різних утокових ниток. Водночас спостерігається вплив варіанту введення утокової нитки на характер досліджуваних залежностей. Так, у полотен варіанту *a* введення утокової нитки крок чарунки по горизонталі збільшується зі зменшенням рядів трико і збільшенням рядів ланцюжка в рапорті, водночас у полотен варіанту *б* вплив кількості рядів трико незначний і виявляється лише при використанні утокової нитки з поліуретановим стрижнем лінійної густини 7,8 текс.

Дослідження кроку чарунки по вертикалі показало, що найбільший вплив на цей показник має лінійна густина поліуретанового компонента утокової нитки. При використанні поліуретанової нитки 7,8 текс спостерігається значне (до 25 %) зменшення відстані між двома чарунками по вертикалі. Це можна пояснити більшою релаксацією напруг нитки 7,8 текс у порівнянні з ниткою 4,4 текс. Водночас спостерігається вплив варіанту введення утокової нитки на характер досліджуваних залежностей (таблиця 2.1).

Отримані рівняння показують, що при варіанті *a* введення утокової нитки при використанні поліуретанової нитки 4,4 текс крок чарунки по вертикалі залежить лише від кількості рядів трико в рапорті, тоді як при використанні поліуретанової нитки 7,8 текс показник залежить як від кількості рядів трико, так і від кількості рядів ланцюжка в рапорті філейного переплетення. Водночас при варіанті *б* введення утокової нитки крок чарунки по вертикалі залежить лише від кількості рядів трико в рапорті філейного переплетення, а лінійна густина поліуретанового компоненту впливає лише на характер залежності.

Отже, проведені дослідження трикотажу комбінованого основов'язаного утоково-філейного переплетення показали, що:

- довжина нитки в петлі та довжина утоку утоково-філейного переплетення не залежать ні від рапорту переплетення ґрунту, ні від лінійної густини поліуретанового компоненту утокової нитки, ні від варіанту введення утокової нитки в структуру філейного переплетення, а залежать лише від вхідних параметрів в'язання;

- рапорт переплетення та варіант введення в структуру філейного трикотажу повздожньої утокової нитки суттєво впливає на параметри структури трикотажу та геометричні розміри чарунок, що необхідно враховувати при проектуванні трикотажу із заданими властивостями;
- лінійна густина поліуретанового компоненту утокової нитки має суттєвий вплив лише на крок чарунок по вертикалі: зміна лінійної густини нитки з 4,4 на 7,8 текс призводить до скорочення (до 25 %) відстані між вертикальними сторонами чарунок, що суттєво впливає на аукзетик-властивості трикотажу.

### **2.3. Теоретичний аналіз реентерабельної структури**

Мастерс і Еванс [5] показали, що матеріали, які мають від'ємний коефіцієнт Пуассона, набувають цієї здатності в результаті геометричної конфігурації багатофазних мікроструктур. Стільники розглядають як основні геометричні одиниці цих мікроструктур. Відкрита чарунка, в якій певні сторони вигнуті всередину чарунки, описані Лейксом [2, 123] як реентерабельні. Вперше макроскопічну аукзетик-структуру представлено також у вигляді стільників Гібсоном [92], який запропонував формулу (1.15) для визначення коефіцієнтів Пуассона.

Значення коефіцієнта Пуассона в площині визначається геометрією клітини, тоді як жорсткість на згин стільникоподібного матеріалу пов'язана з механізмом деформування окремих чарунок, що, в свою чергу, визначається властивостями матеріалу ребер [92]. Стільникові чарунки можуть деформуватися в площині за рахунок прогину та розтягнення ребер (стінок) чарунки та вигину (зсуву) в місцях шарнірного кріплення між ребрами. Автори [90, 92] розробили математичні моделі на основі одного або двох з цих механізмів для конкретних геометричних структур. У площині модулі гексагонального стільника успішно моделюються за припущення, що ребра чарунки прогинаються як балки.

Використовуючи основи простої механіки для розрахунку прогинів у кожній балці, визначають зміни у всій чарунці, що надалі може бути використано для визначення параметрів всієї системи. На підставі чого запропоновано вирази для визначення модулів

пружності та коефіцієнтів Пуассона при одновісному навантаженні, результати розрахунку за якими дають гарну збіжність з експериментальними даними для металевих та каучукових стільникових структур [90, 92]. Модель прогину була удосконалена [90] за рахунок введення деформацій розтягнення та зсуву, але ці уточнення забезпечили лише незначне поліпшення моделі. Однак тільки в окремому випадку, коли гексагональні стільникові чарунки знаходяться під дією двовісного навантаження, частка деформації розтягнення вважається значною.

Але в дійсності, у більшості стільників такого типу відбувається згинання ребр, що є наслідком їхнього шарнірного кріплення та вісьового розтягування. Однак згинання ребр також призводить до появи аукзетик-ефекту в стільниках такого типу [12]. Початкові дослідження таких структур полягали, в основному, у їхніх аналітичних описах. Однак останнім часом з'явилися публікації, в яких до аналітичних досліджень додають обчислювальні підходи. Так, в аналітичну модель додано поперечний модуль зсуву симетричної стільникової структури [242].

Сітчасті структури мають таку геометрію одиниці чарунки, яка реалізує аукзетик-деформацію, що поряд із різноманітністю топології дозволяє проектувати стільники багатофункціонального використання. Властивості поза площиною деформації розраховують теоретично із застосуванням теорій Фойгта та Рейса. Їхня стільникова топологія забезпечує п'ять комплектів геометричних параметрів, що сприяє проектуванню оптимальних та багатофункціональних стільникових елементів. Так, на рис. 2.8 представлено елементарну чарунку реентерабельної структури, аналітичні описи якої можуть бути використані для параметричного аналізу стільникових елементів у класичних та багатофункціональних композиційних матеріалах [242, 243]:

$$v_{12} = \frac{\sin\theta(\alpha + \sin\theta + 2\gamma\sin\varphi)}{\cos\theta(\cos\theta + 2\gamma\cos\varphi)}. \quad (2.1)$$

У реентерабельних структурах використовують від'ємне значення кута нахилу  $\theta$ , що і призводить до від'ємності коефіцієнту Пуассона.

Механізми розтягування і вигину (зсуву) були об'єднані для розробки моделі гексагональної і реентерабельної чарунки тривимірної структури [244] для прогнозування коефіцієнту Пуассона, яка в узагальненій формі [245] може описати коефіцієнт Пуассона полімерних молекул. Для останніх типів структур орієнтації чарунок є випадковими на відміну від періодичних стільникових структур і, отже, дають дуже різні результати. Деформації прогинів та розтягування поєднувалися [246] також для опису еластичності жорстких неупорядкованих 3D-мереж. Ці математичні моделі показують, що в правильних шестикутних стільникових структурах значення коефіцієнту Пуассона вище 1 можна легко досягнути за рахунок відкритої чарунки. Також визначено [76, 244], що при реентерабельній формі чарунки від'ємний коефіцієнт Пуассона також може бути набагато меншим, ніж -1.

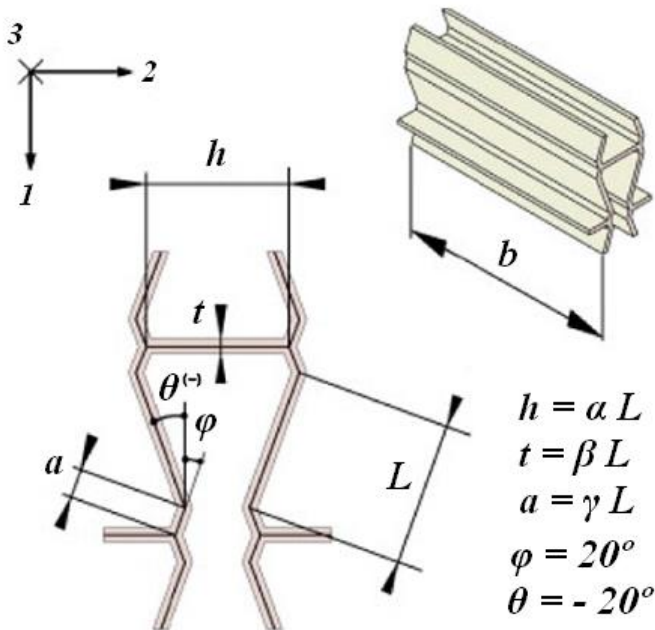


Рис. 2.8. Схема елементарної чарунки реентерабельної структури з ділянками вигину ребер

Автори [5] спробували об'єднати в одній моделі всі три механізми зсуву, прогину і розтягування, на підставі чого отримано формули для модулів зсуву, а також модуля Юнга і коефіцієнта Пуассона для дослідження позаосьових властивостей стільникових чарунк. Для полегшення порівняння моделей кожен з сил виражено через відповідну константу  $K_i$ , що також полегшує об'єднання трьох механізмів для створення загальної моделі. Для всіх трьох механізмів константа сили визначається загальним рівнянням

$$K_i = F/\delta, \quad (2.2)$$

де  $F$  – прикладена сила і  $\delta$  – зміщення, які викликає прикладена сила.

У загальному випадку для елементарної стільникової чарунки (рис. 2.9) з довжинами стінок  $l$  і  $h$ , товщиною  $t$  і глибиною  $b$  передбачено, що пружні константи матеріалу стінки відомі: модуль Юнга  $E_s$  і модуль зсуву  $G_s$ .

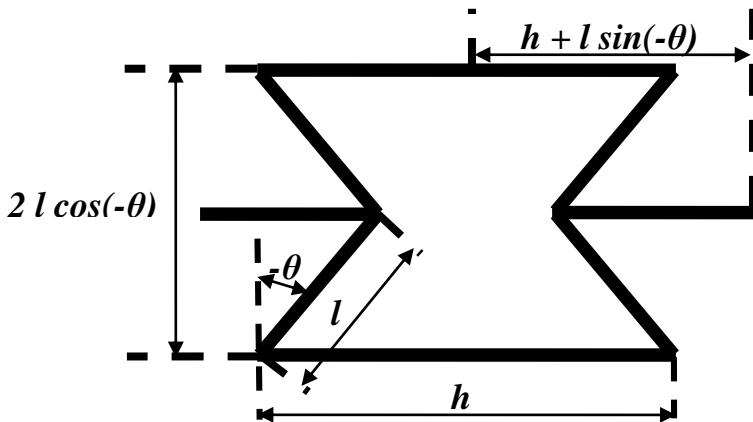


Рис. 2.9. Геометрична модель для розрахунку

На підставі чого отримані залежності для визначення констант  $K_i$  для кожного з деформаційних механізмів:

– прогину

$$K_f = \frac{E_s b t^3}{l^3}; \quad (2.3)$$



– розтягування

$$K_s = \frac{E_s b t}{l}; \quad (2.4)$$

– вигину (зсуву)

$$K_h = \frac{G_s b t^3}{l^3}. \quad (2.5)$$

Модель прогину в повному обсязі описано Гібсоном [92] і дає повне уявлення про механізм деформування реентерабельних чарунок. Встановлено взаємозалежність коефіцієнтів Пуассона (1.15) при розтягуванні в двох взаємно перпендикулярних напрямках:

$$v_{21} = 1/v_{12}. \quad (2.6)$$

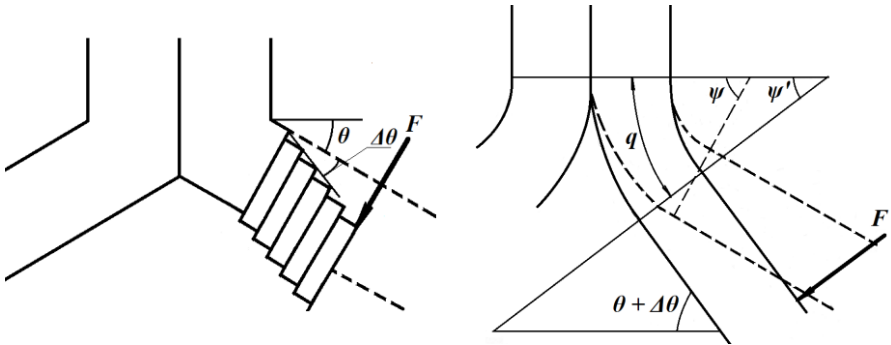
Модель розтягування передбачає, що стінки чарунки деформуються вздовж їхніх осей, не змінюючи кута нахилу, тобто витягуються. Коефіцієнт Пуассона в цьому випадку визначатиметься за рівняннями:

$$v_{21} = - \left( \frac{\sin \theta}{\sin \theta + h/l} \right), \quad (2.7)$$

$$v_{12} = - \frac{\sin \theta (h/l + \sin \theta)}{2h/l + \sin^2 \theta}. \quad (2.8)$$

Слід зауважити, що у відповідності до цієї моделі коефіцієнт Пуассона навіть звичайних гексагональних чарунок є від’ємним, але його значення є порівняно дуже малими для суттєвого впливу на властивості матеріалу.

Модель вигину передбачає, що під дією навантаження відбувається зміна кута нахилу стінки чарунки (рис. 2.10), водночас її довжина залишається незмінною.



а) процес зсуву

б) процес викривлення

Рис. 2.10. Схема вигину сторони (стінки) чарунки [5]

Коефіцієнт Пуассона в цьому випадку визначатиметься за рівняннями, які є подібними до отриманих за моделлю прогину (1.15) та (2.6):

$$v_{21} = \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta \left( \frac{h}{l} + \sin \theta \right)}, \quad (2.9)$$

$$v_{12} = \frac{\sin \theta \left( \frac{h}{l} + \sin \theta \right)}{\cos^2 \theta} = \frac{1}{v_{21}}. \quad (2.10)$$

Очевидно, що для реентерабельної чарунки при від'ємному куті  $\theta$  коефіцієнти Пуассона набувають також від'ємного значення при деформуванні в обох напрямках. У загальному вигляді з урахуванням всіх трьох механізмів деформування коефіцієнт Пуассона може бути визначений за наступними формулами [5]:

$$v_{12} = -\sin \theta \left( \frac{h}{l} + \sin \theta \right) \left[ \frac{-\frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_h} + \frac{1}{K_s}}{\frac{\cos^2 \theta}{K_f} + \frac{\cos^2 \theta}{K_h} + \frac{2\frac{h}{l} + \sin^2 \theta}{K_s}} \right], \quad (2.11)$$

$$v_{21} = - \frac{\sin\theta \cdot \cos\theta \left[ \frac{1}{K_f} + \frac{1}{K_h} - \frac{1}{K_s} \right]}{\left( \frac{h}{l} + \sin\theta \right) \left[ \frac{\sin^2\theta}{K_f \cos\theta} + \frac{\sin^2\theta}{K_h \cos\theta} + \frac{\cos\theta}{K_s} \right]}. \quad (2.12)$$

Кожна з моделей може бути використана для прогнозування пружних властивостей як звичайних, так і реентерабельних гексагональних чарунок. Звичайні шестикутні стільникові матеріали є ізотропним в 1,2-площині для всіх трьох механізмів деформації. Отримані результати показують, що при поєднанні властивостей аукзетик стільникова структура може бути ізотропним матеріалом, на відміну від анізотропної поведінки під дією кожного з механізмів деформування поодинці.

При використанні стільникових матеріалів в несучих конструкціях та композитах, які забезпечують поглинання енергії, вони підлягають значним деформаціям, коли на перший план виходять нелінійне поведіння цих матеріалів. Таким чином, для аналізу процесів найбільше підходить модель великих (значних) деформацій. Вигин у площині і нелінійний стиск звичайних стільників були проаналізовані Чжан і Ешбі [247] та Чжу і Міллсом [248], але за такого підходу зазвичай або уникають розрахунку саме найбільшого прогину, або розділяють деформовану одиницю на сегменти і розраховують значне відхилення від ітерації.

Авторами [16] запропоновано інший теоретичний підхід для оцінки та прогнозування від'ємного коефіцієнту Пуассона стільникових аукзетик-матеріалів, базуючись на моделі великої деформації (прогину). Встановлено, що коефіцієнт Пуассона стільникової аукзетик-структури не є константою при значних деформаціях, а істотно змінюється залежно від прикладеної напруги, однак на межі малих деформацій цієї моделі він збігається з прогнозованими результатами. При значних деформаціях коефіцієнти Пуассона різні при дії навантаження стиску і розтягування. Геометричні параметри елементарної чарунки реентерабельних стільникових структур мають значний вплив на величину коефіцієнта Пуассона і можуть змінити знак коефіцієнту з від'ємного на додатний, особливо при Y-напрямку розтягуванні

або X-напрямку стискаючого навантаження за умови, що деформація є достатньо великою. При малих деформаціях зафіксована ортогональна симетрія коефіцієнтів Пуассона для деяких геометричних параметрів елементарної чарунки (особливо при  $a/b=2$  та  $\theta=30^\circ$ ). Взаємне співвідношення між  $\nu_x$  і  $\nu_y$  зберігається для всіх геометричних параметрів при малих деформаціях. Однак при значних деформаціях ні ортогональність симетрії, ні співвідношення коефіцієнтів не можуть бути забезпечені.

Для визначення залежності між коефіцієнтом Пуассона та параметрами структури реентерабельної стільникової чарунки авторами [249] було використано метод кінцевих елементів. Для дослідження як базовий елемент прийнято трикутник, кожний з вузлів якого має три ступені свободи. На рис. 2.11 представлено елементарну чарунку реентерабельної стільникової структури.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що при збільшенні ширини ребра чарунки від'ємне значення коефіцієнту Пуассона зменшується, що є свідченням високої жорсткості матеріалу. Кут нахилу є визначальним параметром, який характеризує структуру і можливість отримання аукзетик-матеріалів з сировини, яка має додатний коефіцієнт Пуассона.

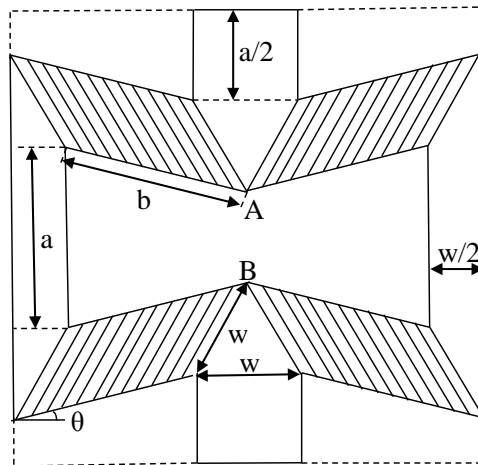


Рис. 2.11. Геометрична модель реентерабельної стільникової чарунки [249]

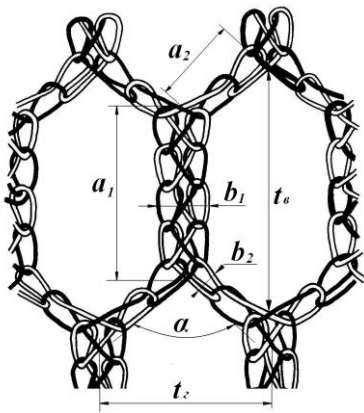
Для підтвердження цього були досліджені варіанти структур, в яких ширина ребер чарунки залишалася постійною, а змінювали співвідношення довжин  $a/b$  та кут  $\theta$  за умови, що немає контакту точок А та В. При  $a/b=0,5$  максимального від'ємного значення ( $v_{xy}=-0,99$ ) коефіцієнт Пуассона досягає при навантаженні вздовж осі абсцис при значенні кута  $\theta=14,47^\circ$ . При  $a/b \geq 1$  коефіцієнт Пуассона досягає максимального від'ємного значення при навантаженні вздовж осі абсцис при значенні кута  $\theta=30^\circ$ , а при навантаженні вздовж осі ординат при значенні кута  $\theta=40^\circ$ . При співвідношенні довжин сторін  $a/b=2$  максимальне від'ємне значення коефіцієнт Пуассона досягне при куті  $\theta=59^\circ$  при навантаженні в обох напрямках. При  $a/b \geq 2$  тенденції зберігаються.

Загальновідомо, що трикутник є абсолютно анізотропним матеріалом, а отже, потребує особливого підходу при проектуванні та дослідженні його властивостей. Враховуючи приведені вище моделі звичайних та реентерабельних гексагональних чарунок і особливості будови основов'язаного трикутника філейного переплетення, при проектуванні аукзетик-трикутника запропоновано використовувати наступні розміри елементарної чарунки (рис. 2.12), які зазвичай використовують для характеристики сітковирубів: довжини  $a_1, a_2$  і ширини  $b_1, b_2$  вертикальної і нахиленої сторін, кроки чарунки по горизонталі  $t_2$  і вертикалі  $t_6$  та кут розкриття чарунки  $\alpha$ . Слід зазначити, що для обох варіантів справедливі наступні рівняння:

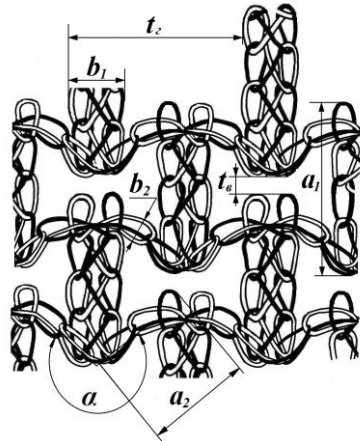
$$t_2 = 2a_2 \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (2.13)$$

$$t_6 = a_1 + a_2 \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (2.14)$$

Максимального абсолютного значення від'ємний коефіцієнт Пуассона видозміненої гексагональної чарунки (рис. 2.12.б) досягне тоді, коли під дією навантаження нахилені ребра вирівнюються і розташуються горизонтально в структурі трикутника. Відстань між двома вертикальними ребрами чарунки зросте від  $t_6$  до  $2a_2$  по горизонталі і від  $t_6$  до  $(a_1 - 2b_2)$  по вертикалі.



а) звичайної



б) видозміненої

Рис. 2.12. Схема чарунки основов'язаного трикотажу

Зміна розмірів чарунки набуде наступних значень:

$$\varepsilon_x = \frac{2a_2 - t_g}{t_g} = \frac{2a_2}{t_g} - 1 \quad (2.15)$$

та

$$\varepsilon_y = \frac{a_1 - 2b_2 - t_B}{t_B} = \frac{a_1 - 2b_2}{t_B} - 1. \quad (2.16)$$

Коефіцієнт Пуассона визначатиметься за формулами

$$\nu_{xy} = -\frac{(2a_2 - t_g)}{t_g} \Big/ \frac{(a_1 - 2b_2 - t_B)}{t_B} = -\frac{(2a_2 - t_g)}{(a_1 - 2b_2 - t_B)} \frac{t_B}{t_g}, \quad (2.17)$$

аналогічно

$$\nu_{yx} = -\frac{(a_1 - 2b_2 - t_B)}{(2a_2 - t_g)} \frac{t_g}{t_B}. \quad (2.18)$$

Враховуючи значення кроків чарунки (2.13) та (2.14), маємо

$$v_{xy} = - \frac{\left(2a_2 - 2a_2 \sin \frac{\alpha}{2}\right)}{2a_2 \sin \frac{\alpha}{2}} \bigg/ \frac{\left(a_1 - 2b_2 - \left(a_1 + a_2 \cos \frac{\alpha}{2}\right)\right)}{\left(a_1 + a_2 \cos \frac{\alpha}{2}\right)}, \quad (2.19)$$

звідки після скорочень отримуємо [250]

$$v_{xy} = \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1\right) \frac{\left(a_1 + a_2 \cos \frac{\alpha}{2}\right)}{\left(2b_2 + a_2 \cos \frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (2.20)$$

Аналогічно

$$v_{yx} = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\left(1 - \sin \frac{\alpha}{2}\right)} \frac{\left(2b_2 + a_2 \cos \frac{\alpha}{2}\right)}{\left(a_1 + a_2 \cos \frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (2.21)$$

#### **2.4. Аукзетик-трикотаж на основі структури з ромбовидних решіток**

Іншим основов'язаним аукзетик-матеріалом є трикотаж [214], який розроблений на основі реентерабельної структури з ромбовидних решіток з вилученими зв'язками подібної до геометричної моделі (рис. 1.20), яку запропонував Сміт [54]. Для її реалізації в основов'язаному трикотажі запропоновано використовувати утокові переплетення (рис. 2.13). У такій структурі було б доречно використати дві системи утокових ниток:  $a$  – вертикальну та  $b$  – горизонтальну. Але на переважній більшості діючих основов'язальних машин є певні труднощі у прокладанні утоку на всю ширину полотна.

Тому запропоновано прокладати утокову нитку за певним рапортом (рис. 2.14.а) при неповному набиранні гребінки. Грунтовим переплетенням у такому полотні рекомендується використовувати ланцюжок при повному набиранні гребінки або за

певним рапортом. Слід зауважити, що при повному набірнні ґрунтової гребінки забезпечується отримання більш щільного трикотажу. Для кращого контакту (шарнірне з'єднання) двох сусідніх утокових ниток та створення каркасу в місцях повороту утокової нитки бажано пров'язувати її в петлі (рис. 2.14.б).

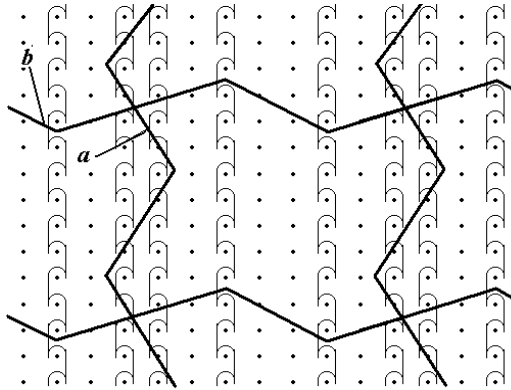


Рис. 2.13. Схема утокового аукзетик-трикотажу

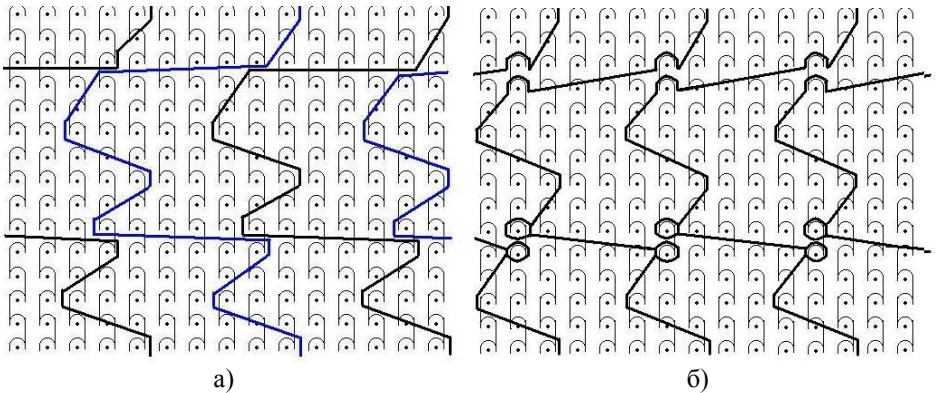


Рис. 2.14. Графічні записи аукзетик-основов'язаного трикотажу, який має елементарну ланку з ромбовидних решіток

Для експериментального дослідження на машині 10 класу [238] вироблено дев'ять варіантів трикотажу:

– чотири варіанти утокового трикотажу, в якому утокова нитка прокладалася за наступним аналітичним записом

0-0/1-1/1-2/4-5/5-5/6-6/3-3/4-4/4-5/2-1/2-2/3-3;



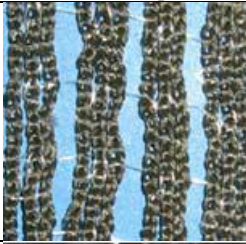

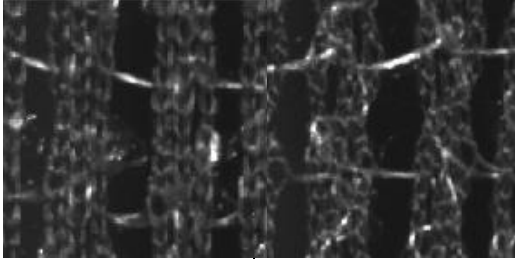
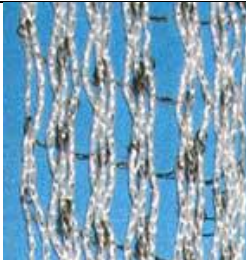



– п'ять варіантів трикотажу, в якому в певних рядах рапорту нитка пров'язується в петлі. Аналітичний запис роботи гребінки 0-0/1-1/2-3/6-7/8-8/9-9/7-6/4-4/5-5/6-7/3-2/4-4/5-5/3-2.

Для дослідження впливу сировини на параметри та властивості полотен використано два види ниток: арамідні нитки Nomex лінійною густиною 22,2x2 текс та поліефірні нитки лінійною густиною 27,8 текс. Для вивчення впливу розміру рапорту та величини елементарної ланки структури використано три варіанти часткового набирання утокової гребінки: |.|, |..|. та |...|...| при повному набиранні ґрунтової гребінки, з ниток якої утворюється переплетення ланцюжок.


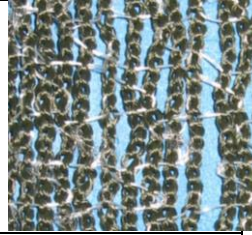

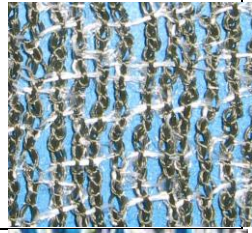




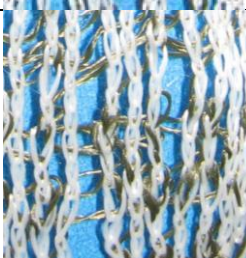
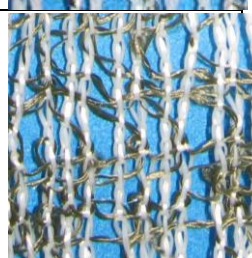
У таблицях 2.2 та 2.3 представлено фотографії трикотажу різних варіантів заправки. Візуальний аналіз структури трикотажу показує, що петлі ґрунтового переплетення ланцюжок, які утворені з арамідної пряжі Nomex, мають закруглену форму (зразки 1 та 2, 5 та 6). Це характерно для трикотажних полотен, які вироблено з жорстких ниток. У основов'язаного трикотажу, петлі ґрунтового переплетення якого виготовлені з поліефірних ниток, форма петлі дещо видовжена в напрямку петельного стовпчика (зразки 3 та 4, 7, 8 та 9). У переважній більшості зразків утокова нитка формує замкнений контур. Водночас у зразках 1 та 2 (таблиця 2.2) і 5 та 6 (таблиця 2.3) на певних ділянках спостерігається горизонтальне положення утокової нитки. Слід зазначити, що в цих випадках як утокові використано поліефірні нитки.

У всіх інших зразках при використанні арамідних ниток в якості утокових на аналогічних ділянках утокові нитки розташовуються під невеликим нахилом до горизонтальної лінії (петельних рядів). Аукзетик-ефект цих полотен і виявиться при деформації, коли утокові нитки змінюють положення від нахилених до горизонтальних.

## Оснoвoв'язані пoлoтнa з утoкoвoю ниткoю

Варіант	Заправка гребінки		Фотографія зразка	
	грунтової	утокової	лицьова сторона	виворотна сторона
1	Номех 22,2x2т x 2 повна	Поліефір 27,8т x 2 часткова  .. .		
2	Номех 22,2x2т повна	Поліефір 27,8т x 2 часткова  .. .		
3	Поліефір 27,8т x 2 повна	Номех 22,2x2т часткова  .. .		
4	Поліефір 27,8т x 2 повна	Номех 22,2x2т часткова  . .		

**Основов'язані полотна з утоковою ниткою,  
яка пров'язується в петлі за рапортом**

Варіант	Заправка гребінки		Фотографія зразка	
	грунтової	утокової	лицьова сторона	вिवоротна сторона
5	Nomex 22,2x2т x 2 повна	Поліефір 27,8т x 2 часткова  ... ...		
6	Nomex 22,2x2т повна	Поліефір 27,8т x 2 часткова  ... ...		
7	Поліефір 27,8т x 2 повна	Nomex 22,2x2т часткова  ... ...		
8	Поліефір 27,8т x 2 повна	Nomex 22,2x2т часткова  . ..		
9	Поліефір 27,8т x 2 повна	Nomex 22,2x2т Часткова  . ..		

## 2.5. Аукзетик-властивості основ'язаного трикотажу

Дослідження коефіцієнту Пуассона проводили на спеціальній установці (рис. 2.15), яка складалася з розривної машини Instron 5569 та фотокамери Sensicamera QE з роздільною здатністю 1376 x 1040 пікселя, за наступною методикою [250]. Розтягування зразків полотен відбувалося на розривній машині у відповідності до ASTM D5034-95 (2001) для визначення сили розриву і величини подовження текстильних полотен. Затискна довжина зразка була 100 мм, ширина – 50 мм і швидкість руху верхнього затискача – 50 мм/хв. У центральній частині кожного зразка відмічали квадратну ділянку розміром 20 мм x 20 мм. Камеру концентрували на центральній ділянці зразка, де розташована ділянка дослідження, і фіксували для забезпечення нерухомості під час досліджу.

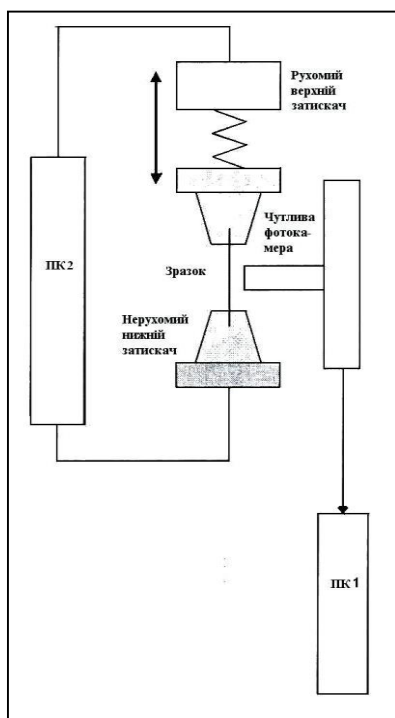


Рис. 2.15. Схематичне зображення установки для визначення коефіцієнту Пуассона

Фото зразка робили в процесі розтягування через кожний 1 мм видовження, що фіксувалося програмним забезпеченням фотокамери на ПК-1. У результаті було отримано по 60–100 фото для кожного досліду. Водночас процес розтягування фіксувався на ПК-2 відповідним програмним забезпеченням розривної машини Instron. Для одночасного визначення напівциклових розривних характеристик полотен процес розтягування доводили до розривання зразків. Для кожного варіанту основов'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення проводили по п'ять паралельних дослідів.

Розміри ділянки в процесі дослідження визначали за допомогою програм Photoshop та Image-J, знаходили відносні розширення  $\epsilon_x$  та видовження  $\epsilon_y$  і визначали відповідний коефіцієнт Пуассона (1.1) в кожний період вимірювання. На підставі цього побудовано графіки залежності коефіцієнту Пуассона від видовження зразка. Кожна залежність є середньою серед п'яти паралельних дослідів.

На рис. 2.16 та рис. 2.17 представлено графіки залежності коефіцієнту Пуассона трикотажу утоково-філейного переплетення з поліуретановою ниткою 7,8 текс як високорозтяжної компоненти від видовження при розтягуванні вздовж петельних стовпчиків при різних варіантах введення утокової нитки в структуру філейного трикотажу.

Отримані графіки показують, що практично всі досліджені полотна на першому етапі розтягнення (видовження до 20 %) мають від'ємний коефіцієнт Пуассона, що свідчить про аукзетик-властивості розроблених полотен. Слід зазначити, що основов'язані полотна комбінованого утоково-філейного переплетення з варіантом *б* введення утокової нитки мають показник дещо вищий (до 20 %), ніж полотна з варіантом *а* введення утокової нитки. Це можна пояснити незначною зміною конфігурації чарунки у полотен варіанту *б*: вертикальні сторони чарунок дещо нахилиються в площині полотна, що призводить до зміни властивостей. Особливо такий нахил спостерігається в полотен, у рапорті яких 7 рядів трико.

Для трикотажу, в структурі якого спостерігається нахил вертикальних ділянок чарунки, дослідження коефіцієнту Пуассона проводили при розтягуванні як вздовж петельних стовпчиків

(вздовж полотна), так і вздовж петельних рядів (поперек полотна). Результати дослідження, які представлено на рис. 2.18, показують, що оснований'язаний трикотаж утоково-філейного переплетення, в рапорті якого 7 рядів переплетення трико, варіанту *б* розташування утокової нитки в структурі виявляє аукзетик-властивості при розтягненні як вздовж петельних стовпчиків, так і вздовж петельних рядів.

Дослідження коефіцієнту Пуассона оснований'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення з поліуретановою ниткою 4,4 текс як високорозтяжної компоненти, при розтягуванні вздовж петельних стовпчиків (рис. 2.19) і петельних рядів (рис. 2.20) проводили лише для варіантів трикотажу, в рапорті якого 7 рядів переплетення трико за різних варіантів розташування утокової нитки в структурі.

Отримані результати підтверджують висновки, які зроблені вище: оснований'язаний трикотаж утоково-філейного переплетення з варіантом *б* розташування утокової нитки в структурі має кращі аукзетик-властивості, ніж трикотаж варіанту *а* розташування утоку. При цьому від'ємність коефіцієнту Пуассону виявляється при розтягуванні як вздовж петельних стовпчиків, так і вздовж петельних рядів.

Водночас виявлено залежність коефіцієнту Пуассона від лінійної густини поліуретанового компоненту утокової нитки. Результати дослідження показують, що при використанні утокової нитки з поліуретановим компонентом 4,4 текс від'ємність коефіцієнту спостерігається лише в початковому періоді розтягування (до 10 %). Лише трикотаж, в рапорті якого 7 рядів переплетення трико та 3 ряди переплетення ланцюжок, варіанту *б* розташування утокової нитки зберігає від'ємність коефіцієнту при витягуванні на 50 % вздовж петельних стовпчиків і на 30% вздовж петельних рядів.

Проведені дослідження коефіцієнту Пуассона трикотажу комбінованого утоково-філейного переплетення підтвердили теоретичне припущення, що всі розроблені полотна з видозміненою гексагональною формою чарунки виявляють аукзетик-властивості, особливо на першому етапі розтягнення (до 20 %).

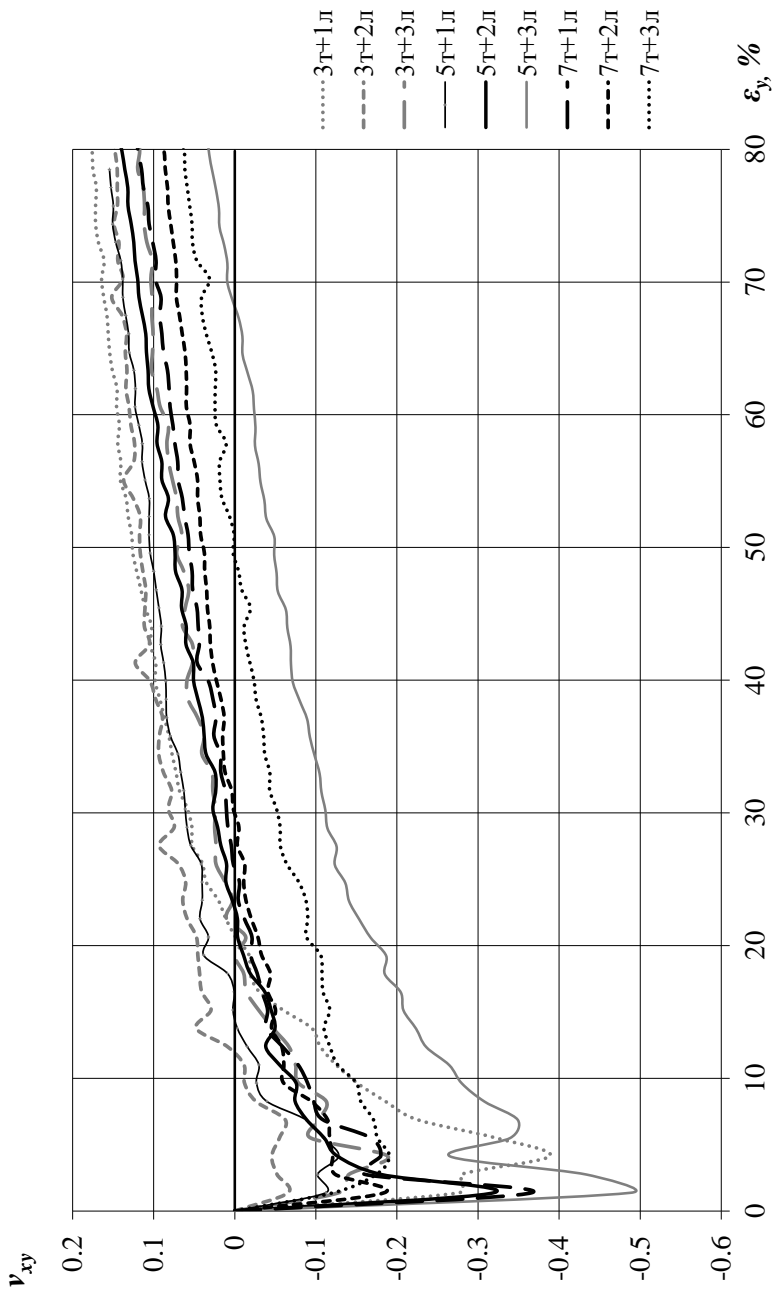


Рис. 2.16. Залежність коефіцієнту Пуассона від видовження вздовж петельних стовпчиків  
 полотна варіанту а розташування утокової нитки

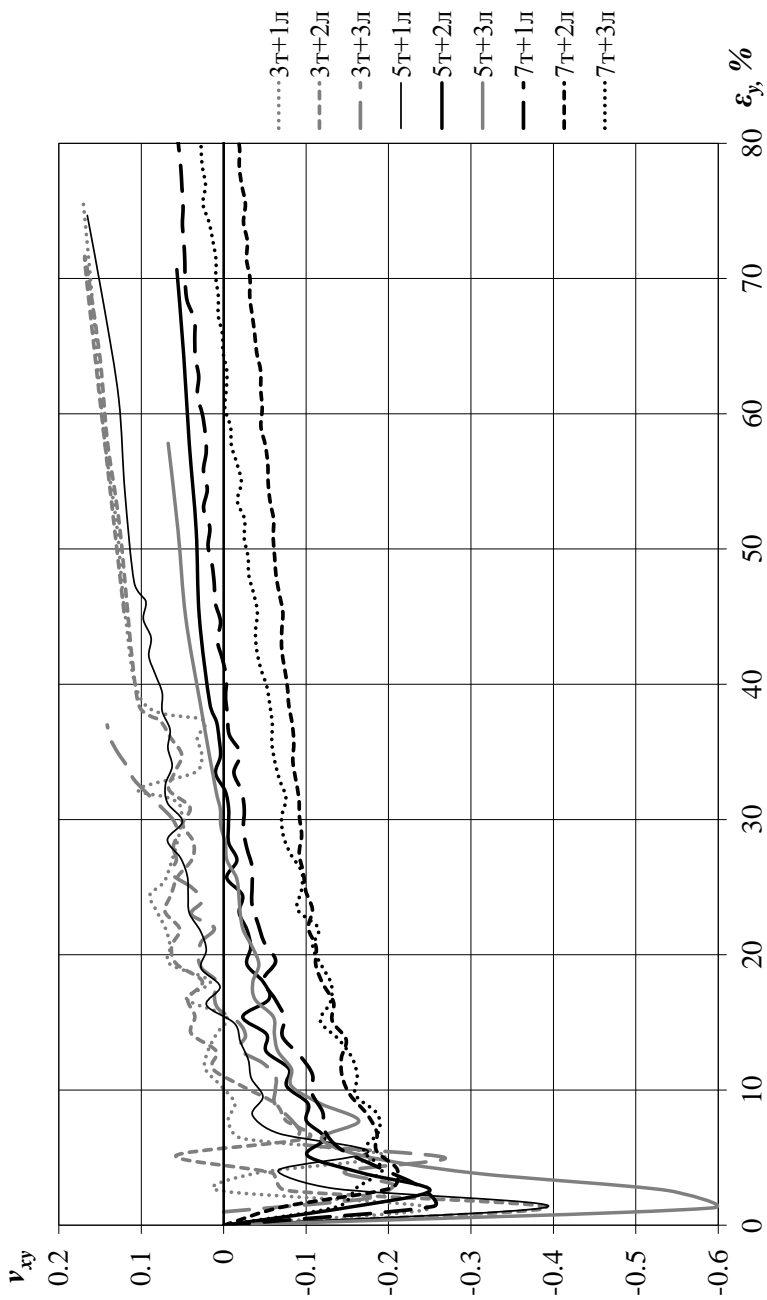


Рис. 2.17. Залежність коефіцієнту Пуассона від видобження вздовж петельних стовпчиків  
полотна варіанту б розташування утокової нитки



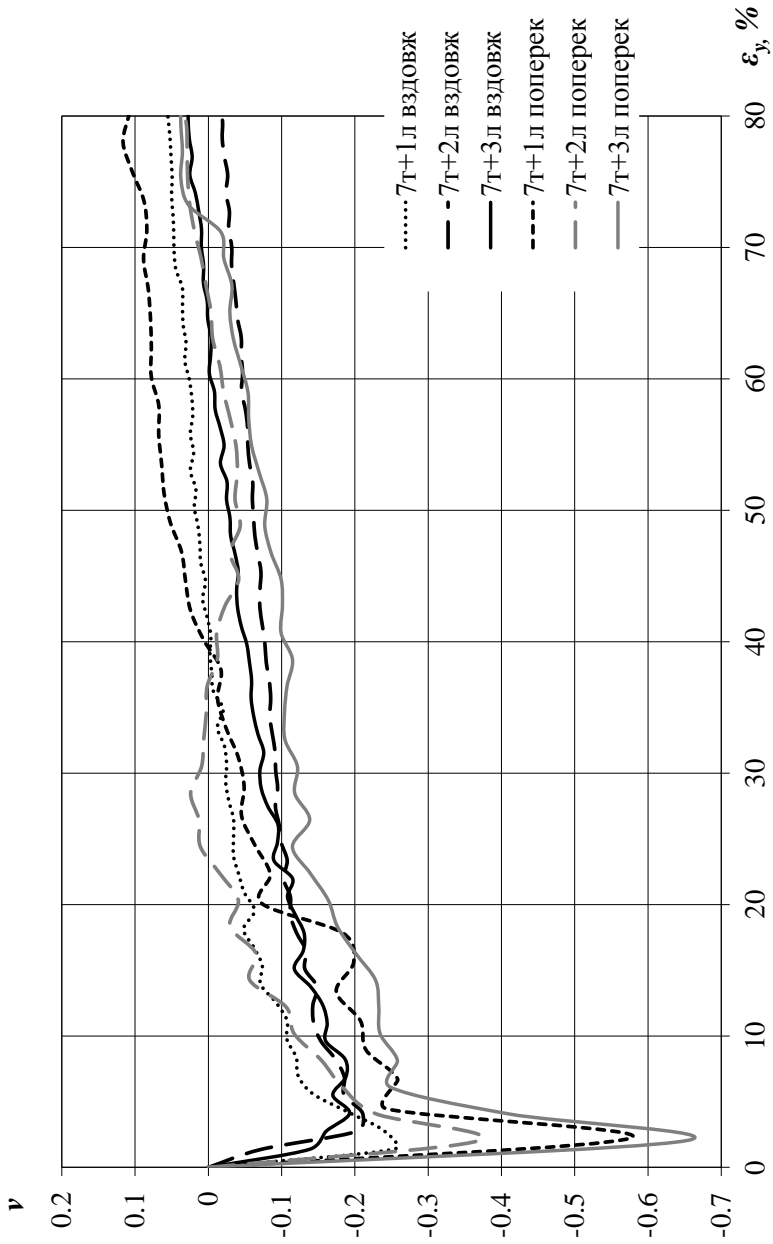


Рис. 2.18. Залежність коефіцієнту Пуассона від видовження полотна варіанту б розташування утокової нитки, в рапорті якого 7 рядів трико

