

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. ОЛЕСЯ
ГОНЧАРА



Т.А. Манько, В.І. Ліповський
«КОМПОЗИТИ: МЕХАНІКА АРМОВАНИХ
МАТЕРІАЛІВ»
НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Дніпро

2024

УДК 621.763:539.3](075.8)
М24

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
(від 16 травня 2024 року протокол № 10)*

Рецензенти:

Санін А.Ф. - доктор технічних наук, професор Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, лауреат Державної премії України;
Козіс К.В. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Державного конструкторського бюро «Південне» імені М.К. Янгеля

Манько Т.А. Композити: механіка армованих матеріалів:
електронний навчальний посібник / Манько Т.А., Ліповський В.І. -
Дніпро: ДНУ ім. О.Гончара, 2024. 136с.

Навчальний посібник містить коротко викладений теоретичний матеріал з загальної характеристики композитів, опису фізичного їх моделювання та теорій міцності конструкцій. Окремо розглянуті не тільки існуючі теорії міцності, а також огляд сучасного стану цього питання, дані практичні рекомендації. Представлена нова галузь матеріалознавства - це "розумні" або "інтелектуальні" композити (англ. - "smart materials"). Вони створюють керовану зміну або регулювання механічного стану (конструкційних властивостей, геометрії, положення, швидкості, прискорення, вібрацій і демпфірування при впливі механічних сил, тиску, температури і інших чинників), поглинання і відбиття електромагнітного випромінювання будь-якого діапазону і інше. Наведені приклади використання таких матеріалів у ракетно-космічній техніці. Теоретичний матеріал базується на розгорнутому огляді використаної літератури.

Посібник призначено для здобувачів освіти першого (бакалаврського) або другого(магістерського) рівня освітньо-професійних програм «Галузеве машинобудування» та «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» за спеціальностями 133 та 134 Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Начальний посібник «Композити: механіка армованих матеріалів» буде корисний не тільки студентам, магістрам, аспірантам, а і працюючим спеціалістам.

УДК 621.763:539.3](075.8)

© Т.А. Манько, В.І. Ліповський, 2024
© ДНУ ім. Олеся Горчара, 2024

ЗМІСТ

| | | |
|----------|---|----|
| | Вступ | 5 |
| 1 | Загальні поняття про полімерні композиційні матеріали | 8 |
| | 1.1 Методи отверднення | 9 |
| | 1.1.1 Полімеризація | 9 |
| | 1.1.2 Поліконденсація | 11 |
| | 1.1.3 Вулканізація | 12 |
| | 1.1.4 Карбонізація і графітізація | 13 |
| | 1.2 Методи нагрівання під час отверднення та отверднення з використанням фізичних полів | 16 |
| | 1.2.1 Електричні печі і нагрівники | 16 |
| | 1.2.2 Інфрачервоне нагрівання | 19 |
| | 1.2.3 Отверднення в магнітних полях | 25 |
| | 1.2.4 Отверднення з електронним опроміненням | 32 |
| | 1.2.5 Отверднення із застосуванням надвисоких частот | 35 |
| | Питання до першого розділу | 38 |
| 2 | Полімерні композиційні матеріали | 41 |
| | 2.1 Сполучні | 42 |
| | 2.2 Армуючі матеріали | 45 |
| | 2.3 Дисперсні наповнювачі | 47 |
| | Питання до другого розділу | 48 |
| 3 | Армуючі волокнисті наповнювачі. Основні види та особливості отримання | 51 |
| | 3.1 Особливості армуючих матеріалів | 51 |
| | 3.2 Схеми армування | 51 |
| | 3.3 Типи армуючих наповнювачів | 52 |
| | 3.4 Наповнення армуючими волокнами/філаментами | 54 |
| | Питання до третього розділу | 57 |
| 4 | Інтелектуальні матеріали | 58 |
| | 4.1 Поняття про інтелектуальні матеріали | 58 |
| | 4.2 П'єзоелектрики | 61 |
| | 4.3 Сплави з ефектом пам'яті | 70 |
| | 4.4 Самовідтворюванні матеріали | 75 |
| | 4.5 Магнітостриктики | 77 |
| | 4.6 Інтелектуальні структури в природі | 80 |
| | 4.7 Самозмазуючі матеріали | 82 |
| | 4.8 Специфічні інтелектуальні матеріали | 84 |
| | Питання до четвертого розділу | 88 |
| 5 | Основи мікромеханики композитів | 94 |
| | 5.1 Вступ до мікромеханики композитів | 94 |
| | 5.2 Властивості односпрямованого матеріалу | 95 |
| | 5.3 Найпростіша модель композиту | 97 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.4 | Визначення фізико-механічних властивостей композиту за допомогою MaterialDesigner CAE Ansys | 100 |
| 5.5 | Фізико-механічні характеристики односпрямованого композиту для визначення міцності матеріалу | 104 |
| 5.6 | Зв'язок робочих напружень композита з напруженнями шарів вздовж та поперек волокон | 107 |
| 5.7 | Критерії міцності односпрямованого композиту | 110 |
| 5.7.1 | Теорія максимальних напружень | 110 |
| 5.7.2 | Теорія максимальних деформацій | 114 |
| 5.7.3 | Теорія міцності Хілла (Hill's) | 117 |
| 5.7.4 | Теорія міцності Tsai-Wu | 119 |
| 5.8 | Огляд сучасних теорій міцності композитів: WWFE-I, WWFE-II, WWFE-III | 122 |
| | Питання до п'ятого розділу | 125 |
| | ВИСНОВКИ | 128 |
| | СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ | 129 |