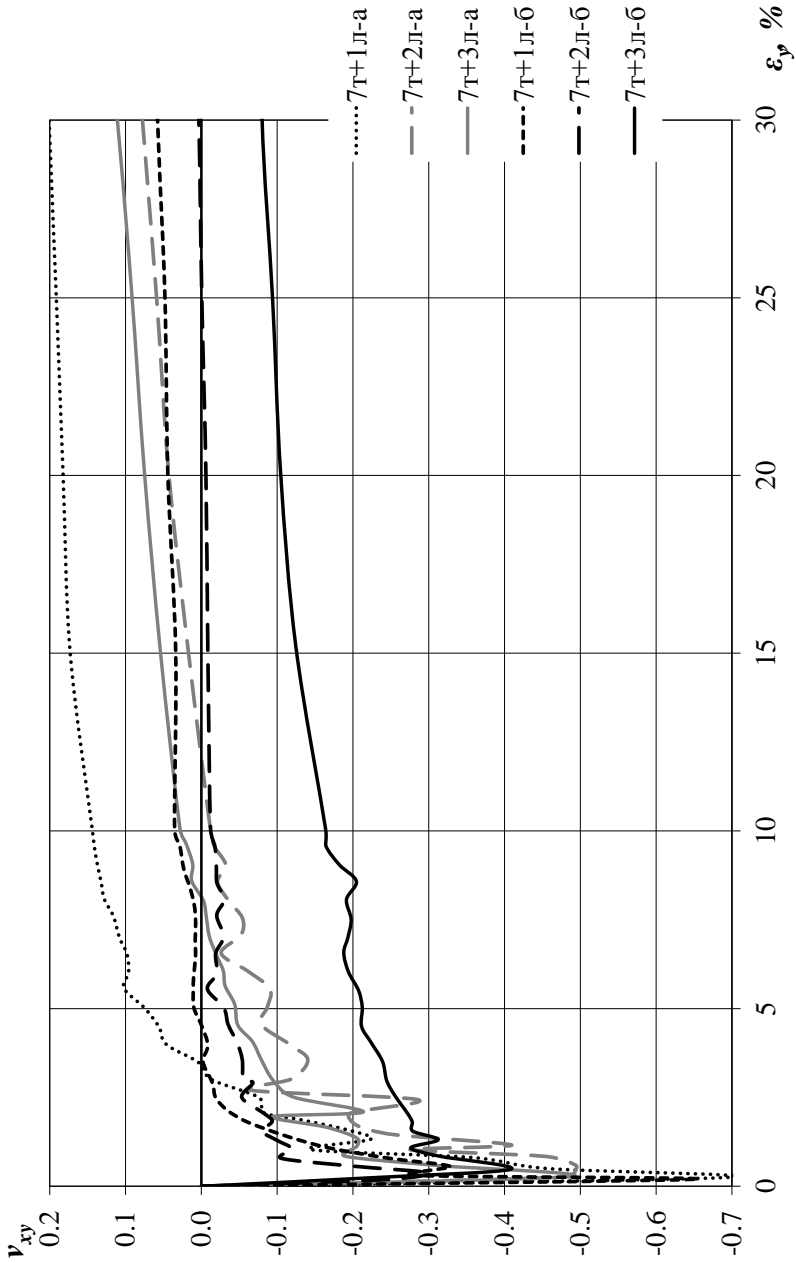


Рис. 2.19. Залежність коефіцієнту Пуассона від видовження при розтягуванні вздовж петельних стовпчиків

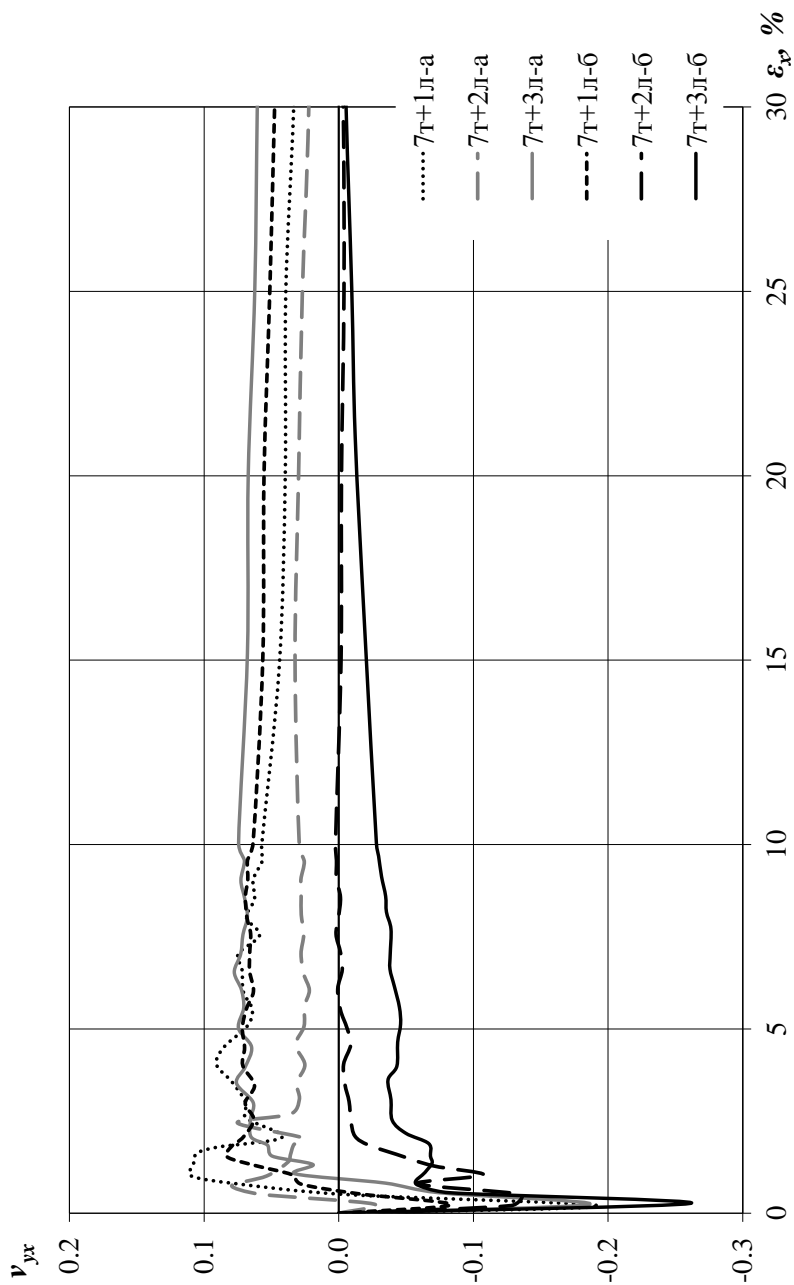


Рис. 2.20. Залежність коефіцієнту Пуассона від видовження при розтягуванні вздовж петельних рядів

Встановлено, що лінійна густина високорозтяжної утокової нитки та варіант її розташування в структурі філейного трикотажу впливає на показник. Аукзетик-властивості трикотажу, в якому використано поліуретанову нитку 4,4 текс, нижчі властивостей трикотажу, в якому використано поліуретанову нитку 7,8 текс, за інших однакових параметрів. Полотна з варіантом б введення утокової нитки мають показник вищий майже на 20 %.

Аналіз отриманих експериментальних даних за допомогою програмного забезпечення SPSS дозволив встановити залежність коефіцієнту Пуассона основов'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення від наступних співвідношень розмірів елементарної чарунки [252]:

– співвідношення кроків чарунок

$$K_1 = t_e / t_z ; \quad (2.22)$$

– відношення кроку чарунки по вертикалі до висоти вертикальної сторони

$$K_2 = t_e / a_1 \quad (2.23)$$

– тангенс кута нахилу діагональної сторони чарунки до горизонталі

$$\operatorname{tg} \alpha = (t_e - a_1) / t_z . \quad (2.24)$$

Найкращу кореляцію коефіцієнту Пуассона встановлено до тангенсу кута нахилу діагональної сторони чарунки [217], що підтверджується відповідними лінійними залежностями (рис. 2.21). Таким чином, результати досліджень коефіцієнту Пуассона трикотажу утоково-філейного переплетення з видозміненими стільниковими чарунками підтверджують правильність підходу до аналітичного визначення коефіцієнту Пуассона (п.2.3), в якому за основу прийнято геометричні розміри чарунки основов'язаного трикотажу.

У таблиці 2.4 наведено найменші значення, яких набуває коефіцієнт Пуассона трикотажу утоково-філейного переплетення, в рапорті якого 7 рядів трико, та аналітично розраховані показники. Наведені дані показують деяку розбіжність розрахункових та

експериментальних даних, що можна пояснити, в першу чергу, нестабільністю петельної структури трикотажу.

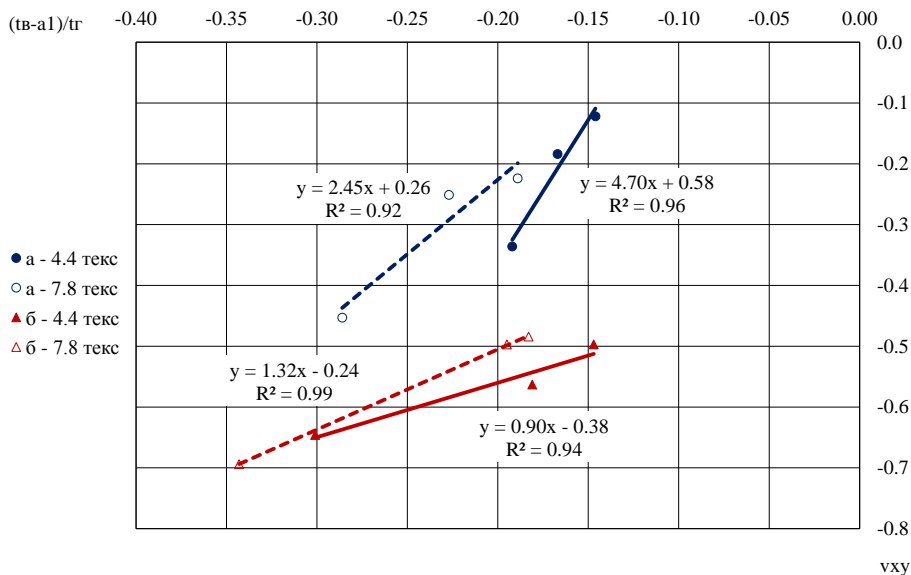


Рис. 2.21. Залежність коефіцієнту Пуассона від співвідношення розмірів чарунки

Таблиця 2.4

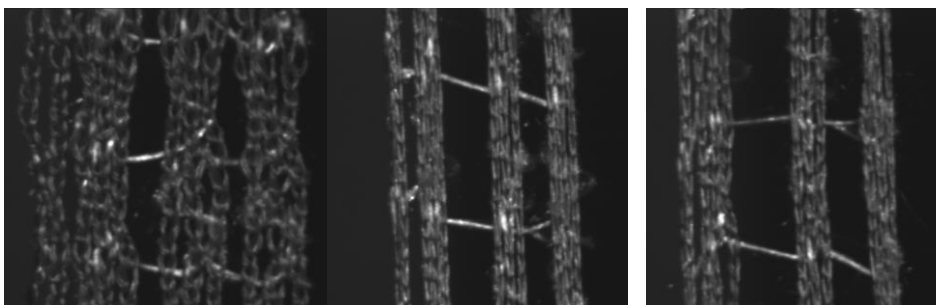
**Коефіцієнт Пуассона трикотажу утоково-філейного переплетення**

Варіант розташування утокової нитки	Лінійна густина утоку, текс	Метод розрахунку коефіцієнту	Варіант рапорту		
			7Т+1л	7Т+2л	7Т+3л
а	4,4	експериментально	-0,336	-0,184	0,122
		аналітично	-0,513	-0,416	-0,182
	7,8	експериментально	-0,453	-0,251	-0,224
		аналітично	-0,522	-0,289	-0,113
б	4,4	експериментально	-0,497	-0,563	-0,646
		аналітично	-0,546	-0,921	-1,002
	7,8	експериментально	-0,694	-0,497	-0,484
		аналітично	-1,378	-1,252	-0,465

У процесі розтягування відбувається не просте переміщення ділянок петель, паралельно з цим процесом відбувається зміна

форми петель, особливо в місцях з'єднання нахилених і вертикальних ділянок, та перетягування ниток з протяжок петель в їхні остови і навпаки. Однак слід зауважити, що спостерігається подібність залежностей розрахункового та експериментального коефіцієнтів Пуассона від варіанту розташування утокової нитки та лінійної густини високорозтяжного компоненту в складі утокової нитки.

Дослідження процесу розтягування основ'язаного трикотажу утокових переплетень, в якому реалізовано реентерабельну аукзетик-структуру у вигляді решіток, показало, що цей трикотаж на першому етапі розтягування поводить себе як звичайне полотно (рис. 2.22), тобто трикотаж звужується, що зазвичай призводить до додатного значення коефіцієнту Пуассона. У момент, коли відносне видовження цих полотен (рис. 2.23) перевищує 20–30%, відмічається зростання ширини (в деяких випадках до 20%). Це можна пояснити тим, що на першому етапі під дією сил розтягування відбувається витягування петлі ланцюжка, палички остову зближуються, відбувається перерозподіл нитки між остовами петель та протяжками. Коли ці процеси завершено, починає працювати утокова нитка, яку введено в структуру. Отже, удосконалення цієї структури може бути здійснено за рахунок варіювання сировинним складом ґрунтових та утокових ниток, а також за рахунок збільшення щільності в'язання ланцюжка.



а. початкове                      б. при видовженні 5 %                      в. при видовженні 50 %  
Рис. 2.22. Фото зразків утокового трикотажу в процесі розтягування

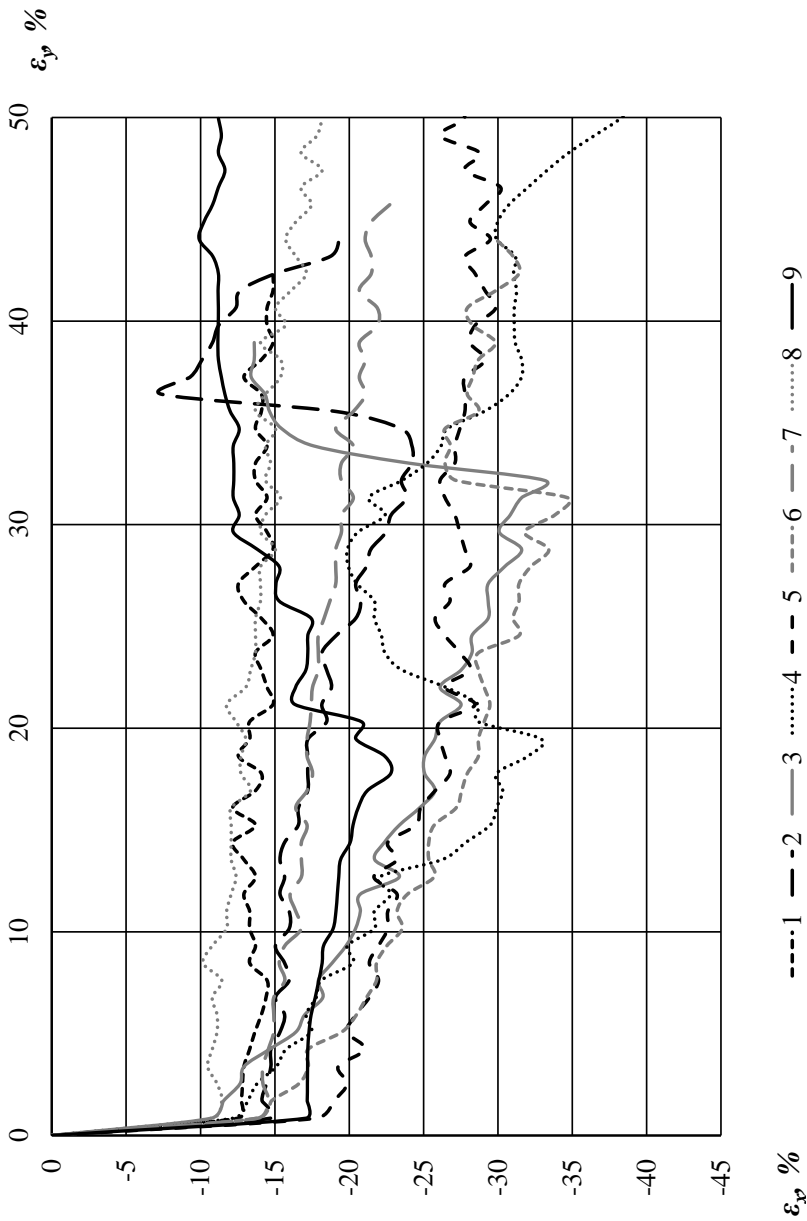


Рис. 2.23. Залежність відносного розширення основів'язаного трикутника  
утокового переплетення від видовження

## 2.6. Висновки по розділу

Теоретичний аналіз сітчастих матеріалів показав, що технологія основов'язання забезпечує вироблення різноманітних за розмірами та формою чарунок трикотажних полотен, при цьому найкращим для їх реалізації є філейне переплетення. Проведений аналіз структури філейного трикотажу, який утворений чергуванням рядів трико та ланцюжка в рапорті, виявив що:

- остови закритих петель трико всіх рядів крім останнього розташовуються в структурі трикотажу вертикально і вигинаються лише з площини трикотажу; кількість рядів трико в рапорті впливає тільки на довжину ділянки, а не на форму петлі;
- остови закритих петель трико останнього ряду рапорту трикотажу нахилиються в площині трикотажу в бік, протилежний розташуванню протяжок, і утворюють перший ряд нахиленої сторони чарунки;
- остови відкритих петель трико та петель ланцюжка, які утворюють діагональну ділянку, різняться за формою та розмірами, однак всі вони нахилиються в бік нахилу остова попередньої петлі трико; кількість рядів ланцюжка в рапорті філейного переплетення впливає як на довжину діагональної ділянки, так і на форму петель, які її утворюють.

Сформульовані принципи утворення чарунок гексагональної чарунки спрощують процес проектування сітчастих структур з чарунками заданих розмірів.

Вперше спроектовано аукзетик-основ'язаний трикотаж, в якому реалізована реентерабельна стільникова будова елементарної чарунки. Це досягається за рахунок введення в структуру трикотажу філейного переплетення з гексагональними чарунками високорозтяжної еластомерної нитки у вигляді повздовжнього утоку, яка після релаксації видозмінює форму елементарної чарунки до реентерабельного стану. Теоретичні положення підтверджено експериментально.

Дослідження параметрів структури трикотажу комбінованого основов'язаного утоково-філейного переплетення дозволяють зробити наступні висновки:



- довжина нитки в петлі та довжина утоку утоково-філейного переплетення не залежать ні від рапорту переплетення ґрунту, ні від лінійної густини поліуретанового компоненту утокової нитки, ні від варіанту введення утокової нитки в структуру філейного переплетення, а залежать лише від вхідних параметрів в'язання;
- рапорт переплетення та варіант введення в структуру філейного трикотажу повздожньої утокової нитки суттєво впливає на параметри структури трикотажу та геометричні розміри чарунок, що призводить до різних аукзетик- властивостей таких структур;
- лінійна густина поліуретанового компоненту утокової нитки має суттєвий вплив лише на крок чарунок по вертикалі: збільшення лінійної густини нитки призводить до скорочення відстані між вертикальними сторонами чарунок по вертикалі, а, відповідно, і прояву кращих аукзетик-властивостей матеріалу.

На підставі проведеного теоретичного аналізу існуючих методів проектування коефіцієнту Пуассона звичайних та реентерабельних стільникових структур встановлено, що головними параметрами, які визначають від'ємність коефіцієнту Пуассона, є співвідношення довжин ребер чарунки та кут нахилу ребра до напрямку розтягування. Запропоновані формули для розрахунку коефіцієнту Пуассона основов'язаних аукзетик-полотен враховують розміри гексагональної чарунки, які зазвичай використовують для характеристики сітковиробів. Результати аналітичного розрахунку підтверджено експериментальними даними.

Дослідження коефіцієнту Пуассона основов'язаного трикотажу комбінованого утоково-філейного переплетення з видозміненими стільниковими чарунками показали, що практично всі запропоновані варіанти структур трикотажних полотен на першому етапі розтягнення виявляють від'ємність коефіцієнту Пуассона. В деяких варіантах полотен ця властивість зберігається навіть при відносному видовженні на 100% при розтягненні як вздовж петельних стовпчиків, так і вздовж петельних рядів. Встановлено, що лінійна густина високорозтяжної утокової нитки

та варіант її розташування в структурі філейного трикотажу впливає на показник.

Вперше спроектовано аукзетик-основ'язаний трикотаж, в якому реалізована реентерабельна структура з ромбовидних решіток. Реалізація структури здійснена при використанні утокових переплетень за рахунок введення утокової нитки за певним рапортом в базове переплетення ланцюжок. Необхідне розташування утокової нитки досягається при використанні в якості утокових ниток підвищеної жорсткості, наприклад, арамідних.

Дослідження коефіцієнту Пуассона основов'язаного трикотажу утокових переплетень показали, що цей трикотаж на першому етапі розтягування поводить себе як звичайне полотно. Коли відносне видовження полотен перевищує 50%, відмічається зростання ширини (в деяких випадках до 20%).

### **3. ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ СТРУКТУРИ УТОКОВО-ФІЛЕЙНОГО ТРИКОТАЖУ**

#### **3.1. Особливості введення утку в структуру основов'язаного трикотажу**

Основов'язаний трикотаж уточних переплетень виробляють з уточними нитками, які прокладені в напрямку в'язання як петельних рядів (з поперечними уточними нитками), так і петельних стовпчиків (з повздовжніми уточними нитками). При його виготовленні керуються трьома правилами [231]:

1. Утоковою гребінкою може бути тільки передня гребінка, яка розташовується ближче до спинок голок, ніж ґрунтова. Тільки в цьому випадку утокова нитка може зароблятися під протяжками ґрунтових ниток;
2. Утокові гребінки кладок на голки не роблять, а виконують тільки зсуви за голками;
3. На двофонтурних основов'язальних машинах кожна з гребінок може бути утоковою по відношенню до голок різних голечниць.

При виробленні основов'язаного трикотажу утокових переплетень величина і напрям зсувів за голками утокових і ґрунтових гребінок визначають структуру трикотажу [239, 253]. Розрізняють шість основних варіантів зсувів утокових і ґрунтових гребінок за голками [231]:

1. Зсуви за спинками голок виконують лише вушкові гребінки з ґрунтовими нитками. В цьому випадку утокові нитки розташовуються на лицьовій стороні трикотажу і в трикотаж не вв'язуються.
2. Утокова та ґрунтова гребінки за спинками голок зсуваються в один і той же бік і на однакову кількість голкових кроків. У цьому випадку утокові нитки розташовуються на виворотній стороні трикотажу і в трикотаж не вв'язуються.
3. Утокова та ґрунтова гребінки за спинками голок зсуваються в один і той же бік, при цьому ґрунтова гребінка зсувається на більшу кількість голкових кроків ніж утокова. В цьому випадку утокова нитка розташується між сусідніми петельними стовпчиками ґрунту, не обвиваючи протяжок петель, а лише перекриваючи їх то з лицьового, то з виворотного боків.

4. Утокова та ґрунтова гребінки за спинками голок зсуваються в один і той же бік, при цьому утокова гребінка зсувається на 1 голковий крок більше, ніж ґрунтова. В цьому випадку утокові нитки знаходяться між сусідніми петельними стовпчиками ґрунту і обвивають протяжки петель.
5. Утокова та ґрунтова гребінки за спинками голок зсуваються в один і той же бік, при цьому утокова гребінка зсувається більше, ніж на 1 голковий крок від ґрунтової. У цьому випадку утокові нитки в місцях зміни напрямку їхніх кладок виходять на виворітній бік трикотажу, а в інших місцях розташовуються між остовами та протяжками петель ґрунту.
6. Утокова та ґрунтова гребінки за спинками голок зсуваються назустріч одна одній. У цьому випадку уточні нитки розташуються між остовами та протяжками петель ґрунту.

За основу проектування утокового трикотажу обрано філейне переплетення з гексагональними отворами чарунок (рис. 2.1), яке утворено чергуванням рядів трико та атласу в рапорті [236]. Особливістю введення утоку в структуру філейного трикотажу є те, що ґрунт філейного трикотажу утворюється двома гребінками при неповному (через вушковину) їх набиранні. І, оскільки отвори трикотажу філейного переплетення розташовані зі зміщенням, для введення утокової нитки в структуру в кожному петельному стовпчикові необхідно також дві гребінки при неповному (через вушковину) їх набиранні.

На рис. 3.1 представлено взаємне розташування петлетвірних органів на основов'язальній тамбурній (Crochet) машині [233]. Таким чином, можливі два варіанти заправки утокових ниток:

- утокові гребінки розташовуються між ґрунтовими, тобто гребінки Г1 та Г4 заправлені ґрунтовими нитками і утворюють філейне переплетення, а гребінки Г2 та Г3 заправлені утоковими нитками для введення їх в структуру трикотажу;
- утокові гребінки розташовуються перед ґрунтовими, тобто гребінки Г1 та Г2 заправлені ґрунтовими нитками і утворюють філейне переплетення, а гребінки Г3 та Г4 заправлені утоковими нитками для введення їх у структуру трикотажу.

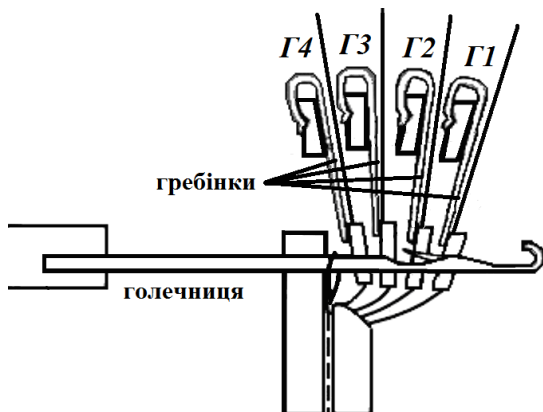


Рис. 3.1. Розміщення петлетвірних органів машини

За подальшого аналізу структури трикотажу і варіанту розташування в ньому утокової нитки аналізується ділянка рядів трико, які утворюють вертикальну сторону чарунки. Адже саме на цій ділянці відбувається взаємодія утоку з протяжками петель ґрунту. На інших ділянках чарунки утокова нитка тягнеться всередині отвору чарунки у вигляді повздожнього утоку [240].

### **3.2. Місце утокової нитки в структурі основ'язаного трикотажу при розташуванні утокових гребінок між ґрунтовими**

Розглянемо варіанти, коли утокові нитки заправлені у гребінки Г2 і Г3, які знаходяться між ґрунтовими гребінками Г1 і Г4 [254]. При цьому утокові нитки не взаємодіють з протяжками петель трико, які утворені з ниток гребінки Г4 (біла нитка), адже вона знаходиться ближче до спинок голок, ніж гребінки Г2 і Г3. По відношенню до них уток буде знаходитись на вивороті трикотажу. Але наявність гребінки Г1 (чорна нитка), яка знаходиться далі за спинками голок, дає можливість вв'язувати утокову нитку в структуру трикотажу.

У варіанті 1.1 (рис. 3.2) утокові гребінки не виконують зсувів за спинками голок. По відношенню до петель, які утворені з ниток гребінки Г4, утокові нитки знаходиться на виворотній стороні

трикотажу, а по відношенню до петель, які утворені з ниток гребінки Г1 – на лицьовій стороні трикотажу. Отже, забезпечується розташування нитки утоку між протяжками петель трико, які утворені з ниток різних гребінок. Слід зауважити, що в цьому випадку міцність закріплення утокової нитки недостатня і залежить лише від сил тертя між утоковими та ґрунтовими нитками.

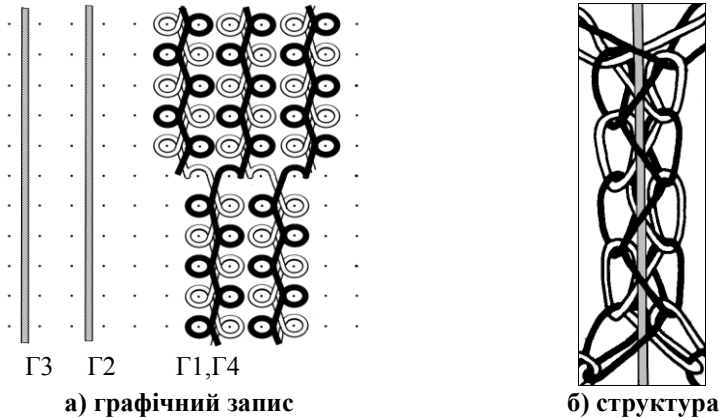


Рис. 3.2. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 1.1

У представлених варіантах 1.2÷1.7 (рис. 3.3 ÷ рис. 3.8) зсув утокових гребінок за спинками голок відбувається назустріч зсуву ґрунтової гребінки Г1, яка набрана частково, тобто взаємодія ниток цих гребінок не відбувається. Проте нитка утоку по відношенню до петель, які утворені з ниток ґрунтової гребінки Г1, розташовується на лиці і наявність іншої гребінки Г4 забезпечує розташування утоку між протяжками петель трико, які утворені з ниток різних гребінок, не залежно від величини та варіанту зсуву гребінок, які заправлені утоковими нитками. Таким чином, для отримання такої структури можна взагалі не робити зсувів утокової гребінки (варіант 1.1), що значно спростить процес петлетворення.

У варіантах 1.8÷1.13 (рис. 3.9 ÷ рис. 3.14) зсув утокових гребінок за спинками голок відбувається в напрямку зсуву ґрунтової гребінки Г1, що призводить до взаємодії утокових ниток з нитками цієї гребінки. При цьому розташування утокової нитки залежить від варіанту та величини зсувів утокових гребінок за спинками голок.

У варіантах 1.8÷1.10 (рис. 3.9 ÷ рис. 3.11) утокові гребінки зсуваються за спинками голок на 1 голковий крок за рапортом.

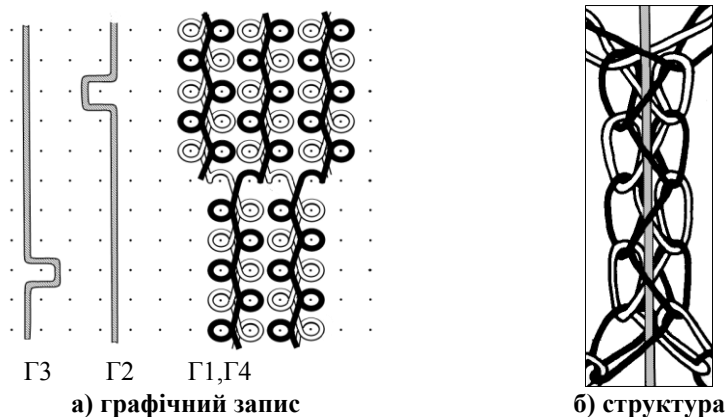


Рис. 3.3. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 1.2

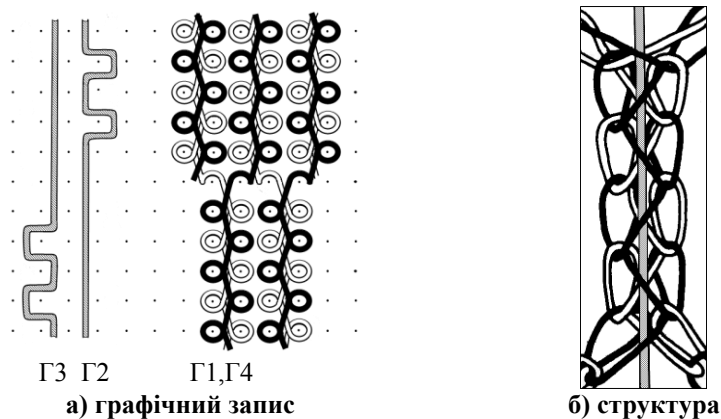


Рис. 3.4. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 1.3

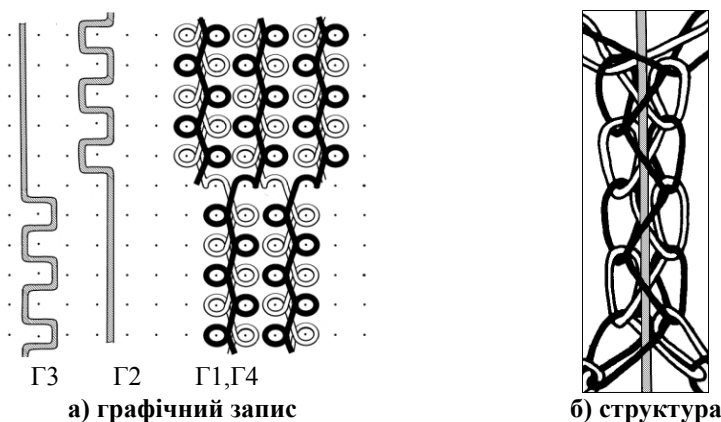
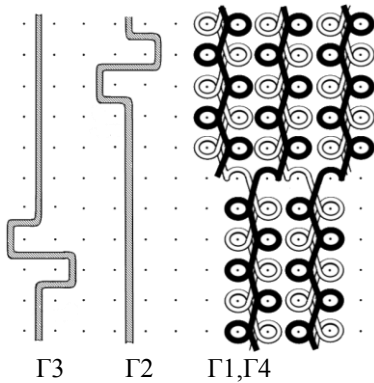
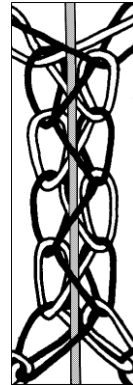


Рис. 3.5. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 1.4

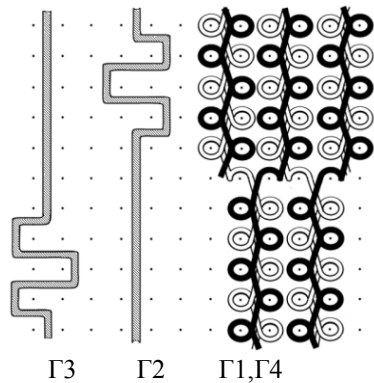


Г3 Г2 Г1,Г4  
а) графічний запис

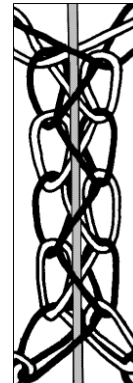


б) структура

Рис. 3.6. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 1.5

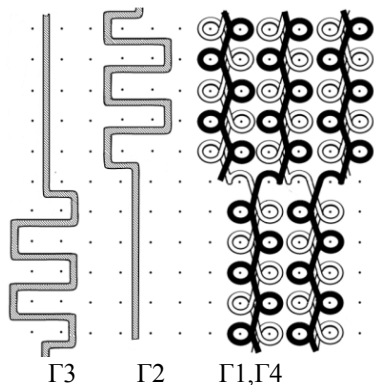


Г3 Г2 Г1,Г4  
а) графічний запис

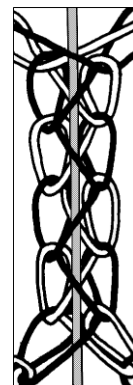


б) структура

Рис. 3.7. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 1.6



Г3 Г2 Г1,Г4  
а) графічний запис



б) структура

Рис. 3.8. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 1.7



Варіант 1.8 (рис. 3.9) прокладання утокової нитки забезпечує взаємодію утокових ниток з ґрунтовими таким чином, що у третьому ряді рапорту, де відбувається зсув утокових гребінок, утокові нитки виходять на виворіт полотна, тобто перекривають протяжки петель ґрунту, а в інших рядах рапорту розташовуються між протяжками петель трико, утворених з ниток різних гребінок. Варіанти 1.9 (рис. 3.10) та 1.10 (рис. 3.11) відрізняються кількістю зсувів утокових гребінок в рапорті переплетення, що призводить до збільшення кількості рядів в рапорті, в яких утокові нитки виходять на виворіт полотна і перекривають протяжки петель ґрунту.

У варіантах 1.11÷1.13 (рис. 3.12 ÷ рис. 3.14) утокові гребінки зсуваються за спинками голок на 2 голкових крок за рапортом, що забезпечує обвивання утоковими нитками протяжок петель трико, які утворені з ниток гребінки Г1.

Так, у трикотажі варіанту 1.11 (рис. 3.12) утокові нитки обвивають одну протяжку петлі трико у третьому ряді; у двох сусідніх рядах виходять на виворіт полотна, перекриваючи протяжки петель трико з ниток гребінки Г1; в інших рядах розташується між протяжками петель трико, утворених з ниток різних гребінок.

Взаємодія утокових ниток з нитками ґрунтової гребінки Г1 у трикотажі варіанту 1.12 (рис. 3.13) відбувається наступним чином: уток обвиває протяжки петель трико у третьому та четвертому рядах; в сусідніх рядах утокова нитка знаходиться на вивороті трикотажу, перекриваючи протяжки петель трико з ниток гребінки Г1 (чорна нитка); а потім знаходиться між протяжками петель трико, які утворені з ниток різних гребінок. У трикотажі варіанту 1.13 (рис. 3.14) спостерігаємо обвивання утоковою ниткою протяжок петель трико вже у трьох рядах рапорту.

Таким чином, у цих варіантах прокладання утокової нитки підвищується надійність їх закріплення в структурі трикотажу за рахунок обвивання утком протяжок петель, яка зростає зі збільшенням в рапорті кількості зсувів утокових гребінок за спинками голок.

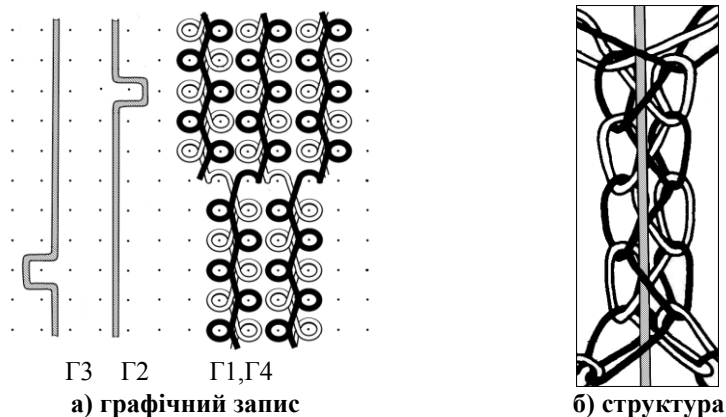


Рис. 3.9. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 1.8

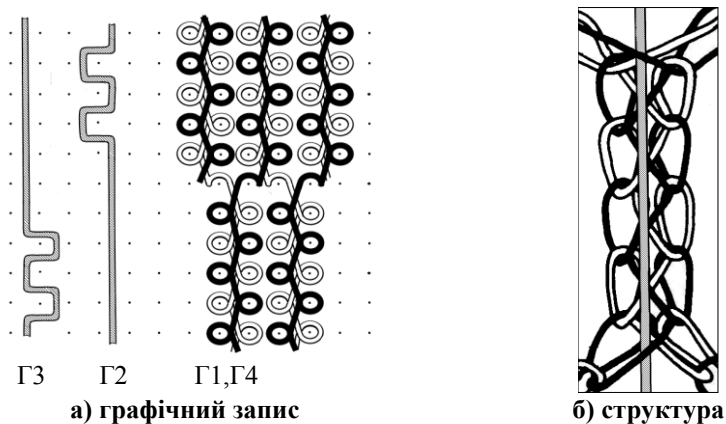


Рис. 3.10. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 1.9

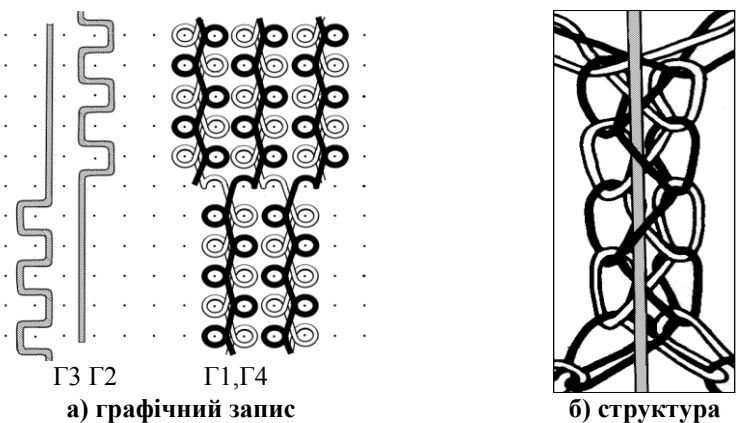
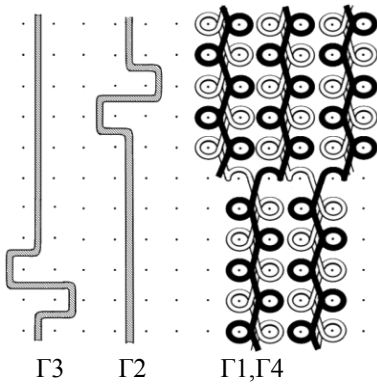
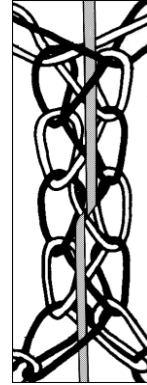


Рис. 3.11. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 1.10

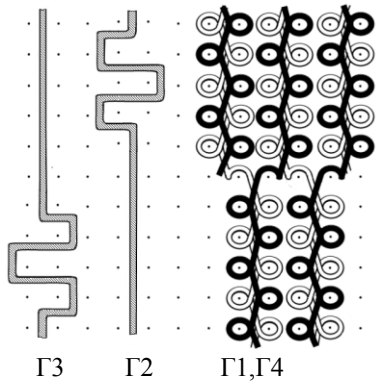


а) графічний запис

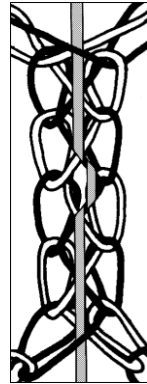


б) структура

Рис. 3.12. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 1.11

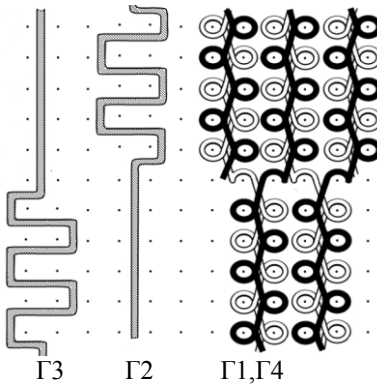


а) графічний запис

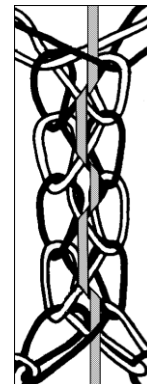


б) структура

Рис. 3.13. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 1.12



а) графічний запис



б) структура

Рис. 3.14. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 1.13

### 3.3. Місце утокової нитки в структурі основов'язаного трикотажу при розташуванні утокових гребінок перед ґрунтовими

Розглянемо варіант, коли утокові гребінки розташовуються перед ґрунтовими, тобто ближче до спинки голок, що забезпечує взаємодію утокових ниток з протяжками ґрунтових ниток, при чому в деяких випадках з двома гребінками Г1 і Г2 водночас [255].

У варіанті 2.1 (рис. 3.15) утокові гребінки не виконують зсувів за спинками голок. В результаті цього утокові нитки не запрацюються в структуру полотна, а вільно розташовуються на лицьовій його стороні.

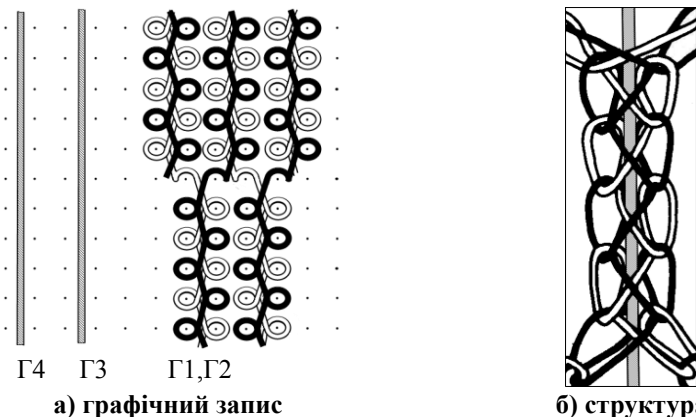
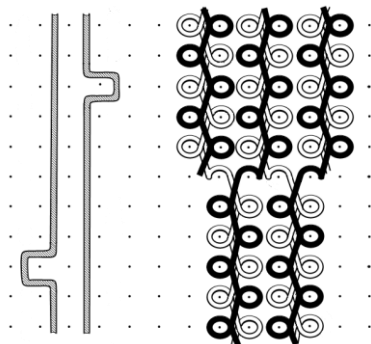


Рис. 3.15. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 2.1

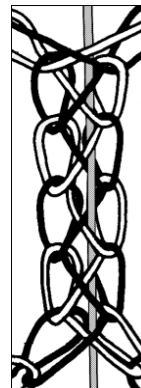
У варіантах введення утоку 2.2–2.7 (рис. 3.16 ÷ рис. 3.21) зсув утокових гребінок Г3 і Г4 відбувається в бік зсуву ґрунтової гребінки Г1. Таким чином утокові нитки взаємодітимуть з її нитками, але оскільки по відношенню до ниток ґрунтової гребінки Г2 утокові нитки завжди розташовуються на лицьовій стороні полотна, спостерігаємо взаємодію утокових ниток з нитками обох ґрунтових гребінок Г1 і Г2 водночас.

У варіантах 2.2–2.4 (рис. 3.16 ÷ рис. 3.18) утокові та ґрунтова Г1 гребінки за спинками голок зсуваються в один і той же бік і на однакову кількість голкових кроків (1), тобто утокові нитки у відповідних рядах розташовуються на виворотній стороні. Варіант зсувів утокових гребінок впливає лише на кількість таких рядів.



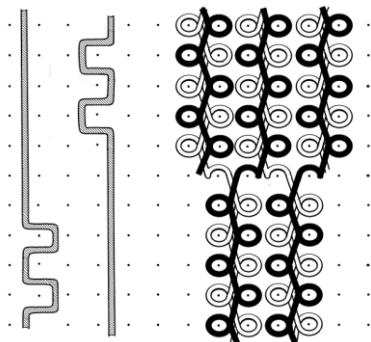
Г4 Г3 Г1,Г2

а) графічний запис



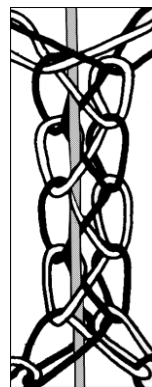
б) структура

Рис. 3.16. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 2.2



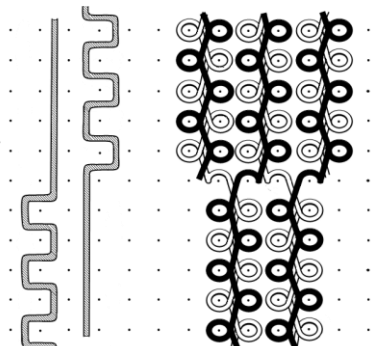
Г4 Г3 Г1,Г2

а) графічний запис



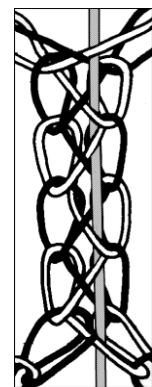
б) структура

Рис. 3.17. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 2.3



Г4 Г3 Г1,Г2

а) графічний запис



б) структура

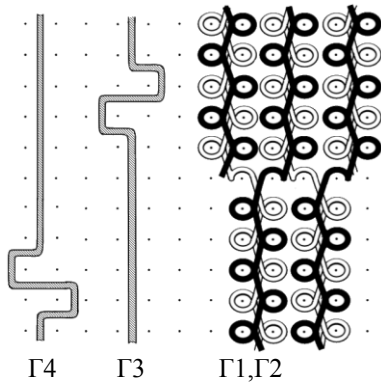
Рис. 3.18. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 2.4

У трикотажі варіанту 2.2 прокладання (рис. 3.16) утокові нитки взаємодіють з нитками ґрунтової гребінки Г1 і у третьому і четвертому рядах перекривають її протяжки, виходячи на виворотну сторону; в інших рядах вони розташовуються на лицьовій стороні трикотажу. У трикотажі варіанту 2.3 (рис. 3.17) утокові нитки взаємодіють з нитками ґрунту наступним чином: у першому, третьому та п'ятому рядах утокова нитка знаходиться на лицьовій стороні трикотажу; у другому та четвертому – на виворотній стороні. Розглядаючи взаємодію утокових гребінок з ґрунтовою гребінкою Г1 у трикотажі варіанту 2.4 (рис. 3.18) можна констатувати, що в першому, третьому і п'ятому рядах утокові нитки виходять на виворотну сторону трикотажу, у другому та четвертому рядах – на лицьову.

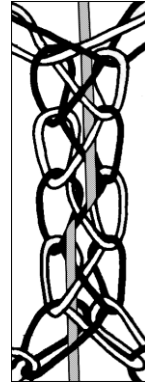
Таким чином, у розглянутих варіантах 2.2÷2.4 утокові нитки розташуються між протяжками трико різних ґрунтових гребінок виходячи за рапортом то на лицьовий, то на виворотний бік трикотажу. При цьому зі збільшенням кількості переходів з однієї сторони трикотажу на іншу зростає надійність закріплення утокової нитки в структурі трикотажу.

У варіантах 2.5÷2.7 (рис. 3.19 ÷ рис. 3.21) утокові та ґрунтова Г1 гребінки за спинками голок за рапортом зсуваються в один і той же бік, при цьому утокові гребінки зсуваються на 1 голковий крок більше, ніж ґрунтова. В цьому випадку утокові нитки обвивають протяжки петель з ниток гребінки Г1. Водночас по відношенню до петель з ниток гребінки Г2 нитки утоку завжди розташовуються на лицьовій стороні полотна, таким чином нитка утоку обвиває і їхні протяжки. При цьому кількість обвитих протяжок залежатиме від рапорту зсувів.

У трикотажі варіанту 2.5 (рис. 3.19) утокові нитки обвивають протяжки петель трико у третьому ряді. У наступних сусідніх рядах утокові нитки виходять на виворотну сторону трикотажу, а далі знову розташовуються на лицьовій стороні. У трикотажі варіанту 2.6 (рис. 3.20) утокові нитки обвивають протяжки петель ґрунту у другому та третьому рядах. У сусідніх рядах утокові нитки виходять на виворотну сторону трикотажу, а далі розташовуються на лицьовій стороні. У варіанті 2.7 (рис. 3.21) утокові нитки обвивають протяжки петель ґрунту у чотирьох рядах, а далі розташовуються

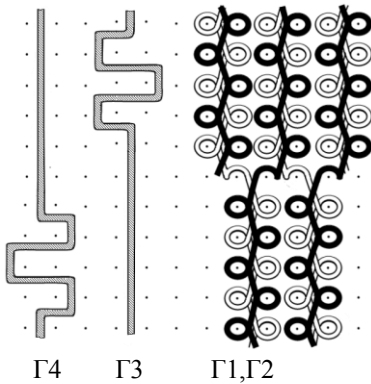


Г4 Г3 Г1,Г2  
а) графічний запис

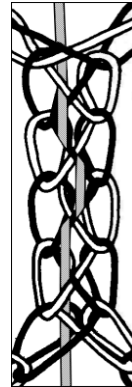


б) структура

Рис. 3.19. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 2.5

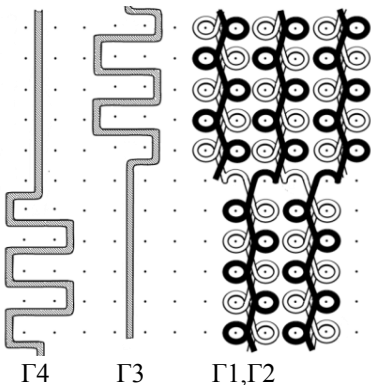


Г4 Г3 Г1,Г2  
а) графічний запис

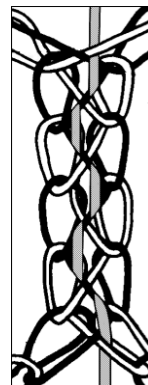


б) структура

Рис. 3.20. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 2.6



Г4 Г3 Г1,Г2  
а) графічний запис



б) структура

Рис. 3.21. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 2.7

на лицьовій стороні трикотажу.

Слід звернути увагу, що у розглянутих варіантах 2.5÷2.7 за рахунок обвивання протяжок ґрунтових петель спостерігається надійне закріплення утокових ниток у структурі трикотажу, яке зростає зі збільшенням кількості рядів, в яких відбувається обвивання.

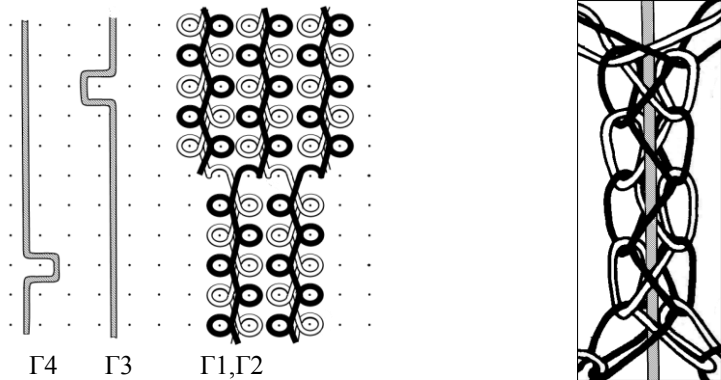
У варіантах введення утоку 2.8÷2.10 (рис. 3.22 ÷ рис. 3.24) зсув гребінок з утоковими нитками відбувається в бік зсуву гребінки Г2 з ґрунтовими нитками, що призводить до їхньої взаємодії. При цьому з нитками ґрунтової гребінки Г1 утокові нитки взаємодіяти зовсім не будуть, таким чином вони не виходять на виворіт полотна, перекриваючись протяжками петель трико з ниток цієї гребінки. В рядах, в яких утокові гребінки зсуваються за спинками голок, утокові нитки розташовуватимуться між протяжками петель трико з ниток двох ґрунтових гребінок. В рядах, в яких утокова гребінка не виконує зсувів, утокова нитка буде розташовуватися на лицьовій стороні трикотажу.

Таким чином, у трикотажі варіанту 2.8 (рис. 3.22) утокові нитки знаходяться між протяжками петель лише у третьому ряді, у трикотажі варіанту 2.9 (рис. 3.23) – у другому, третьому та четвертому рядах, а у трикотажі варіанту 2.10 (рис. 3.24) – в усіх п'яти рядах вертикальної ділянки чарунки. Слід звернути увагу, що розташування утоку у трикотажі варіанту 2.10 аналогічне варіантам 1.1–1.7. Надійність закріплення ниток невелика, особливо у трикотажі варіанту 2.8.

У трикотажі варіантів 2.11÷2.13 (рис. 3.25 ÷ рис. 3.27) відбувається обвивання утоковими нитками протяжок петель трико з ниток ґрунтової гребінки Г2, при цьому кількість обвитих протяжок залежить від рапорту зсувів утокових гребінок за спинками голок.

Так, у трикотажі варіанту 2.11 (рис. 3.25) утокові нитки обвивають одну протяжку петель трико, варіанту 2.12 (рис. 3.26) – дві, а варіанту 2.13 (рис. 3.27) – чотири протяжки петель. При цьому з виворотної сторони трикотажу утокові нитки перекриваються протяжками петель трико з ниток ґрунтової гребінки Г1. В інших рядах рапорту утокові нитки розташовуються на лицьовій стороні трикотажу.

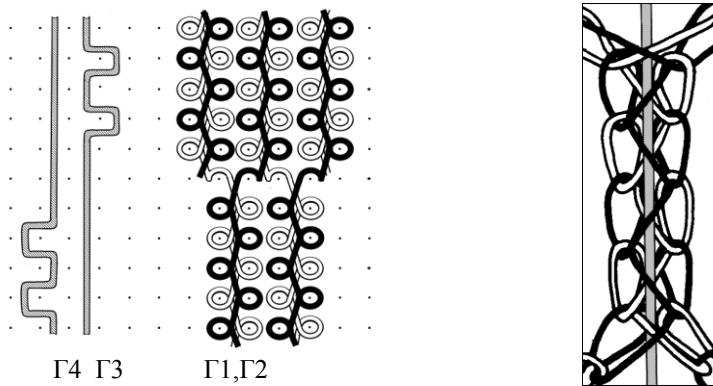




а) графічний запис

б) структура

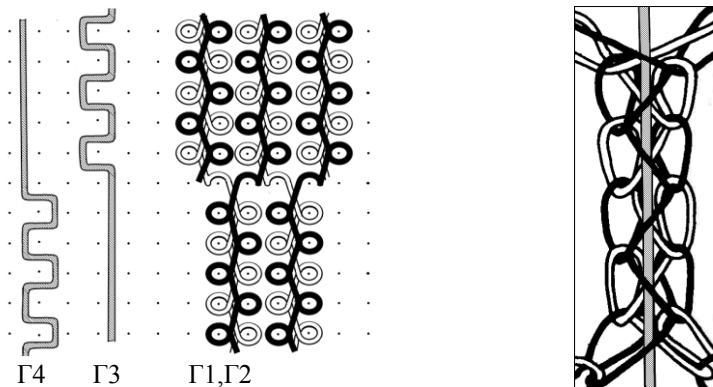
Рис. 3.22. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 2.8



а) графічний запис

б) структура

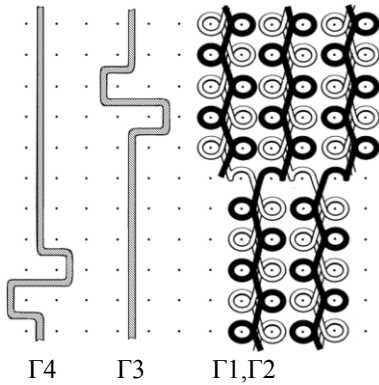
Рис. 3.23. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 2.9



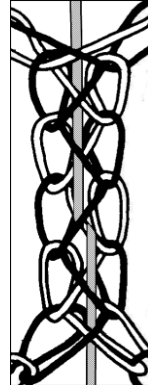
а) графічний запис

б) структура

Рис. 3.24. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 2.10

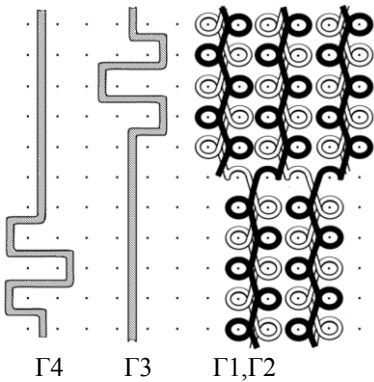


а) графічний запис

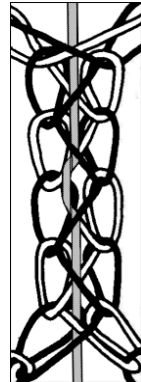


б) структура

Рис. 3.25. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 2.11

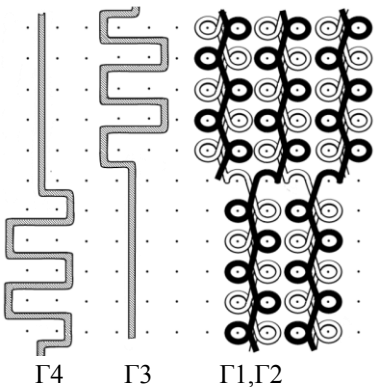


а) графічний запис

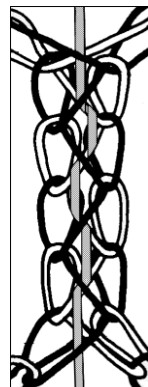


б) структура

Рис. 3.26. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 2.12



а) графічний запис



б) структура

Рис. 3.27. Трикотаж філейно-утокового переплетення варіанту 2.13

### 3.4. Моделювання структури основ'язаного трикотажу

Загальновідомо, що елементарною ланкою трикотажу є петля. Трикотаж одного й того ж переплетення, який має однакові види петель (відкриті та/або закриті), у врівноваженому стані може мати різні за формою петлі. Форма, яку отримують петлі, залежить від багатьох якісних і кількісних факторів, найголовнішим з яких є довжина нитки в петлі. В трикотажі одного й того ж переплетення, що виготовлений з ниток того самого сировинного складу і лінійної густини, форма петель залежатиме від довжини нитки в петлі. Для кожного переплетення трикотажу залежно від форми петлі існує взаємозв'язок між довжиною нитки в петлі  $l$ , середнім діаметром нитки  $d$  і параметрами взаємного розташування петель в трикотажі: петельним кроком  $A$  і висотою петельного ряду  $B$ . Саме тому геометричне моделювання структури трикотажу є однією з низки першочергових завдань при створенні нових структур та проектуванні їх властивостей.

Слід зазначити, що робіт з моделювання петельної структури основ'язаного трикотажу не так багато, як можна собі уявити. Однією з перших можна вважати модель Алісона [256], який представив остов петлі у вигляді напівкола, поєднаного з двома прямими відрізками паличок, та абсолютно прямої протяжки. Гросберг розробив [257] та удосконалив [258] геометричну модель петлі двогребінкового переплетення, яка базується на фізико-механічних властивостях пряжі та ниток. Для цього він прийняв припущення, що остов петлі та її протяжка ізольовані один від одного силами тертя, а також те, що остов наступної петлі протягується через остов попередньої петлі в найширшій її частині, а протяжка є частиною кола. Розробкою геометричних моделей петлі основ'язаного трикотажу займалися також Шінн та Ел-Араф [259]. У геометричній моделі проф. А. С. Далідовича форма петлі одностороннього переплетення описується сумою відрізків, дуг кіл або еліпсів [231]. Нитки в такій моделі ідеалізуються. Приймається, що на всіх відрізках петлі нитка має однакову товщину, деформаційні властивості і нормальний переріз – коло.

Однак в переважній більшості всі ці моделі є плоскими. Але в реальній структурі трикотажу петлі розгортаються, згинаються і

нахилиються, тому логічніше представляти їх у вигляді просторових кривих. Такий принцип використовується при 3D- проектуванні структур. Загальна 3D-модель остова та протяжки петлі головних двогребінкових переплетень розроблені О. Гоктип та С. С. Халок [260] за допомогою САD-програми для комп'ютерної візуалізації структури трикотажу. Інша 3D-модель петлі двогребінкового оснований'язаного переплетення запропонована Х. Дабір'яном та Алі Джедді [261], які представили петлю у вигляді сукупності прямих відрізків різного спрямування в просторі. Гарна збіжність теоретичних розрахунків довжини нитки в петлі з експериментальними даними доводить можливість використання цієї моделі для прогнозування властивостей трикотажу.

Однак всі перераховані вище моделі петлі оснований'язаного трикотажу стосуються головних одно- та двогребінкових переплетень, які виготовляються при повному набиранні гребінок. Як вказувалося вище (п.2.1), головним переплетенням для отримання сітчастих полотен з гексагональними отворами чарунок є філейне, яка отримане при неповному набиранні нитками двох гребінок, що виконують симетричну кладку ниток на голки.

В такій структурі розрізняють декілька конфігурацій петель, які відрізняються за формою та розмірами [234]. На рис. 3.28 наведено декілька варіантів структури сітчастого трикотажу з гексагональними отворами чарунок, який отриманий чергуванням рядів трико та атласу або ланцюжка.

В процесі дослідження структури трикотажу філейного переплетення з гексагональними отворами чарунок встановлено наступні закономірності:

- вертикальні сторони чарунки утворені закритими петлями трико, які мають однакову конфігурацію (тип I). Остови цих петель розвернуті в площині, яка перпендикулярна площині трикотажу;
- нахилені сторони чарунки формуються петлями трико (тип II та III або IV) та ланцюжка (тип V або VI);
- у випадку, коли діагональну сторону чарунки формує непарна кількість петель ланцюжка (рис. 3.28.б), то наступною за ними буде закрита петля трико (тип IV), а у випадку, коли діагональну сторону чарунки формує парна кількість петель ланцюжка (рис. 3.28.в), то наступною за ними буде відкрита петля трико (тип

- III), як у випадку, коли рапорт формується чергуванням рядів трико та атласу (рис. 3.28.а);
- у головці петлі протяжки наступної петлі розташуються одна над іншою, якщо вона є закритою, і поряд у випадку, коли наступна петля відкрита;
  - у випадку, коли діагональну сторону чарунки формує парна кількість петель ланцюжка, то всі вони мають однакову форму (тип VI) і дзеркальне відображення, у випадку, коли діагональну сторону чарунки формує непарна кількість петель ланцюжка, то останньою завжди буде петля, яка відрізняється за формою (тип V).

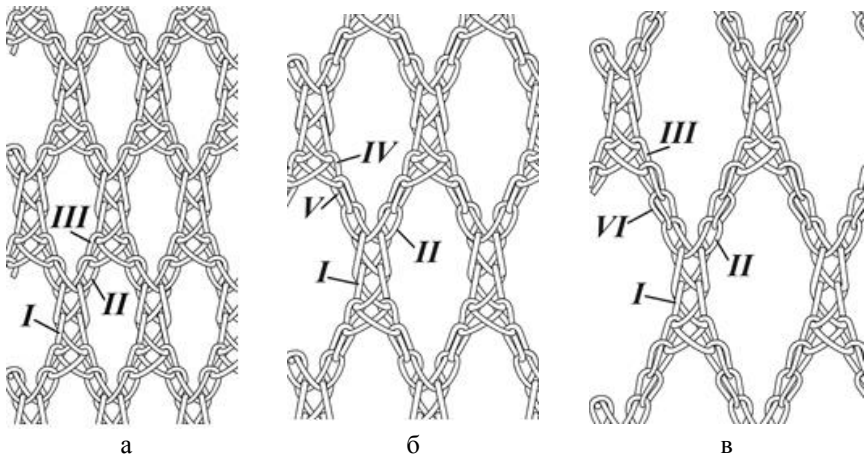


Рис. 3.28. Варіанти структур сітчастого трикотажу

Моделювання петель основ’язаного філейного трикотажу проводилось по середній лінії нитки шляхом поділу її на ділянки плоских та просторових ліній (рис. 3.29), довжину яких можна визначити за відомими геометричними формулами. Так, палички *ab* та *gd* основа петлі є прямими, довжина яких визначається з відповідних трикутників. Голкова дуга *бгд* у більшості випадків є половиною кола відповідного діаметру, але може бути представлена і гвинтовою лінією (петля II типу). Протяжку петлі *деж* зазвичай представлено у вигляді частини еліпсу (петлі I та II типів) або гвинтової лінії (петлі III–VI типів), довжина якої визначається відповідним інтегралом.

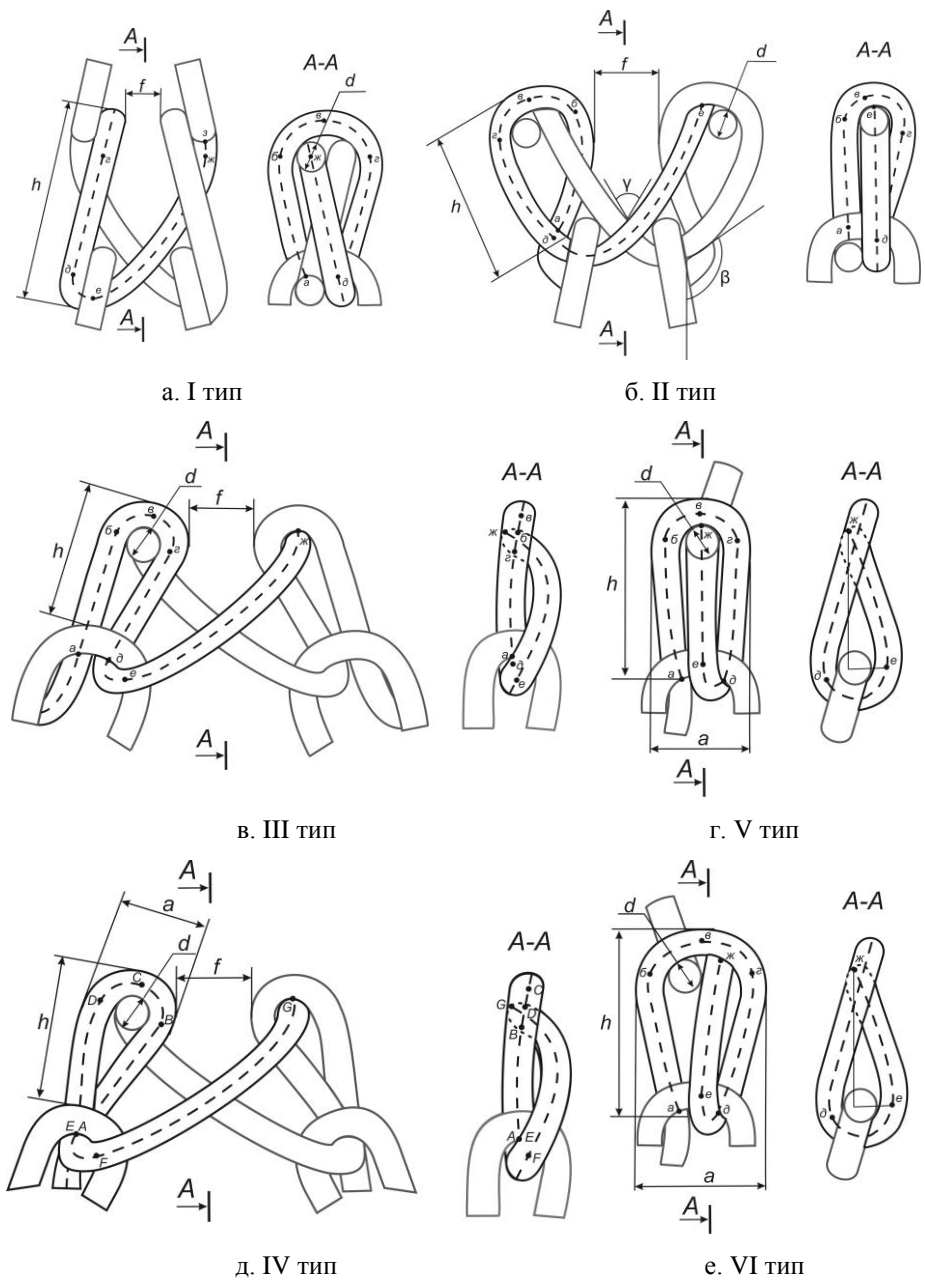


Рис. 3.29. Типы петель в структуре сігчастого трикотажу

У результаті математичних перетворень отримані формули для визначення довжини нитки в петлях різних типів [262, 263] з урахуванням висоти петлі  $h$  та відстані між двома сусідніми петлями  $f$ :

– тип I

$$l_I = 2h + (2\pi - 5)d + (f + 2d) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{(h-1,5d)^2 + d^2}{(f+2d)^2}\right)^2 \cos^2 t} dt ; \quad (3.1)$$

– тип II

$$l_{II} = 2h - 4d + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\left(1 + \frac{16}{\pi^2}\right) d^2 + 8d^2 \sin^2 t} dt + (f + 3d) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{(h-d)^2 + 4d^2}{(f+3d)^2}\right)^2 \cos^2 t} dt ; \quad (3.2)$$

– тип III

$$l_{III} = 2h + (\pi - 1)d + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{(h^2 - d^2) \cos^2 t + (f + 4d)^2 \sin^2 t + \frac{16}{\pi^2} d^2} dt ; \quad (3.3)$$

– тип IV

$$l_{IV} = h + (\pi - 0,5)d + \sqrt{(h - 0,5d)^2 - 4d^2} + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{(h^2 - d^2) \cos^2 t + (f + 4d)^2 \sin^2 t + \frac{16}{\pi^2} d^2} dt ; \quad (3.4)$$

– тип V

$$l_V = 2h + 3,44d + \sqrt{(h - 1,5d)^2 + 1,56d^2} ; \quad (3.5)$$

– тип VI

$$l_{VI} = 2h + 5d + \sqrt{(h - 1,5d)^2 + 1,56d^2} . \quad (3.6)$$

Очевидно, що відкрита петля трико III типу подібна до закритої петлі трико IV, а різниця в довжинах нитки в петлі отримана, головним чином, за рахунок різного розташування паличок остова. В той же час, петлі ланцюжка V та VI типів різняться величиною голкової дуги внаслідок різного розташування протяжок петлі наступного петельного ряду. Саме це і призводить до різниці в довжинах нитки в петлі.

У таблицях 3.1–3.3 наведено результати розрахунку довжин ниток в петлях різних типів та середньої довжини нитки в петлі. Порівняння розрахункових показників з експериментальними даними показують гарну збіжність отриманих результатів, що є підтвердженням правильності підходу до моделювання петлі.

Загальні розміри чарунки, її кроки та лінійні розміри рапорту переплетення є визначальними параметрами при проектуванні сітчастих полотен різного призначення. З огляду на розміри петель різних типів в структурі подальше проектування аукзетик-основов'язаних полотен утоково-філейного переплетення будемо проводити, виходячи з довжини нитки в петлі. При цьому прийемо декілька припущень:

- релаксація високорозтяжної утокової нитки на ділянці розташування її в структурі трикотажу незначна і не впливає на форму та розміри петель ґрунтового переплетення;
- повна релаксація високорозтяжної нитки відбувається на ділянці її вільного розташування, тобто коли вона не зафіксована в структурі трикотажу.

Таблиця 3.1

**Довжина нитки в петлі трикотажу, рапорт якого утворений чергуванням рядів трико та атласу**

Кількість рядів трико в рапорті	Петлі за типами			Довжина нитки в петлі, мм			Середня довжина нитки в петлі, мм		
	I	II	III	I	II	III	розрахункова	експериментальна	%
3т	4	2	2	4,46	5,35	5,38	4,91	5,02±0,24	2,2
5т	8	2	2	4,64	5,46	5,58	4,93	5,07±0,19	2,8
7т	12	2	2	4,68	5,62	5,29	4,88	4,77±0,07	2,2
Середнє значення				4,59	5,48	5,42	4,91	4,95	0,9



Таблиця 3.2

**Довжина нитки в петлі трикотажу, в рапорті якого є петля ланцюжка**

Кількість рядів трико в рапорті	Петлі за типами				Довжина нитки в петлі, мм				Середня довжина нитки в петлі, мм		
	I	II	IV	V	I	II	IV	V	розрахункова	експериментальна	%
3	4	2	2	2	4,82	4,89	5,57	3,65	4,75	4,83±0,38	1,7
5	8	2	2	2	5,01	5,06	5,69	3,43	4,89	4,88±0,18	0,2
7	12	2	2	2	4,85	5,16	5,68	3,54	4,83	4,80±0,24	0,6
Середнє значення					4,89	5,04	5,65	3,54	4,82	4,83±0,25	0,2

Таблиця 3.3

**Довжина нитки в петлі трикотажу, в рапорті якого дві петлі ланцюжка**

Кількість рядів трико в рапорті	Петлі за типами				Довжина нитки в петлі, мм				Середня довжина нитки в петлі, мм		
	I	II	III	VI	I	II	III	VI	розрахункова	експериментальна	%
3	4	2	2	4	4,57	4,99	5,39	4,13	4,63	4,78±0,13	3,2
5	8	2	2	4	4,88	5,27	5,50	4,17	4,83	5,02±0,14	4,0
7	12	2	2	4	4,73	5,32	5,61	4,09	4,75	4,89±0,27	3,0
Середнє значення					4,73	5,20	5,50	4,13	4,74	4,99±0,20	3,4

Проф. О. С. Далідович визначив головні залежності між параметрами петлі в рівноважному та напруженому (при розтягненні) стані та довжиною нитки в петлі [231], виходячи з теорії максимальної площини, яку займає петля внаслідок пружності нитки. Відповідно до цього висоти петель можуть бути визначені за наступними формулами:

– в трикотажі у рівноваженому стані

$$B_m = 0.25l_m - 0.03\sqrt{T} \quad \text{та} \quad B_n = \frac{l_n - 3(\pi - 1)d}{3}; \quad (3.7)$$

– в трикотажі, який знаходиться під дією сили відтягування

$$B_{m \max} = \frac{l_m - 2.5\pi d_{\min}}{3} \quad \text{та} \quad B_{n \max} = \frac{l_n - (3 + 2.5\pi)d_{\min}}{3}, \quad (3.8)$$

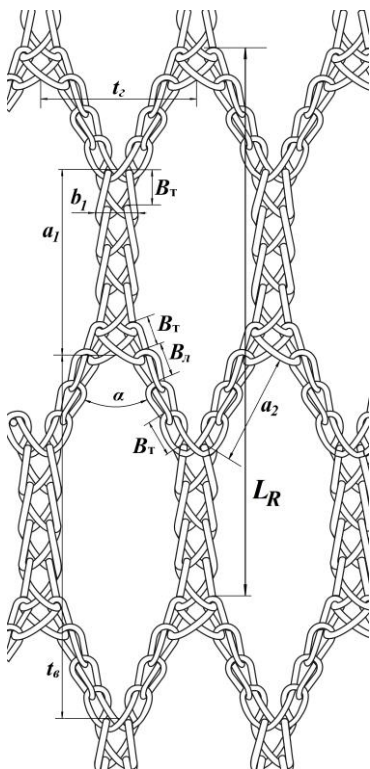
де  $l_m, l_l$  – довжини ниток в петлях трико та ланцюжка відповідно, мм;

$T$  – лінійна густина нитки, текс;

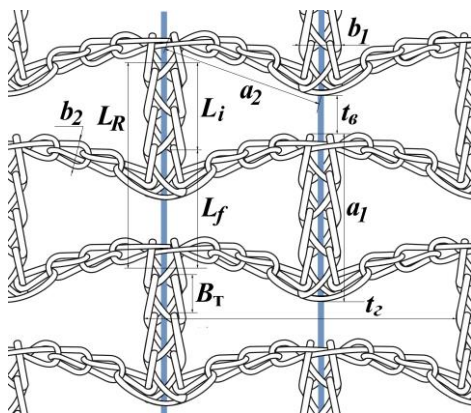
$d, d_{min}$  – відповідно розрахунковий та умовний діаметри нитки, мм.

Довжина рапорту сітчастого оснований'язаного трикотажу, який утворений чергуванням рядів трико ( $n_T$ ) та ланцюжка ( $n_L$ ) в рапорті переплетення, в рівноважному стані (рис. 3.30) визначатиметься за наступним рівнянням:

$$L_R = a_1 + t_6, \quad (3.9)$$



а. філейне переплетення



б. аукзетик-структура

Рис. 3.30. Схема структури для розрахунку

Очевидно, що враховуючи прийняті вище припущення, довжина  $a_1$  вертикальної сторони чарунки буде однаковою для філейного і відповідного утоково-філейного трикотажу:

$$a_1 = (n_m - 1)B_m. \quad (3.10)$$

Крок чарунки по вертикалі визначаємо окремо для філейного трикотажу, враховуючи кут розкриття чарунки  $\alpha$ :

$$t_\epsilon = (n_m - 1)B_m + 2(B_m + n_\lambda B_\lambda) \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (3.11)$$

Підставляючи (3.10) та (3.11) в формулу (3.9), отримуємо рівняння для визначення довжини рапорту сітчастого трикотажу філейного переплетення

$$L_R = a_1 + t_\epsilon = 2(n_m - 1)B_m + 2(B_m + n_\lambda B_\lambda) \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (3.12)$$

Аукзетик-ефект в основов'язаному трикотажі з видозміненими гексагональними чарунками досягається за умови (п.2.3):

$$t_\epsilon < a_1 - 2b_2 \text{ або } t_\epsilon < (n_m - 1)B_m - 2b_2. \quad (3.13)$$

Враховуючи (3.13) та (3.10) довжина рапорту (3.9) трикотажу з видозміненою гексагональною чарункою для досягнення аукзетик-ефекту повинна задовольняти наступним умовам:

$$L_R < 2(n_m - 1)B_m - 2b_2. \quad (3.14)$$

Слід зауважити, що в процесі вироблення на машині трикотаж, як і нитки в зоні в'язання, знаходяться під дією сил відтягування, що зумовлює витягування петель, зближення їх остовів, зменшення ширини полотна. Очевидно, що довжина рапорту на машині як трикотажу філейного переплетення, як і відповідного трикотажу утоково-філейного переплетення, при

однакових технологічних параметрах в'язання будуть однаковими і визначатимуться за наступним рівнянням:

$$L_R^s = 2n_m B_{m \max} + 2n_l B_{l \max} . \quad (3.15)$$

З іншого боку, довжина рапорту трикотажу утоково-філейного переплетення може бути визначена довжиною високорозтяжної утокової нитки в структурі

$$L_R = L_i + L_f , \quad (3.16)$$

де  $L_i$  – довжина високорозтяжної нитки, яка фіксується в структурі трикотажу, мм;

$L_f$  – довжина високорозтяжної нитки, яка не фіксується в структурі, а вільно розташовується в трикотажі, мм.

Довжина високорозтяжної нитки, яка фіксується в структурі трикотажу в  $i$  рядах рапорту філейного переплетення, визначається за рівняннями:

– в трикотажі у врівноваженому стані

$$L_i = (i - 0.5) B_m ; \quad (3.17)$$

– в трикотажі, який знаходиться під дією сили відтягування

$$L_i^s = (i - 0.5) B_{m \max} . \quad (3.18)$$

З рівняння (3.16), враховуючи (3.14) і (3.15) та відповідні їм (3.17) та (3.18) знаходимо довжину високорозтяжної нитки, яка не вв'язана в структуру і вільно розташована в ній:

– у трикотажі у врівноваженому стані

$$L_{if} < (2n_m - 1,5 - i) B_m - 2b_2 ; \quad (3.19)$$

– в трикотажі, який знаходиться під дією сили відтягування

$$L_{if}^s = (2n_m - i + 0,5) B_{m \max} + 2n_l B_{l \max} . \quad (3.20)$$

Таким чином, враховуючи отримані рівняння (3.19) та (3.20) довжини високорозтяжної утокової нитки, за рахунок релаксації якої відбувається зміна гексагональної форми чарунки, можна визначити необхідне її подовження перед входом до в'язальної системи машини, яке дозволить отримати трикотаж з аукзетик-властивостями

$$\varepsilon > \left[ \frac{(2n_m - i + 0,5)B_{m \max} + 2n_l B_{l \max}}{(2n_m - 1,5 - i)B_m - 2b_2} - 1 \right] 100, \% \quad (3.21)$$

Очевидно, що необхідне подовження зростає зі зменшенням кількості рядів трико та зі збільшенням кількості рядів ланцюжка в рапорті філейного переплетення, а також при збільшенні кількості рядів, в яких утокова нитка фіксується в структурі трикотажу.

У таблиці 3.4 представлено результати теоретичного розрахунку видовження високорозтяжної нитки для різних варіантів її розташування в структурі та коефіцієнту Пуассона (2.17) трикотажу. Абсолютне значення коефіцієнту Пуассона зростає зі збільшенням кількості рядів як трико, так і ланцюжка в рапорті ґрунтового філейного переплетення. Тобто найкраще значення показника очікується в трикотажі, в рапорті якого 7 рядів трико та 3 ряди ланцюжка, водночас попереднє видовження високорозтяжної нитки повинно бути значно вищим.

У таблиці 3.5 наведено результати дослідження розмірів чарунки та коефіцієнту Пуассона утоково-філейного трикотажу, який вироблено з поліетилентерефталатної нитки 27,8 текс як ґрунтової та поліуретанової нитки 7,8 текс пневмоз'єднаної з поліетилентерефталатною ниткою 16,7 текс як утокової. Утокова нитка розташується в структурі трикотажу в двох рядах рапорту і подавалася в зону в'язання з максимально-можливим видовженням, яке становило 150 %. Діаграми, які представлено на рис. 3.31, відображають залежність коефіцієнту Пуассона від рапорту ґрунтового філейного переплетення.

Результати експериментальних досліджень, які представлено на рис. 3.31.а, показали, що як і передбачалось теоретично, абсолютне значення коефіцієнту Пуассона зростає зі збільшенням

кількості рядів як трико, так і ланцюжка в рапорті ґрунтового філейного переплетення, однак ця тенденція зберігається незначний період процесу розтягування (до 10%). Подальше розтягування трикотажу призводить до того, що в переважній більшості варіантів структури коефіцієнт Пуассона набуває додатного значення.

Таблиця 3.4

**Результати теоретичних розрахунків**

№ п/п	Рапорт філейного переплетення		Мінімальне подовження $\epsilon$ для різних варіантів розташування утку, %			Коефіцієнт Пуассона, $v_{xy}$
	$n_t$	$n_c$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	
1	3	1	483	947	-	-0,031
2	3	2	614	1222	-	-0,130
3	3	3	746	1497	-	-0,196
4	5	1	198	226	270	-0,144
5	5	2	240	278	334	-0,698
6	5	3	283	329	399	-1,070
7	7	1	143	152	164	-0,195
8	7	2	168	181	196	-1,179
9	7	3	194	209	228	-1,846

Таблиця 3.5

**Результати експериментальних досліджень**

№ п/п	Рапорт філейного переплетення		Розміри чарунки, мм				Коефіцієнт Пуассона $v_{xy}$ при подовженні	
	$n_t$	$n_c$	$a_1$	$a_2$	$t_b$	$t_r$	10%	30%
1	3	1	3,76	1,94	2,01	6,31	0,003	0,052
2	3	2	4,07	2,52	2,12	7,49	- 0,022	0,038
3	3	3	3,13	4,80	4,53	8,57	- 0,062	0,011
4	5	1	5,26	1,71	3,69	5,94	- 0,034	0,068
5	5	2	5,19	2,56	5,28	6,54	- 0,076	-0,016
6	5	3	5,48	4,29	5,26	8,14	- 0,082	-0,004
7	7	1	5,46	1,90	5,73	7,02	- 0,108	-0,094
8	7	2	5,26	2,41	6,29	7,75	- 0,143	-0,073
9	7	3	6,09	3,47	5,82	8,86	- 0,162	-0,024

При видовженні трикотажу на 30 % (рис. 3.31.б) лише варіанти структури, в рапорті яких 7 рядів трико, зберігають від'ємність коефіцієнту Пуассона, однак його абсолютне значення

знижується зі збільшенням рядів ланцюжка в рапорті. Це є результатом недостатнього видовження високорозтяжної утокової нитки перед входом у зону в'язання.

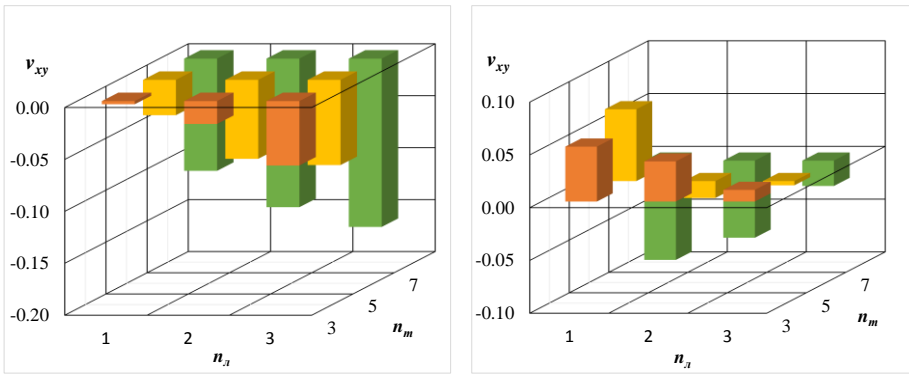


Рис. 3.31. Коефіцієнт Пуассона трикотажу при різних рівнях подовження

### 3.5. Висновки по розділу

Проведений теоретичний аналіз структури філейно-утокового трикотажу показав, що у випадку, коли утокові гребінки знаходяться між ґрунтовими гребінками, утокова нитка з лицьової сторони в будь-якому випадку перекривається протяжками петель трико ґрунтової гребінки, яка знаходиться ближче до спинок голок. Особливість розташування утокової нитки в структурі трикотажу визначає взаємодія утокових гребінок з ґрунтовою, яка розташована далі від спинок голок:

- у варіантах, коли зсув утокових гребінок за спинками голок відбувається в напрямку протилежному зсуву ґрунтової гребінки, яка знаходиться далі за спинками голок, утокові нитки розташуються між протяжками петель трико, які утворені з ниток різних гребінок, не залежно від величини та варіанту зсуву гребінок, які заправлені утоковими нитками. Для отримання такої структури можна взагалі не робити зсувів утокової гребінки, що значно спростить технологію виготовлення трикотажу;
- у варіантах, коли зсув утокових гребінок за спинками голок відбувається в напрямку зсуву ґрунтової гребінки, яка знаходиться далі за спинками голок, розташування утокових

ниток залежить від величини та варіанту зсуву гребінок, заправлених утоковими нитками. При цьому можна отримати структуру трикотажу, в якому утокова нитка обвиває протяжки петель трико, що значно підвищує надійність закріплення утоку.

У випадку, коли утокові гребінки знаходяться за ґрунтовими, розрізняють три варіанти їх взаємодії:

- якщо утокові гребінки не роблять зсувів за спинками голок, утокова нитка в структуру трикотажу не вв'язується, а розташовується з його лицьового боку;
- якщо зсув утокових гребінок відбувається в бік зсуву ґрунтової гребінки, яка розташована ближче до спинок голок, то ці нитки взаємодіють у відповідності до рапорту зсувів утокових гребінок, а з виворотної сторони перекриваються протяжками петель з ниток ґрунтової гребінки, яка розташована далі за спинками голок;
- якщо зсув утокових гребінок протилежний зсуву ґрунтової гребінки, яка розташована ближче до спинок голок, то утокові нитки взаємодіють з нитками обох ґрунтових гребінок.

Проведені теоретичні дослідження дозволяють визначити місце утокової нитки в структурі філейного трикотажу і встановити варіант більш надійного закріплення її в полотні.

У процесі дослідження структури трикотажу філейного переплетення з гексагональними отворами чарунок встановлено наступні закономірності:

- вертикальні сторони чарунки утворені закритими петлями трико, які мають однакову конфігурацію. Остови цих петель розвернуті в площині, яка перпендикулярна площині трикотажу;
- у випадку, коли діагональну сторону чарунки формує непарна кількість петель ланцюжка, то наступною за ними буде закрита петля трико, а у випадку, коли діагональну сторону чарунки формує парна кількість петель ланцюжка, або вони взагалі відсутні, то наступною за ними буде відкрита петля трико;
- у головці петлі протяжки наступної петлі розташуються одна над іншою, якщо вона є закритою, і поряд у випадку, коли наступна петля є відкритою.

У процесі дослідження структури трикотажу філейного переплетення встановлено, що петлі різного виду мають різну



довжину нитки в петлі, яка відрізняється переважно довжиною протяжки та кількістю розміщених діаметрів ниток в голівці петлі. На підставі геометричного моделювання запропоновано математичні залежності для визначення довжини нитки в петлях різних видів, які враховують просторове розміщення петлі в структурі трикотажу та дозволяють прогнозувати параметр на етапі проектування структури.

Головним технологічним параметром, який забезпечує аукзетик-властивості основов'язаних полотен утоково-філейного переплетення визначено подовження високорозтяжної утокової нитки перед входом до зони в'язання. На підставі геометричного моделювання структури трикотажу до та після релаксації встановлено, що необхідне подовження зростає зі зменшенням кількості рядів трико та зі збільшенням кількості рядів ланцюжка в рапорті філейного переплетення, а також при збільшенні кількості рядів, в яких утокова нитка фіксується в структурі трикотажу. Запропоновані математичні залежності необхідного подовження від рапорту переплетення та розмірів петель дозволяють спростити процес проектування полотен із заданим коефіцієнтом Пуассона.

## **4. ПАРАМЕТРИ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТІ УТОКОВО-ФІЛЕЙНОГО ТРИКОТАЖУ**

### **4.1. Об'єкти та методи дослідження**

*Об'єктом дослідження є основов'язаний трикотаж філейного переплетення, який утворено чергуванням рядів трико та атласу в рапорті, та утоково-філейного переплетень 12 варіантів розташування повздовжньої утокової нитки в структурі [264]. Для дослідження впливу рапорту філейного переплетення на показники сплановано та проведено двофакторний експеримент за планом Коно2. Як незалежні входні фактори обрано кількість рядів трико  $n_T$  (3, 5 та 7) та ланцюжка  $n_L$  (1, 2 та 3) в рапорті ґрунтового переплетення. Для дослідження одночасного впливу рапорту філейного переплетення та варіанту розташування утоку обрано 8 варіантів прокладання утокової нитки.*

Всі полотна виготовлено на однофонтурній основов'язальній машині фірми Müller (Швейцарія) [265] моделі RD-MT 10 класу, яка має 1 гребінку для виготовлення закритого ланцюжка і 8 візерункових вушкових гребінок, 4 з яких – утокові (3 останні можуть працювати в одній лінії). До особливостей цієї машини слід віднести: відсутність платин, але наявність штег, які виконують роль відбійної площини; автоматичний і індивідуальний контроль подачі пряжі для кожної з візерункових і уткових гребінок; можливе регулювання висоти гребінок при прокладанні на чи під голку; наявність пристроїв для утворення фасонних і візерункових ефектів. Недоліком цієї машини є невисока продуктивність, яка пов'язана з використанням язичкових голок, але на відміну від крючкових голок вони не піддаються швидкому зношуванню.