ВСТУП

Матеріали оточують нас усюди: вони укоренились в наших культурі і мисленні так само, як і в нашому існуванні. Фактично матеріали настільки тісно пов'язані з появою цивілізації, що вони дали імена: кам'яному, бронзовому, залізному вікам. В наступний час це вік композитів. Матеріали дійсно є робочим змістом нашого суспільства. Вони відіграють вирішальну роль не тільки в нашому способі життя, але і благополуччі і безпеці нації.

Матеріали звичайно є часткою матерії у Всесвіті, або більш виразно – це речовини, чії властивості роблять їх корисними в конструкціях, машинах, пристосуваннях. Ці категорії включають метали, кераміку, полімери, волокна, камінь і композити. Отже цикл матеріалів - це система, що переплітає природні ресурсні і людські потреби. Всеосяжному способі матеріали утворюють глобальну мережу, що прив'язує нації і економіки не тільки одну до одної на цій планеті, а також до самої сутності природи.

Тоді стає очевидним, що з розвитком знань не дивно знати науку і інженерію матеріалів, які займають своє місце серед інших теоретичних і практичних наук, і розширюють можливість людського спілкування.

Наука і інженерія матеріалів пов'язані з розвитком і застосуванням знань про склад, структуру і переробку матеріалів відповідно до їх властивостей і застосування.

Як запропоновано на рисунку (див. рисунок)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА ІНЖЕНЕРІЯ

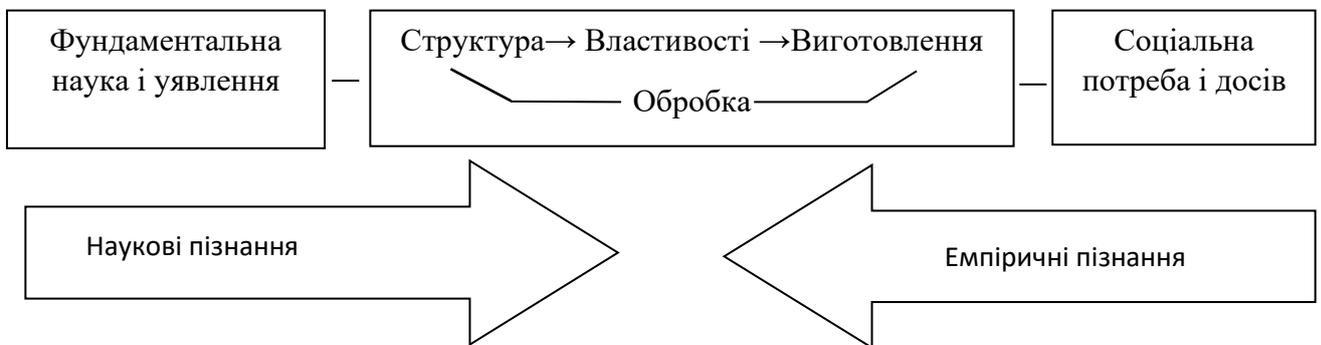


Рисунок 1.1. Зображення центральних елементів «наука й інженерія матеріалів» що пов'язано з протилежно спрямованими плинами наукового і емпіричного пізнань

Існує зв'язок між структурою, властивостями, обробкою, функцією і роботою матеріалів. Наука і інженерія матеріалів працює як стрічка, що передає знання від наукових основ і фундаментальних досліджень до суспільних потреб і досвіду (рис. 1.1). Протилежні плинні наукового пізнання в одному напрямку і досвідчені інформації – в іншому напрямку дуже гармонійно сполучаються в науці і інженерії.