Всі трикотажні полотна отримані при незмінних параметрах в'язання (натягу ниток та силі відтягування трикотажу) при розташуванні уткових гребінок за ґрунтовими. Набирання всіх чотирьох вушкових гребінок нитками основ часткове (через вушковину).

Як сировину для ґрунтового філейного переплетення використано поліефірну (поліетилентерефталатну) нитку лінійною густиною 27,8 текс. Для високорозтяжної утокової компоненти

обрано поліуретанову нитку лінійною густиною 7,8 текс, яка з'єднана з поліефірною ниткою лінійною густиною 16,7 текс.

*Метод дослідження* – експериментальний. Дослідження параметрів структури (кількості петельних стовпчиків та рядків на 100 мм, товщини та поверхневої щільності) трикотажу проводились за стандартними методиками [266–268], а дослідження розмірів чарунок трикотажу – за допомогою великого інструментального мікроскопу з точністю до 0,01 мм. Дослідження механічних властивостей трикотажу проводилися за стандартними методами [269,270]: розривних характеристик – на маятниковій розривній машині «РТ-250М-2» та установці «Instron 5569» при одновісному розтягненні зразка до розриву з дотриманням закону постійної швидкості руху затискача; релаксаційних характеристик – на релаксометрі «стійка» при навантаженні, яке складало 5 % від розривного. Всі дослідження проводилися після попереднього приведення зразків трикотажу в умовно-рівноважний стан.

## **4.2. Вплив варіанту розташування утокової нитки в структурі основов'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення**

### **4.2.1. Параметри структури**

Основними параметрами петельної структури трикотажу вважаються довжина нитки в петлях, кількість петельних стовпчиків та рядів на 100 мм, товщина та поверхнева густина трикотажу. Результати дослідження цих параметрів основов'язаного трикотажу філейного та утоково-філейного переплетень наведено в таблиці 4.1.

Довжина нитки в петлі основов'язаного трикотажу залежить, перш за все, від таких технологічних параметрів виготовлення полотна як натяг нитки та сила відтягування полотна. Оскільки трикотаж виготовлено при однакових параметрах в'язання, то впливу варіанту введення утокової нитки в структуру трикотажу на довжини нитки в петлях не встановлено [240].

Щільність трикотажу виражається кількістю петельних стовпчиків і рядків, які припадають на одиницю довжини (100 мм) і є одним з технологічних показників, який забезпечує необхідні фізико-механічні властивості і зовнішній вид полотна [231].

Таблиця 4.1

## Параметри структури трикотажу

Варіант введення утку		Кількість на 100 мм петельних		Товщина, мм	Поверхнева густина, г/м <sup>2</sup>	
		стовпчиків в	рядів			
Базове філейне переплетення			60	116	0,82	181,00
Утокова гребінка зсувається за спинками голок в бік зсуву ґрунтової гребінки Г1	Утокова нитка не обвиває протяжк и петель ґрунту	2.2	40	196	0,97	233,52
		2.3	40	172	0,89	217,40
		2.4	40	153	0,82	193,61
	Утокова нитка обвиває протяжк и петель ґрунту	2.5	40	191	1,03	227,21
		2.6	40	176	0,95	217,60
		2.7	40	149	0,79	185,60
Утокова гребінка зсувається за спинками голок в бік зсуву ґрунтової гребінки Г2	Утокова нитка не обвиває протяжк и петель ґрунту	2.8	40	208	1,09	243,17
		2.9	40	203	1,01	240,77
		2.10	40	202	1,02	231,48
	Утокова нитка обвиває протяжк и петель ґрунту	2.11	40	213	1,04	249,23
		2.12	40	196	1,06	243,43
		2.13	40	185	1,02	231,40

Проведені дослідження [271] показали, що кількість петельних стовпчиків на 100 мм ( $N_{ст}$ ) у трикотажі базового філейного переплетення становить 60, а у трикотажі утоково-філейного переплетення 40 незалежно від варіанту розташування

утокової нитки в структурі трикотажу. Зменшення показника у трикотажі утоково-філейного переплетення пов'язано зі зміною форми чарунки. Під дією релаксаційних процесів в утоковій високорозтяжній нитці діагональні сторони чарунки розташовуються в полотні практично горизонтально, що зазвичай приводить до розширення чарунки та скорочення її по довжині. Результатом чого є також значне (на 40–100 %) зростання кількості петельних рядів на 100 мм.

Водночас спостерігається вплив варіанту розташування утокової нитки в структурі трикотажу на кількість петельних рядків на 100 мм. ( $N_p$ ), що наочно ілюструє діаграма (рис. 4.1). Для трикотажу переплетення, в якому утокова гребінка зсувається за спинками голок в бік зсуву ґрунтової гребінки Г1 (варіанти 2.2–2.7), значення показників менші, ніж для трикотажу переплетення, в якому утокова гребінка зсувається за спинками голок в бік зсуву ґрунтової гребінки Г2 (варіанти 2.8–2.13).

Крім того, зі збільшенням точок контакту утокової нитки з нитками ґрунту (варіанти 2.2–2.4, 2.5–2.7, 2.11–2.13) спостерігається зменшення щільності трикотажу по вертикалі. Це можна пояснити тим, що при збільшенні точок контакту утокової нитки з нитками ґрунту, а особливо у випадках обвивання утоком протяжок петель ґрунту, процеси релаксації високорозтяжної нитки утруднені через зростаючі сили тертя між утоковими та ґрунтовими нитками.

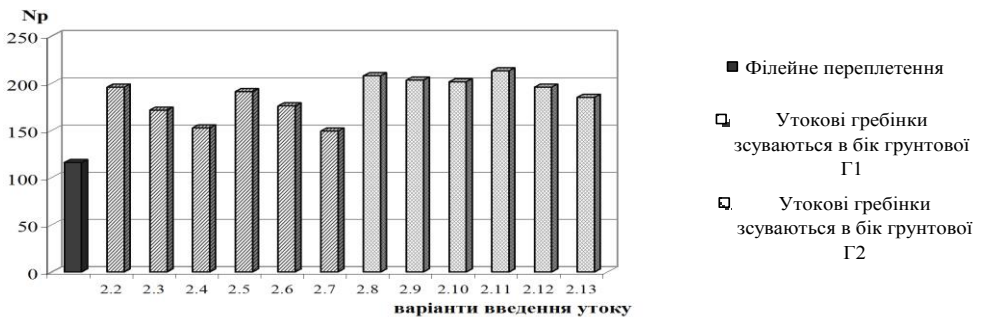


Рис. 4.1. Залежність кількості петельних рядів на 100 мм від варіанту розташування утокової нитки

На рис. 4.2 представлено діаграму, яка ілюструє вплив варіанту введення утокової нитки на товщину трикотажу. Вплив можна пояснити тим, що в трикотажі тих варіантів, де є релаксація утокової нитки, відбувається переважно не тільки наближення вертикальних сторін двох чарунок по довжині трикотажу [214, 217], але й вигин цих ділянок в площині, яка перпендикулярна площині полотна. Крім того діаметр високорозтяжної нитки при повній її релаксації зазвичай буде більшим, ніж у розтягнутому стані.

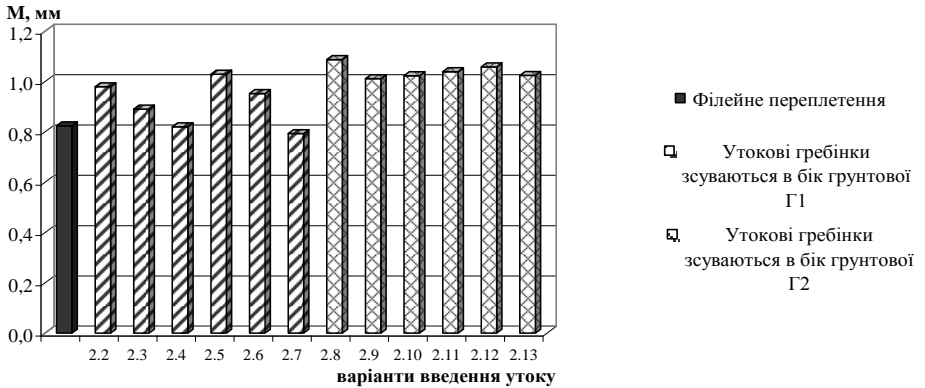


Рис. 4.2. Залежність товщини трикотажу від варіанту розташування утокової нитки

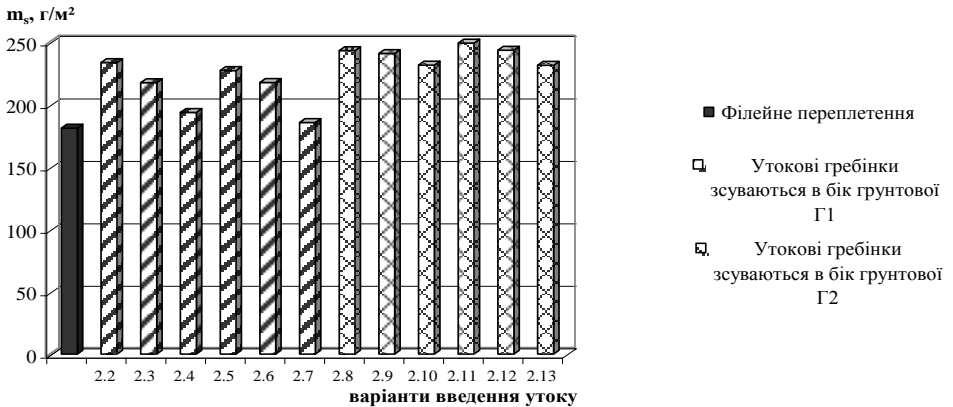


Рис. 4.3. Залежність поверхневої густини трикотажу від варіанту розташування утокової нитки

Поверхнева густина трикотажу є одним з основних показників, які визначають матеріалоемність полотен і масу виробу, виготовленого з цього полотна, і залежить перш за все від щільності трикотажу. При цьому зі зміною поверхневої густини полотна змінюються фізико-механічні властивості. Діаграму, яку представлено на рис. 4.3, показує що поверхнева густина досліджуваного основов'язаного трикотажу залежить від наявності утокової нитки в структурі полотна, а також від варіанту введення цієї нитки. При порівнянні діаграм, зображених на рис. 4.1, рис. 4.2 та рис. 4.3, бачимо, що поверхнева густина трикотажу зменшується зі зменшенням кількості петельних рядів на 100 мм та товщини полотна, що є логічним підтвердженням висновків, які зроблені вище.

#### **4.2.2. Розміри чарунок трикотажу**

Досліджуваний трикотаж утоково-філейного переплетення належить до сіткополотен, основними параметрами яких є геометричні розміри всіх сторін чарунки: довжини ( $a_1$  та  $a_2$ ) і ширини ( $b_1$  та  $b_2$ ) відповідно вертикальної та діагональної сторін, а також кроки чарунок по горизонталі  $t_h$  та вертикалі  $t_v$  (рис. 2.12.а). При дослідженні варіанту розташування утокової нитки в структурі філейного трикотажу в якості утокової нитки використовували високорозтяжну поліуретанову нитку, яка подавалася в зону в'язання під значним натягом і після зняття навантажень відновлювала свої розміри. В результаті такої релаксації утокової нитки відбувалися зміни форми чарунок (рис. 2.12.б).

Очевидно, що введення високорозтяжної утокової нитки в структуру трикотажу філейного переплетення впливає і на розміри його чарунок, результати експериментальних досліджень яких представлені у таблиці 4.2 і на діаграмах (рис. 4.4 ÷ рис. 4.6). Проведений аналіз результатів дослідження довжин сторін чарунок (рис. 4.4) показав наступне:

- введення високорозтяжної утокової нитки в структуру філейного трикотажу призводить до зменшення довжини як вертикальної, так і діагональної сторін;
- варіант взаємодії утокових гребінок з ґрунтовими (в бік зсуву якої Г1 чи Г2 відбувається зсув утокових гребінок за спинками голок)

впливає на показники, особливо на довжину вертикальної сторони.

Таблиця 4.2

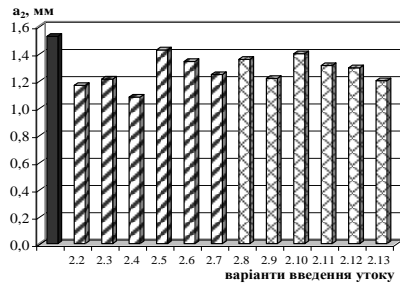
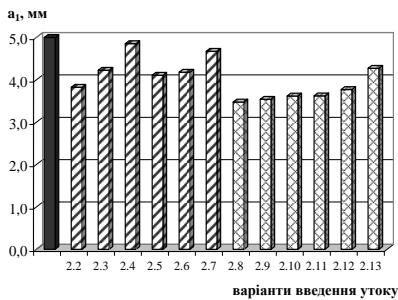
**Розміри чарунок трикотажу, мм**

Варіант введення утку		Довжини сторін		Ширини сторін		Кроки чарунок		
		вертикальній $a_1$	діагональній $a_2$	вертикальній $b_1$	діагональній $b_2$	по горизонталі $t_r$	по вертикалі $t_b$	
Базове філейне переплетення		5,01	1,52	1,22	0,82	3,11	5,49	
Утокова гребінка зсувається за спинками голок в бік зсуву ґрунтової гребінки Г1	Утокова нитка не обвиває протяжки петель ґрунту	2.2	3,82	1,16	1,64	1,00	5,20	2,07
		2.3	4,23	1,21	1,69	1,05	5,28	2,67
		2.4	4,85	1,08	1,72	0,96	5,76	2,70
	Утокова нитка обвиває протяжки петель ґрунту	2.5	4,11	1,42	1,56	1,02	5,46	2,30
		2.6	4,18	1,34	1,60	0,98	5,51	2,65
		2.7	4,68	1,24	1,57	1,09	5,07	3,28
Утокова гребінка зсувається за спинками голок в бік зсуву ґрунтової гребінки Г2	Утокова нитка не обвиває протяжки петель ґрунту	2.8	3,48	1,36	1,67	0,92	5,29	2,31
		2.9	3,54	1,22	1,78	0,88	5,61	2,30
		2.10	3,62	1,40	1,70	1,00	5,65	2,51
	Утокова нитка обвиває протяжки петель ґрунту	2.11	3,62	1,31	1,75	0,95	5,56	2,17
		2.12	3,77	1,29	1,73	0,97	5,50	2,39
		2.13	4,27	1,20	1,60	0,98	5,07	2,67



Так, у трикотажі варіантів 2.8–2.13 довжина вертикальної сторони на 10–13% більша, ніж у трикотажу відповідних варіантів 2.2–2.7. Довжина ж діагональної сторони навпаки у трикотажі варіантів 2.8–2.13 менша, ніж у відповідних варіантів 2.2–2.7;

- суттєвий вплив на довжини сторін має кількість точок контакту утокової нитки з нитками ґрунту. Так, довжина  $a_1$  зростає від варіанту 2.2 до 2.4, від 2.5 до 2.7, від 2.8 аж до 2.13. Тобто зі збільшенням точок контакту утокових та ґрунтових ниток процеси релаксації високо розтяжної нитки утруднені, що не дає змогу наближати чарунки одна до одної в вертикальному напрямку. Водночас у трикотажі відповідних варіантів спостерігаємо зменшення довжини діагональної сторони  $a_2$ , що пов'язано з розширенням остовів петель, які її утворюють.



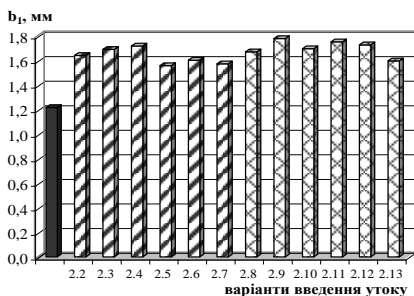
а) вертикальної  $a_1$

б) діагональної  $a_2$

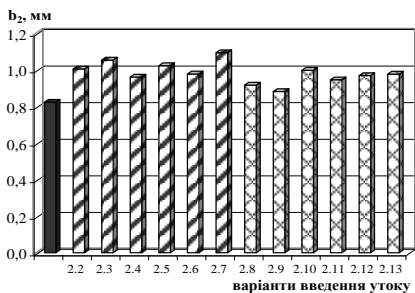
Рис. 4.4. Залежність довжин сторін чарунки від варіанту розташування утокової нитки

Введення утокової нитки в структуру філейного трикотажу призводить до збільшення ширини як вертикальної  $b_1$ , так і діагональної  $b_2$  сторін чарунки (рис. 4.5). При цьому відбувається значне (на 30–40 %) потовщення вертикальної сторони, що є наслідком наявності додаткової нитки в структурі. Збільшення ж товщини діагональної сторони до 25 % залежно від варіанту пояснюється, перш за все, розташуванням цієї ділянки в структурі полотна. У трикотажі філейного переплетення вона займає діагональне положення, а в трикотажі утоково-філейного переплетення майже горизонтальне. Внаслідок такого переміщення

ділянок відбувається розширення остовів петель, які утворюють ділянку.

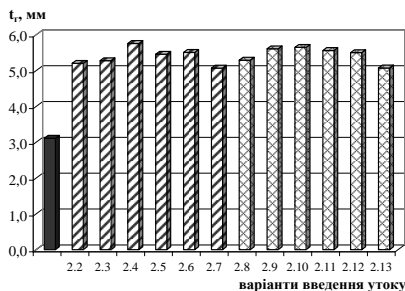


а) вертикальної  $b_1$

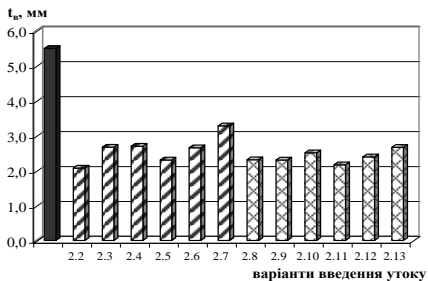


б) діагональної  $b_2$

Рис. 4.5. Залежність ширин сторін чарунки від варіанту розташування утокової нитки



а) по горизонталі  $t_1$



б) по вертикалі  $t_2$

Рис. 4.6. Залежність кроків чарунки від варіанту розташування утокової нитки

Показники кількості петельних стовпчиків та рядків на 100 мм ( $N_{ст}$  та  $N_p$ ) зазвичай не використовуються для характеристики сіткополотен, до яких належить трикотаж досліджуваного утоково-філейного переплетення. Кроки чарунки по горизонталі та вертикалі є характеристиками форми чарунки та їхнього взаємного розташування в полотні, а також опосередкованими показниками щільності трикотажу. Проведені дослідження показали, що введення високорозтяжної нитки в структуру трикотажу філейного переплетення у вигляді повздовжнього утку призводить до одночасного зменшення кроку чарунки по вертикалі і збільшення кроку чарунки по горизонталі (рис. 4.6).

При цьому збільшення кроку чарунки по горизонталі відбувається майже у 2 рази і показник практично однаковий для всіх варіантів трикотажу утоково-філейного переплетення. Водночас крок чарунки по вертикалі трикотажу утоково-філейного переплетення зменшується більш ніж у 2 рази в порівнянні з трикотажем філейного переплетення і залежить від варіанту введення утокової нитки. Причина цього полягає в різному ступені релаксації високорозтяжної утокової нитки в структурі трикотажу.

#### 4.2.3. Розрахункові співвідношення розмірів

Попередні дослідження (п.2.5) та дослідження, проведені в Массачусетському університеті [216, 252] довели, що аукзетик-властивості основов'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення залежать від співвідношень розмірів чарунок. На підставі отриманих експериментальних даних нами розраховано відповідні співвідношення, результати чого представлено в таблиці 4.3. На рис. 4.7 представлено діаграму, яка відображає вплив варіанту введення утоку в структуру трикотажу на тангенс кута нахилу діагональної сторони чарунки. Очевидно, що тільки трикотаж філейного переплетення має позитивне значення показника, що свідчить про відсутність у нього аукзетик-властивостей. Найбільше від'ємне значення показник набуває у трикотажі філейно-утокового переплетення з варіантом утоку 2.4, що є показником кращих властивостей.

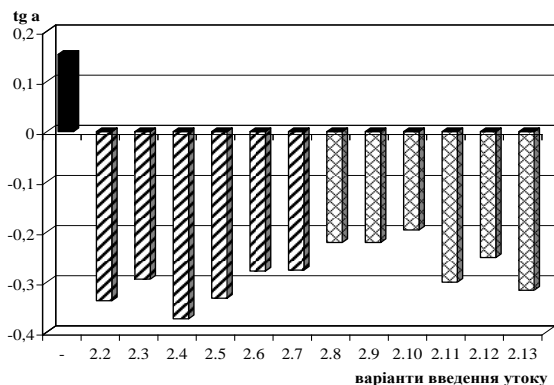


Рис. 4.7. Залежність тангенсу кута нахилу діагональної сторони чарунки від варіанту розташування утокової нитки

Співвідношення розмірів чарунок

Варіант трикотажу		$K_1$	$K_2$	$\text{tg } \alpha$
Філейне переплетення		1,765	1,096	0,154
Філейно-утокове переплетення	2.2	0,398	0,542	-0,337
	2.3	0,506	0,631	-0,294
	2.4	0,469	0,557	-0,373
	2.5	0,421	0,560	-0,332
	2.6	0,481	0,634	-0,278
	2.7	0,647	0,701	-0,276
	2.8	0,437	0,664	-0,221
	2.9	0,410	0,650	-0,221
	2.10	0,444	0,693	-0,196
	2.11	0,390	0,599	-0,300
	2.12	0,434	0,634	-0,251
	2.13	0,527	0,625	-0,316

#### 4.2.4. Розривальні характеристики

Як відомо, характеристики трикотажних полотен при однократному розтягненні до розриву найчастіше застосовують при оцінці їхніх механічних властивостей. Більшість робіт з дослідження механічних властивостей трикотажних полотен пов'язані з визначенням напівциклових характеристик [272]: розривального навантаження  $P_p$  (Н) та розривного видовження  $l_p$  (мм) або відносного розривального видовження  $\epsilon_p$  (%). Ці показники особливо важливі при використанні трикотажу у техніці та промисловості, де вони підлягають значним навантаженням. Результати досліджень напівциклових характеристик основ'язаного трикотажу філейного та утоково-філейного переплетень наведено у таблиці 4.4 та на діаграмі (рис. 4.8).

Отримані дані показують, що розривальне навантаження трикотажу утоково-філейного переплетення на 10–20% більше розривального навантаження трикотажу базового філейного переплетення, що можна пояснити наявністю утокової нитки в структурі, яка також чинить опір розриву, що підвищує міцність трикотажу. При цьому спостерігається незначний вплив варіанту закріплення утокової нитки в структурі трикотажу на досліджуваний показник. Так, трикотаж варіантів 2.2–2.4 має розривальне навантаження, яке на 5–10% вище, ніж трикотаж інших варіантів розташування утоку.

## Розривальні характеристики трикотажу

Варіант розташування утку				Навантаження $P_p, H$	Відносне видовження $\epsilon_p, \%$
Базове філейне переплетення				91,7	39,5
Утоково-філейне переплетення	утокова гребінка зсувається за спинками голок паралельно ґрунтовій гребінці Г1	утокова нитка не обвиває протяжки петель ґрунту	2.2	108,2	200,0
			2.3	108,1	200,0
			2.4	103,5	163,7
		утокова нитка обвиває протяжки петель ґрунту	2.5	98,3	200,0
			2.6	98,4	160,0
			2.7	98,6	138,2
	утокова гребінка зсувається за спинками голок паралельно ґрунтовій гребінці Г2	утокова нитка не обвиває протяжки петель ґрунту	2.8	102,2	185,5
			2.9	98,8	193,2
			2.10	98,4	191,6
		утокова нитка обвиває протяжки петель ґрунту	2.11	98,8	186,6
			2.12	98,5	190,5
			2.13	98,5	189,5

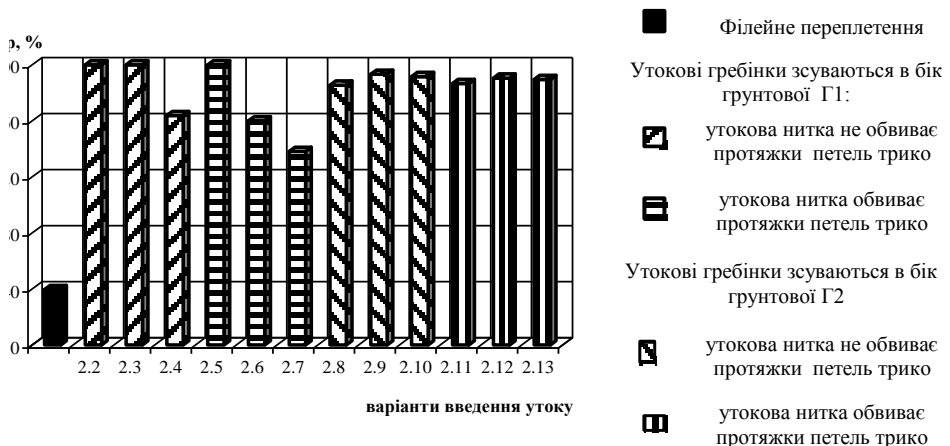


Рис. 4.8. Залежність розривального видовження від варіанту розташування утку

У варіантах 2.2–2.4 утокові нитки розташовуються в трикотажі практично вертикально між протяжками петель трико з ниток різних ґрунтових гребінок, виходячи то на лицьовий, то на виворітний бік трикотажу. Зі збільшенням кількості переходів з

однієї сторони трикотажу на іншу зменшується розривальне навантаження трикотажу.

Відносне розривальне видовження (таблиця 4.4, рис. 4.8) трикотажу філейно-утокового переплетення в 4–5 разів більше розривального видовження трикотажу базового філейного переплетення, що можна пояснити наявністю високорозтяжної повздовжньої утокової нитки в структурі трикотажу. При цьому спостерігається вплив варіанту закріплення утокової нитки на досліджуваний показник.

У трикотажі варіантів введення утоку 2.8–2.13, у яких зсув гребінок з утоковими нитками здійснюється у бік зсуву гребінки Г2 з ґрунтовими нитками, розривальне видовження практично однакове і становить в середньому 180%, тоді як розривальне видовження трикотажу філейного переплетення лише біля 40 %.

У трикотажі варіантів введення утоку 2.2–2.7, у яких зсув гребінок з утоковими нитками здійснюється у бік зсуву гребінки Г1 з ґрунтовими нитками, розривне видовження залежить від варіанту розташування утоку в структурі трикотажу. Так, зі збільшенням точок контакту утокової нитки з ґрунтовими (варіанти від 2.2 до 2.4 та від 2.5 до 2.7) спостерігається зниження розривального видовження. При цьому трикотаж варіантів 2.5–2.7, в яких відбувається обвивання протяжок петель трико утоковими нитками, має менше розривальне видовження, ніж трикотаж, в якому утокова нитка розташовується без обвивання протяжок петель ґрунту. Причиною такого зниження розривального видовження є те, що в трикотажі цих варіантів утокова нитка знаходиться в дещо розтягнутому стані, ступінь чого залежить від кількості обвивань [273].

#### **4.2.5. Повна деформація та її складові частини**

Текстильні вироби в процесі використання в різних галузях піддаються навантаженням, які значно менші за розривні. Незначні за величиною, чергуючись з розвантаження та відпочинком, вони впливають на структуру текстильних матеріалів, особливо трикотажних, і призводять до деформування та послаблення, зміни розмірів та форми. Тому важливим є дослідження характеристик механічних властивостей, які отримують при дослідженнях за

циклом: навантаження – розвантаження – відпочинок: повної деформації та її складових частин.

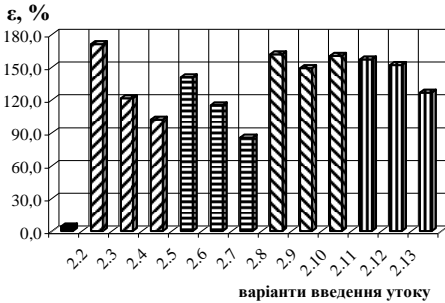
Повна деформація складається з наступних частин: пружної деформації, яка зникає відразу після зняття навантажень; еластичної деформації з тривалим періодом релаксації, яка відбувається у часі при невеликих швидкостях; пластичної деформації, яка не зникає після зняття навантаження. Так, як в процесі досліджень миттєво зникаючі пружні деформації вловити дуже складно, а еластична деформація залежить від тривалості та умов релаксації [272], то при проведенні досліджень визначали оборотні деформації, до складу яких входять пружна та більша частина еластичної деформації, та залишкову деформацію, яка містить в собі пластичну деформацію та частину еластичної деформації, яка не виявилася впродовж часу «відпочинок» проби.

На рис. 4.9 наведено діаграми, які відображають розраховані значення повної деформації трикотажу та її складових частин. Результати досліджень показали, що введення в структуру філейного трикотажу високо розтяжної утокової нитки як повздовжнього утоку призводить до значного (в десятки разів) зростання повної деформації трикотажу в напрямку прокладання утоку. При цьому спостерігається вплив варіанту закріплення утокової нитки в структурі трикотажу [273].

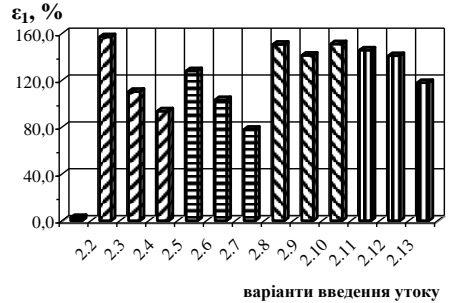
Так, у трикотажі варіантів введення утоку 2.8–2.13, у яких зсув гребінок з утоковими нитками здійснюється у бік зсуву гребінки Г1 з ґрунтовими нитками, повна деформація (рис. 4.9.а) як і її швидкооборотна частина (рис. 4.9.б) на 20–40% вищі, ніж у трикотажі відповідних варіантів, у яких зсув гребінок з утоковими нитками здійснюється у бік зсуву гребінки Г2 з ґрунтовими нитками. При цьому у цих же варіантів повільнооборотна частина деформації (рис. 4.9.в) менша.

Порівняльний аналіз діаграм повної деформації трикотажу (рис. 4.9.а) та її швидкооборотної складової (рис. 4.9.б) вказує на співпадіння залежностей. Значення деформації знижується при збільшенні точок контакту утокової нитки з ґрунтовими в структурі трикотажу (варіанти 2.2–2.4, 2.5–2.7, 2.11–2.13), що можна пояснити уповільненням релаксаційних процесів. При цьому обвивання утком протяжок петель також перешкоджає швидкій релаксації

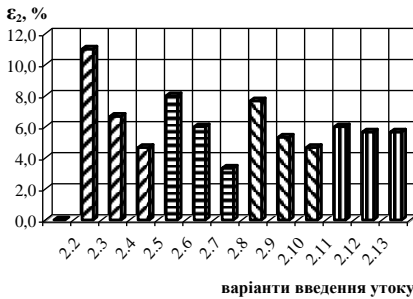
напруг, які виникають в утоковій нитці при розтягненні, що також знижує значення показників.



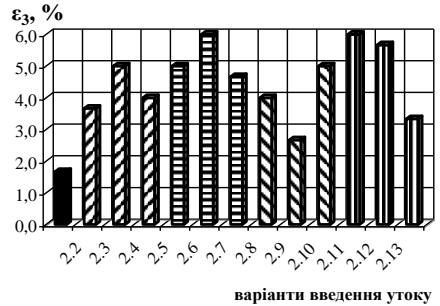
**а) повна**



**б) швидкооборотна**



**в) повільнооборотна**



**г) залишкова**

**Рис. 4.9 Залежність деформації трикотажу від варіанту розташування утокової нитки**

Що стосується залишкової складової деформації (рис. 4.9.г), то в трикотажі філейно-утокового переплетення вона дещо вища (на 2-4%), ніж у трикотажі філейного переплетення, однак абсолютні її значення не перевищують 6%. У процесі дослідження не виявлено залежностей між варіантом введення утоку і значенням залишкової деформації.

Для характеристики механічних властивостей трикотажу велике значення мають значення співвідношень складових частин повної деформації. Що більшою є частка оборотної частини в повній деформації трикотажу, то краще він зберігає розміри та форму. Превалювання залишкової частини повної деформації призводить до швидкої зміни розмірів трикотажу в процесі його



експлуатації. В таблиці 4.5 наведено значення показників для філеїного та утоково-філеїного трикотажу з різним варіантом розташування утокової нитки.

Таблиця 4.5

**Частки складових частин повної деформації трикотажу**

Варіант введення утку			Повна деформація $\varepsilon$ , %	Частка складових частин деформації			
				швидкооборотної $\Delta\varepsilon_1$	повільної $\Delta\varepsilon_2$	залишкової $\Delta\varepsilon_3$	
Філеїне переплетення			4,3	0,62	0,00	0,38	
Утоково-філеїне переплетення	утокові гребінки зсуваються у бік ґрунтової Г1	уток не обвиває	2.2	171,7	0,92	0,06	0,02
		протяжки	2.3	122,0	0,90	0,06	0,04
		петель	2.4	102,3	0,92	0,04	0,04
		уток обвиває	2.5	141,0	0,91	0,06	0,03
		протяжки	2.6	112,0	0,90	0,05	0,05
		петель	2.7	86,0	0,91	0,04	0,05
	утокові гребінки зсуваються у бік ґрунтової Г2	уток не обвиває	2.8	162,3	0,93	0,05	0,02
		протяжки	2.9	149,3	0,95	0,03	0,02
		петель	2.10	160,7	0,94	0,03	0,03
		уток обвиває	2.11	157,7	0,92	0,04	0,04
		протяжки	2.12	152,3	0,92	0,04	0,04
		петель	2.13	127,0	0,93	0,04	0,03

Отримані дані показують, що в трикотажі утоково-філеїного переплетення частка залишкової деформації не перевищує 0,05, що вказує на гарну формостійкість досліджуваних полотен. При цьому значну частку (понад 0,90) становить швидкооборотна деформація, що є свідченням стрімкої релаксації напруг, які виникають при розтягненні цього виду трикотажу. Встановлено, що варіант закріплення утокової нитки в структурі трикотажу не впливає на співвідношення складових частин деформації.

У трикотажі філеїного переплетення частка швидкооборотної деформації становить лише 0,62, а залишкової – 0,38 практично за відсутності повільнооборотної частини повної деформації трикотажу.

### **4.3. Дослідження впливу рапорту філейного переплетення**

#### **4.3.1. Параметри структури**

На підставі результатів дослідження параметрів структури трикотажу філейного та утоково-філейного переплетення отримано рівняння регресії (таблиці 4.6÷4.9), які адекватно з ймовірністю 0,95 описують залежність показників (кількості петельних стовпчиків та рядів на 100 мм, товщини та поверхневої густини трикотажу) від кількості рядів трико ( $n_T$ ) та ланцюжка ( $n_L$ ) в рапорті філейного переплетення та від варіанту розташування утокової нитки в структурі трикотажу.

Щільність в'язання трикотажу утоково-філейного переплетення є функцією обох параметрів: кількість петельних рядків на 100 мм зростає зі збільшенням рапорту філейного переплетення (для трикотажу філейного переплетення параметр є незмінним), а кількість петельних стовпчиків на 100 мм – переважно при зменшенні кількості рядів ланцюжка в рапорті. Причина цього полягає в формі чарунки після релаксації утокової нитки.

Еластомерна нитка подається в зону в'язання трикотажу під максимально можливим натягом і після закінчення дії відтяжного пристрою починається її релаксація, внаслідок чого гексагональна форма чарунки філейного переплетення змінюється: вертикальні сторони чарунки наближуються одна до одної по довжині полотна, а нахилені сторони змінюють кут нахилу до горизонталі. Адже саме ділянка чарунки, яка утворена петлями ланцюжка, розташовується в структурі практично горизонтально, що призводить до розширення чарунки.

Водночас спостерігається вплив на показники варіанту розташування утокової нитки в структурі. Так, у трикотажі, в якому утокова нитка не обвиває протяжки петель трико і розташовується в структурі трикотажу в одному ряді рапорту, кількість петельних рядів на 100 мм (рис. 4.10) вища, ніж у трикотажі, в якому утокова нитка розташовується в структурі трикотажу в трьох рядах рапорту. При цьому різниця зростає до 15% зі збільшенням рапорту філейного переплетення. Це є свідченням різного ступеня релаксації високорозтяжної утокової нитки в структурі.

## Кількість петельних рядів на 100 мм

Варіант розташування утокової нитки в структурі	Позначення варіанту	Рівняння регресії	
		в натуральних значеннях змінних	в кодованих значеннях змінних
Філейне переплетення	Ф	$N_p = 115,8 \pm 3,4$	
Утокова нитка переходить з лицьового на виворітний бік	2.2 в одному ряді рапорту	$N_p = 136,6 + 12,1n_r + 20,2n_l$	$Y\{N_p\} = 237,6 + 24,2x_1 + 20,2x_2$
	2.3 в трьох рядах рапорту	$N_p = 138,2 + 7,5n_r + 25,7n_l$	$Y\{N_p\} = 227,0 + 14,9x_1 + 25,7x_2$
Утокова нитка розташовується між протязками петель трико двох гребінків	2.8 в одному ряді рапорту	$N_p = 160,0 + 10,1n_r + 18,8n_l$	$Y\{N_p\} = 248,0 + 20,1x_1 + 18,8x_2$
	2.9 в трьох рядах рапорту	$N_p = 142,8 + 12,6n_r + 44,5n_l - 6,3n_{rl}$	$Y\{N_p\} = 231,7 + 13,0x_2 - 12,6x_{1x_2}$
Утокова нитка обвиває протязки петель трико однієї гребінки	2.11 в одному ряді рапорту	$N_p = 159,6 + 5,9n_r + 26,2n_l$	$Y\{N_p\} = 241,5 - 11,8x_1 + 26,2x_2$
	2.12 в двох рядах рапорту	$N_p = 66,8 + 24,2n_r + 74,5n_l - 8,4n_{rl}$	$Y\{N_p\} = 252,8 + 14,8x_1 + 32,6x_2 - 16,8x_{1x_2}$
Утокова нитка обвиває протязки петель трико обох гребінків	2.5 в одному ряді рапорту	$N_p = 133,5 + 7,9n_r + 28,1n_l$	$Y\{N_p\} = 229,1 + 15,8x_1 + 28,1x_2$
	2.6 в двох рядах рапорту	$N_p = 118,9 + 9,1n_r + 25,0n_l$	$Y\{N_p\} = 214,2 + 18,1x_1 + 25,0x_2$

## Кількість петельних стовпчиків на 100 мм

Варіант розташування утокової нитки в структурі	Позначення варіанту	Рівняння регресії	
		в натуральних значеннях змінних	в кодovаних значеннях змінних
Філейне переплетення	Ф	$N_{cr} = 71,3 - 8,4n_{л}$	$Y\{N_{cr}\} = 54,6 - 8,4x_2$
Утокова нитка переходить з лицьового на виворітний бік	2.2	$N_{cr} = 42,8 - 3,2n_{л}$	$Y\{N_{cr}\} = 36,4 - 3,2x_2$
	2.3	$N_{cr} = 27,4 + 1,2n_{л} - 4,2n_{л}$	$Y\{N_{cr}\} = 35,2 + 2,5x_1 - 4,2x_2$
Утокова нитка розташовується між протяжками петель трико двох гребінків	2.8	$N_{cr} = 44,9 - 3,0n_{л}$	$Y\{N_{cr}\} = 38,9 - 3,0x_2$
	2.9	$N_{cr} = 37,8 + 0,9n_{л} - 3,6n_{л}$	$Y\{N_{cr}\} = 34,9 + 1,8x_1 - 3,6x_2$
Утокова нитка оббиває протяжки петель трико однієї гребінки	2.11	$N_{cr} = 43,0 - 3,3n_{л}$	$Y\{N_{cr}\} = 36,4 - 3,3x_2$
	2.12	$N_{cr} = 43,4 - 4,8n_{л}$	$Y\{N_{cr}\} = 33,7 - 4,8x_2$
Утокова нитка оббиває протяжки петель трико обох гребінків	2.5	$N_{cr} = 40,5 + 0,7n_{л} - 4,1n_{л}$	$Y\{N_{cr}\} = 36,0 + 1,5x_1 - 4,1x_2$
	2.6	$N_{cr} = 39,0 + 0,8n_{л} - 4,0n_{л}$	$Y\{N_{cr}\} = 35,1 + 1,7x_1 - 4,0x_2$

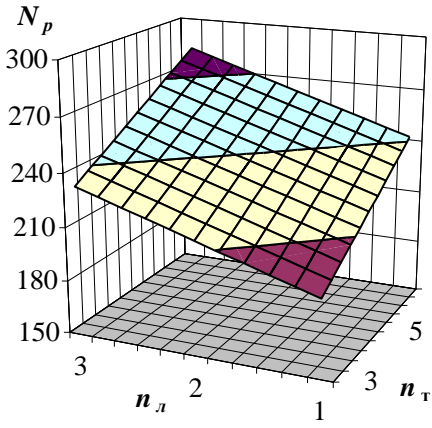
## Товщина полотна

Варіант розташування утокової нитки в структурі	Позначення варіанту	Рівняння регресії	
		в натуральних значеннях змінних	в кодovаних значеннях змінних
Філейне переплетення	Ф	$M = 0,77 - 0,05n_r$	$Y\{M\} = 0,67 - 0,05x_2$
Утокова нитка переходить з лицьового на виворітний бік	в одному ряді рапорту	$M = 0,89 + 0,04n_r$	$Y\{M\} = 1,11 + 0,08x_1$
	в трьох рядках рапорту	$M = 0,55 + 0,10n_r$	$Y\{M\} = 1,03 + 0,19x_1$
Утокова нитка розташовується між протязками петель трико двох гребінок	в одному ряді рапорту	$M = 0,89 + 0,04n_r$	$Y\{M\} = 1,10 + 0,08x_1$
	в трьох рядках рапорту	$M = 0,84 + 0,05n_r$	$Y\{M\} = 1,07 + 0,09x_1$
Утокова нитка обвиває протязки петель трико однієї гребінки	в одному ряді рапорту	$M = 0,90 + 0,05n_r$	$Y\{M\} = 1,15 + 0,10x_1$
	в двох рядках рапорту	$M = 0,84 + 0,06n_r$	$Y\{M\} = 1,13 + 0,12x_1$
Утокова нитка обвиває протязки петель трико обох гребінок	в одному ряді рапорту	$M = 0,64 + 0,10n_r$	$Y\{M\} = 1,15 + 0,21x_1$
	в двох рядках рапорту	$M = 0,54 + 0,08n_r$	$Y\{M\} = 0,96 + 0,17x_1$

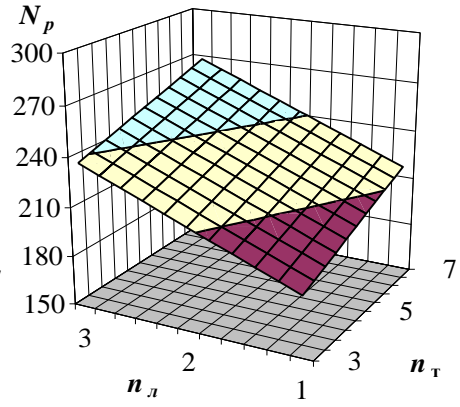
Таблиця 4.9

## Поверхнева густина

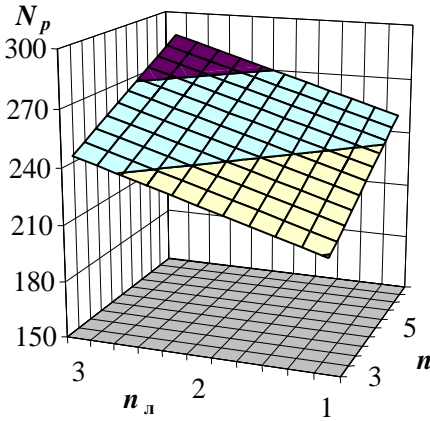
Варіант розташування утокової нитки в структурі	Позначення варіанту	Рівняння регресії	
		в натуральних значеннях змінних	в кодovаних значеннях змінних
Філейне переплетення	Ф	$m_s = 312,85 - 35,61n_r - 27,51n_l + 2,78n_r^2$	$Y\{m_s\} = 149,24 - 15,66x_1 - 27,51x_2 + 11,11x_1^2$
	2.2	$m_s = 288,33 + 15,29n_r - 93,92n_l + 23,48n_r^2$	$Y\{m_s\} = 270,84 + 30,58x_1 + 23,48x_2^2$
Утокова нитка переходить з лильового на виворітний бік	2.3	$m_s = 199,77 + 13,50n_r - 10,00n_l$	$Y\{m_s\} = 247,29 + 27,01x_1 - 10,00x_2$
	2.8	$m_s = 317,89 - 0,98n_r - 72,05n_l + 11,39n_r^2 + 5,30n_l n_r$	$Y\{m_s\} = 267,44 + 19,24x_1 + 11,39x_2^2 + 10,60x_1x_2$
Утокова нитка розташовується між протязками петель трико двох гребінків	2.9	$m_s = 360,63 - 12,72n_r - 47,60n_l + 6,36n_r n_l$	$Y\{m_s\} = 265,43 - 15,79x_2 + 12,72x_1x_2$
	2.11	$m_s = 360,63 - 12,72n_r - 47,60n_l + 6,36n_r n_l$	$Y\{m_s\} = 264,02 + 8,21x_1 - 15,24x_2$
Утокова нитка обвиває протязки петель трико однієї гребінки	2.12	$m_s = 244,47 + 4,50n_r - 12,28n_l$	$Y\{m_s\} = 241,80 + 8,99x_1 - 12,58x_2$
	2.5	$m_s = 297,77 + 0,29n_r - 47,69n_l + 6,72n_r n_l$	$Y\{m_s\} = 271,05 + 21,46x_1 - 14,08x_2 + 13,44x_1x_2$
Утокова нитка обвиває протязки петель трико обох гребінків	2.6	$m_s = 315,24 - 6,84n_r - 51,63n_l + 8,14n_r n_l$	$Y\{m_s\} = 259,18 + 18,88x_1 - 10,93x_2 + 16,28x_1x_2$



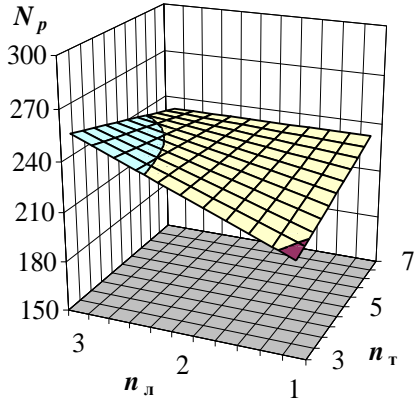
а) 2.2



б) 2.3

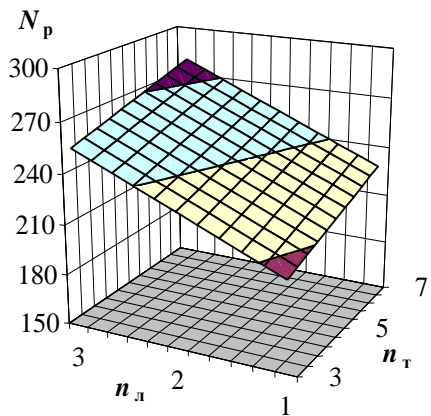


в) 2.8

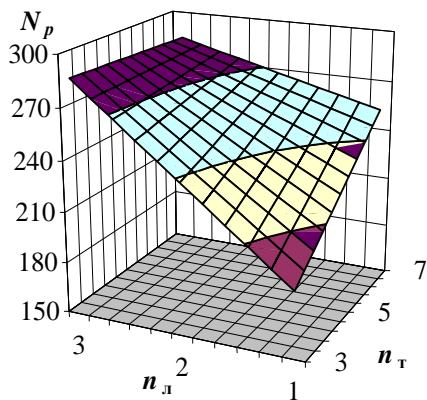


г) 2.9

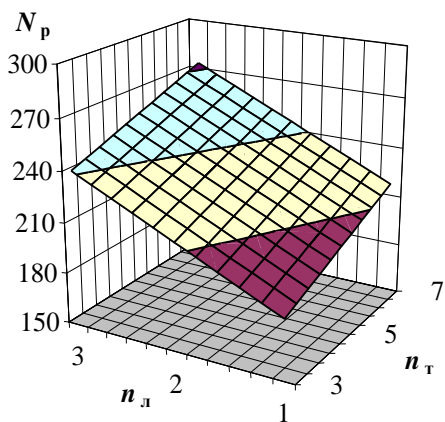
**Рис. 4.10. Залежність кількості петельних рядів від рапорту філейного переплетення основ'язаного трикотажу, в структурі якого утокова нитка не обвиває протяжки петель трико**



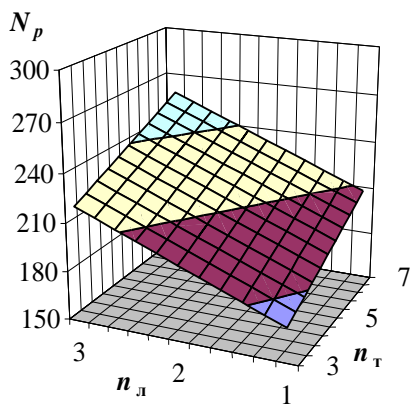
а) 2.11



б) 2.12



в) 2.5



г) 2.6

Рис. 4.11. Залежність кількості петельних рядів від рапорту філейного переплетення основ'язаного трикотажу, в структурі якого утокова нитка обвиває протяжки петель трико



У трикотажі, в структурі якого утокова нитка обвиває протяжки петель трико, спостерігаємо більш виражений вплив на показник кількості рядів ланцюжка в рапорті філейного переплетення (рис. 4.11) по відношенню до трикотажу, в якому утокова нитка не обвиває протяжки петель трико, що також пов'язане з розташуванням ділянки, яка утворена петлями ланцюжка, а відповідно і з різною релаксацією нитки.

Кількість петельних стовпчиків на 100 мм трикотажу філейного переплетення є функцією кількості рядів ланцюжка в рапорті (рис. 4.12). При цьому показник на 50% вищий, ніж у трикотажі утоково-філейного переплетення. Суттєвий вплив на кількість петельних стовпчиків на 100 мм має варіант розташування утокової нитки в структурі.

Аналіз отриманих рівнянь (таблиця 4.7) показує, що для трикотажу, в якому утокова нитка не обвиває протяжки петель трико і розташовується в структурі в трьох рядах рапорту, показник зростає при зменшенні кількості рядів ланцюжка і збільшенні кількості рядів трико в рапорті (рис. 4.13). Водночас кількість петельних стовпчиків на 100 мм трикотажу, в структурі якого утокова нитка фіксується лише в одному ряді рапорту, залежить лише від кількості рядів ланцюжка.

Для трикотажу, в структурі якого утокова нитка обвиває протяжки петель трико, залежності мають дещо відмінний характер (рис. 4.14). Так, при обвиванні утоковою ниткою протяжок петель трико лише однієї гребінки кількість петельних стовпчиків зменшується лише при збільшенні кількості рядів ланцюжка в рапорті (рис. 4.14.а та б).

При обвиванні утоковою ниткою протяжок петель трико обох ґрунтових гребінок водночас кількість петельних стовпчиків на 100 мм зменшується як при збільшенні кількості рядів ланцюжка, так і при зменшенні рядів трико в рапорті філейного переплетення (рис. 4.14.в та г). При цьому зниження на 10% більше у трикотажі, в структурі якого утокова нитка фіксується в двох рядах рапорту (варіант 2.12 та 2.6).

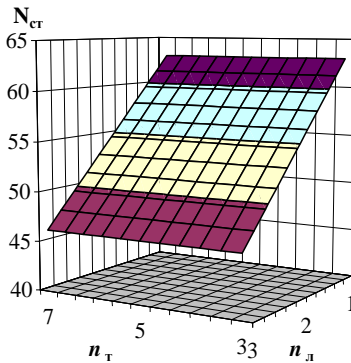
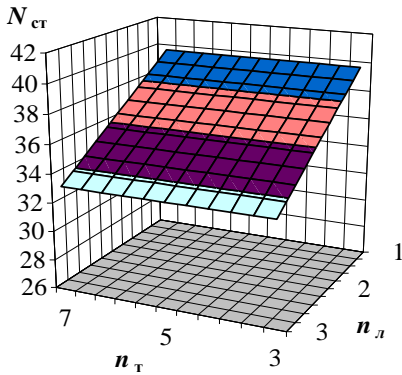
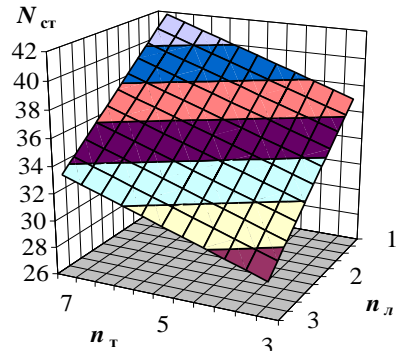


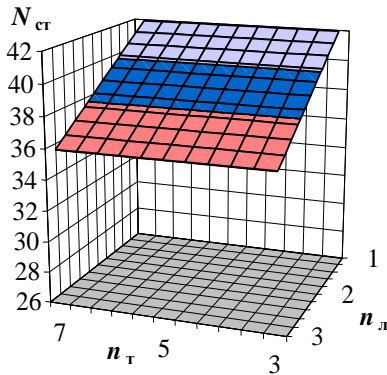
Рис. 4.12. Залежність кількості петельних стовпчиків основов'язаного трикотажу філейного переплетення від рапорту



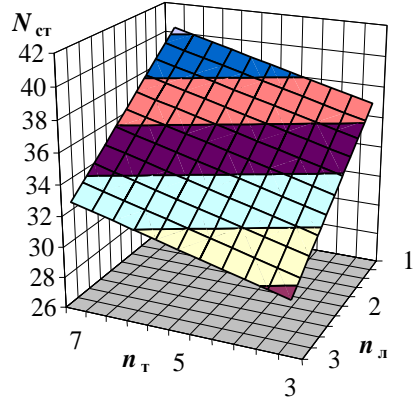
а) 2.2



б) 2.3

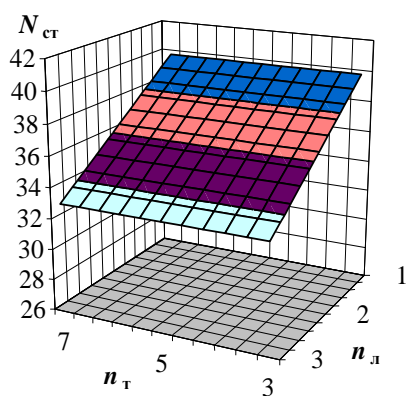


и) 2.8

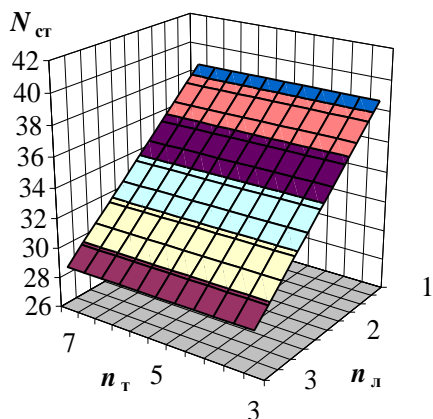


г) 2.9

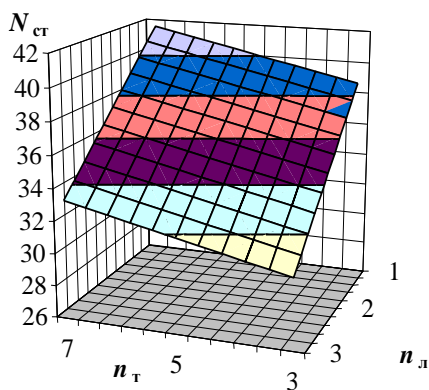
Рис. 4.13. Залежність кількості петельних стовпчиків від рапорту філейного переплетення основов'язаного трикотажу, в структурі якого утокова нитка не обвиває протяжки петель трико



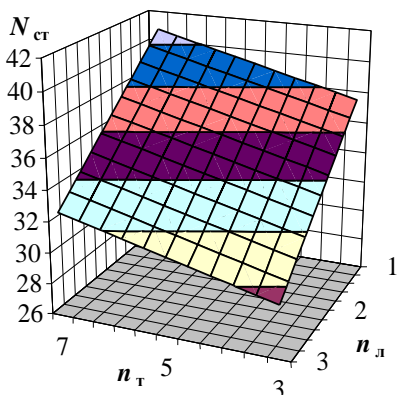
а) 2.11



б) 2.12



в) 2.5



г) 2.6

Рис. 4.14. Залежність кількості петельних стовпчиків від рапорту філейного переплетення основ'язаного трикотажу, в структурі якого утокова нитка обвиває протяжки петель трико

Результати дослідження товщини трикотажу (таблиця 4.8) показали, що товщина філейного трикотажу залежить від кількості рядів ланцюжка в рапорті, що можна пояснити різною формою петель, які створюють нахилену сторону чарунки, та різним розташуванням їх у просторі при зміні рапорту переплетення.

При введенні в структуру трикотажу утокової нитки спостерігаємо значне збільшення товщини трикотажу (рис. 4.15),

що є підтвердженням висновків, які зроблені в п.4.2. Водночас на товщину трикотажу утоково-філейного переплетення впливає лише кількість рядів трико в рапорті філейного переплетення. Такий вплив можна пояснити тим, що при збільшенні довжини ділянки вона в деяких випадках (особливо при 7 рядах трико в рапорті) вигинається в площині, яка перпендикулярна площині трикотажу.

Водночас спостерігається вплив варіанту розташування утоку (рис. 4.15): зі збільшенням рапорту розташування утоку в структурі товщина трикотажу зменшуються, що пояснюється меншим ступенем релаксації еластомерної нитки в структурі і, як наслідок, меншим її діаметром. Слід зазначити, що найменшу товщину має трикотаж, в якому утокова нитка обвиває протяжки петель трико обох ґрунтових гребінок і фіксується в структурі в двох рядах рапорту (варіант 2.6).

$M, \text{мм}$

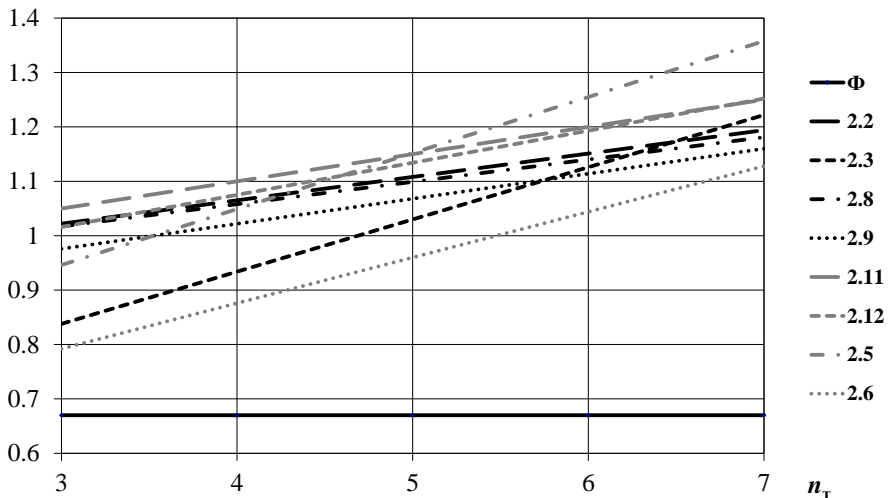


Рис. 4.15. Залежність товщини основ'язаного трикотажу від кількості рядів трико в рапорті філейного переплетення

Найважливішим чинником, що визначає матеріалоемність продукції та вагу трикотажного виробу, є поверхнева густина. Отримані регресійні рівняння (таблиця 4.9) та їхні графічні відображення (рис. 4.16 ÷ рис. 4.18) ілюструють вплив як кількості рядів трико, так і кількості рядів ланцюжка на цей параметр.

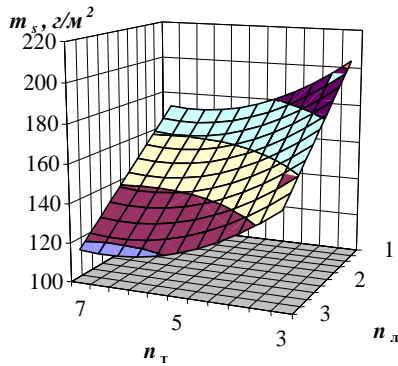
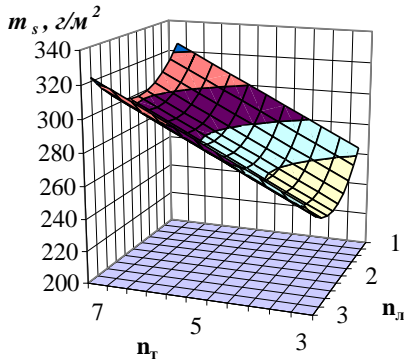
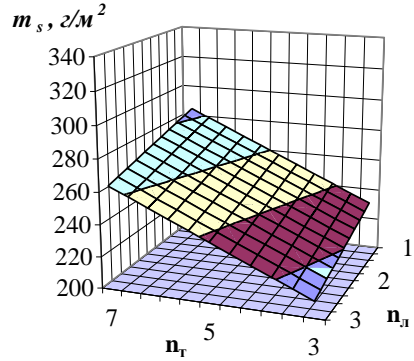


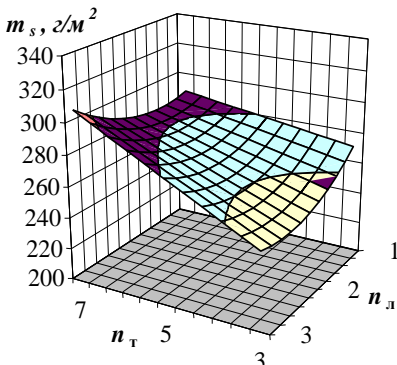
Рис. 4.16. Залежність поверхневої густини основ'язаного трикотажу від рапорту філейного переплетення



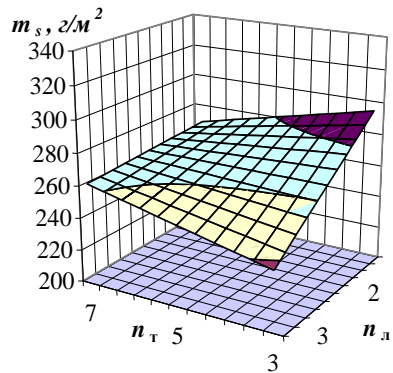
а) 2.2



б) 2.3

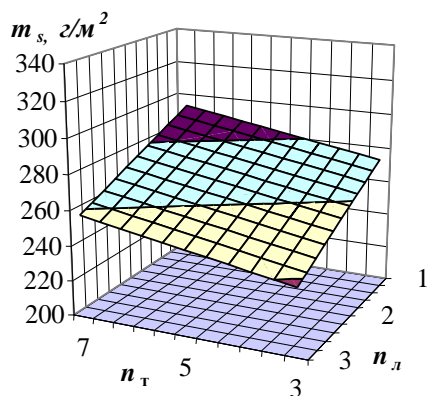


и) 2.8

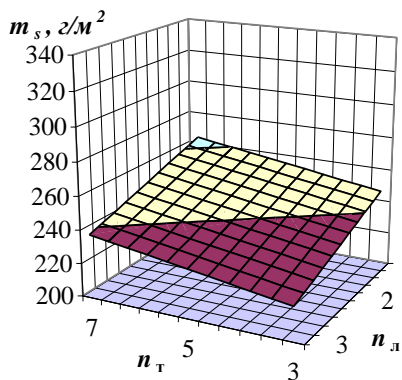


г) 2.9

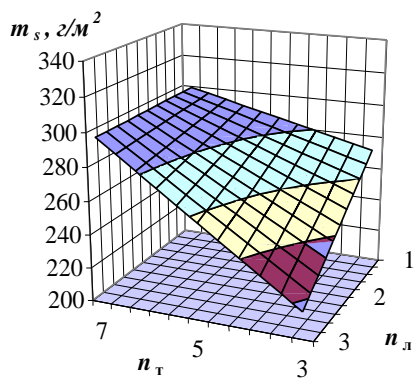
Рис. 4.17. Залежність поверхневої густини від рапорту філейного переплетення основ'язаного трикотажу, в структурі якого утокова нитка не обвиває протяжки петель трико



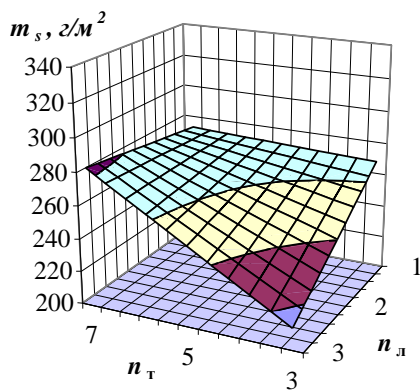
а) 2.11



б) 2.12



в) 2.5



г) 2.6

**Рис. 4.18. Залежність поверхневої густини від рапорту філейного переплетення основ'язаного трикотажу, в структурі якого утокова нитка обвиває протяжки петель трико**

Слід відмітити вплив варіанту розташування утокової нитки в структурі, який пов'язаний з діаметром утокової нитки, а відповідно – зі ступенем її релаксації в структурі. Так, при збільшенні кількості рядів, в яких утокова нитка розташовується в структурі трикотажу (варіанти 2.3, 2.9, 2.12 та 2.6), поверхнева густина полотна знижується в порівнянні з трикотажем, в структурі якого утокова нитка фіксується в одному ряді (варіанти 2.2, 2.10, 2.11 та 2.5).

### 4.3.2. Розміри чарунок трикотажу

Проведений аналіз форми чарунки сітчастого основов'язаного трикотажу філейного переплетення показав, що цей трикотаж має чітко-виражену симетричну гексагональну форму, розміри якої залежать від рапорту переплетення. При аналізі форми чарунки основов'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення різних варіантів прокладання високорозтяжного повздовжнього утоку встановлено, що у всіх варіантах в результаті релаксації утокової нитки гексагональна форма чарунки філейного трикотажу змінюється. Вертикальні сторони чарунки, які утворені взаємно перехрещеними петлями трико, наближуються в повздовжньому напрямку, а діагональні сторони, які утворені головним чином петлями ланцюжка, переміщуються, змінюючи кут нахилу до горизонталі. Таким чином, отримуємо типову аукзетик-структуру. Аукзетик-властивості матеріалів характеризуються коефіцієнтом Пуассона, який для сітчастих полотен залежить від розмірів чарунки та їх співвідношень.

Водночас форма чарунки трикотажу, в якому утокова нитка розташовується між протяжками петель трико в одному ряді рапорту, суттєво відрізняється від описаної. В такому трикотажі еластомерна нитка закріплена в структурі лише в одному ряді рапорту (варіант 2.8), а в усіх інших рядах – розташовується вільно на поверхні трикотажу. Таким чином, внаслідок її релаксації відбувається не просте наближення вертикальних сторін чарунки, які утворені рядами петель трико, а наближення саме тих рядів, в яких утокова нитка розташована в структурі трикотажу.

У результаті цього вертикальні сторони чарунки не тільки наближаються, але й нахилиються в площині трикотажу; а діагональні – не тільки змінюють кут нахилу, але й вигинаються в площині, яка перпендикулярна площині полотна. Ступінь нахилу вертикальної сторони чарунки зростає при збільшенні рапорту ґрунтового філейного переплетення, а особливо зі збільшенням кількості рядів трико в рапорті. Нахил вертикальної сторони чарунки спостерігаємо також у трикотажі утоково-філейного переплетення, який має 7 рядів трико в рапорті, 2.2, 2.11, 2.5 та 2.6 варіантів розташування утокової нитки в структурі.

У результаті дослідження структури основ'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення, в структурі якого утокова нитка розташовується по чергово то на лицьовому, то на виворотному його боці (варіанти 2.2–2.3), виявлено наступне. Після релаксації в структурі трикотажу еластомерна нитка зменшується по довжині і намагається випрямитися. В результаті цього в місцях її переходу з одного боку полотна на інший відбувається переміщення протяжок петель трико ґрунтового переплетення – вони огинають утокову нитку, що призводить до збільшення площі контакту цих ниток, а, відповідно, і до зростання надійності закріплення утокової нитки в структурі трикотажу. При цьому зі збільшенням кількості переходів з однієї сторони трикотажу на іншу надійність закріплення утокової нитки в структурі зростає, але зростають і сили тертя, які перешкоджають релаксації еластомерної нитки.

За результатами дослідження розмірів чарунки встановлено рівняння регресії, які адекватно з ймовірністю 0,95 описують залежності довжин сторін чарунки (таблиця 4.10) та кроків чарунки (таблиці 4.12 та 4.13) основ'язаного трикотажу від кількості рядів трико та ланцюжка в рапорті філейного переплетення.

Представлені математичні залежності підтверджують відомий факт, що довжини сторін чарунок  $a_1$  та  $a_2$  залежать від відповідної кількості рядів трико та ланцюжка в рапорті. Однак в деяких випадках виявлено вплив обох факторів на довжини сторін чарунки основ'язаного трикотажу.

Перш за все у трикотажі філейного переплетення довжина нахиленої сторони залежить як від кількості рядів ланцюжка, так і від кількості рядів трико в рапорті. Однак вплив кількості рядів трико на довжину нахиленої сторони незначний і пов'язаний, головним чином, з перетягуванням нитки з закритої петлі трико у відкриту петлю в трикотажі, в рапорті якого 7 рядів трико. Тобто можна констатувати, що довжина нахиленої сторони чарунки трикотажу філейного переплетення залежить переважно від кількості рядів ланцюжка в рапорті.

Вплив кількості рядів ланцюжка на довжину вертикальної сторони чарунки спостерігається у варіантів 2.11 та 2.6 основ'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення, в



структурі якого утокова нитка обвиває протяжки петель трико. Це можна пояснити положенням вертикальної ділянки, яка утворена петлями трико, адже саме при цих варіантах розташування утокової нитки відбувається нахил ділянки в площині полотна, особливо коли вона утворена 7 рядами трико. Водночас у варіантів 2.8 та 2.11 зафіксовано вплив кількості рядів трико на довжину нахиленої сторони чарунки. Це пов'язано зі зміною форми та положення остова петлі трико останнього ряду зв'язки зі збільшенням довжини діагональної ділянки.

Порівняльний аналіз довжини вертикальної сторони чарунки основов'язаного трикотажу філейного та утоково-філейного переплетення (рис. 4.19) дозволив виявити вплив варіанту розташування утокової нитки в структурі трикотажу на значення показника. Введення в структуру філейного трикотажу високорозтяжної нитки у вигляді повздовжнього утоку призводить до зменшення довжини ділянки на 15÷40% внаслідок релаксації утокової нитки. Різниця зростає при збільшенні кількості рядів трико в рапорті переплетення.

Найбільшу довжину вертикальної сторони має основов'язаний трикотаж, в структурі якого утокова нитка обвиває протяжки петель трико обох ґрунтових гребінок водночас (варіанти 2.5 та 2.6). При цьому у трикотажі, в якому утокова нитка обвиває протяжки петель трико в одному ряді рапорту, довжина вертикальної ділянки чарунки більша орієнтовно на 15% по відношенню до довжини вертикальної ділянки чарунки трикотажу, в якому утокова нитка обвиває протяжки петель трико в двох рядах, і за абсолютними значеннями наближається до розмірів ділянки чарунки трикотажу філейного переплетення.

Порівняльний аналіз довжини нахиленої сторони чарунки основов'язаного трикотажу філейного та утоково-філейного переплетення (рис. 4.20) дозволив виявити вплив варіанту розташування утокової нитки в структурі трикотажу на значення показника.

В усіх варіантах розташування утокової нитки в структурі трикотажу окрім варіантів, коли утокова нитка обвиває протяжки петель трико обох гребінок водночас, довжина нахиленої сторони чарунки більша, ніж у філейного трикотажу.

## Довжини сторін чарунки

Варіант розташування утокової нитки в структурі	Позначення варіанту	Рівняння регресії в натуральних значеннях змінних	
		вертикальна ділянка	нахилена ділянка
Філейне переплетення	Ф	$a_1 = 0,59 + 0,86 n_r$	$a_2 = -0,45 + 0,23 n_r + 1,24 n_l - 0,08 n_r n_l$
Утокова нитка переходить з лийового на вивіртний бік	2.2 в одному ряді рапорту	$a_1 = 0,52 + 0,64 n_r$	$a_2 = 2,23 + 0,50 n_l$
	2.3 в трьох рядах рапорту	$a_1 = 1,63 + 0,51 n_r$	$a_2 = 2,14 + 0,48 n_l$
Утокова нитка розташовується між протяжками петель трико двох гребінок	2.8 в одному ряді рапорту	$a_1 = 0,80 + 0,59 n_r$	$a_2 = 1,78 + 0,13 n_r + 0,49 n_l$
	2.9 в трьох рядах рапорту	$a_1 = 0,90 + 0,58 n_r$	$a_2 = 2,67 + 0,40 n_l$
Утокова нитка обвиває протяжки петель трико однієї гребінки	2.11 в одному ряді рапорту	$a_1 = 0,23 + 0,40 n_r + 1,75 n_l - 0,44 n_r^2$	$a_2 = 1,94 + 0,13 n_r + 0,51 n_l$
	2.12 в двох рядах рапорту	$a_1 = 1,26 + 0,54 n_r$	$a_2 = 2,62 + 0,28 n_l$
Утокова нитка обвиває протяжки петель трико обох гребінок	2.5 в одному ряді рапорту	$a_1 = 1,56 + 0,66 n_r$	$a_2 = 1,38 + 0,35 n_l$
	2.6 в двох рядах рапорту	$a_1 = -0,002 + 0,65 n_r + 0,43 n_l$	$a_2 = 1,69 + 0,34 n_l$

$a_1, \text{мм}$

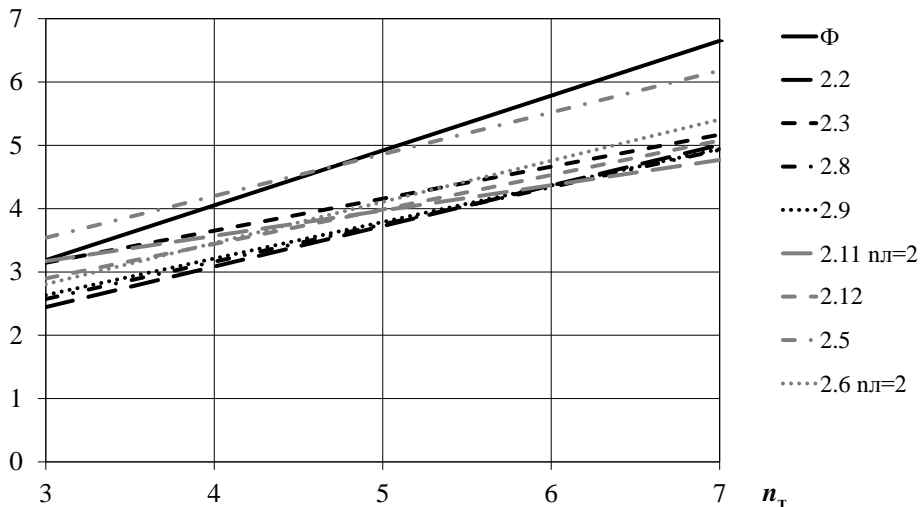


Рис. 4.19. Залежність довжини вертикальної сторони чарунки від кількості рядів трико в рапорті філейного переплетення

$a_2, \text{мм}$

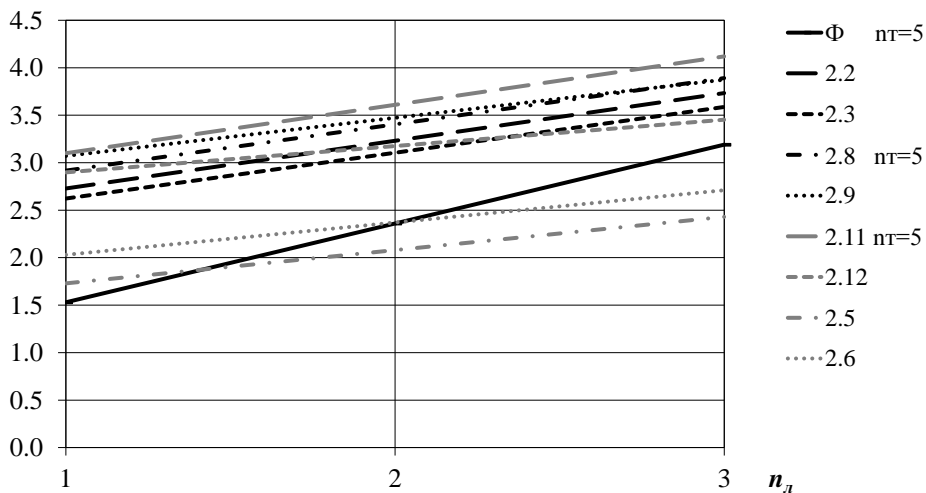


Рис. 4.20. Залежність довжини нахиленої сторони чарунки від кількості рядів ланцюжка в рапорті філейного переплетення

У трикотажі, в якому утокава нитка обвиває протяжки петель трико обох гребінок водночас, довжина нахиленої ділянки чарунки за абсолютними значеннями наближається до розмірів ділянки чарунки трикотажу філейного переплетення. У трикотажі, в якому утокава нитка обвиває протяжки петель трико в двох рядах, довжина нахиленої ділянки чарунки більша на 13% по відношенню до відповідних розмірів чарунки трикотажу, в якому утокава нитка обвиває протяжки петель трико в одному ряді. Тобто спостерігаємо залежність, яка протилежна залежності довжини вертикальної ділянки.

Аналіз результатів дослідження ширини ділянок чарунки сітчастого основов'язаного трикотажу (таблиця 4.11) показав, що ці параметри не залежать від рапорту ґрунтового філейного переплетення. Лише для трикотажу філейного переплетення спостерігається незначний вплив кількості рядів трико в рапорті на ширину вертикальної ділянки, що можна пояснити формою петель, які утворюють цю ділянку і їх розташуванням в просторі. Водночас спостерігається вплив варіанту розташування утокавої нитки в структурі трикотажу утокаво-філейного переплетення на досліджувані параметри, що підтверджує висновки, які зроблені у п.4.2.

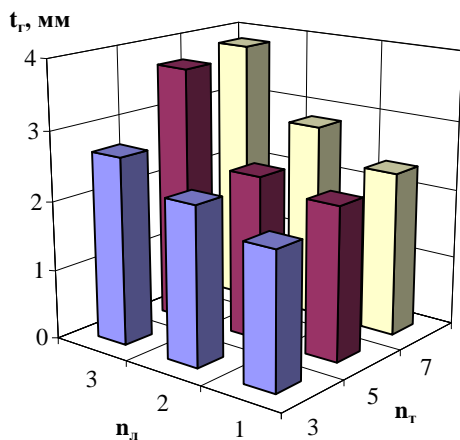
Кроки чарунок по горизонталі і по вертикалі основов'язаного трикотажу філейного переплетення залежать від довжин як вертикальної, так і горизонтальної сторін чарунки (рис. 4.21), що підтверджується отриманими рівняннями регресії (таблиця 4.12 та таблиця 4.13). Таким чином, при збільшенні кількості рядів як трико, так і ланцюжка в рапорті відбувається одночасне подовження та розширення чарунки трикотажу філейного переплетення.

Слід відзначити вплив варіанту розташування утокавої нитки в полотні на кроки чарунки, що пов'язано з різним ступенем релаксації нитки в полотні, а відповідно, і різним нахилом ділянки до горизонталі.

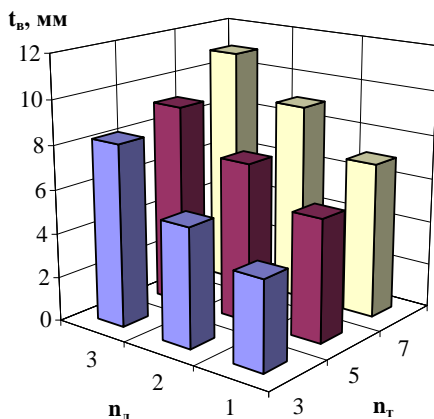
Крок чарунки по горизонталі (рис. 4.22) трикотажу утокаво-філейного переплетення залежить, головним чином, від кількості рядів ланцюжка в рапорті ґрунтового філейного переплетення (таблиця 4.12) і більш ніж в 2 рази перевищує значення показника у трикотажі філейного переплетення.

## Ширини сторін чарунки

Варіант розташування утокової нитки в структурі		Позна чення варі- анту	Середнє значення показника	
			вертикальна ділянка	нахилена ділянка
Філейне переплетення		Ф	$b_1 = 1,22 + 0,02n_T$	$b_2 = 0,95 \pm 0,06$
Утокова нитка переходить з лицьового на виворітний бік	в одному ряді рапорту	2.2	$b_1 = 1,40 \pm 0,04$	$b_2 = 0,87 \pm 0,07$
	в трьох рядах рапорту	2.3	$b_1 = 1,50 + 0,10$	$b_2 = 0,88 + 0,10$
Утокова нитка розташовуєтьс я між протяжками петель трико двох гребінок	в одному ряді рапорту	2.8	$b_1 = 1,55 \pm 0,10$	$b_2 = 0,92 \pm 0,06$
	в трьох рядах рапорту	2.9	$b_1 = 1,48 \pm 0,10$	$b_2 = 0,92 \pm 0,06$
Утокова нитка обвиває протяжки петель трико однієї гребінки	в одному ряді рапорту	2.11	$b_1 = 1,90 \pm 0,11$	$b_2 = 1,16 \pm 0,11$
	в двох рядах рапорту	2.12	$b_1 = 1,63 \pm 0,08$	$b_2 = 1,01 \pm 0,13$
Утокова нитка обвиває протяжки петель трико обох гребінок	в одному ряді рапорту	2.5	$b_1 = 1,70 \pm 0,09$	$b_2 = 1,18 \pm 0,09$
	в двох рядах рапорту	2.6	$b_1 = 1,66 \pm 0,10$	$b_2 = 1,11 \pm 0,11$



**а) по горизонталі**



**б) по вертикалі**

**Рис. 4.21. Кроки чарунки основов'язаного трикотажу філейного переплетення**

Найбільшу ширину чарунка приймає в трикотажі, в структурі якого утокова нитка обвиває протяжки петель трико однієї гребінки в двох рядах рапорту (варіант 2.12), а найменшу – при розташуванні утокової нитки на виворотній стороні в одному ряді, а в інших рядах – на лицьовій стороні трикотажу (варіант 2.2).

Виняток складає трикотаж варіанту 2.8 розташування утокової нитки, крок чарунки по горизонталі якого залежить від кількості рядів трико в рапорті, а адекватної залежності кроку чарунки по вертикалі від рапорту ґрунтового філейного переплетення взагалі не встановлено. В структурі саме цього трикотажу найбільш виражений нахил вертикальної сторони чарунки.

Дослідження величини вертикального кроку чарунки (рис. 4.23) підтвердило висновок, якій зроблено в п.4.2: введення високорозтяжної нитки в структуру філейного трикотажу призводить до значного зменшення кроку чарунки по вертикалі внаслідок зміни гексагональної форми чарунки в результаті релаксації утокової нитки. Слід відзначити співпадіння характеру залежності показника від кількості рядів трико в рапорті філейного переплетення.

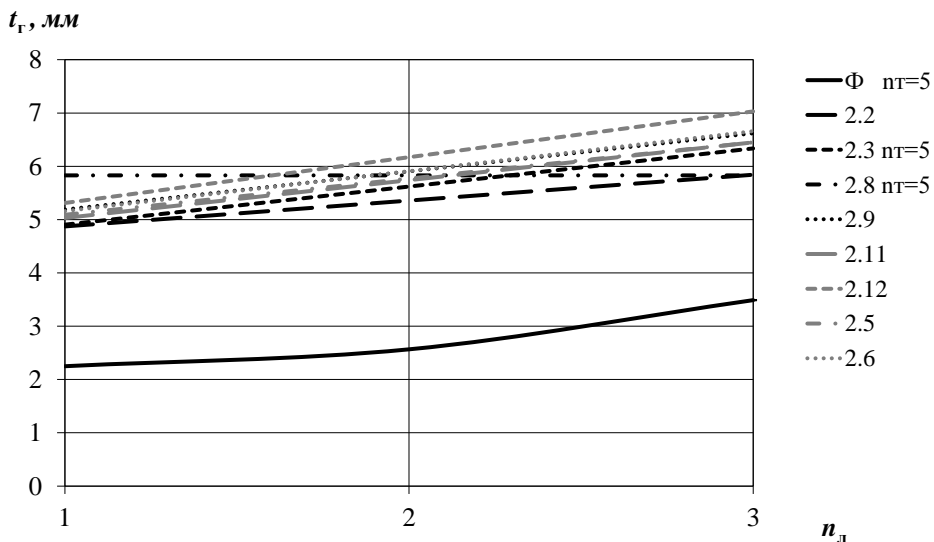


Рис. 4.22. Залежність кроку чарунки по горизонталі від кількості рядів ланцюжка в рапорті філейного переплетення

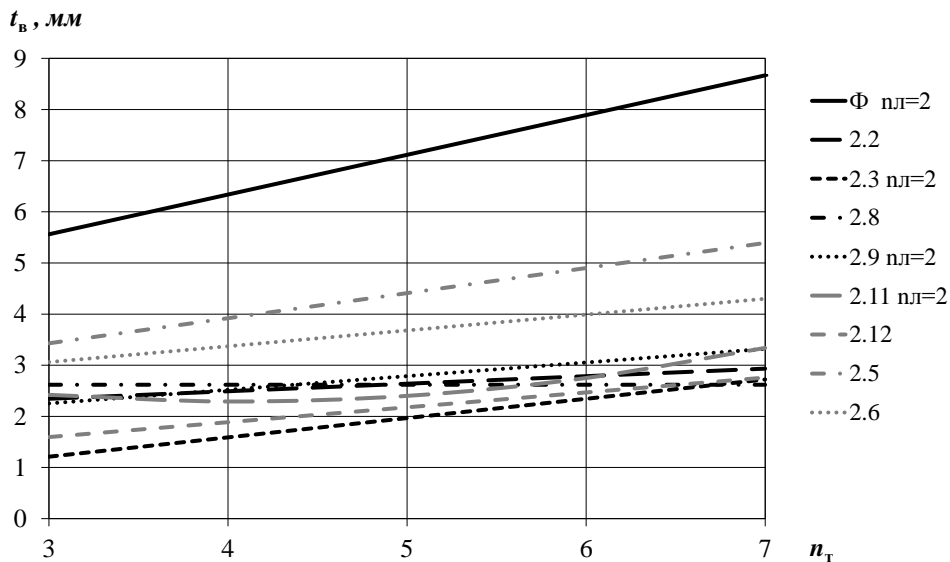


Рис. 4.23. Залежність кроку чарунки по вертикалі від кількості рядів трику в рапорті філейного переплетення

## Крок чарунки по горизонталі

Варіант розташування утокової нитки в структурі	Позначення варіанту	Рівняння регресії	
		в натуральних значеннях змінних	в кодованих значеннях змінних
Філейне переплетення	Ф	$t_r = 1,66 + 0,18n_r + 0,59 n_n + 0,30 n_n^2$	$Y\{t_r\} = 2,56 + 0,35x_1 + 0,62x_2 + 0,30x_2^2$
Утокова нитка переходить з лицьового на виворітний бік	2.2	$t_r = 4,38 + 0,49 n_n$	$Y\{t_r\} = 5,36 + 0,49x_2$
	2.3	$t_r = 5,02 - 0,17n_r + 0,72n_n$	$Y\{t_r\} = 5,62 - 0,33x_1 + 0,72x_2$
Утокова нитка розташовується між протяжками петель трико двох гребінок	2.8	$t_r = 6,68 - 0,17 n_r$	$Y\{t_r\} = 5,85 - 0,35x_1$
	2.9	$t_r = 4,47 + 0,72 n_n$	$Y\{t_r\} = 5,90 + 0,72x_2$
Утокова нитка обвиває протяжки петель трико однієї гребінки	2.11	$t_r = 4,32 + 0,71 n_n$	$Y\{t_r\} = 5,74 + 0,71x_2$
	2.12	$t_r = 4,45 + 0,86n_n$	$Y\{t_r\} = 6,17 + 0,86x_2$
Утокова нитка обвиває протяжки петель трико обох гребінок	2.5	$t_r = 4,41 + 0,68n_n$	$Y\{t_r\} = 5,76 + 0,68x_2$
	2.6	$t_r = 4,41 + 0,75n_n$	$Y\{t_r\} = 5,91 + 0,75x_2$



## Крок чарунки по вертикалі

Варіант розташування утокової нитки в структурі	Позначення варіанту	Рівняння регресії	
		в натуральних значеннях змінних	в кодованих значеннях змінних
Філейне переплетення	Ф	$t_b = -0,67 + 0,78n_r + 1,95n_l$	$Y\{t_b\} = 7,11 + 1,56x_1 + 1,94x_2$
Утокова нитка переходить з лисьового на виворітний бік	2.2	$t_b = 1,90 + 0,15 n_r$	$Y\{t_b\} = 2,64 + 0,29x_1$
	2.3	$t_b = 0,60 + 0,38 n_r - 0,26n_l$	$Y\{t_b\} = 2,99 + 0,75x_1 + 0,26x_2$
Утокова нитка розташовується між протяжками петель трико двох гребінків	2.8	Не встановлено	
	2.9	$t_b = 0,88 + 0,27n_r + 0,29n_l$	$Y\{t_b\} = 2,78 + 0,53x_1 + 0,29x_2$
Утокова нитка обвиває протяжки петель трико однієї гребінки	2.11	$t_b = 3,57 - 0,97 n_r + 0,34n_l + 0,12 n_r^2$	$Y\{t_b\} = 2,46 + 0,52x_1 + 0,34x_2 + 0,49x_1^2$
	2.12	$t_b = 0,72 + 0,29 n$	$Y\{t_b\} = 2,18 + 0,58x_1$
Утокова нитка обвиває протяжки петель трико обох гребінків	2.5	$t_b = 1,96 + 0,49 n_r$	$Y\{t_b\} = 4,42 + 0,98x_1$
	2.6	$t_b = 2,13 + 0,31 n_r$	$Y\{t_b\} = 3,67 + 0,62x_1$

Найбільші значення крок чарунки має в трикотажі, в структурі якого утокова нитка обвиває протяжки петель трико обох ґрунтових гребінок водночас (варіанти 2.5 та 2.6), а найменше – в трикотажі, в структурі якого нитка переходить з виворотної на лицьову сторону в трьох рядах рапорту (варіант 2.3).

#### **4.3.3. Розрахункові співвідношення розмірів**

Результати аналітичних розрахунків відповідних співвідношень для трикотажу утоково-філейного переплетення з повздовжнім утоком, в якому утокова нитка розташовується без обвивання протяжок петель трико, представлено в таблиці 4.14, а співвідношення розмірів чарунки утоково-філейного трикотажу, в якому утокова нитка обвиває протяжки петель трико, представлено в таблиці 4.15.

Головним співвідношенням розмірів чарунки сітчастих полотен, яке визначає аукзетик-властивості текстильних матеріалів, зокрема основ'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення, є тангенс кута нахилу діагональної сторони чарунки до горизонталі  $\text{tg } \alpha$ . Результати аналітичних розрахунків показника для трикотажу філейного та утоково-філейного переплетення з високорозтяжним повздовжнім утоком представлено на діаграмах (рис. 4.24 ÷ рис. 4.26).

Очевидно, що трикотаж філейного переплетення має додатні значення тангенсу кута нахилу сторони чарунки (рис. 4.24), що є свідченням відсутності у нього аукзетик-властивостей. Водночас трикотаж утоково-філейного переплетення практично всіх рапортів та варіантів розташування утоку (рис. 4.25 та рис. 4.26) має від'ємне значення тангенсу кута нахилу діагональної сторони чарунки, що є свідченням від'ємного значення коефіцієнту Пуассона. Таким чином, основ'язаний трикотаж утоково-філейного переплетення всіх представлених варіантів розташування високорозтяжної повздовжньої утокової нитки є аукзетик-матеріалами.

Слід відмітити, що трикотаж, в структурі якого утокова нитка не обвиває протяжки петель трико і фіксується лише в одному ряді рапорту (рис. 4.25.а та в), має менші значення тангенсу кута нахилу сторони чарунки, ніж трикотаж, в структурі якого утокова

нитка фіксується в трьох рядах рапорту (рис. 4.25.б та г) без обвивання протяжок петель трико.

Таблиця 4.14

**Співвідношення розмірів чарунок трикотажу з утком без обвивання**

Варіант розташування утокової нитки	Утокова нитка виходить за рапортом то на лицьову то на виворітну сторону					
	в одному ряді рапорту 2.2			в трьох рядах рапорту 2.3		
варіант трикотажу	$K_1$	$K_2$	$\text{tg } \alpha$	$K_1$	$K_2$	$\text{tg } \alpha$
3т+1л	0,41	0,88	-0,058	0,34	0,68	-0,159
3т+2л	0,48	0,97	-0,013	0,33	0,69	-0,148
3т+3л	0,38	0,97	-0,011	0,34	0,86	-0,056
5т+1л	0,45	0,64	-0,257	0,49	0,68	-0,230
5т+2л	0,42	0,70	-0,177	0,50	0,77	-0,153
5т+3л	0,47	0,68	-0,226	0,55	0,76	-0,170
7т+1л	0,52	0,53	-0,456	0,67	0,72	-0,261
7т+2л	0,72	0,62	-0,447	0,73	0,71	-0,291
7т+3л	0,52	0,60	-0,339	0,55	0,81	-0,128
Варіант розташування утокової нитки	Утокова нитка розташована між протяжками петель трико					
	в одному ряді рапорту 2.8			в трьох рядах рапорту 2.9		
варіант трикотажу	$K_1$	$K_2$	$\text{tg } \alpha$	$K_1$	$K_2$	$\text{tg } \alpha$
3т+1л	0,37	0,85	-0,065	0,34	0,76	-0,107
3т+2л	0,37	0,82	-0,082	0,41	0,95	-0,021
3т+3л	0,47	1,15	0,060	0,34	1,03	0,009
5т+1л	0,42	0,63	-0,246	0,46	0,75	-0,154
5т+2л	0,49	0,77	-0,146	0,42	0,68	-0,201
5т+3л	0,45	0,70	-0,189	0,49	0,82	-0,109
7т+1л	0,58	0,65	-0,312	0,60	0,68	-0,286
7т+2л	0,54	0,57	-0,405	0,61	0,69	-0,270
7т+3л	0,53	0,52	-0,481	0,53	0,70	-0,220

## Співвідношення розмірів чарунок трикотажу з обвивочним утком

Варіант розташування утокової нитки	Утокова нитка обвиває протяжки петель трико однієї гребінки					
	в одному ряді 2.11			в двох рядах 2.12		
Варіант трикотажу	$K_1$	$K_2$	$\text{tg } \alpha$	$K_1$	$K_2$	$\text{tg } \alpha$
3т+1л	0,40	0,87	- 0,059	0,44	0,78	- 0,122
3т+2л	0,43	0,87	-0,065	0,29	0,64	- 0,160
3т+3л	0,44	1,02	0,007	0,34	0,86	- 0,057
5т+1л	0,43	0,62	- 0,258	0,45	0,66	- 0,238
5т+2л	0,38	0,56	- 0,303	0,37	0,60	- 0,251
5т+3л	0,44	0,77	- 0,133	0,39	0,64	- 0,221
7т+1л	0,64	0,71	- 0,260	0,61	0,68	- 0,280
7т+2л	0,71	0,80	- 0,173	0,51	0,56	- 0,399
7т+3л	0,58	0,93	- 0,044	0,57	0,75	- 0,191
Варіант розташування утокової нитки	Утокова нитка обвиває протяжки петель трико двох гребінок					
	в одному ряді 2.5			в двох рядах 2.6		
Варіант трикотажу	$K_1$	$K_2$	$\text{tg } \alpha$	$K_1$	$K_2$	$\text{tg } \alpha$
3т+1л	0,53	0,86	-0,086	0,41	0,76	-0,127
3т+2л	0,57	0,88	-0,075	0,43	0,88	-0,060
3т+3л	0,44	0,97	-0,014	0,41	0,89	-0,052
5т+1л	0,80	0,93	-0,064	0,60	0,78	-0,171
5т+2л	0,73	0,90	-0,084	0,65	0,91	-0,067
5т+3л	0,67	0,80	-0,165	0,51	0,76	-0,162
7т+1л	1,02	0,79	-0,257	0,71	0,71	-0,290
7т+2л	0,93	0,91	-0,092	0,76	0,77	-0,231
7т+3л	0,78	0,79	-0,203	0,62	0,58	-0,452

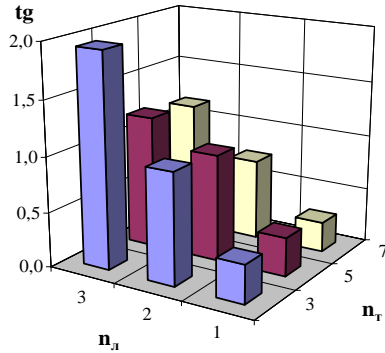
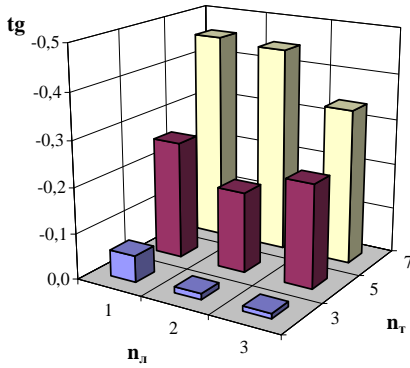
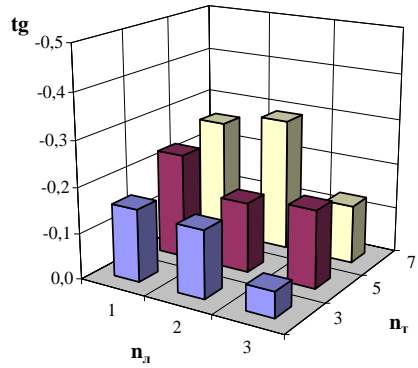


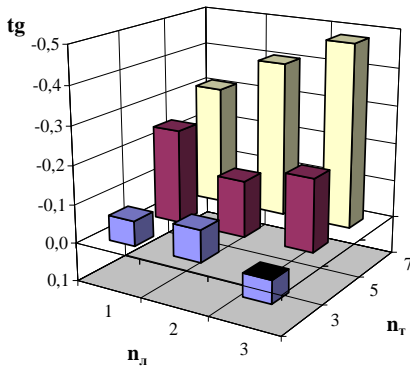
Рис. 4.24. Тангенс кута нахилу сторони чарунки основ'язаного трикотажу філейного переплетення



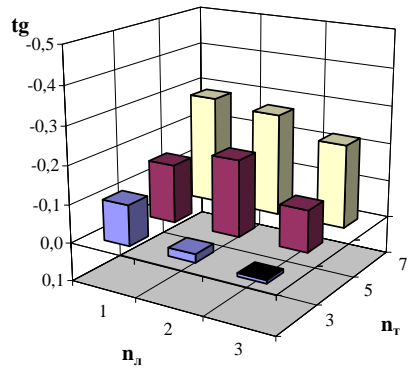
а) 2.2



б) 2.3

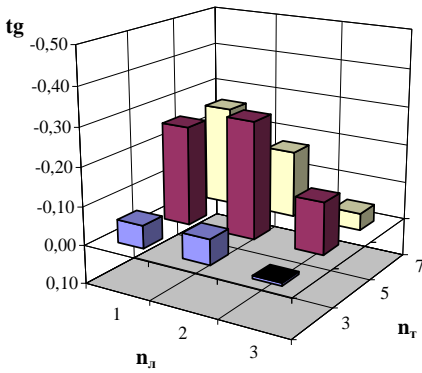


и) 2.8

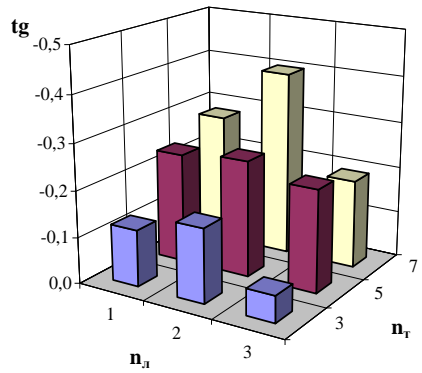


г) 2.9

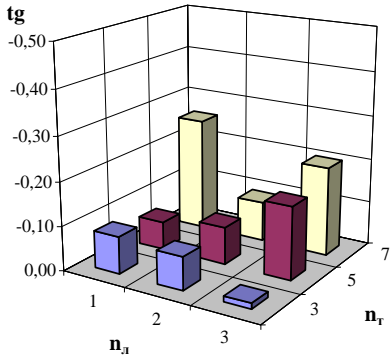
Рис. 4.25. Тангенс кута нахилу сторони чарунки основ'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення, в структурі якого утокова нитка не обвиває протяжки петель трико



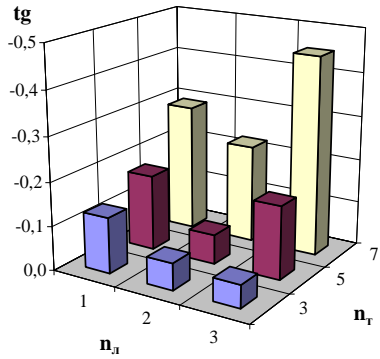
а) 2.11



б) 2.12



в) 2.5



г) 2.6

Рис. 4.26. Тангенс кута нахилу сторони чарунки основ'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення, в структурі якого утокова нитка обвиває протяжки петель трико

Водночас трикотаж, у структурі якого утокова нитка обвиває протяжки петель трико і фіксується лише в одному ряді рапорту (рис. 4.26.а та в), навпаки, має вищі значення тангенсу кута нахилу сторони чарунки ніж трикотаж, в структурі якого утокова нитка фіксується в двох рядах рапорту (рис. 4.26.б та г). Очевидно, що основ'язаний трикотаж, в рапорті якого сім рядів трико будь-якого варіанту розташування утокової нитки в структурі, має стрімке зростання абсолютного значення тангенсу, що підтверджує попередній висновок про наявність гарних аукзетик-властивостей. Слід звернути увагу, що в трикотажі цих варіантів і вертикальні сторони чарунок нахилені в площині трикотажу.

#### 4.3.4. Розривальні характеристики

Експериментальні дані (таблиця 4.16 та рис. 4.27) підтверджують результати, які отримані в попередньому дослідженні (п.4.2): введення еластомерної нитки в структуру філейного трикотажу в якості повздовжнього утоку призводить до зростання на  $10\div 20\%$  розривального навантаження основ'язаних полотен. Це підтверджує висновок, що розривальне навантаження утоково-філейного трикотажу є функцією міцності еластомерної нитки. Водночас не визначено впливу на показник рапорту філейного переплетення.

Таблиця 4.16

**Розривальне навантаження основ'язаних полотен**

Варіант розташування утокової нитки в структурі		Позначення варіанту	Розривальне навантаження $P_p, H$
Філейне переплетення		Ф	$117,1\pm 4,8$
Утокова нитка переходить з лицьового на виворітний бік	в одному ряді рапорту	2.2	$125,0\pm 10,3$
	в трьох рядах рапорту	2.3	$110,3\pm 6,8$
Утокова нитка розташовується між протяжками петель трико двох гребінок	в одному ряді рапорту	2.8	$133,9\pm 5,8$
	в трьох рядах рапорту	2.9	$132,4\pm 7,1$
Утокова нитка обвиває протяжки петель трико однієї гребінки	в одному ряді рапорту	2.11	$135,6\pm 6,8$
	в двох рядах рапорту	2.12	$135,6\pm 7,8$
Утокова нитка обвиває протяжки петель трико обох гребінок	в одному ряді рапорту	2.5	$134,0\pm 12,6$
	в двох рядах рапорту	2.6	$136,4\pm 7,6$

Слід зауважити, що сітчасте основ'язане полотно, в якому утокова еластомерна нитка розташовується то на лицьовому, то на виворітному боці, фіксуючись між протяжками петель трико (варіанти 2.2 та 2.3), має розривальне навантаження на  $10\div 20\%$  нижче у порівнянні з іншим розташуванням утокової нитки. Зниження показника відбувається зі збільшенням кількості переходів нитки з лицьового на виворітний бік, що може бути

пов'язане зі зростанням сил тертя між ґрунтовими та утоковими нитками.

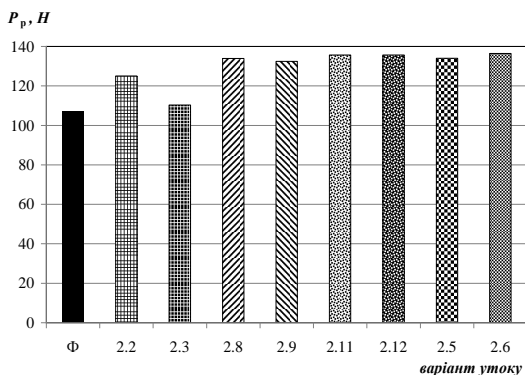


Рис. 4.27. Залежність розривального навантаження основ'язаного трикотажу від варіанту розташування утоку

Дослідження розривального видовження сітчастих основ'язаних полотен виявили вплив рапорту філейного переплетення на показник (рис. 4.28 ÷ рис. 4.30). Математична обробка результатів дослідження дозволила встановити рівняння регресії (таблиця 4.17), які адекватно з точністю 0,95 описують досліджуваний процес.

Розривальне видовження сітчастого основ'язаного полотна з гексагональними отворами, яке використовується як основа для формування аукзетик-структур, має зворотну залежність від кількості рядів трико в рапорті філейного переплетення (рис. 4.28). Зі збільшенням кількості рядів трико в рапорті філейного переплетення зростає довжина вертикальної сторони чарунки, яка орієнтована у напрямку розтягування, що і призводить до зменшення значення показника.

Введення еластомерної нитки як повздовжнього утоку призводить до зростання у 2–3 рази показника подовження, що пов'язано, в першу чергу, з еластичними властивостями самої утокової нитки. Вищі значення показник розривного подовження досягає у варіантах утоково-філейного трикотажу, в яких утокова нитка обвиває протяжки петель трико (рис. 4.30).



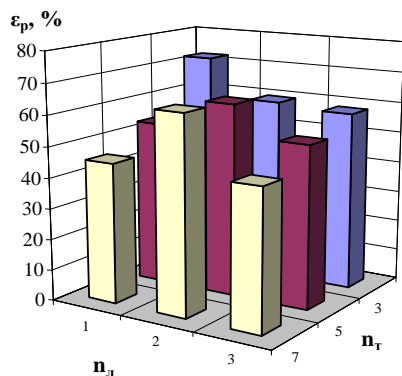
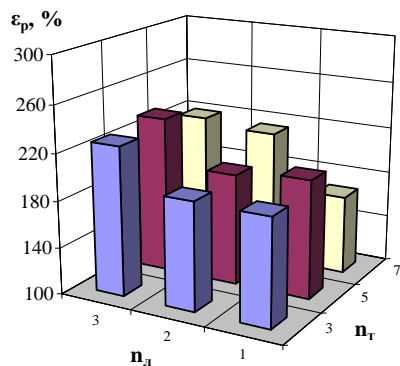
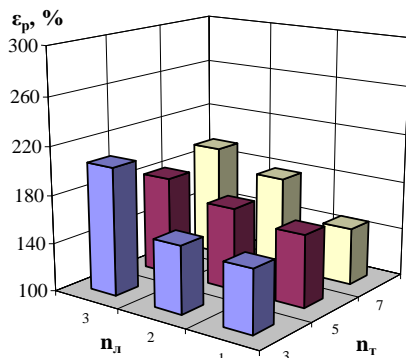


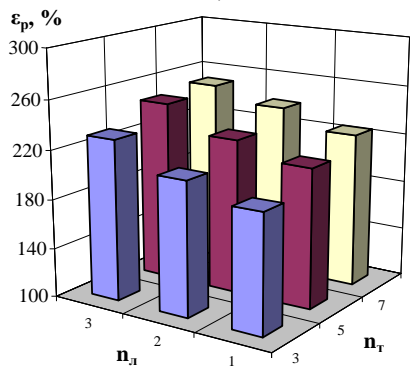
Рис. 4.28. Розривне подовження основ'язаного трикотажу філейного переплетення



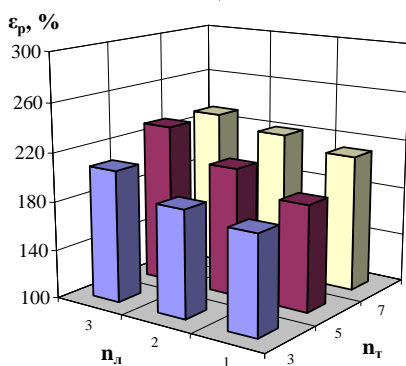
а) 2.2



б) 2.3

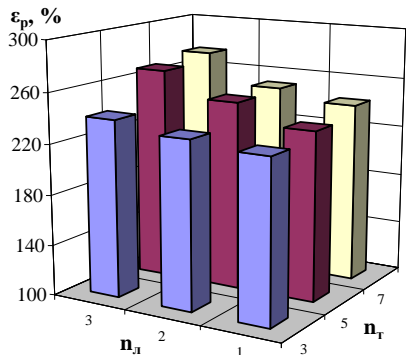


и) 2.8

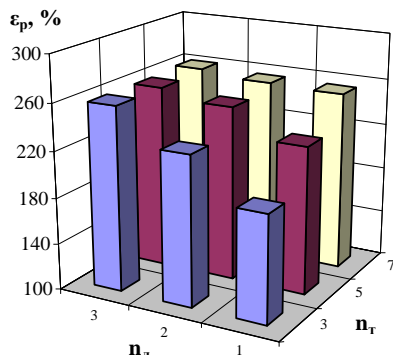


г) 2.9

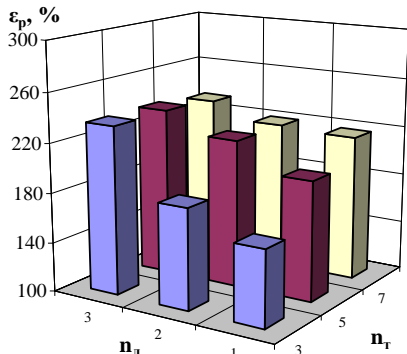
Рис. 4.29. Розривальне видовження основ'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення, в структурі якого утокова нитка не обвиває протяжки петель трико



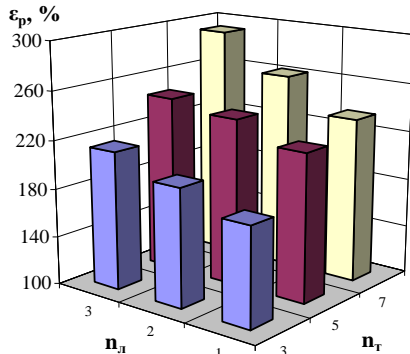
а) 2.11



б) 2.12



в) 2.5



г) 2.6

Рис. 4.30. Розривальне видовження основ'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення, в структурі якого утокова нитка обвиває протяжки петель трико

Найменше значення (рис. 4.29) показник має у трикотажі варіанту 2.3, в якому еластомерна утокова нитка розташовується почергово то на лицьовому, то на виворотному боці трикотажу. Це вказує на залежність показника від ступеня релаксації еластомерної нитки в структурі.

## Розривальне видовження основов'язаних полотен

Варіант розташування утокової нитки в структурі	Позначення варіанту	Рівняння регресії	
		в натуральних значеннях змінних	в кодovаних значеннях змінних
Філейне переплетення	Ф	$\epsilon_p = 75,7 - 2,9n_c$	$Y\{\epsilon_p\} = 61,26 - 5,78 x_1$
Утокова нитка переходить з лийового на виворітний бік	2.2 в одному ряді рапорту	$\epsilon_p = 181,1 + 20,0n_c$	$Y\{\epsilon_p\} = 206,1 + 20,0 x_2$
	2.3 в трьох рядах рапорту	$\epsilon_p = 145,8 + 20,4n_c$	$Y\{\epsilon_p\} = 166,2 + 20,4 x_2$
Утокова нитка розташовується між протязками петель трико двох гребінок	2.8 в одному ряді рапорту	$\epsilon_p = 211,5 + 15,6n_c$	$Y\{\epsilon_p\} = 227,1 + 15,6 x_2$
	2.9 в трьох рядах рапорту	$\epsilon_p = 154,8 + 7,2n_r + 14,9n_c$	$Y\{\epsilon_p\} = 206,0 + 14,5 x_1 + 14,9 x_2$
Утокова нитка обвиває протязки петель трико однієї гребінки	2.11 в одному ряді рапорту	$\epsilon_p = 235,0 + 13,2n_c$	$Y\{\epsilon_p\} = 248,1 + 13,2 x_2$
	2.12 в двох рядах рапорту	$\epsilon_p = 154,8 + 15,1n_r + 55,0n_c - 7,5n_{pc}$	$Y\{\epsilon_p\} = 247,6 + 15,1 x_1 + 17,3 x_2 - 15,1 x_1 x_2$
Утокова нитка обвиває протязки петель трико обох гребінок	2.5 в одному ряді рапорту	$\epsilon_p = 116,8 + 15,0n_c + 58,2n_c - 7,4n_{pc}$	$Y\{\epsilon_p\} = 212,9 + 15,2 x_1 + 21,3 x_2 - 14,8 x_1 x_2$
	2.6 в двох рядах рапорту	$\epsilon_p = 134,9 + 16,4n_r + 18,8n_c$	$Y\{\epsilon_p\} = 235,7 + 32,8 x_1 + 18,8 x_2$

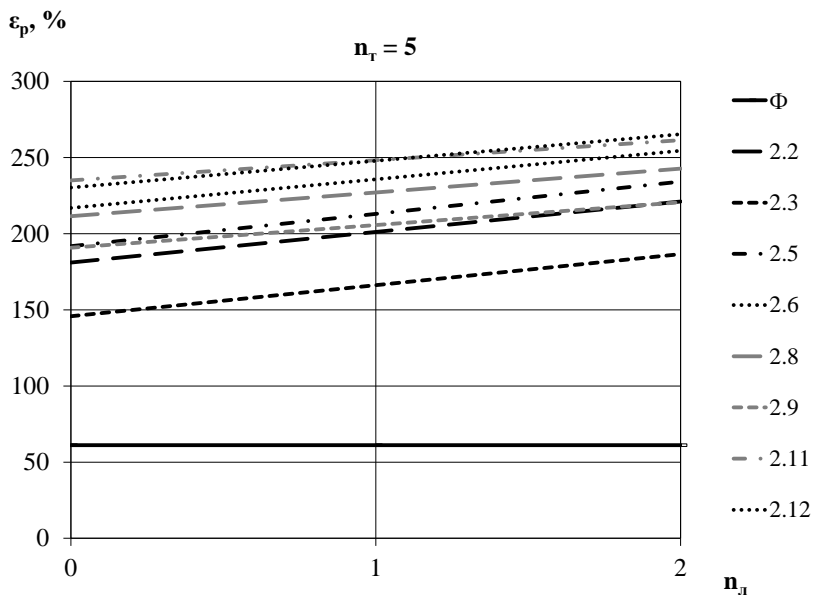


Рис. 4.31. Залежність розривального видовження основ'язаного трикотажу від кількості рядів ланцюжка в рапорті філейного переплетення

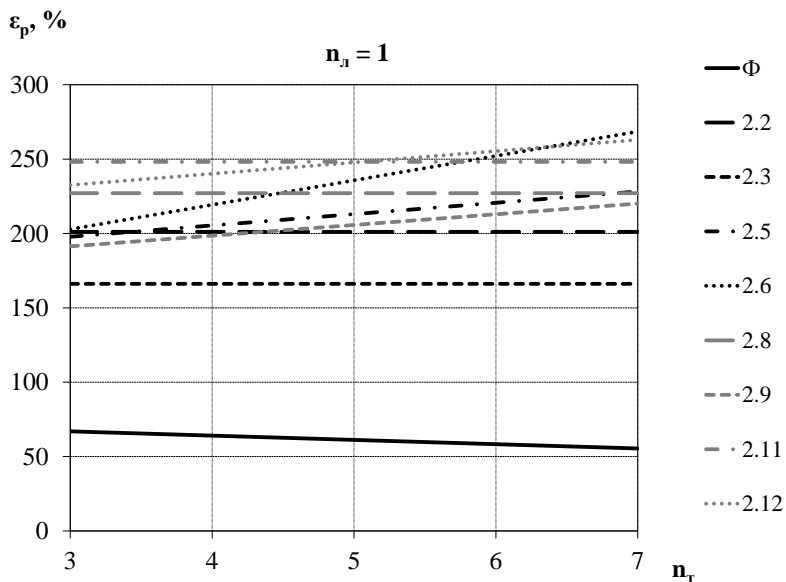


Рис. 4.32. Залежність розривального видовження основ'язаного трикотажу від кількості рядів трико в рапорті філейного переплетення

Аналіз отриманих залежностей (таблиця 4.17) показує, що найбільший вплив на показник розривального видовження має кількість рядів ланцюжка в рапорті філейного переплетення (рис. 4.31). Ця частина рапорту формує нахилену сторону чарунки, яка в процесі розтягування змінює своє положення в площині полотна. Саме тому при збільшенні кількості рядів ланцюжка в рапорті видовження зростає.

Водночас у деяких варіантів спостерігається вплив на показник кількості рядів трико в рапорті (рис. 4.32), що є наслідком розвертання вертикальних сторін чарунки у площині полотна. Така зміна положення сторони чарунки найбільше притаманна варіантам трикотажу, в яких утокова нитка обвиває протяжки петель трико, а кількість рядів трико в рапорті 7.

#### **4.3.5. Повна деформація та її складові частини**

Повна деформація  $\varepsilon$  – це деформація, яку отримує зразок в кінці першої частини циклу (навантаження) і розраховується як різниця у відсотках між довжинами зразка до і після навантаження протягом визначеного часу. Діаграми, які відображають результати досліджень повної деформації трикотажу утоково-філейного переплетення, наведено на рис. 4.33 та рис. 4.34, на підставі чого отримано рівняння регресії (таблиця 4.18), які адекватно описують залежності повної деформації від кількості рядів трико  $n_T$  та ланцюжка  $n_L$  в рапорті філейного переплетення.

У процесі дослідження встановлено, що для трикотажу, в якому утокова нитка розташується по чергово то на лицьовій, то на виворітній стороні рівняння регресії, мають перший порядок; а для трикотажу, в якому утокова нитка розташується по чергово то на лицьовій стороні, то між протяжками петель трико, – другий. Для трикотажу, в якому утокова нитка обвиває протяжки петель трико в одному ряді рапорту рівняння регресії мають перший порядок; а для трикотажу, в якому утокова нитка обвиває протяжки петель трико в двох рядах рапорту – другий.

Аналіз результатів досліджень показує, що на повну деформацію полотна впливає як рапорт ґрунтового філейного переплетення, так і варіант розташування утокової нитки в структурі (таблиця 4.18).

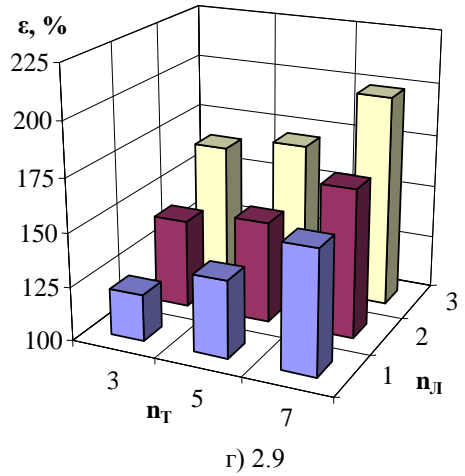
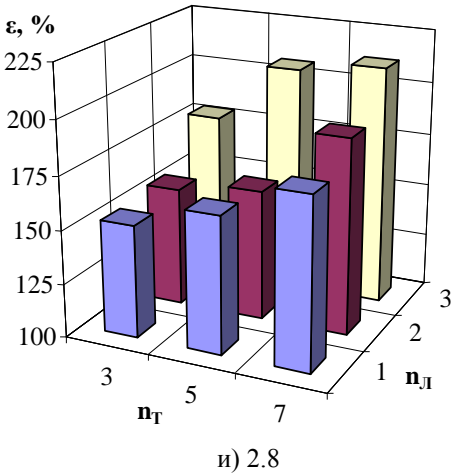
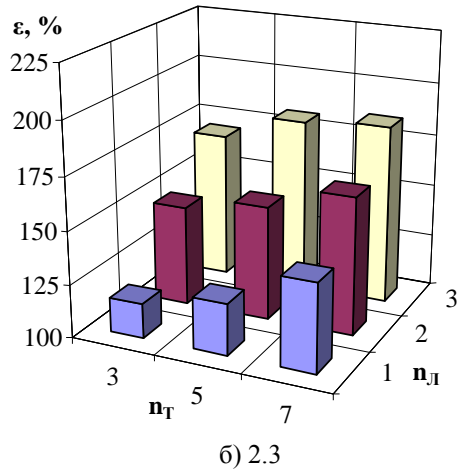
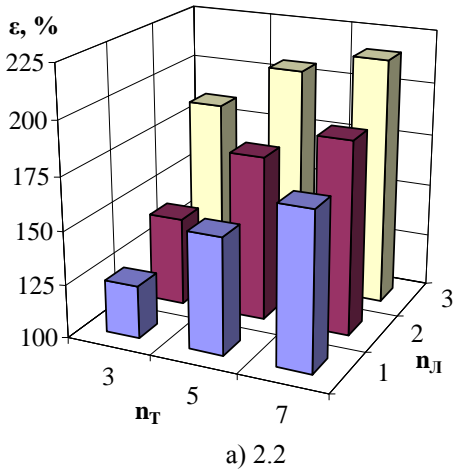
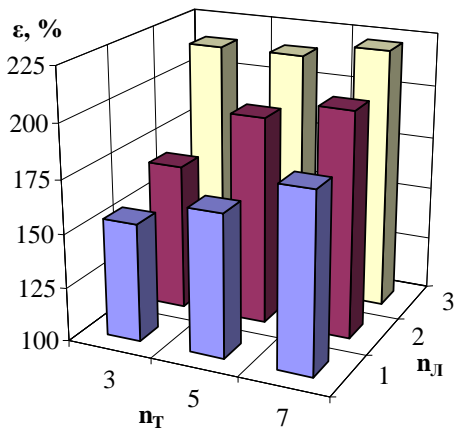
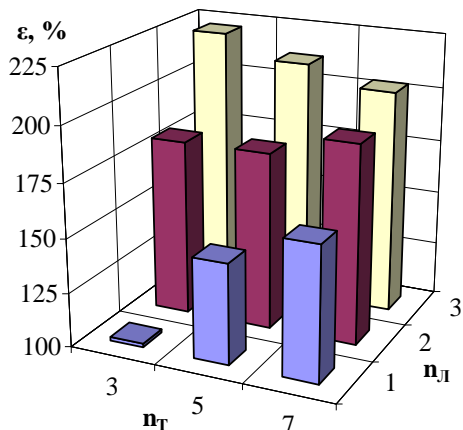


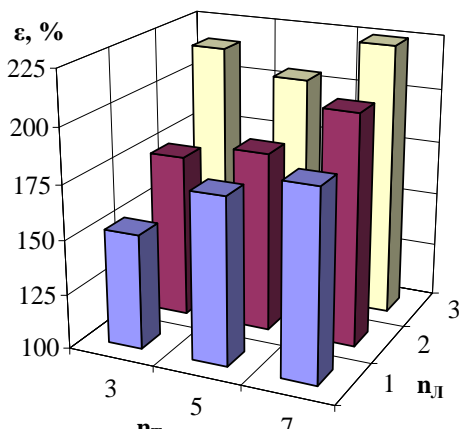
Рис. 4.33. Повна деформація основ'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення, в структурі якого утокова нитка не обвиває протяжки петель трико



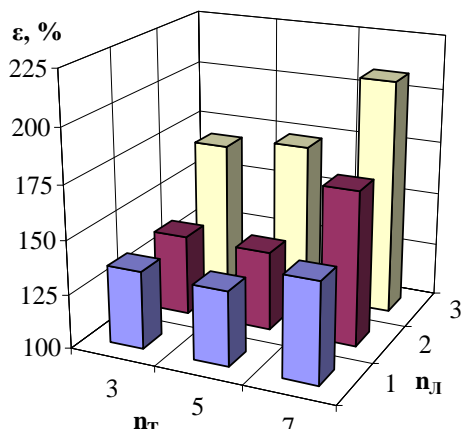
а) 2.11



б) 2.12



в) 2.5



г) 2.6

Рис. 4.34. Повна деформація основ'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення, в структурі якого утокова нитка обвиває протяжки петель трико

## Повна деформація основ'язаних полотен

Варіант розташування утокової нитки в структурі	Позначення варіанту	Рівняння регресії	
		в натуральних значеннях змінних	в кодованих значеннях змінних
Філейне переплетення	Ф	$\varepsilon = 11,7 \pm 0,3$	$\varepsilon = 11,7 \pm 0,3$
Утокова нитка переходить з лицьового на виворітний бік	в одному ряді рапорту	$\varepsilon = 69,7 + 10,8n_r + 25,7n_l$	$Y\{\varepsilon\} = 174,9 + 21,5x_1 + 25,7x_2$
	в трьох рядах рапорту	$\varepsilon = 79,2 + 4,9n_r + 25,7n_l$	$Y\{\varepsilon\} = 154,9 + 9,7x_1 + 25,7x_2$
Утокова нитка розташовується між протязками петель трико двох гребінок	в одному ряді рапорту	$\varepsilon = 146,7 + 7,9n_r - 34,9n_l + 12,9n_l^2$	$Y\{\varepsilon\} = 168,6 + 15,9x_1 + 16,8x_2 + 12,9x_2^2$
	в трьох рядах рапорту	$\varepsilon = 114,2 - 10,7n_r + 19,8n_l + 1,9n_r^2$	$Y\{\varepsilon\} = 147,6 + 16,4x_1 + 19,8x_2 + 7,6x_1^2$
Утокова нитка обвиває протязки петель трико однієї гребінки	в одному ряді рапорту	$\varepsilon = 112,2 + 5,9n_r + 24,4n_l$	$Y\{\varepsilon\} = 190,9 + 11,9x_1 + 24,4x_2$
	в двох рядах рапорту	$\varepsilon = -50,3 + 23,9n_r + 128,8n_l - 9,8n_l^2 - 10,5n_l^2$	$Y\{\varepsilon\} = 186,9 + 8,7x_1 + 37,8x_2 - 10,5x_2^2 - 19,6x_1x_2$
Утокова нитка обвиває протязки петель трико обох гребінок	в одному ряді рапорту	$\varepsilon = 105,2 + 6,6n_r + 22,5n_l$	$Y\{\varepsilon\} = 183,42 + 13,28x_1 + 22,50x_2$
	в двох рядах рапорту	$\varepsilon = 231,2 - 33,5n_r - 47,6n_l + 3,8n_l n_r + 3,3n_r^2 - 12,8n_l^2$	$Y\{\varepsilon\} = 139,7 + 14,3x_1 + 22,2x_2 - 7,5x_1x_2 + 13,3x_1^2 + 12,8x_2^2$



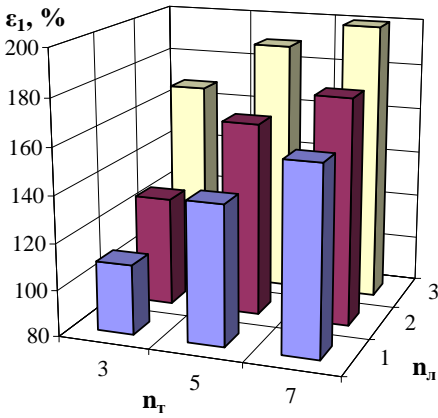
Так, зі збільшенням як кількості рядів трико, так і ланцюжка в рапорті філейного переплетення повна деформація зростає для всіх варіантів розташування утоку. Це пояснюється саме наявністю високорозтяжної утокової нитки в трикотажі і її здатністю відновляти свої розміри після зняття навантаження. Утокова нитка закріплена в структурі трикотажу лише в декількох рядах рапорту філейного переплетення. В інших рядах рапорту вона вільно розташовується в структурі і саме на цих ділянках і здатна до повної релаксації. Зі збільшенням кількості рядів трико та ланцюжка збільшується саме ця ділянка, що і призводить до збільшення повної деформації трикотажу.

Вплив варіанту розташування утокової нитки пов'язаний також з релаксацією утокової нитки в структурі трикотажу: чим краще релаксує утокова нитка, тим вищу повну деформацію матиме трикотаж. Так, повна деформація трикотажу, в якому утокова нитка не обвиває протяжок петель трико і розташується в структурі лише в одному ряді рапорту (рис. 4.33.а та в), а в інших рядах знаходиться на лицьовій стороні, на 25÷30% більша, ніж у трикотажі, в якому утокова нитка контактує з нитками ґрунту в 3 рядах рапорту (рис. 4.33.б та г).

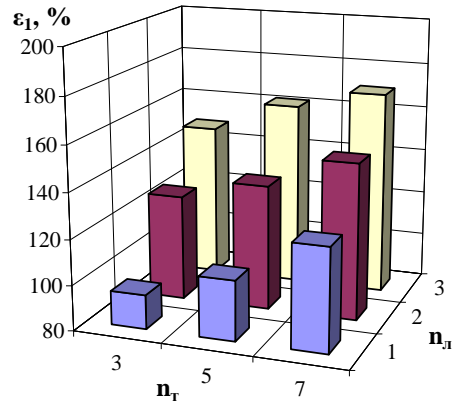
У трикотажі, в якому утокова нитка обвиває протяжки петель трико в двох рядах рапорту, вона знаходиться в структурі в дещо розтягнутому стані, що і призводить до зниження показника повної деформації, особливо у варіанті, рапорт якого містить лише три ряди трико (рис. 4.34.б та г). Суттєвого впливу варіанту обвивання утоковою ниткою протяжок петель трико (однієї або двох гребінок водночас) при дослідженні повної деформації трикотажу утоково-філейного переплетення не виявлено. Слід відмітити лише зниження на 10÷25% показника повної деформації у трикотажі, в рапорті якого три ряди трико, а утокова нитка обвиває протяжки петель трико обох гребінок водночас у двох рядах рапорту (рис. 4.34.г)

Аналіз результатів досліджень швидкооборотної складової повної деформації (рис. 4.35 та рис. 4.36) виявив подібність залежностей (таблиця 4.19) отриманим регресійним рівнянням, які описують залежності повної деформації трикотажу від рапорту філейного переплетення та варіанту розташування утокової нитки в

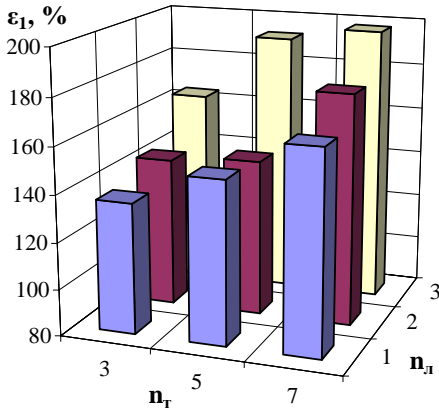
структурі трикотажу (таблиця 4.18). Різниця полягає лише у величині показника.



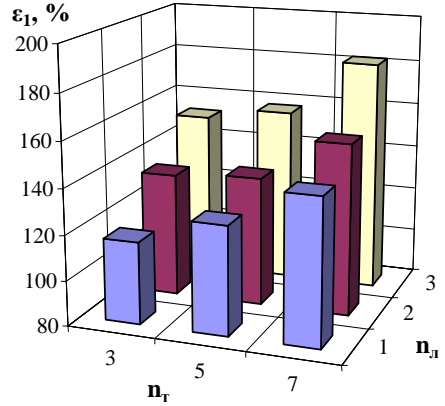
а) 2.2



б) 2.3

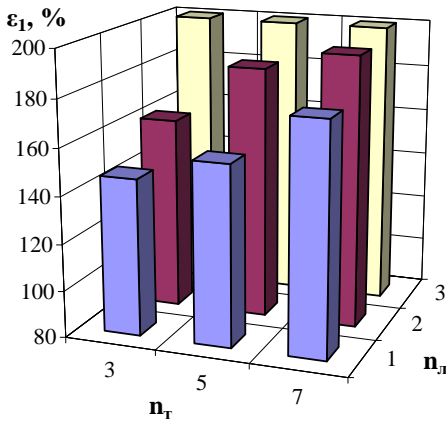


и) 2.8

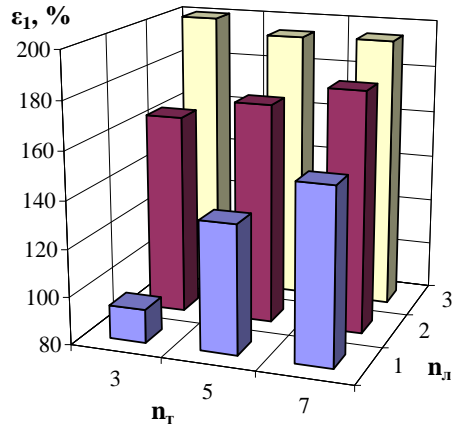


г) 2.9

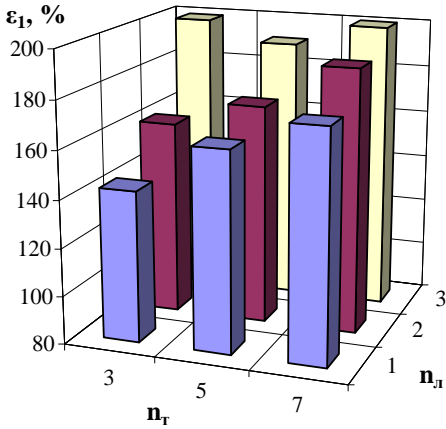
Рис. 4.35. Швидкооборотна складова повної деформації основ'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення, в структурі якого утокова нитка не обвиває протяжки петель трико



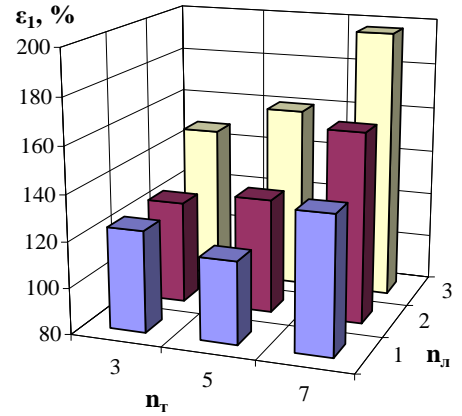
а) 2.11



б) 2.12



в) 2.5



г) 2.6

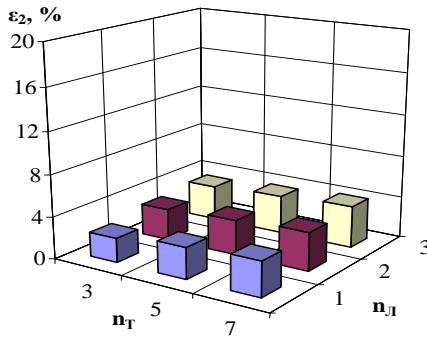
**Рис. 4.36. Швидкооборотна складова повної деформації основ'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення, в структурі якого утокова нитка обвиває протяжки петель трико**

## Швидкообортна деформація основов'язаних полотен

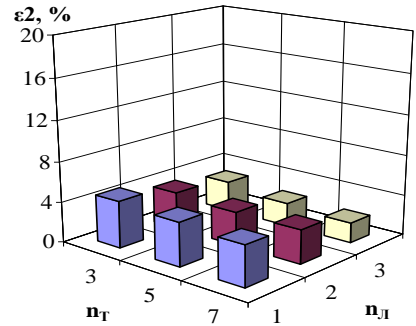
Варіант розташування утокової нитки в структурі	Позначення варіанту	Рівняння регресії	
		в натуральних значеннях змінних	в кодованих значеннях змінних
Філейне переплетення	Ф	$\varepsilon_1 = 10,9 \pm 0,3$	$\varepsilon_1 = 10,9 \pm 0,3$
Утокова нитка переходить з лицьового на виворітний бік	в одному ряді рапорту	$\varepsilon_1 = 54,4 + 11,3n_r + 24,9n_l$	$Y\{\varepsilon_1\} = 160,4 + 22,5x_1 + 24,9x_2$
	в трьох рядах рапорту	$\varepsilon_1 = 54,1 + 6,2n_r + 25,6n_l$	$Y\{\varepsilon_1\} = 136,2 + 12,4x_1 + 25,6x_2$
Утокова нитка розташовується між протязками петель трико двох гребінків	в одному ряді рапорту	$\varepsilon_1 = 124,9 + 8,2n_r - 27,5n_l + 11,1n_l^2$	$Y\{\varepsilon_1\} = 155,6 + 16,4x_1 + 16,9x_2 + 11,1x_2^2$
	в трьох рядах рапорту	$\varepsilon_1 = 112,9 - 10,2n_r + 17,1n_l + 1,7n_r^2$	$Y\{\varepsilon_1\} = 137,9 + 13,2x_1 + 17,1x_2 + 6,7x_1^2$
Утокова нитка обвиває протязки петель трико однієї гребінки	в одному ряді рапорту	$\varepsilon_1 = 103,1 + 6,2n_r + 23,8n_l$	$Y\{\varepsilon_1\} = 181,6 + 12,4x_1 + 23,8x_2$
	в двох рядах рапорту	$\varepsilon_1 = -50,0 + 22,2n_r + 119,5n_l - 8,2n_r n_l - 11,0n_l^2$	$Y\{\varepsilon_1\} = 174,2 + 11,7x_1 + 34,7x_2 - 11,0x_2^2 - 16,3x_1x_2$
Утокова нитка обвиває протязки петель трико обох гребінків	в одному ряді рапорту	$\varepsilon_1 = 124,0 + 6,6n_r - 7,8n_l + 7,2n_l^2$	$Y\{\varepsilon_1\} = 170,4 + 13,3x_1 + 20,8x_2 - 7,2x_2^2$
	в двох рядах рапорту	$\varepsilon_1 = 207,9 - 35,0n_r - 33,0n_l + 4,2n_r n_l + 3,5n_r^2 - 8,2n_l^2$	$Y\{\varepsilon_1\} = 129,8 + 17,2x_1 + 20,9x_2 + 8,4x_1x_2 + 14,1x_1^2 + 8,2x_2^2$

У процесі дослідження повільнооборотної складової повної деформації (рис. 4.37 та рис. 4.38) не встановлено адекватних залежностей цього компоненту деформації від рапорту ґрунтового філейного переплетення. Водночас спостерігається незначний вплив на показник варіанту розташування утокової нитки.

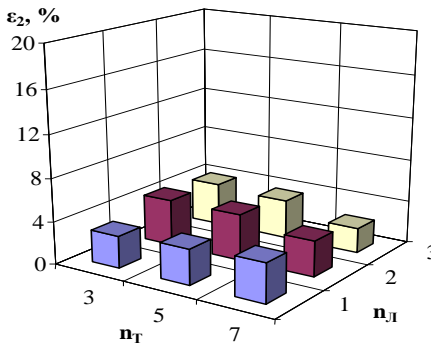
Повільнозворотна складова повної деформації трикотажу утоково-філейного переплетення, в структурі якого утокова нитка розташовується без обвивання протяжок петель трико ґрунтового філейного переплетення, є незначна і коливається від 1,5 до 5,0 % (рис. 4.37). Різницю між показниками можна віднести до похибки досліду.



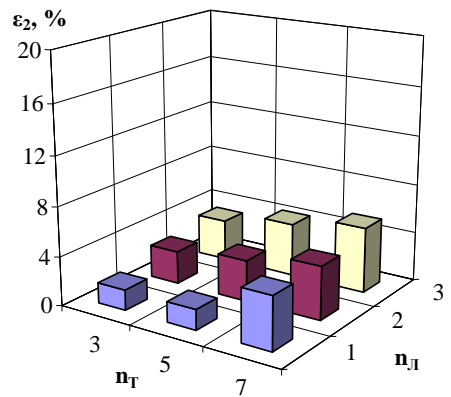
а) 2.2



б) 2.3

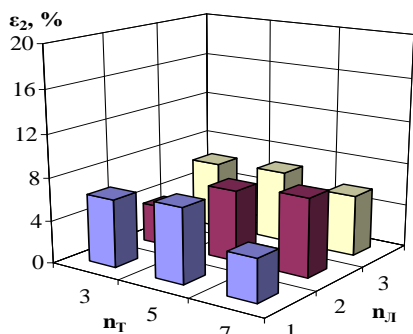


и) 2.8

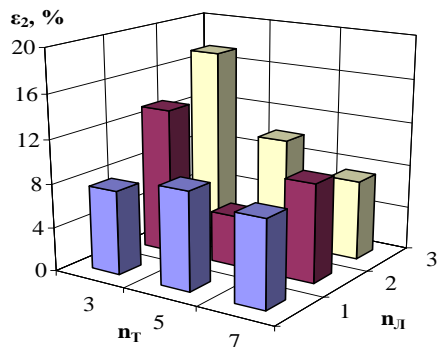


г) 2.9

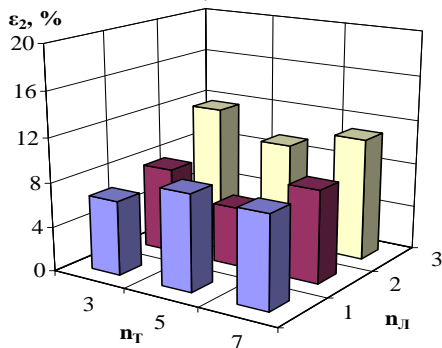
Рис. 4.37. Повільнооборотна складова повної деформації основ'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення, в структурі якого утокова нитка не обвиває протяжки петель трико



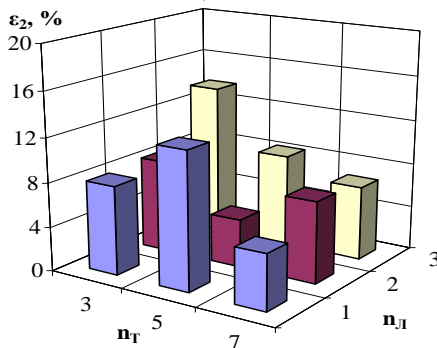
а) 2.11



б) 2.12



в) 2.5



г) 2.6

**Рис. 4.38. Повільнооборотна складова повної деформації основ'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення, в структурі якого утокова нитка обвиває протяжки петель трико**

Повільнооборотна складова повної деформації у трикотажі утоково-філейного переплетення, в структурі якого утокова нитка обвиває протяжки петель трико (рис. 4.38), коливається від 4 % до 16 %, що є більшим, ніж у трикотажі утоково-філейного переплетення, в якому утокова нитка розташується без обвивання протяжок петель. Крім того, у трикотажі, в якому утокова нитка обвиває протяжки петель трико обох гребінок водночас (рис. 4.38.б та г), повільнооборотна частина повної деформації на 2÷4% вища, ніж у відповідних варіантів трикотажу, в якому утокова нитка обвиває протяжки петель трико однієї гребінки. При цьому показник на 2÷3% вищий у трикотажі, в якому утокова нитка обвиває протяжки петель трико в двох рядах рапорту. Тобто, можна

зробити висновок, що повільнооборотна складова повної деформації трикотажу також залежить від ступеню релаксації високорозтяжної нитки в структурі трикотажу.

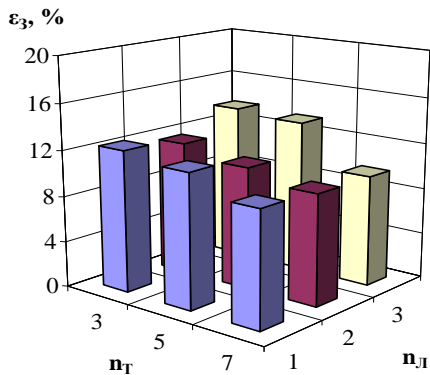
У результаті аналізу розрахункових даних залишкової складової повної деформації (рис. 4.39 та рис. 4.40) утоково-філейного трикотажу виявлено залежність цієї складової як від рапорту ґрунтового філейного переплетення, так і від варіанту розташування утокової нитки в структурі трикотажу. На підставі математичної обробки результатів встановлено рівняння регресії (таблиця 4.20), які адекватно з ймовірністю 0,95 описують досліджуваний процес.

У трикотажі, в якому утокова нитка розташовується на виворотній стороні лише в одному ряді рапорту, а в інших рядах знаходиться з лицьової сторони (рис. 4.39.а), залишкова деформація становить 8–12%. При збільшенні кількості переходів нитки з лицьової на виворотну сторону спостерігаємо зростання залишкової частини повної деформації до 12–18 % (рис. 4.39.б). Це можна пояснити збільшенням точок контакту між утоковою та ґрунтовими нитками. При розтягуванні полотна відбувається розтягування еластомерної утокової нитки і, відповідно, її переміщення в структурі. Після зняття навантаження релаксація утокової нитки в такій структурі відбувається не повністю через виникаючі сили тертя між утоковими та ґрунтовими нитками. Слід відмітити, що показник збільшується, головним чином, зі зменшенням кількості рядів трико в рапорті філейного переплетення.

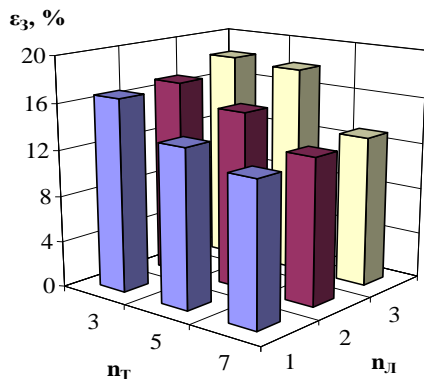
Для трикотажу, в якому утокова нитка розташується почергово то на лицьовій стороні, то між протяжками петель ґрунту (рис. 4.39.г) спостерігаємо нижчі показники залишкової частини повної деформації. При цьому показник зменшується зі зменшенням як кількості рядів трико, так і кількості рядів ланцюжка в рапорті філейного переплетення. Це можна пояснити тим, що в такій структурі релаксація утокової нитки відбувається найкраще.

Водночас залишкова складова повної деформації трикотажу утоково-філейного переплетення, в якому високорозтяжна утокова нитка обвиває протяжки петель трико (рис. 4.40), є незначною і не перевищує 7 %. У трикотажі, в якому утокова нитка обвиває протяжки петель трико лише однієї гребінки в одному ряді рапорту

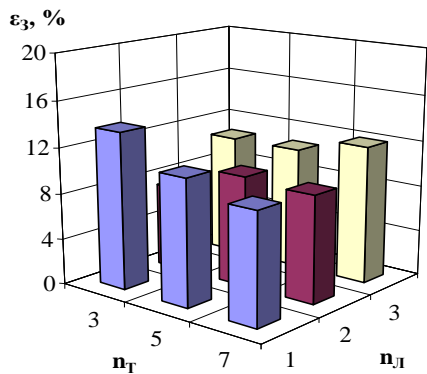
філейного переплетення, залишкова деформація становить 2,5–3,7% (рис. 4.40.а) і не залежить від рапорту філейного переплетення. Різницю в показниках можна віднести до похибки досліду. У варіанті трикотажу, в якому утокова нитка обвиває протяжки петель трико обох гребінок в одному ряді рапорту філейного переплетення залишкова деформація (рис. 4.40.в) залежить лише від кількості рядів ланцюжка в рапорті.



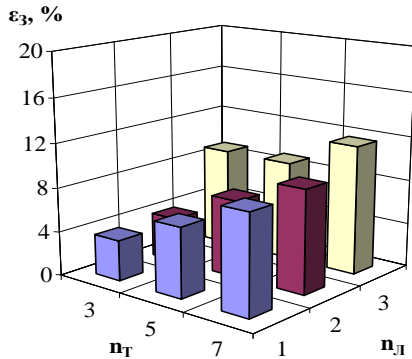
а) 2.2



б) 2.3



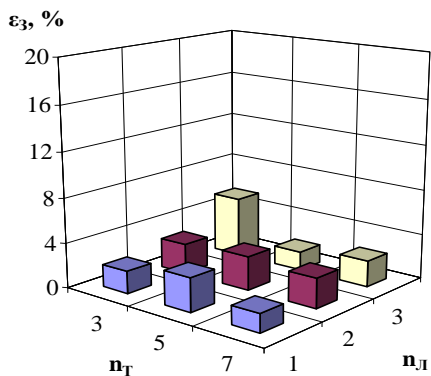
в) 2.8



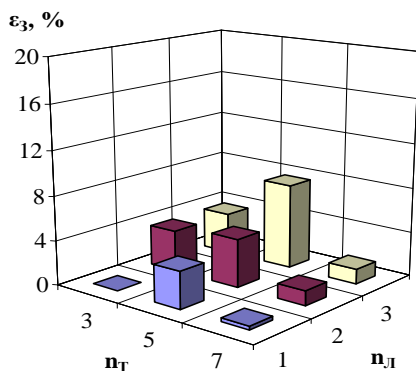
г) 2.9

Рис. 4.39. Залежність залишкової складової повної деформації від рапорту філейного переплетення основ'язаного трикотажу, в структурі якого утокова нитка не обвиває протяжки петель трико

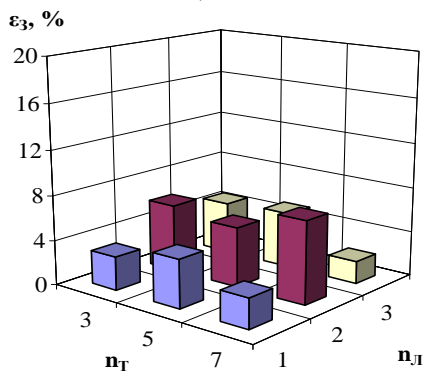




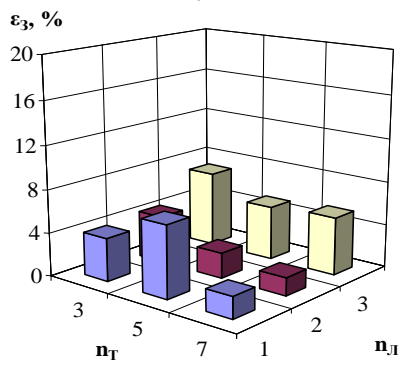
а) 2.11



б) 2.12



в) 2.5



г) 2.6

Рис. 4.40. Залежність залишкової складової повної деформації від рапорту філеїного переплетення основ'язаного трикотажу, в структурі якого утокова нитка обвиває протяжки петель трико

У трикотажі, в якому утокова нитка обвиває протяжки петель трико в двох рядах рапорту, спостерігається вплив обох факторів (рис. 4.40.б та г). Це можна пояснити збільшенням точок контакту між утоковими та ґрунтовими нитками. При розтягуванні полотна відбувається розтягування еластомерної утокової нитки, а відповідно і її переміщення в структурі. Після зняття навантаження релаксація утокової нитки в такій структурі відбувається не повністю через виникаючі сили тертя між утоковими та ґрунтовими нитками.

## Залишкова деформація основов'язаних полотен

Варіант розташування утокової нитки в структурі	Позначення варіанту	Рівняння регресії	
		в натуральних значеннях змінних	в кодovаних значеннях змінних
Філейне переплетення	Ф	$\varepsilon_3 = 0$	$\varepsilon_3 = 0$
Утокова нитка переходить з лишьового на виворітний бік	в одному ряді рапорту	$\varepsilon_3 = 14,6 - 0,7n_r$	$Y\{\varepsilon_3\} = 11,2 - 1,4x_1$
	в трьох рядах рапорту	$\varepsilon_3 = 19,1 - 1,2n_r + 1,1n_p$	$Y\{\varepsilon_3\} = 15,4 - 2,3x_1 + 1,1x_2$
Утокова нитка розташовується між протяжками петель трико двох гребінок	в одному ряді рапорту	$\varepsilon_3 = 25,4 - 1,3n_r - 13,3n_p + 2,5n_p^2 + 0,67n_r n_p$	$Y\{\varepsilon_3\} = 8,8 + 2,5x_2^2 + 1,3x_1x_2$
	в трьох рядах рапорту	$\varepsilon_3 = -0,6 + 1,8n_r - 1,9n_p + 1,3n_p^2 - 0,3n_r n_p$	$Y\{\varepsilon_3\} = 6,6 + 2,2x_1 + 1,8x_2 + 1,3x_2^2 - 0,7x_1x_2$
Утокова нитка обвиває протяжки петель трико однієї гребінки	в одному ряді рапорту	$\varepsilon_3 = 2,6$	-
	в двох рядах рапорту	$\varepsilon_3 = -18,8 + 8,5n_r + 1,5n_p - 0,85n_p^2$	$Y\{\varepsilon_3\} = 5,4 + 1,5x_2 - 3,4x_1^2$
Утокова нитка обвиває протяжки петель трико обох гребінок	в одному ряді рапорту	$\varepsilon_3 = -3,8 + 10,5n_p - 2,6n_p^2$	$Y\{\varepsilon_3\} = 7,7 - 2,6x_2^2$
	в двох рядах рапорту	$\varepsilon_3 = 14,7 - 0,5n_r - 8,9n_p + 2,2n_p^2$	$Y\{\varepsilon_3\} = 3,2 - 1,1x_1 + 2,2x_2^2$

У таблиці 4.21 наведено результати розрахунку часток складових частин повної деформації трикотажу утоково-філейного переплетення з різним розташуванням утокової нитки в структурі трикотажу. Слід зазначити, що всі основов'язані полотна, які досліджувались, мають високі показники пружності та формостійкості: частка швидко зворотної компоненти вища 0,85 при незначній до 0,11 частці залишкової компоненти повної деформації.

Таблиця 4.21

**Частки складових частин повної деформації основов'язаних полотен**

Варіант розташування утокової нитки в структурі			Частки повної деформації		
			швидкооборотна $\Delta\varepsilon_1$	повільнооборотна $\Delta\varepsilon_2$	залишкова $\Delta\varepsilon_3$
Філейне переплетення		Ф	0,930	0,070	0
Утокова нитка переходить з лицьового на виворітний бік	в одному ряді рапорту	2.2	0,884 ÷ 0,936	0,018÷ 0,021	0,045÷ 0,097
	в трьох рядах рапорту	2.3	0,860 ÷ 0,920	0,011÷ 0,040	0,070 ÷ 0,110
Утокова нитка розташовується між протяжками петель трико двох гребінок	в одному ряді рапорту	2.8	0,891 ÷ 0,934	0,011÷ 0,028	0,046 ÷ 0,089
	в двох рядах рапорту	2.9	0,915 ÷ 0,956	0,018÷ 0,022	0,028 ÷ 0,058
Утокова нитка обвиває протяжки петель трико однієї гребінки	в одному ряді рапорту	2.11	0,940 ÷ 0,970	0,022÷ 0,042	0,014 ÷ 0,031
	в двох рядах рапорту	2.12	0,905 ÷ 0,957	0,026÷ 0,078	0,021 ÷ 0,057
Утокова нитка обвиває протяжки петель трико обох гребінок	в одному ряді рапорту	2.5	0,920 ÷ 0,945	0,029÷ 0,054	0,008 ÷ 0,036
	в двох рядах рапорту	2.6	0,860 ÷ 0,952	0,032÷ 0,092	0,013 ÷ 0,049

Слід відзначити вплив варіанту розташування утокової нитки в структурі трикотажу на показники, що пов'язано зі

ступенем релаксації утокових еластомерних ниток в структурі трикотажу після зняття навантаження. Так трикотаж, в якому утокова нитка розташовується без обвивання протяжок петель трико ґрунтового переплетення, має нижчі значення показника частки швидкозворотної компоненти і вищі значення показника частки залишкової компоненти у повній деформації. Отже, при розтягуванні такого трикотажу в його структурі відбуваються незворотні процеси перерозподілу ниток між елементами структури.

Трикотаж, в якому утокова нитка обвиває протяжки петель трико однієї гребінки в одному ряді рапорту переплетення (варіант 2.11), має найкращі експлуатаційні властивості: частка швидкозворотної компоненти вища за 0,94 при незначній до 0,31 частці залишкової компоненти повної деформації.

#### **4.4. Висновки по розділу**

Проведені експериментальні дослідження параметрів структури та механічних властивостей трикотажу філейно-утокового переплетення з різним розташуванням високорозтяжної повздовжньої утокової нитки в структурі трикотажу філейно-утокового переплетення, дозволили зробити наступні висновки:

- варіант розташування утоку в структурі трикотажу впливає на кількість петельних рядків на 100 мм: зі збільшенням точок контакту утокової нитки з нитками ґрунту спостерігається зменшення щільності через зростаючі сили тертя між утоковими та ґрунтовими нитками, що утруднює процеси релаксації високо розтяжної нитки. Водночас кількість петельних стовпчиків залишається постійною;
- варіант розташування утоку в структурі трикотажу впливає на його товщину та поверхневу щільність, при цьому при релаксації утокової нитки відбувається не тільки наближення вертикальних сторін двох чарунок по довжині трикотажу, але й вигин цих ділянок в площині, яка перпендикулярна площині полотна;
- варіант розташування утоку в структурі трикотажу впливає на геометричні розміри чарунки. При цьому розміри вертикальної

сторони чарунки залежать від ступеня релаксації утокової нитки, а розміри діагональної сторони чарунки – від форми остову петель, які її утворюють;

- визначено коефіцієнти співвідношення розмірів чарунки дозволяють виявити трикотаж, який проявляє більшу здатність до розширення при видовженні (аукзетик- властивість) при міцному закріпленні утокової нитки в структурі;
- варіант розташування утокової нитки в структурі трикотажу впливає на розривальне видовження трикотажу: зі збільшенням точок контакту утокової нитки з ґрунтовими спостерігається зниження розривального подовження, яке посилюється при обвиванні утком протяжок петель ґрунту. Водночас розривальне навантаження змінюється незначно;
- варіант розташування утоку в структурі трикотажу впливає на його повну деформацію та зворотні складові частини. Значення деформацій знижується при збільшенні точок контакту утокової нитки з ґрунтовими в структурі трикотажу;
- варіант розташування утоку в структурі трикотажу не впливає на залишкову частину деформації, яка в трикотажі філейно-утокового переплетення становить від 2,5 до 6 %;
- варіант закріплення утокової нитки в структурі трикотажу не впливає на співвідношення складових частин деформації. У трикотажі утоково-філейного переплетення частка залишкової деформації не перевищує 0,05, а швидкозворотна частина більша за 0,90.

Проведені експериментальні дослідження параметрів структури та механічних властивостей трикотажу філейно-утокового переплетення, який утворено чергуванням рядів трико та ланцюжка в рапорті філейного переплетення, з різним розташуванням високорозтяжної повздовжньої утокової нитки в структурі дозволили зробити наступні висновки:

- Параметри структури та геометричні розміри чарунки основ'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення залежать як від рапорту філейного переплетення, так і від варіанту обвивання протяжок петель трико утковими нитками.

- Рапорт філейного переплетення не впливає на розривальне навантаження основов'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення, однак виявлено прямопропорційну залежність розривального подовження від рапорту філейного переплетення при незначному впливі варіанту розташування утокової нитки в структурі, що є наслідком різної релаксації еластомерної нитки в структурі полотна.
- Як рапорт ґрунтового переплетення, так і варіант розташування утокової нитки впливають на показник повної деформації та її складових частин. Зі збільшенням рапорту філейного переплетення повна деформація трикотажу збільшується для всіх варіантів введення утоку.
- В усіх варіантах основовязаного трикотажу утоково-філейного переплетення найбільшу частку ( $>0,8$ ) повної деформації становить швидкозворотна, тоді як частка залишкової деформації змінюється в межах 0,01–0,15, що є ознакою гарної формостійкості.
- Отримані на підставі експериментальних даних рівняння регресії адекватно описують залежності показників від рапорту філейного переплетення та дозволяють на етапі проектування полотен прогнозувати їхню структуру та властивості.

У результаті аналізу форми чарунки основов'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення різних варіантів прокладання високорозтяжного повздовжнього утоку встановлено, що у всіх варіантах в результаті релаксації утокової нитки гексагональна форма чарунки філейного трикотажу змінюється: вертикальні сторони чарунки, які утворені взаємно перехрещеними петлями трико, наближуються в повздовжньому напрямку, а діагональні сторони, які утворені головним чином петлями ланцюжка, переміщуються змінюючи кут нахилу до горизонталі. Таким чином, отримуємо типову аукзетик-структуру.

Водночас форма чарунки трикотажу, в якому утокова нитка розташовується в структурі трикотажу в одному ряді рапорту, суттєво відрізняється від описаної: внаслідок релаксації утокової нитки відбувається не просте наближення вертикальних сторін чарунки, які утворені рядами петель трико, а наближення саме тих рядів, в яких утокова нитка розташована в структурі трикотажу.

У результаті цього вертикальні сторони чарунки нахиляються в площині трикотажу; а діагональні вигинаються в площині, яка перпендикулярна площині полотна. Ступінь нахилу вертикальної сторони чарунки зростає при збільшенні рапорту ґрунтового філейного переплетення, а особливо зі збільшенням кількості рядів трико в рапорті.

Трикотаж утоково-філейного переплетення практично всіх рапортів та варіантів розташування утоку має від'ємне значення тангенсу кута нахилу діагональної сторони чарунки, що є свідченням від'ємного значення коефіцієнту Пуассона. Проведений аналіз форми чарунок та аналітичні розрахунки головних співвідношень їхніх розмірів дозволили визначити варіанти структур основов'язаного трикотажу, який матиме кращі аукзетик-властивості. Такими структурами може бути визнаний трикотаж утоково-філейного переплетення, в рапорті якого 7 рядів трико, а утокова нитка розташована в структурі полотна лише в одному ряді рапорту, а в інших рядах вільно розташовується на лицьовій стороні.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Аукзетик-матеріали поряд з незвичною здатністю розширюватися при розтягненні та звужуватися при стисканні мають інші унікальні фізико-механічні властивості: збільшене значення модулю зсуву, підвищений опір продавлюванню, стійкість до утворення тріщин, здатність поглинати енергію тощо. Обширні дослідження текстильних структур волокон, пряжі та тканин, що мають аукзетик-потенціал і експлуатаційні властивості проаналізованих аукзетик-матеріалів показують, що дослідження в сфері аукзетик-текстильних матеріалів матимуть подальший розвиток.

Проведений аналіз різноманітних структур та моделей, які запропоновані для досягнення аукзетик-ефектів в матеріалах, дозволяє визначати низку структур, які можуть бути реалізовані в текстильних, і зокрема трикотажних, матеріалах як на мікрорівні, так і на макрорівні. Отримання аукзетик-текстильних матеріалів, зокрема трикотажних, з сировини, яка не має таких властивостей, все більше приваблює дослідників та науковців через широкі можливості в'язальних машин до отримання складаних тривимірних структур та сітчастих матеріалів з отворами різних форм та розміру. Отже, в'язані структури мають виключну універсальність і багатофункціональність при створенні текстильних матеріалів з від'ємним коефіцієнтом Пуассона.

Теоретичний аналіз сітчастих матеріалів показав, що технологія основ'язання забезпечує вироблення різноманітних за розмірами та формою чарунок трикотажних полотен, при цьому найкращим для їх реалізації є філейне переплетення. Сформульовані принципи утворення чарунок гексагональної чарунки спрощують процес проектування сітчастих структур з чарунками заданих форм та розмірів.

Вперше спроектовано основ'язаний аукзетик-трикотаж, в якому реалізована реентерабельна стільникова будова елементарної чарунки за рахунок введення в структуру трикотажу філейного переплетення з гексагональними чарунками високорозтяжної еластомерної нитки у вигляді повздожнього утоку, яка після релаксації видозмінює форму елементарної чарунки до



реентерабельного стану. Дослідження коефіцієнту Пуассона основ'язаного трикотажу комбінованого утоково-філейного переплетення показали, що практично всі запропоновані варіанти структур трикотажних полотен на першому етапі розтягнення виявляють від'ємність коефіцієнту Пуассона.

На підставі проведеного теоретичного аналізу існуючих методів проектування коефіцієнту Пуассона звичайних та реентерабельних стільникових структур встановлено, що головними параметрами, які визначають від'ємність коефіцієнту Пуассона, є співвідношення довжин ребер чарунки та кут нахилу ребра до напрямку розтягування. Запропоновані формули для розрахунку коефіцієнту Пуассона основ'язаних аукзетик-полотен з видозміненими стільниковими чарунками враховують розміри гексагональної чарунки, які зазвичай використовують для характеристики сітківиробів.

Вперше спроектовано аукзетик-основ'язаний трикотаж, в якому реалізована реентерабельна структура з ромбовидних решіток. Реалізація структури здійснена при використанні утокових переплетень за рахунок введення утокової нитки за певним рапортом в базове переплетення ланцюжок. Необхідне розташування утокової нитки досягається при використанні як утокових ниток підвищеної жорсткості, наприклад, арамідних. Дослідження коефіцієнту Пуассона основ'язаного трикотажу утокових переплетень показали, що цей трикотаж на першому етапі розтягування поводить себе як звичайне полотно. Коли відносне подовження полотен перевищує 50%, відмічається зростання ширини (в деяких випадках до 20%).

Проведений теоретичний аналіз структури філейно-утокового трикотажу показав, що у випадку, коли утокові гребінки знаходяться між ґрунтовими гребінками, утокова нитка з лицьової сторони в будь-якому випадку перекривається протяжками петель трико ґрунтової гребінки, яка знаходиться ближче до спинок голок. Особливість розташування утокової нитки в структурі трикотажу визначає взаємодія утокових гребінок з ґрунтовою, яка розташована далі від спинок голок.

У випадку, коли утокові гребінки знаходяться за ґрунтовими, а їхній зсув відбувається в бік зсуву ґрунтової гребінки, яка

розташована ближче до спинок голок, то їхні нитки взаємодіють у відповідності до рапорту зсувів утокових гребінок, а з виворотної сторони перекриваються протяжками петель з ниток ґрунтової гребінки, яка розташована далі за спинками голок. У випадку, коли зсув утокових гребінок протилежний зсуву ґрунтової гребінки, яка розташована ближче до спинок голок, утокові нитки взаємодіють з нитками обох ґрунтових гребінок.

Проведені теоретичні дослідження дозволяють визначити місце утокової нитки в структурі філейного трикотажу і встановити варіант більш надійного закріплення її в полотні.

У процесі дослідження структури трикотажу філейного переплетення з гексагональними отворами чарунок встановлено, що вертикальні сторони чарунки утворені закритими петлями трико, які мають однакову конфігурацію, остови яких розташовані в напрямку в'язання та розвернуті в площині, яка перпендикулярна площині трикотажу; діагональна сторона чарунки формується закритою петлею трико, остов якої нахилиється в напрямку, який протилежний розташуванню протяжок, петлями ланцюжка та відкритою або закритою петлею трико, яка нахилиється в бік вихідної протяжки. У головці петлі протяжки наступної петлі розташуються одна над іншою, якщо петля є закритою, і поряд у випадку коли наступна петля є відкритою. За допомогою методу геометричного моделювання визначені математичні залежності для розрахунку довжини нитки в петлях різних видів, які враховують просторове розміщення петлі в структурі трикотажу та дозволяють прогнозувати параметр на етапі проектування структури.

Головним технологічним параметром, який забезпечує аукзетик-властивості основов'язаних полотен утоково-філейного переплетення, визначено подовження високорозтяжної утокової нитки перед входом до зони в'язання. Запропоновані математичні залежності необхідного подовження від рапорту переплетення та розмірів петель дозволяють спростити процес проектування полотен із заданим коефіцієнтом Пуассона.

Проведені експериментальні дослідження параметрів структури та механічних властивостей трикотажу філейно-утокового переплетення виявили суттєвий вплив на показники варіанту розташування високорозтяжної повздовжньої утокової

нитки в структурі. Визначені коефіцієнти співвідношення розмірів чарунки дозволяють виявити варіант переплетення, який проявляє більшу здатність до розширення при видовженні (аукзетик-властивість) при міцному закріпленні утокової нитки в структурі.

Проведені експериментальні дослідження параметрів структури та механічних властивостей трикотажу філейно-утокового переплетення, який утворено чергуванням рядів трико та ланцюжка в рапорті філейного переплетення з різним розташуванням високорозтяжної повздовжньої утокової нитки в структурі, дозволили встановити залежності показників від рапорту ґрунтового філейного переплетення та виявити їх особливості для трикотажу різних варіантів розташування високорозтяжної повздовжньої утокової нитки в структурі. Отримані рівняння регресії адекватно описують залежності показників від рапорту філейного переплетення та дозволяють на етапі проектування полотен прогнозувати їхню структуру та властивості.

У результаті аналізу форми чарунки осново-в'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення різних варіантів розташування високорозтяжного повздовжнього утоку встановлено, що у всіх полотнах в результаті релаксації утокової нитки гексагональна форма чарунки філейного трикотажу змінюється: вертикальні сторони чарунки, які утворені взаємно перехрещеними петлями трико, наближуються в повздовжньому напрямку, а діагональні сторони, які утворені головним чином петлями ланцюжка, переміщуються змінюючи кут нахилу до горизонталі. Таким чином, отримуємо типову аукзетик-структуру.

Водночас форма чарунки трикотажу, в якому утокова нитка розташовується в структурі трикотажу в одному ряді рапорту, суттєво відрізняється від описаної: вертикальні сторони чарунки нахилиються в площині трикотажу; а діагональні вигинаються в площині, яка перпендикулярна площині полотна. Ступінь нахилу вертикальної сторони чарунки зростає при збільшенні рапорту ґрунтового філейного переплетення, а особливо зі збільшенням кількості рядів трико в рапорті.

Трикотаж утоково-філейного переплетення практично всіх рапортів та варіантів розташування утоку має від'ємне значення тангенсу кута нахилу діагональної сторони чарунки, що є

свідченням від'ємного значення коефіцієнту Пуассона. Проведений аналіз форми чарунок та аналітичні розрахунки головних співвідношень їхніх розмірів дозволили визначити варіанти структур основов'язаного трикотажу, який матиме кращі аукзетик-властивості.

## Перелік посилань

1. Evans K. E. Molecular network design / K. E. Evans, M. A. Nkansah, I. J. Hutchinson, S. C. Rogers // *Nature*. – 1991. – Vol. 353. – P. 124.
2. Lakes R. S. Foam structures with a negative Poisson's ratio / R. S. Lakes // *Science*. – 1987. – Vol. 235. – P.1038–1040.
3. Patent Publishing No. WO88/00523, International. Polyhedron cell structure and method of making same / RS Lakes. – May 1987.
4. Donoghue J. P. Composite laminates with enhanced indentation and fracture resistance due to negative Poisson's ratio / J. P. Donoghue, K. E. Evans // 8th International Conference in Composite Materials SAMPE. – Honolulu, Hawaii. – 1991.
5. Masters I. G. Models for the elastic deformation of honeycombs / I. G. Masters, K. E. Evans // *Composite Structures*. – 1996. – Vol. 35. – P. 403–422.
6. Caddock B. D. Microporous materials with negative Poisson's ratios. 1. Microstructure and mechanical properties / B. D. Caddock, K. E. Evans // *Journal Physic. D: Applied Physic*. – 1989. – Vol. 22. – P. 1877–1882.
7. Alderson K. L. The fabrication of microporous polyethylene having a negative Poisson's ratio / K. L. Alderson, K. E. Evans // *Polymer*. – 1992. – Vol. 33. – P. 4435–4438.
8. Pickles A. P. The effects of powder morphology on the processing of auxetic polypropylene / A. P. Pickles, K. L. Alderson, K. E. Evans // *Polymer Engineering and Science*. – 1996. – Vol. 36, No. 5. – P. 636–642.
9. Anderson A. Expanding materials and applications: exploiting auxetic textiles./ Andy Anderson, Kim Anderson // *Technical Textiles International*. – September 2005. – Vol.14, Issue 6. – P. 29–34.
10. Umakiran T. Auxetic textile and its application / T. Umakiran, A. Anil Kumar / *Man-made textile in India*. – 2009, August. – P. 265–269.
11. Liu Q. Literature review: Materials with negative Poisson's ratios and potential applications to aerospace and defence. DSTO-GD-0472. / Liu Q. – DSTO Defence science and technology organization. 2006. – 36 p.
12. Alderson A. Auxetic materials / Alderson A., Alderson K. L. // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. – 2007. – Vol. 221. – P. 565–575.
13. Kenneth E. Auxetic Materials: Functional Materials and Structures from Lateral Thinking! / Kenneth E., Evans K. E, Alderson A. // *Advanced Materials*. – 2000. – Vol.12, No. 9. – P. 617–628.
14. Alderson A. The Use of Auxetic Materials in Smart, Gradient and Multifunctional Systems / Alderson A // *Book of abstracts 4-th International Conference Smart materials, structures, systems*. – Tuscany, Italy June 10–14 2012. – P. 22.
15. Кизимчук О. П. «Аухетич»-матеріали – новий клас текстильних матеріалів / О. П. Кизимчук // *Вісник КНУТД*. 2008 р. – № 1, Спеціальний випуск. Т. 2. – С. 50–52.

16. Wan H. A study of negative Poisson's ratios in auxetic honeycombs based on a large deflection model / Wan H., Ohtaki H., Kotosaka S., Hu G. M. // *European Journal of Mechanics Solids*. – 2004. – Vol. 23. – P. 95–106.
17. Wojciechowski K. W. Remarks on Poisson Ratio beyond the Limits of the Elasticity Theory / Wojciechowski K. W. // *Journal of the Physical Society of Japan*. – 2003. – Vol.72. – P. 1819–1820.
18. Baughman R. H. Negative Poisson's ratios as a common feature of cubic metals / Baughman R. H., Shacklette JM, Zakhidov A. A., Stafstrom S. // *Nature*. – 1998. – Vol. 392. – P. 362–365.
19. Love A. A. *Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity* (4th ed.) / Love A. A. – New York: Dover Publications. – 1977. – 642 p.
20. Etienne F. H. Thermally induced microcracking in granites: characterisation and analysis / Etienne F. H, Houpert R. // *International Journal of Rock Mechanics and Mineral Science- Geomechanics Abstracts*. – 1989. – Vol. 26. – P. 125–134.
21. Gunton D. J. The Young's modulus and Poisson's ratio of arsenic, antimony and bismuth / Gunton D. J., Saunders G. A. // *Journal of Materials Science*. – 1972. – Vol.7. – P. 1061–1068.
22. Li Y. The anisotropic behavior of Poisson's ratio, Young's modulus and shear modulus in hexagonal materials / Li Y // *Physica Status Solidi*. – 1976. – Vol. 38. – P. 171–175.
23. Williams J. L. Properties and an anisotropic model of cancellous bone from the proximal tibial epiphysis / Williams J. L., Lewis J. L. // *Journal of Biomechanical Engineering* – 1982. – Vol.104. – P. 50–56.
24. Lees C. Poisson's ratio in skin / Lees C., Vincent J. F.V., Hillerton J. E. // *Biomedical Materials and Engineering*. – 1991. – Vol.1. – P. 19–23.
25. Veronda D. R. Mechanical characterization of skin-finite deformations / Veronda D. R., Westmann R. A. // *Journal of Biomechanics*. – 1970. – Vol. 3. – P. 111–124.
26. Liu Y. A review on auxetic structures and polymeric materials / Liu Y., Hu H // *Scientific Research and Essays*. – 2010. – Vol. 5 (10). – P. 1052–1063.
27. Grima J. N. On the auxetic properties of rotating rhombi and parallelograms: A preliminary investigation / Grima J. N., Farrugia P. S., Gatt R., Attard D. // *Physica Status Solidi*. – 2008. – Vol. 245. – P. 521–529.
28. Friis E. A. Negative Poisson's ratio polymeric and metallic foams / Friis E. A., Lakes R. S., Park J. B. // *Journal of Materials Science*. – 1988. – Vol. 23, No.12. – P. 4406–4414.
29. Lee T. Anisotropic polyurethane foam with Poisson's ratio greater than 1 / Lee T., Lakes R. S. // *Journal of Materials Science*. – 1997. – Vol.32. – P. 2397–2401.
30. Evans K. E. Microporous materials with negative Poisson's ratios. II. Mechanisms and interpretation / Evans K. E., Caddock B. D. // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1989. – Vol. 22, No.12. – P. 1883–1887.
31. Alderson K. L. Strain-dependent behaviour of microporous polyethylene with a negative Poisson's ratio / Alderson K. L., Evans K. E. // *Journal of Materials Science*. – 1993. – Vol. 28. – P. 4092–4098.

32. Neale P. J. Negative Poisson's ratio of microporous polyethylene in compression / Neale P. J., Alderson K. L., Pickles A. P., Evans K. E. // *Journal of Materials Science Letters*. – 1993. – Vol.12. – P. 1529–1532.
33. Evans K. E. The static and dynamic moduli of auxetic microporous polyethylene / Evans K. E., Alderson K. L. // *Journal of Materials Science Letters*. – 1992. – Vol.11, No24. – P. 1721–1724.
34. Pickles A. P. The effect of the processing parameters on the fabrication of auxetic polyethylene. Part I The effect of compaction conditions / Pickles A. P., Webber R. S., Alderson K. L., Neale P. J., Evans K. E. // *Journal of Materials Science*. – 1995. – Vol. 30. – P. 4059–4068.
35. Alderson K. L. The effect of the processing parameters on the fabrication of auxetic polyethylene. Part II The effect of sintering temperature and time / Alderson K. L., Kettle A. P., Neale P. J., Pickles A. P., Evans K. E. // *Journal of Materials Science*. – 1995. – Vol. 30. – P. 4069–4075.
36. Alderson K. L. Evidence for Uniaxial Drawing in the Fibrillated Microstructure of Auxetic Microporous Polymers / Alderson K. L., Alderson A., Webber R. S., Evans K. E. // *Journal of Materials Science Letters*. – 1998. – Vol.17. – P. 1415–1419.
37. Neale P. J. The Effects of Powder Morphology on the Processing of Auxetic Polyethylene. Part III The Effect of Extrusion Conditions / Neale P. J., Pickles A. P., Alderson K. L., Evans K. E. // *Journal of Materials Science*. – 1995. – Vol. 30. – P. 4087–4094.
38. Patent application no. 9905145.0, United Kingdom. Auxetic materials / Alderson K. L., Simkins V. R. – 6 March 1999.
39. Alderson K. L. Auxetic polypropylene fibres. Part 1. Manufacture and characterization / Alderson K. L., Alderson A., Smart G., Simkins V. R., Davies P. J. // *Plastics Rubber and Composites*. – 2002. – Vol. 31, No. 8. – P. 344–349.
40. Alderson K. L. A novel fabrication route for auxetic polyethylene. Part 1: processing and microstructure / Alderson K. L., Webber R. S., Kettle A. P., Evans K. E. // *Polymer Engineering and Science* – 2005. – Vol. 45, Issue 4. – P. 568–578.
41. Ravirala N. Auxetic polypropylene films / Ravirala N., Alderson A., Alderson K. L., Davies P. J. // *Polymer Engineering and Science* – 2005. – Vol. 45, Issue 4. – P. 517–528.
42. Webber R. S. A novel fabrication route for auxetic polyethylene. Part 2: Mechanical properties / Webber R. S., Alderson K. L., Evans K. E. // *Polymer Engineering and Science*. – 2008. – Vol. 48. – P. 1351–1358.
43. Simkins V. R. An experimental study of thermal post-production processing of auxetic polypropylene fibres / Simkins V. R., Ravirala N., Davies P. J., Alderson A., Alderson K. L. // *Physica Status Solidi (b)* – 2008. – Vol. 245. – P. 598–605.
44. Ravirala N. Negative Poisson's Ratio Polyester Fibers / Ravirala N., Alderson K. L., Davies P. J., Simkins V. R., Alderson A. // *Textile Research Journal*. – 2006. – Vol.76. – P. 540–546.

45. He C. B. Toward Negative Poisson Ratio Polymers through Molecular Design / He C. B., Liu P. W., Griffin A. C. // *Macromolecules*. – 1998. – Vol. 31. – P. 3145–3147.
46. He C. B. Toward molecular auxetics: Main chain liquid crystalline polymers consisting of laterally attached para-quaterphenyls / He C. B., Liu P. W., McMullan P. J., Griffin A. C. // *Physica Status Solidi*. – 2005. – Vol. 242. – P. 576–584.
47. Aldred P. Dynamic simulations of potentially auxetic liquid-crystalline polymers incorporating swivelling mesogens / Aldred P., Moratti S. C. // *Molecular Simulation*. – 2005. – Vol. 31. Issue 13. – P. 883–887.
48. Grima J. N. Self-expanding molecular networks / Grima J. N., Evans K. E. // *Chemical Communications*. – 2000. – Vol.16. – P. 1531–1532.
49. Wu H. M. Molecular design of new kinds of auxetic polymers and networks / Wu H. M., Wei G. Y. // *Chinese Journal of Polymer Science*. – 2004. – Vol. 22. – P. 355–362.
50. Wei G. Y. Design of auxetic polymer self-assemblies / Wei G. Y. // *Physica Status Solidi*. – 2005. – Vol. 242. – P. 742–748.
51. Alderson A. Modelling of the mechanical and mass transport properties of auxetic molecular sieves: an idealised organic (polymeric honeycomb) host-guest system / Alderson A., Davies P. J., Williams M. R., Evans K. E., Alderson K. L., Grima J. N. // *Molecular Simulation*. – 2005. – Vol. 31. – P. 897–905.
52. Yang W. Review on auxetic materials / Yang W., Li Z. M., Shi W., Xie B. H., Yang M. B. // *Journal of Materials Science*. – 2004. – Vol. 39. – P. 3269–3279.
53. Whitty J. P. M. Towards the design of sandwich panel composites with enhanced mechanical and thermal properties by variation of the in-plane Poisson's ratios / Whitty J. P. M., Alderson A., Myler P., Kandola B // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2003. – Vol. 34. – P. 525–534.
54. Smith C. A novel mechanism for generating auxetic behaviour in reticulated foam: Missing rib foam model / Sith C., Grima J., Evans K. // *Acta Materialia*. – 2000. – Vol.48. – P. 4349–4356.
55. NTC Project: M04-GT21. Textile Fibres Engineering from Molecular Auxetic Polymers. / Philip J. McMullan, Satish Kumar, Anselm C. Griffin. – Annual Report 2005. – 10 p.
56. NTC Project: M04-GT21. Textile Fibres Engineering from Molecular Auxetic Polymers. / Philip J. McMullan, Satish Kumar, Anselm C. Griffin. – Annual Report 2006. – 10 p.
57. NTC Project: M04-GT21. Textile Fibres Engineering from Molecular Auxetic Polymers / Philip J. McMullan, Satish Kumar, Anselm C. Griffin. – Annual Report 2007. – 10 p.
58. Uzun M. Tribological properties of auxetic and conventional polypropylene weft knitted fabrics – M. Uzun, I. Patel // *Archives of materials Science and Engineering*. – August 2010. – vol. 44, issue 2. – P. 120–125.
59. Patent Application No. WO2004/088015, International. Improvements in and relating to composite materials and structures / P. Hook, K. E. Evans, J. P. Hennington, C. Hartmann-Thompson, T. R. Bunce. – Oct. 14, 2004.



60. NTC Project: F06-MD09: The Formation and Performance of Auxetic Textiles / Samuel C. Ugbohue, Steve B. Warner, Yong K. Kim, Qinguo Fan, Chen Lu Yang, Olena Kyzymchuk, Yani Feng . – Annual Report 2007. – 10 p.
61. NTC Project: F06-MD09: The Formation and Performance of Auxetic Textiles / Samuel C. Ugbohue, Yong K. Kim, Steven B. Warner, Qinguo Fan, Chen Lu Yang, Yani Feng, Olena Kyzymchuk. – Annual Report 2008. – 10 p.
62. NTC Project: F06-MD09: The Formation and Performance of Auxetic Textiles / Samuel C. Ugbohue, Yong K. Kim, Steven B. Warner, Qinguo Fan, Chen Lu Yang, Yani Feng, John Lord, Olena Kyzymchuk. – Annual Report 2009. – 10 p.
63. Patent 8772187, International (USA) A1. IPC D04B 23/00, D04B 23/16 Auxetic fabric structure and related fabrication method / Samuel C. Ugbohue, Yong K. Kim, Steven B. Warner, Qinguo Fan, Chen-Lu Yang, Olena Kyzymchuk – Priority date 21.06.2007; International publication date 31.12.2008. Granted on July 8, 2014. – 27 p.
64. Huang X. Developing a new processing route to manufacture honeycomb ceramics with negative Poisson's ratio / Huang X., Blackburn S. // *Key Engineering Materials*. – 2002. – Vol. 206. – P. 201–204.
65. Lakes R. S. Indentability of Conventional and Negative Poisson's Ratio Foams / Lakes R. S., Elms K. // *Journal Composite Materials*. – 1993. – Vol. 27. – P. 1193–1202.
66. Alderson A. A triumph of lateral thought / Alderson A // *Chemistry & Industry*. – 1999. – Vol.10. – P. 384–391.
67. Smith C. W. Strain dependent densification during indentation in auxetic foams / Smith CW, Evans K. E., Lehman F. // *Cellular Polymers*. – 1999. – Vol.18. – P.79–101.
68. Alderson K. L. The strain dependent indentation resilience of auxetic microporous polyethylene / Alderson K. L, Fitzgerald A., Evans K. E // *Journal of Materials Science*. – 2000. – Vol. 35, No. 16. – P. 4039–4047.
69. Choi J. B. Fracture toughness of re-entrant foam materials with a negative Poisson's ratio: experiment and analysis / Choi J. B., Lakes R. S. // *International Journal of Fracture*. – 1996. – Vol. 80. – P.73–83.
70. Scarpa F. Trends in acoustic properties of iron particle seeded auxetic polyurethane foam / Scarpa F., Bullough W. A. Lumley P. // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. – 2004. – Vol. 218. – P. 241–244.
71. Scarpa F. Dynamic properties of high structural integrity auxetic open cell foam / Scarpa F., Ciffo L. G., Yates J. R. // *Smart Materials and Structure*. – 2004. – Vol.13, No.1. – P. 49–56.
72. Scarpa F. Passive and MR Fluid-Coated Auxetic PU Foam-Mechanical, Acoustic and Electromagnetic Properties / Scarpa F., Smith F. C. // *Journal of Intelligent Material Systems and Structure*. – 2004. – Vol.15. – P. 973–979.
73. Alderson A. Auxetic polymeric filters display enhanced de-fouling and pressure compensation properties / Alderson A., Rasburn J., Evans K. E., Grima J. N. // *Membrane Technology*. – 2001. – Vol.137. – P. 6–8.

74. Rasburn J. Auxetic structures for variable permeability systems / Rasburn J, Mullarkey P. G., Evans K. E., Alderson A., Ameer-Beg S., Perrie W. // American Institute of Chemical Engineering (AIChE) Journal – 2001. – Vol. 47. – P. 2623–2626.
75. Alderson A. Mass transport properties of auxetic (negative Poisson's ratio) foams / Alderson A., Rasburn J., Evans K. E. // Physica Status Solidi, (b). – 2007. – Vol. 244. – P. 817–827.
76. Evans K. E. Tailoring the negative Poisson's ratio / Evans K. E. // Chemical Industry. – 1990. – Vol. 20. – P. 654–657.
77. Evans K. E. Design of doubly-curved sandwich panels with honeycomb cores / Evans K. E // Composite Structure. – 1991. – Vol.17. – P. 95–111.
78. Кизимчук О. П. Головні властивості аукзетик-матеріалів / О. П. Кизимчук, В. Г. Здоренко // Вісник КНУТД – 2013. – № 4. – С. 264–270.
79. Beer F. P. Mechanics of Materials / Beer F. P., Johnston E. R. Jr., DeWolf J. T. – New York; McGraw Hill, 84. – 2001. – 816 p.
80. Choi J. B. Nonlinear properties of metallic cellular materials with a negative Poisson's ratio / Choi J. B., Lakes R. S. // Journal of Materials Science. – 1992. – Vol. 27, No.19. – P. 5373–5381.
81. Choi J. B. Nonlinear properties of polymer cellular materials with a negative Poisson's ratio/ Choi J. B., Lakes R. S. // Journal of Materials Science. – 1992. – Vol. 27, No.19. – P. 4678–4684.
82. Pravoto Y. Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: A structural review on the negative Poisson's ratio / Yunan Pravoto // Computational Materials Science. – 2012. – Vol. 58. – P. 140–153.
83. Timoshenko S. P. Theory of Elasticity. 3-rd ed./ Timoshenko S. P., Goodier J. N. – New York: McGraw-Hill. – 1970. – 567 p.
84. Chan N. Indentation resilience of conventional and auxetic foams / Chan N., Evans K. E. // Journal of Cellular Plastics. – 1998. – Vol.34. – P. 231–262.
85. Coenen V. The indentation response of auxetic composite laminates / Coenen V., Alderson K., Myler P., Holmes K. // 6th International Conference Deformation and Fracture of Composites, Manchester, UK. – 2001.
86. Alderson K. L. Novel variation in the microstructure of auxetic microporous ultra high molecular weight polyethylene, Part 2: Mechanical properties/ Alderson K. L., Webber R. S., Evans K. E. // Polymer Engineering and Science. – 2000. – Vol. 40, No.8. – P. 1906–1914.
87. Alderson K. L. Auxetic polyethylene: the effect of a Poisson's ratio on hardness / Alderson K. L., Pickles A. P., Neale, P. J., Evans, K. E.// Acta Metallurgica et Materialia. – 1994. – Vol. 42. – P. 2261–2266.
88. Coenen V. The low velocity impact response of auxetic composite laminates / Coenen V., Alderson K., Myler P., Holmes K // 8th International Conference of Composite Engineering, 2001.
89. Lakes R. S. Making and characterizing negative Poisson's Ratio materials / Lakes R. S., Witt R. // International Journal of Mechanical Engineering Education. – 2001. Vol. 30. – № 1. – P. 50–58.

90. Gibson L. J. Cellular Solids: Structure and Properties / Gibson L. J., Ashby M. F. – London: Cambridge University Press. – 1999. – 510p.
91. Maiti S. K. Fracture toughness of brittle cellular solids / Maiti S.K., Ashby M. F., Gibson L. J. // Scripta Metallurgica. – 1984. – Vol.18, No. 3. – P. 213–217.
92. Gibson L. J. The Mechanics of Two Dimensional Cellular Materials / Gibson L. J., Ashby M. F., Schajer G. S., Robertson C. I. // Proceeding of London Royal Society. – 1982. – Vol. A382. – P. 25–42.
93. Edwards H. I. Fracture Mechanics / Edwards H. I., Wanhill R. J. H. – Australia: Arnold. – 1986.
94. Howell B. Examination of negative Poisson's ratio materials / Howell B., Prendergast P., Hansen L. // Applied Acoustics. – 1994. – Vol. 43, No. 2. – P.141–148.
95. Scarpa F. Dynamic crushing of auxetic open-cell polyurethane foam / Scarpa F, Yates J. R., Ciffo L.G., Patsias S // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2002. – Vol. 216. – P. 1153–1156.
96. Greaves G. N. Poisson's ratio and modern materials / G. N. Greer, R. S. Lakes, T. Rouxel // Nature materials. – 2011. – Vol.10. – P.823–837.
97. Конек Д. А. Материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона (обзор). / Д. А. Конек, К. В. Войцеховский, Ю. М. Плескачевский, С. В. Шилько // Механика композитных материалов и конструкций. – 2004. – Т. 10, № 1. – С. 35–69.
98. Lee J. Application of homogenization FEM analysis to regular and re-entrant honeycomb structures / Lee J, Choi J. B., Choi K. // Journal of Materials Science. – 1996. – Vol. 31. – P. 4105–4110.
99. Theocaris P. S. Negative Poisson's ratio in materials with a star-shaped microstructure. A numerical homogenization approach / Theocaris P. S., Stavroulakis G. E., Panagiotopoulos P. D. // Archive of Applied Mechanics. – 1997. – Vol. 67. – P. 274–286.
100. Lim T. C. Constitutive relationship of a material with unconventional Poisson's ratio / Lim T. C. // Journal of Materials Science Letters. – 2003. – Vol. 22. – P. 1783–1786.
101. Grima J. N. On the potential of connected stars as auxetic systems / Grima J. N., Gatt R., Alderson A., Evans K. E. // Molecular Simulation. – 2005. – Vol. 31. – P. 925–935.
102. Prall D. Properties of a chiral honeycomb with a Poisson's ratio of  $-1$ . / Prall D., Lakes R. S. // International Journal of Mechanical Science. – 1997. – Vol. 39. – P. 305–314.
103. Spadoni A. Global and local linear buckling behavior of a chiral cellular structure / Spadoni A., Ruzzene M., Scarpa F. // Physica Status Solidi. – 2005. – Vol. 242. – P. 695–709.
104. Bornengo D. Evaluation of hexagonal chiral structure for morphing airfoil concept / Bornengo D., Scarpa F., Remillat C. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part G Journal of Aerospace Engineering. – 2005. – Vol. 219. – P. 185–192.

105. Ishibashi Y. A. Microscopic Model of a Negative Poisson's Ratio in Some Crystals / Ishibashi Y., Iwata M. J. // *Journal of the Physical Society of Japan*. – 2000. – Vol. 69. – P. 2702–2703.
106. Vasiliev A. A. Elastic properties of a two-dimensional model of crystals containing particles with rotational degrees of freedom / Vasiliev A. A., Dimitriev S. V., Ishibashi Y., Shinegari T. // *Physical Review*. – 2002. – Vol. 65. Issue 9. – Art. 094101.
107. Grima J. N. Auxetic behavior from rotating squares / Grima J. N., Evans K. E. // *Journal of Materials Science Letters*. – 2000. – Vol. 19. – P. 1563–1565.
108. Grima J. N. Auxetic behavior from rotating triangles / Grima J. N., Evans K. E. // *Journal of Materials Science*. – 2006. – Vol. 41. – P. 3193–3196.
109. Grima J. N. Auxetic behaviour from rotating rigid units / Grima J. N., Alderson A., Evans K. E. // *Physica Status Solidi (b)*. – 2005. – Vol. 242. – P. 561–575.
110. Grima J. N. On the Auxetic Properties of 'Rotating Rectangles' with Different Connectivity / Grima J. N., Gatt R., Alderson A., Evans K. E. // *Journal of The Physical Society of Japan*. – 2005. – Vol. 74. – P. 2866–2867.
111. Grima J. N. Auxetic behaviour from rotating semi-rigid units / Grima J. N., Zammit V., Gatt R., Alderson A., Evans K. E. // *Physica Status Solidi*. – 2007. – Vol. 244. – P. 866–882.
112. Milton G. W. Composite materials with Poisson's ratios close to -1 / Milton G. W. // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 1992. – Vol. 40. – P. 1105–1137.
113. Hine P. J. Negative Poisson's ratios in angle-ply laminates / Hine P. J., Duckett R. A., Ward I. M. // *Journal of Materials Science Letters*. – 1997. – Vol. 16. – P. 541–544.
114. Wojciechowski K. W. Constant thermodynamic tension Monte Carlo studies of elastic properties of a two-dimensional system of hard cyclic hexamers / Wojciechowski K. W. // *Molecular Physics*. – 1987. – Vol. 61. – P. 1247–1258.
115. Wojciechowski K. W. Non-chiral, molecular model of negative Poisson ratio in two dimensions. / Wojciechowski K. W. // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. – 2003. – Vol. 36. – P. 11765–11778.
116. Wojciechowski K. W. Negative Poisson ratio in a twodimensional "isotropic" solid / Wojciechowski K. W., Braka A. C. // *Physical Review A*. – 1989. – Vol. 40. – P. 7222–7225.
117. Wojciechowski K. W. Elastic properties of dense solid phases of hard cyclic pentamers and heptamers in two dimensions / Wojciechowski K. W., Tretiakov K. V., Kowalik M. // *Physical Review E*. – 2003. – Vol. 67. – Art. 036121.
118. Tretiakov K. V. Monte Carlo simulation of two-dimensional hard body systems with extreme values of the Poisson's ratio / Tretiakov K. V., Wojciechowski K. W. // *Physica Status Solidi*. – 2005. – Vol. 242. – P. 730–741.
119. Tretiakov K. V. Poisson's ratio of simple planar isotropic solids in two dimensions / Tretiakov K. V., Wojciechowski K. W. // *Physica Status Solidi*. – 2007. – Vol. 244. – P. 1038–1046.

120. Alderson K. L. Microstructural evolution in the processing of auxetic microporous polymers / Alderson K. L., Webber R. S., Evans K. E. // *Physica Status Solidi (b)*. – 2007. – Vol. 244. – P. 828–841.
121. Кизимчук О. П. Геометричні моделі аукзетик-матеріалів / О. П. Кизимчук, В. Г. Здоренко // *Вісник КНУТД*. – 2013. – № 3. – С. 104–111.
122. Larsen U. D. Design and fabrication of compliant mechanisms and material structures with negative Poisson's ratio / Larsen U. D., Sigmund O., Bouwstra S. // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 1997. – Vol. 6. – P. 99–106.
123. Lakes R. S. Deformation mechanisms in negative Poisson's ratio materials: structural aspects / Lakes R. S. // *Journal of Materials Science*. – 1991. – Vol. 26. – P. 2 287–2292.
124. Gaspar N. Novel Honeycombs with Auxetic Behaviour / Gaspar N., Ren X. J., Smith C.W., Grima J. N., Evans K. E. // *Acta Materialia*. – 2005. – Vol. 53. – P. 2439–2445.
125. Dolla W. J. S. Structural and Drug Diffusion Models of Conventional and Auxetic Drug-eluting Stents / Dolla W. J. S., Fricke B. A., Becker B. R. // *Journal of Medical Devices*. – 2007. – Vol. 1. – P. 47–55.
126. Grima J. N. On the properties of auxetic meta-tetrachiral structures / Grima J. N., Gatt R., Farrugia P. S. // *Physica Status Solid*. – 2008. – Vol. 245. – P. 511–520.
127. Alderson A. Molecular Origin of Auxetic Behavior in Tetrahedral Framework Silicates / Alderson A., Evans K. E. // *Physical Review Letters*. – 2002. – Vol. 89. – Art. 225503.
128. Grima J. N. Auxetic behaviour in non-crystalline materials having star or triangular shaped perforations / Grima J. N., Gatt R., Ellul B., Chetcuti E. // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2010. – Vol. 356. – P.1980–1987.
129. Shilko S. V. Peculiarities of friction in auxetic composites / Shilko S. V., Petrokovets E. M., Pleskachevsky Y. M. // *Physica Status Solidi*. – 2008. – Vol. 245. – P. 591–597.
130. Evans K. E. Auxetic two-dimensional polymer networks. An example of tailoring geometry for specific mechanical properties / Evans K. E., Alderson A., Christian F. R. // *Journal of Chemical Society. Faraday Transactions*. – 1995. – Vol. 91. – P. 2671–2680.
131. Кизимчук О. П. Трикотаж як основа композиційних матеріалів / О. П. Кизимчук, В. Г. Здоренко, І. В. Єрмоленко // *Вісник КНУТД* – 2014. – № 1. – С. 124–131.
132. Wambua P. M. A Review of Preforms for Composites Industry / P. M. Wambua, R. Anandjiwala // *Journal of Industrial Textiles*. – April 2011. – Vol. 40, No.4. – P. 310–333.
133. Soden J. A. Conventional Weaving of Shaped Preforms for Engineering Composites / Soden J. A., Hill B. J // *Composites: Part A*. – 1998. – Vol. 29. – P. 757–762.
134. Truong T. C. Carbon Composites Based on Multi-axial Multi-Ply Stitched Preforms: Part 4 Mechanical Properties of Composites and Damage Observation / Truong T. C., Vettori M., Lomov S., Verpoest I. // *Composites: Part A*. – 2005. – Vol. 36. – P. 1207–1221.

135. Alagirusamy R. Hybrid Yarns and Textile Preforming for Thermoplastic Composites / Alagirusamy R., Fangueiro R., Ogale V., Padaki, N. // *Textile Progress*. – 2006. – Vol. 38(4). – P. 18–37.
136. Aart W. Net-Shape knitting for complex composite performs / Aart W., Van Vuure, Frank K. Ko. // *Textile research journal*. – 2003. – Vol. 73(1). – P. 1–10.
137. Rudd C. D. Liquid moulding technologies / Rudd C. D., Long A. C., Kendall K. N., Mangin C. G. E. – Cambridge, UK: Woodhead Publishing Ltd. – 1997. – 425 p.
138. Sheffer E Knitting novel 3-D solid structures with multiple needle bars / Sheffer E., Dias T. // *Proceeding of UMIST Textile Conferences — Textile Engineered for Performance*. 20–22 April 1998. – Manchester, UK. – 1998.
139. Gibbon J. Knitting in the third dimension / Gibbon J. // *Textile Horizons*. – 1994. – Vol. 14 (6). – P. 22.
140. King J. E. Composite materials in aeroengine gas turbines: Performance potential vs commercial constraint? Keynote Lecture / King J. E., Greaves R. P., Low H. // Presented at the Sixth European Conference Composite Materials. – London, UK, 14–16 May 1996.
141. Gommers B. Analysis of knitted fabric reinforced composites: Part 1. Fiber orientation distribution / B. Gommers, I. Verpoest, P. Van Houtte // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 1998. – Vol. 29A. – P. 1579–1588.
142. Ramakrishna S. Application of textile and textile composite concepts for biomaterials development / Ramakrishna S., Ramaswamy S., Teoh S. H., Hastings G. W., Tan C. T. // *Proceeding of International Conference Texcomp*. – 3–27 January 1996.
143. Savci S. A Study of the Deformation of Weft-knit Preforms for Advanced Composite Structures Part 1: Dry Preform Properties / Savci S., Curiskis J. I., Pailthorpe M. T // *Composite Science and Technology*. – 2000. – Vol. 60. – P. 1931–1942.
144. Mayer J. Knitted Fibre Reinforced Composites / Mayer J., Ha S.W., Ruffiex K., Tognin R., Kock B., Wintermantel E. // *Automotive Engineering*. – 1994. – August. – P. 21–24.
145. Raz S. Warp knitting production / S. Raz. – *Melliand Textilberichte*. – 1987. – 548 p.
146. Leong K. H. The potential of knitting for engineering composites – a review / K. H. Leong, S. Ramakrishna, Z. M. Huang, G. A. Bibo // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2000. – Vol. 31. – P. 197–220.
147. Hong H. Theoretical Analysis of Load-extension Properties of Plain Weft Knits Made from High Performance Yarns for Composite Reinforcement / Hong H., DeAraujo M. D., Fangueiro R., Ciobanu O. // *Textile research Journal*. 2002. – Vol. 72 (11). – P. 991–995.
148. Hearle J. W. S. Textile for composites – Part I: The general scene / Hearle J. W. S. // *Textile Horizons*. – 1994. – Vol. 14 (6). – P. 12.
149. Hohfeld J. Consolidation of thick, close, circular, knitted glass fibre textiles with epoxy resin into flat panels, tubes and T-profiles / Hohfeld J., Drew M. J.,

- Kaldenhoff R. // Proceeding of International Conference on Flow Processes in Composite Materials, 7–9 July 1994, Ireland. – 1994. – P. 120–142.
150. Taylor E. Bring in the reinforcements / Taylor E. // *Advanced Composite Engineering*. – 1990. – January. – P. 17.
  151. Rudd C. D. Mechanical properties of weft knit glass fibre/polyester laminates / Rudd C. D., Owen M. J., Middleton V. // *Composite Science and Technology*. – 1990. – Vol. 39. Issue 3. – P. 261–277.
  152. Chou S. The fatigue properties of weft-knit fabric reinforced epoxy resin composites / Chou S., Chen H.-C., Lai C.-C. // *Composite Science and Technology*. – 1992. – Vol. 45. Issue 4. – P. 283–291.
  153. Leong K. H. An investigation of the mechanical performance of Milano-rib weft knitted glass/epoxy composites / Leong K. H., Falzon P. J., Bannister M. K., Herszberg I. // *Composite Science and Technology*. – 1998. – Vol. 58. Issue 2. – P. 239–251.
  154. Herszberg I. Bearing strength of glass/epoxy composites manufactured from weft-knitted E-glass fabric / Herszberg I., Falzon P. J., Leong K. H., Bannister M. K. // *Proceeding of 1st Australasian Congress on Applied Mechanics, Melbourne, Australia, 21–23 February 1996*. – The Institution of Engineers, Australia. – 1996. – Vol. 1. – P. 279–84.
  155. Ramakrishna S. Energy absorption capability of epoxy composite tubes with knitted carbon fibre fabric reinforcement / Ramakrishna S., Hull D. // *Composite Science and Technology*. – 1993. – Vol. 49. Issue 4. – P. 349–356.
  156. Wu W. L. Mechanical properties of warp-knitted fabric-reinforced composites / Wu W. L., Kotaki M., Fujita A., Hamada H., Inoda M., Maekawa Z. // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 1993. – Vol. 12. Issue 10. – P. 1096–1110.
  157. Ramakrishna S. Tensile behaviour of knitted carbon-fibre fabric/epoxy laminates–Part I: experimental / Ramakrishna S., Hull D. // *Composite Science and Technology*. – 1994. – Vol. 50. Issue 2. – P. 237–247.
  158. Mouritz A. Review of applications for advanced three dimensional fibre textile composites / Mouritz A., Bannister M., Falson P., Leong K. // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 1999. – Vol. 30. – P. 1445–1461.
  159. Wu W. L. Design of knitted fabric reinforced composites / Wu W. L., Hamada H., Kotaki M., Maekawa Z. // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 1995. – Vol. 14. Issue 10. – P. 1032–1042.
  160. Leong K. H. The effects of deforming knitted glass preforms on the basic composite mechanical properties / Leong K. H., Nguyen M., Herszberg I. // *Journal of Materials Science*. – 1999. – Vol. 34, Issue 10. – P. 2377–2387.
  161. Ruan X. Failure behavior of knitted fabric composites / Ruan X., Chou T-W. // *Journal of Composite Materials*. – 1998. – Vol. 32. Issue 3. – P. 198–222.
  162. Rios C. R. The relationship between fibre architecture and cracking damage in a knitted fabric reinforced composite / Rios C. R., Ogin S. L., Lekakou C., Leong KH // *Proceeding of 12th International Conference on Composite Materials*. – Paris, France, 5–9 July 1999. – P. 1035.
  163. Haan J. Notched strength of knitted fabric composites / Haan J., Kameo K., Nakai A., Fujita A., Mayer J., Wintermantel E., Hamada H. // *Proceeding of 11th*

- International Conference on Composite Materials. – Gold Coast, Australia, 14–18 July 1997. – P. 219–26.
164. Mouritz A. P. Mode I interlaminar fracture toughness properties of advanced textile fibreglass composites / Mouritz A. P., Bains C., Herszberg I. // *Composites Part A*. – 1999. – Vol. 30, Issue 7. – P. 859–870.
  165. Reber R. Failure behavior of weft-knitted carbon fibre reinforced PEEK / Reber R., de Haan J., Petitmermet M., Mayer J., Wintermantel E. // *Proceeding of First Asia-Australasian Conference on Composite Materials*. – Osaka, Japan. 1998. – Vol. 1. – P. 407–14.
  166. Karger-Kocsis J. Fracture behaviour and damage growth in knitted carbon fibre fabric reinforced polyethylmethacrylate / Karger-Kocsis J., Cziga'ny T., Mayer J. // *Plastic, Rubber and Composite Processing and Applications*. – 1996. – Vol. 25, Issue 3. – P. 109.
  167. Hull D. Damage mechanism characterisation in composite damage tolerance investigations / Hull D., Shi Y. B. // *Composite Structures*. – 1993. – Vol. 23, Issue 2. – P. 99–120.
  168. Ko F. K. Weft insertion warp knit for hybrid composites. / Ko F. K., Krauland K., Scardino F. // *Proceedings of ICCM-IV*. – Tokyo, Japan. 1982. – P. 1169–1176.
  169. Gommers B. Analysis of knitted fabric reinforced composites: Part II. Stiffness and strength / B. Gommers, I. Verpoest, P. Van Houtte // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 1998. – Vol. 29A. – P. 1589–1601.
  170. Sarlin J. A new type of knitted reinforcing fabrics and its application / Sarlin J., Pentti P., Jarvela // *Proceeding of Fourth European Conference in Composite Materials*. – 1990. – P. 621–23.
  171. Andersson C-H. Weft insert co-knitting and lost yarn preforming, new fabric based techniques for composite materials preforming. Reprint / Andersson C.-H., Eng K. // *Presented at Forum on New Materials*. – Florence. – 1994.
  172. Anand S. Biaxial reinforced multilayer weft knitting / Anand S. // *Proceeding of International Conference on Textile Composites Texcomp – 3*. – Aachen, Germany. 1996. – 2 p.
  173. Offermann P. Biaxial reinforced knitted fabrics for composite reinforcement. Promotional Leaflet / Offermann P. – T. U. – Dresden, Germany. – 1997.
  174. Gohl EPG. Textile for modern living / Gohl EPG, Vilensky LD. – Cheshire: Longman. – 1994. – 418 p.
  175. Stumpf H. New thermoplastic composite preforms based on split-film warp-knitting / Stumpf H., Mader E., Baeten S., Pisanikovski T., Zah W., Eng K., Andersson C. H., Verpoest I., Schulte K. // *Composites Part A*. – 1998. – Vol. 29, Issue 12. – P. 1511–1523.
  176. Baeten S. New low cost textile preforms and short cycle processing techniques for thermoplastic composites / Baeten S., Verpoest I., Stumpf H., Schulte K., Zah W., Mader E., Pisanikovski T., Andersson C-H., Eng K. // *Proceeding of 11th International Conference on Composite Materials*. – Gold Coast, Australia, 14–18 July 1997. – Vol. 5. – P. 227–237.
  177. Stumpf H. New thermoplastic composite preforms based on split-film warp-knitting / Stumpf H., Mader E., Baeten S., Pisanikovski T., Zah W., Eng K.,



- Anderson C-H., Verpoest I., Schulte K. // Proceeding of International Conference on Composite Materials Texcomp – 3. – Aachen, Germany. 1996. – 20/1.
178. Ko F. K. Multiaxial Warp Knit for Advanced Composites, / Ko F. K., Kutz J. // Proceedings of the Fourth Annual Conference on Advanced Composites, ASM International. – 1988. – P. 367–370.
179. Wagener G. Stitch-bonded non-crimp products — new possibilities for the reinforcement of composites / Wagener G. // Proceedings of Internationales Techtexsil-Symposium. – 1993. – 3.2, Lecture 325. – P. 1.
180. Anand S. Warp knitted structures in composites / Anand S. // Proceedings of Seventh European Conference in Composite Materials. – London, UK, 14–16 May 1996 – Vol. 2. – P. 407–413.
181. Bischoff Th. Textile reinforced concrete facade elements—an investigation to optimize concrete composite technologies / Bischoff Th., Wulfhorst B., Franzke G., Offermann P., Bartl A.-M., Fuchs H., Hempel R., Curbach M., Pachow U., Weiser W. // Proceedings of 43rd International SAMPE Symposium. – Anaheim, CA, USA, May 31–June 4, 1998. – Vol. 43. – P. 1790.
182. Franzke G. Multi-axial warp knitted layers – a textile for reinforcing concrete / Franzke G., Offermann P., Bischoff T., Wulfhorst B. // Proceedings of 11<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials. – Gold Coast, Australia, 14–18 July 1997. – Vol. 2. – P. 870–880.
183. Kamiya R. Some recent advances in the fabrication and design of three-dimensional textile performs: a review / Ryuta Kamiya, Bryan A. Cheeseman, Peter Popper, Tsu-Wei Chou // Composites science and technology. – 2000. – Vol. 60. – P. 33–47.
184. Dexter H. B. Mechanical properties and damage tolerance of multiaxial warp-knit composites / Dexter H. B., Hasko G. H. // Composite Science and Technology. – 1996. – Vol. 56. Issue 3. – P. 367–380.
185. Horsting K. Properties of components made of reinforcing layers / Ho`rsting K., Wulfhorst B., Kaldenhoff R., Offermann P., Franzke G., Diestel O., Engelmann U. // Proceeding of Internationales Techtexsil-Symposium. – 1993. – 3.1, Lecture 318. – p. 1.
186. Bibo GA. Carbon-fibre non-crimp fabric laminates for cost-effective damage-tolerant structures / Bibo G. A., Hogg P. J., Backhouse R., Mills A. // Composites science and technology. – 1998. – Vol. 58. Issue 1. – P. 129–143.
187. Rosant O. Warp knit laminates for stampable sandwich performs / O. Rosant, P. E. Bourban, J. A. E. Manson // Composite science and technology. – 2001. – Vol. 61. – P. 145–156.
188. Phillips D. Optimising the mechanical properties of 3D-knitted sandwich structures / Phillips D., Verpoest I., van Raemdonck J. // Proceeding of 11<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials. – Gold Coast, Australia, 14–18 July 1997. – Vol. 5. – P. 211–218.
189. Knitted fabrics have better drape in sandwich structures / Editor // Advanced Composites Bulletin. – October 1995. – P. 2.
190. Davies S. Textile for composites / Davies S. // Proceeding of Tech Textile International. – December 1996/January 1997. – P. 22–24.

191. Bizer T. Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing / Bizer T. – London: Chapman and Hall, 1997. – 233 p.
192. Janicka J. Net-Shape knitted fabric as carrying elements in technical composite products / Jolanta Janicka, Romualda Kozminska, Mirosława Majewska // Autex research Journal. – 2003–Vol.3, No.3.
193. Chen X. Design, manufacture and experimental analysis of 3D honeycomb textile composites Part 1: Design and manufacture / Xiaogang Chen, Ying Sun, Xiaozhou Gong // Textile research journal. – 2008. – Vol. 78. Issue 9. – P. 771–781.
194. Zic I. Mechanical Properties of Composite Panels Reinforced with Integrally Woven 3D Fabric. / Zic I., Ansell M. P., Newton A., Price R.W. // Journal of Textile Institute. – 1990. – Vol. 81. – P. 461–479.
195. Tan X. Parameters Affecting Energy Absorption and Deformation in Textile Composite Cellular Structures / Chen X. // Materials & Design. – 2005. – Vol. 26, Issue 5. – P. 424–438.
196. Masters I. G. Models for the elastic deformation of honeycombs / I. G. Masters, K. E. Evans // Composite Structures. – 1996. – Vol. 35. – P. 403–422.
197. Reid S. R. Dynamic Compression of Cellular Structures and Material / Reid S. R., Reddy T. Y., Peng C. // Structural Crashworthiness and Failure / Jones N., Wiezbicki T. – London: Elsevier Applied Science, 1993. – P. 295–340.
198. Ruan D. In-plane Dynamic Crashing of Honeycombs – a Finite Element Study / Ruan D., Liu G., Wang B., Yu T. X. // International Journal of Impact Engineering. – 2003. – Vol. 28. – P. 161–182.
199. Courtney H. H. Mechanical Behaviour of Materials, 2<sup>nd</sup> ed. – Boston: McGraw-Hill, 2011. – 650 p.
200. Venugopal M. Development of auxetic textile / M. Venugopal, A. Peer // The Indian Textile Journal. – 2010, April. – P. 47–55.
201. Alderson K. Positive development in negative materials / K. Alderson // Materials World. – December, 2007. – Vol.15, Issue 12. – P. 32–34.
202. Patent number KR20060009826. Snapping fabrics / Hook P. B., Evans K. E., Hannington J. P., Hartmann-Thompson C., Bunce T. R. – 2006.
203. Sloan M. R. The helical auxetic yarn – A novel structure for composites and textiles; geometry, manufacture and mechanical properties / M. R. Sloan, J. R. Wright, K. E. Evans // Mechanics of Materials. – 2011. – Vol. 43. – P. 376–486.
204. Wright J. R. On the design and characterisation of low-stiffness auxetic yarns and fabrics / Julian R., Wright, Michael K. Burns, Edward James, Michael R. Sloan, Kenneth E. Evans // Textile Research Journal. – May 2012. – Vol. 82, Issue 7. – P. 645–654.
205. Wright J. R. Tensile properties of helical auxetic structures: a numerical study / Wright J. R., Sloan M. R., Evans K. E. // Journal of Applied Physics – 2010. – Vol.108, n. 4 – art. p. 044905. (8 pp.)
206. Shanahan M. E. R. Elastic behaviour of a stretched woven cloth / M. E. R. Shanahan, N. Piccirelli // Composites, Part A. – June 2008. – Vol. 39, Issue 6. – P. 1059–1064.

207. Miller W. The manufacture and characterisation of a novel, low modulus, negative Poisson's ratio composite / W. Miller, P. B. Hook, C. W. Smith, X. Wang, K. E. Evans // *Composites Science and Technology*. – April 2009. – Vol. 69, n.5. – P. 651–655.
208. Patent Number 8002879 B2, US. Uses of auxetic fibres / P. Hook. – Aug. 23, 2011.
209. Alderson A. An Auxetic Filter: A Tuneable Filter Displaying Enhanced Size Selectivity or Defouling Properties / A. Alderson, J. Rasburn, S. Ameer-Beg, P. G. Mullarkey, W. Perrie, K. E. Evans // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. – March 2000. – Vol. 39, Issue 3. – P. 654–665.
210. Patent Number 20070031667 A1, US., Composite materials and structures / P. B. Hook, K. E. Evans, J. P. Hannington, C. Hartmann-Thompson, T. R. Bunce. – Feb 8, 2007.
211. Patent Number 20110039088 A1, US. Moisture sensitive auxetic material / W. Lee, S. Lee, C. Koh, J. Heo. – Feb. 17, 2011.
212. Ge Z. Innovative three-dimensional fabric structure with negative Poisson's ratio for composite reinforcement / Zhaoyang Ge, Hong Hu // *Textile Research Journal*. – March 2013. – Vol. 83. – P. 543–550.
213. Hu H. Development of three-dimensional auxetic textile structure for composite reinforcement / Hong Hu, Zhaoyang Ge, Bingang Xu // 16<sup>th</sup> International Conference on Composite Structure ISSC 16. – Porto. Portugal. – 28–30 June 2011.
214. Ugbolue S. The formation and performance of auxetic textiles. Part I: theoretical and technical considerations / Samuel C. Ugbolue, Yong K. Kim, Steven B. Warner, Qinguo Fan, Chen-Lu Yang, Olena Kyzymchuk, Yani Feng // *Journal of the Textile Institute*, 1754–2340, 2010. – Volume 101, Issue 7. – P. 660 – 667.
215. Кизимчук Е. Строение и проектирование основовязанных ахетис-полотен / Елена Кизимчук, Сэмюэль Угболу, Ким Йонг, Стивен Варнер, Чинко Фан, Ченг Янг, Йани Фенг // *Технический текстиль*. – 2008. – № 17.
216. Ugbolue S. The formation and performance of auxetic textiles. Part II: geometry and structural properties / Samuel C. Ugbolue, Yong K. Kim, Steven B. Warner, Qinguo Fan, Chen-Lu Yang, Olena Kyzymchuk, Yani Feng, John Lord // *Journal of the Textile Institute*, 2011. – Volume 102, Issue 5. – P. 424–433.
217. Ugbolue S. Engineered Warp Knit Auxetic Fabrics / Samuel C. Ugbolue, Yong K. Kim, Steven B. Warner, Qinguo Fan, Chen-Lu Yang, Olena Kyzymchuk, Yani Feng, John Lord // *Journal of Textile Science & Engineering*. – 2012. – Volume 2, Issue 1. – DOI:10.4172/2165-8064.1000e103.
218. Patent Number 2008/0011021 A1, US. Fabrics having knit structures exhibiting auxetic properties and garments formed thereby / M. Starbuck, A. S. C. Anand, N. Ravirala, K. L. Alderson, A. Alderson. – 2008.
219. Patent Number 2012/0129416 A1, US. Auxetic knitted fabric / S. Anand, D. Skertchly, A. Alderson and K. Alderson. – 2012.
220. Alderson K. Auxetic warp knit textile structure / K. Alderson, A. Alderson, S. Anand, V. Simkins, S. Nazare, N. Ravirala. // *Physica Status Solidi (b)*. – 2012. – Vol. 249. – P. 1322–1329.

221. Wang Z. Deformation behaviors of three-dimensional auxetic spacer fabric / Z. Wang, H. Hu, X. Xiao // *Textile research journal*. – 2014. – P. 1–12.
222. Liu Y. Negative Poisson's ratio weft knitted fabrics / Yanping Liu, Hong Hu, Jimmy K. C. Lam, Su Liu // *Textile Research Journal*. – 2010. – Vol. 80. – P. 856–863.
223. Rant D. Auxetic Textiles. (Review) / Rant Darja, Rijavec Tatjana, Pavko-Cuden Alenka // *Acta Chimica Slovenica*. – 2013, Vol.60. – P.715–723.
224. Buhai C. Development of auxetic weft knitted fabrics / C. Buhai, M. Blaga, R. Ciobanu, C. Budulan // *Proceeding of 46th International Congress IFKT*. – 6–8 September 2012, Sinaia, Romania. – 2012. – P.758–763.
225. Rant D. Foldable links-links knitted structures with auxetic potential / Rant Darja, Pavko-Cuden Alenka // *Tecstilies*. – 2013. – Vol. 56., Issue 3. – P. 190–197.
226. Blaga M. Production of foldable weft knitted structures with auxetic potential on electronic flat knitting machines / Mirela Blaga, Alenka Pavco-Cuden //
227. Hu H. Development of auxetic fabrics using flat knitting technology / H. Hu, Z. Wang, S. Liu // *Textile Research Journal*. – 2011. – Vol. 81. – P. 1493–1502.
228. Rant D. Bioinspired multifunctional weft knitted auxetic structures / D. Rant, A. Pavko-Cuden, V. Bukosek, M. Gorenssek // *Third International Conference on Multifunctional, Hybrid and Nanomaterials HYMA 2013*. – Sorrento, Italy. – 3–7 March 2013.
229. Rangaswamy Venkatraj, Net Fabrics / Rangaswamy Venkatraj // *The Indian Textile Journal*. – 1996. – Sept. – P. 4– 51.
230. Ермоленко И. В. Форма и размеры ячеек в трикотаже филейного переплетения / И. В. Ермоленко, Е. П. Кизимчук // *Текстиль и облекло*. – 2014. – № 1 – С. 2–8.
231. Шалов И. И. Технология трикотажа / И. И. Шалов, А. С. Далидович, Л. А. Кудрявин. – М.: Легпромбытиздат. – 1986. – 376 с.
232. Пат. № 4148 Україна U 7 D 04 B 21/10. Сітчастий оснований'язаний трикотаж. / Рукавцев Г. І., Бендік Н. І., Алексеева Н. В. та інші. – № 2004020974; Заявлено 11.02.2004; Опубл. 17.01.2005, Бюл. № 1, 2005 р. – 2 с.
233. Spencer D. Knitting technology a comprehensive handbook and practical guide. Third edition / David J. Spencer – UK: Woodhead publishing limited. – 2001. – 386 p.
234. Ермоленко І. В. Створення чарунок гексагональної форми в трикотажі філейного переплетення / І. В. Ермоленко, О. П. Кизимчук // *Вісник КНУТД*. – 2011. – №1. – С. 97–100.
235. Моисеенко Ф. А. Нормализация процесса вязания на основовязальных машинах / Ф. А. Моисеенко // – М.: Легкая индустрия. – 1978. – 200 с.
236. Кизимчук О. П. Параметры структуры трикотажу філейних переплетень // *Вісник КНУТД* / О. П. Кизимчук. – 2008. – № 3. – С. 58–62.
237. Ермоленко І. В. Розробка технології виготовлення оснований'язаного трикотажу з чарунками гексагональної форми: авт-т дисертації на здобуття наук. ст. канд. техн. н. – К.: КНУТД. – 2015. – 20 с.

238. Єрмоленко І. В. Перспективи розвитку основов'язального обладнання для виготовлення тасьм / І. В. Єрмоленко, О. П. Кизимчук // Проблеми легкої і текстильної промисловості України. – 2012. – № 2 (20). – С. 162–167.
239. Кизимчук О. П. Зміна розмірів чарунки трикотажу комбінованого основов'язаного переплетення залежно від варіанту розташування утокової нитки / О. П. Кизимчук, В. В. Савченко // Вісник КНУТД. – 2010. – № 1 – С. 106–111.
240. Кизимчук О. П. Параметри структури трикотажу комбінованого основов'язаного переплетення / О. П. Кизимчук // Вісник КНУТД. – 2009. – № 5 – С. 112–118.
241. Розробити шляхи технологічної трансформації трикотажної промисловості України та банк світових досягнень галузі // Звіт про НДР рег. № 0109U002478 (заключний). – К.: КНУТД. – 2010.
242. Lira C. Transverse elastic shear of multi reentrant auxetic honeycombs / Lira C., Innocenti P., Scarpa F. // *Composite Structures*. – 2009. – Vol 90. – P. 314–322.
243. Bezazi A novel centresymmetric honeycomb composite structure. / A. Bezazi, F. Scarpa, C. Remillat. // *Composite Structures*. – 2005. – Vol. 71. – P. 356–364.
244. Warren T. L. Negative Poisson ratio in a transversely isotropic foam structure / Warren T. L. // *Journal of Applied Physics*. – 1990. – Vol. 67. – P. 7591.
245. Wei G. Negative and conventional Poisson's ratios of polymeric networks with special microstructures / Wei G. // *Journal of Chemical Physics*. – 1992. – Vol. 96. – P. 3226.
246. Jones J. L. Elasticity of rigid networks / Jones J. L., Ball R. C. // *Macromolecules*. – 1991. – Vol. 24. – P. 6369.
247. Zhang J. Buckling of honeycombs under in-plane biaxial stresses / Zhang J., Ashby M. F. // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 1992. – Vol. 34, Issue 6. – P. 491–509.
248. Zhu H.X. The in-plane non-linear compression of regular honeycombs / Zhu H.X., Mills N.J. // *International Journal of Solids Structures*. – 2000. – Vol. 37. – P. 1931–1949.
249. Yang D. U. Geometric effect on micropolar elastic honeycomb structure with negative Poisson's ratio using finite element method / Yang D. U., Lee S., Huang F.Y. // *Finite Elements in Analysis and Design*. – 2003. – Vol. 39. – P. 187–205.
250. Кизимчук О. П. Теоретичний аналіз коефіцієнту Пуассона стільникових структур / О. П. Кизимчук // Вісник Хмельницького національного університету – 2014. – № 1. – С. 251–255.
251. Feng Y. The Formation and Performance of Auxetic Warp Knit Structures. MS thesis / Yani Feng. – UmassD, 2009.
252. Ugbohue S. The Structural Properties of Warp Knit Auxetic Fabrics / Samuel C. Ugbohue, Olena Kyzymchuk, Yong K. Kim, Steven B. Warne, Qinguo Fan, Chen-Lu Yang, Yani Feng and John Lord // 45th International Congress of International Federation of Knitting Technologists. Ljubljana, Slovenia, 27–29 May 2010. – Symposium proceeding – P. 984–993.

253. Нешатаев А. А. Формирование рисунков в основовязаном трикотаже // А. А. Нешатаев. – М.: Легкая индустрия. – 1968. – 232 с.
254. Кизимчук О. П. Можливі варіанти закріплення повздовжніх утокових ниток в структурі основовязаного трикотажу філейно-утокового переплетення. Повідомлення 1. При розташуванні вушкових гребінок з утоковими нитками між гребінками з ґрунтовими нитками / О. П. Кизимчук, Т. О. Мещерська // Вісник КНУТД. – 2010. – № 3 – С. 144–148.
255. Кизимчук О. П. Можливі варіанти закріплення повздовжніх утокових ниток в структурі основовязаного трикотажу філейно-утокового переплетення. Повідомлення 2. При розташуванні вушкових гребінок з утоковими нитками за гребінками з ґрунтовими нитками / О. П. Кизимчук, Т. О. Мещерська // Вісник КНУТД. – 2010. – № 4 – С. 103–107.
256. Allison G. L. Warp-knitting calculation made easy. / Allison G. L. // Skinner's Silk Rayon Record/ – 1958. – vol. 32. – P. 281–283.
257. Grosberg P. Geometry of warp-knitted fabric. / Grosberg P. // Journal of Textile Institute. – 1960. – Vol. 51. – P. T39–T48.
258. Grosberg P. The geometrical properties of simple warp-knit fabric / Grosberg P. // Journal of Textile Institute. – 1964. – vol. 55. – P. 118–130.
259. Shinn W. E. The geometry of warp-knit structures / Shinn W. A., El-Araf M. // Knit Outerw Times. – 1966. – Vol. 35, No 43. – P. 24–27.
260. Goktepe O. A. 3D-loop model for visual simulation of warp-knitted structures. / Goktepe O., Harlock S. C. // Journal of the Textile Institute. – 2002. – vol. 93, part 1, No. 1. – P. 11–28.
261. Dabiryan H. Analysis of warp knitted fabric structure. Part 1: a 3D straight model for warp knitted fabrics./ Dabiryan H., Jeddi A. A. // Journal of the Textile Institute. – 2011. – vol. 102, No. 12. – P. 1065–1074.
262. Ермоленко И. В. Длина нити в петле филейного переплетения / И. В. Ермоленко, Е. П. Кизимчук // Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности. – 2013. – № 3. – С. 3–7.
263. Kyzymchuk O. Loop length model of fillet structure / Olena Kyzymchuk, Inna Ermolenko // The 47<sup>th</sup> International Federation of Knitting Technologists Congress (IFKT 2014), 25–26 September 2014, Izmir, Turkey. – Book of proceedings – P. 145–150.
264. Kyzymchuk O. The effect of positioning of inlaid yarns in fillet warp knit structures / Olena Kyzymchuk, Samuel C. Ugbole // The 46<sup>th</sup> International Federation of Knitting Technologists Congress (IFKT 2012), 6–8 September 2012, Sinaia, Romania. – Book of proceedings – P. 764–769.
265. Jacob Muller AG: Systems and Solution for Narrow Fabrics. Офіційний портал фірми. Режим доступу: [www.mueller-frick.com/en/products-applications/machines-and-software/warp-crochet-knitting-systems/](http://www.mueller-frick.com/en/products-applications/machines-and-software/warp-crochet-knitting-systems/)
266. ГОСТ 8846-87. Полотна и изделия трикотажные. Методы определения линейных размеров, перекоса, числа петельных рядов и петельных столбиков и длины нити в петле. – М.: Изд-во стандартов, 1988.
267. ГОСТ 12023-66. Материалы текстильные. Полотна. Методы определения толщины. – М.: Изд-во стандартов, 1989.

268. ГОСТ 8845–87. Полотна и изделия трикотажные. Методы определения влажности, массы и поверхностной плотности.
269. ГОСТ 8847–85. Полотна трикотажные. Методы определения разрывных характеристик и характеристик при нагрузках, меньше разрывных. – М.: Изд-во стандартов, 1986.
270. ГОСТ 16218.9-89. Изделия текстильно-галантерейные. Методы испытания при растяжении. – М.: Изд-во стандартов, 1989.
271. Кизимчук О. П. Параметри структури оснований'язаного трикотажу філейно-утокового переплетення з різним розташуванням поздовжнього утоку / О. П. Кизимчук, Т. О. Мещерська, С. Угболу // Вісник КНУТД. – 2010. – № 5 – С. 335–342.
272. Кобляков А. И. Структура и механические свойства трикотажа / А. И. Кобляков – М.: Легкая индустрия. – 1973. – 240 с.
273. Кизимчук О. П. Механічні властивості оснований'язаного трикотажу філейно-утокового переплетення з різним розташуванням поздовжнього утоку / О. П. Кизимчук, М. О. Коваленко, С. Ч. Угболу // Вісник КНУТД. – 2011. – № 3 – С. 91–97.
274. Кизимчук О. П. Параметри структури трикотажу філейно-утокового переплетення / О. П. Кизимчук // Матеріали міжнародної конференції «Новітні технології в текстильній промисловості», 9–11 жовтня 2012 року, ХНУ, Хмельницький. – С.118–120.
275. Кизимчук О. П. Параметри структури оснований'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення з обвивочним утком / О. П. Кизимчук // Вісник КНУТД. – 2012. – № 3 – С. 158–163.
276. Кизимчук О. П. Дослідження структури оснований'язаного трикотажу з повздовжнім утком / О. П. Кизимчук // Вісник КНУТД. – 2012. – № 5. – С. 79–85.
277. Кизимчук О. П. Структура оснований'язаного трикотажу з високорозтяжним повздовжнім утком / О. П. Кизимчук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 6. – С. 88–92.
278. Кизимчук О. П. Властивості оснований'язаного трикотажу утоково-філейного переплетення / О. П. Кизимчук, О. М. Недогибченко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 3. – С. 141–145.
279. Kuzymchuk O. Breaking characteristics of warp knit net fabric / Olena Kuzymchuk, Inna Ermolenko // *Vlakna a textile* – 2013. – № 3. – P. 10–14.
280. Кизимчук О. П. Механічні властивості оснований'язаного трикотажу з високо розтяжним повздовжнім утком / О. П. Кизимчук, М. С. Яременко // Вісник КНУТД. – 2012. – № 6. – С. 127–134.
281. Кизимчук О. П. Механічні властивості оснований'язаного трикотажу з обвивочним утком / О. П. Кизимчук, Ю. В. Мельничук, А. В. Волохатюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2013. – № 4. – С. 114–118.
282. Kuzymchuk O. Stretch characteristics of fillet warp knit with elastomeric in-layed yarn / Olena Kuzymchuk // 5<sup>th</sup> international scientific – professional conference TEXTILE SCIENCE AND ECONOMY, 05–06<sup>th</sup> November 2013, Zrenjanin, Serbia. – Book of proceedings. – P. 18–23.

Наукове видання

Олена Павлівна Кизимчук

Текстильні матеріали  
з від'ємним коефіцієнтом Пуассона

Монографія

Підписано до друку: .07.2015 Формат  
60x84/16. Папір офсетний Ум.-друк.  
арк. 14,42. Наклад 300 прим.

Видавництво «КАФЕДРА»  
04136, м. Київ, вул. Маршала Гречка 13, оф. 117  
e-mail: kafedra.druk@gmail.com  
www.kafedra.in.ua  
тел./факс: (044) 501-18-30, (067) 442-98-78

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготівників  
і розповсюджувачів видавничої продукції  
Серія ДК № 4175 від 20.10.2011 р.

Друкарня «Гордон»  
03179, м. Київ, вул. Котельникова, 95  
Тел./факс (044) 501-35-69  
Свідоцтво про державну реєстрацію  
ДК № 1422 від 08.07.2003