Фактично цей навчальний посібник відповідає їм обом, як за назвою так і за змістом, використовуючи загальний термін наука і матеріали.

Для суспільного використання застосованих матеріалів вимагають численних професійних висновків відносно служби, надійності, довговічності, економічного використання і навколишнього середовища. Наприклад, у реактивному двигуні ракетних конструкцій кожен матеріал ретельно відібраний з метою домогтися необхідної комбінації властивостей, що прослужать задуманій функції. Сюди входять композиційні армовані матеріали, вуглецеві, суперсплави, титанові сплави, легкі алюмінієві сплави, і всі ці матеріали повинні працювати як одне ціле в загальній системі. Вибираючи матеріал для елементів конструкції також враховують його механічні, теплофізичні характеристики, щільність, вартість, ступінь освоєння в виробництві, а також технологічні властивості, що визначають можливість застосування найефективніших виробничих процесів – штампування, зварювання тощо. Крім указанного вище, найбільшу увагу приділяють необхідній міцності і твердості за найменшої маси конструкції. Таким чином наука і інженерія матеріалів утворюють рамки, в яких продуктивно працюють професіонали в багатьох дисциплінах.

Сучасні матеріали можна розділити на органічні і неорганічні, металеві і неметалеві. Задачами сучасних досліджень є виявлення їх нових властивостей і поліпшення комплексу характеристик відомих матеріалів, а також створення з особливими параметрами. Це необхідно для підвищення рівня якості виробу при роботі як в звичайних умовах, а також для роботи в екстремальних. Космос можна віднести до екстремальних, де є змога одержувати нові матеріали а також змінювати поведінку відомих.

Нерідко до сучасних матеріалів пред'являються жорсткі вимоги за функціональними властивостями. В даний час створені різні нові функціональні матеріали – це «біологічні», композиційні smart («розумні»). Їх кмітливість полягає в реакції на зовнішній вплив, що через керуючий пристрій забезпечує зворотній зв'язок з джерелом збурювання. У першому наближенні до smart матеріалів можна віднести такі, що забезпечують адекватний відгук на зворотній вплив (сегноелектрики, п'єзокераміка, сплави з пам'яттю форми, аморфні та інші). Розробка нових smart матеріалів в додаванні відомих функціональних матеріалів нових можливостей шляхом різних сполучень із традиційними.

В сьогоднішні, тенденції також засвідчують надзвичайно швидке розширення використання полімерних матеріалів. Вражаюча номенклатура неметалічних матеріалів, розмаїтість їхньої хімічної природи забезпечують широкий спектр їх технічних властивостей. З урахуванням цих особливостей вони все ширше застосовуються в конструкціях літальних апаратів, серед полімерних композиційних матеріалів (полімерів зміцнених наповнювачами у вигляді порошків, волокон, тканин) найціннішими для ракетобудування є армовані скляними, вуглецевими, органічними і іншими високоміцними волокнами.

Розроблений посібник допоможе студентам систематизувати цей напрямок при навчанні і подальшій роботі, а саме - при виборі матеріалу для

отримання об'єкту досліджень і виробництві, починаючи від загальних понять про полімерні композиційні матеріали та методи їх отвердження, і закінчуючи аналізом основ мікромеханіки композитів. Як раз посібник ретельно охоплює всі аспекти, від теорії до практики, що дає змоги отримати глибокі знання та розвинути навички, необхідні для розробки та застосування композитних конструкцій у сучасній техніці. Зрозуміння композитних матеріалів є ключовим у контексті сучасного інженерного проектування. Цей напрям підготовки допоможе формуванню аналітичного мислення та здатності критично оцінювати інженерні рішення. Дослідження в області композитних матеріалів відкриває нові горизонти для студентів інженерних спеціальностей у сферах авіаційної, космічної, автомобільної та суднобудівної промисловості.

Таким чином, цей посібник стане невід'ємною складовою у формуванні професійної компетентності майбутніх інженерів у сфері композитних технологій. Він стає одним з ключових компонентів у підготовці кваліфікованих фахівців, здатних до успішного впровадження нових технологій у виробництво та наукові дослідження.

1. Загальні поняття про полімерні композиційні матеріали

Розвиток сучасної техніки неможливий без застосування матеріалів з високими і надвисокими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями. Важливе місце серед них посідають полімерні композиційні матеріали, які використовують як елементи різних конструкцій і виробів.

Композиційні матеріали — це гетерогенні системи, які отримані з двох або більше компонентів із збереженням індивідуальності кожного.

У композиційних матеріалах розрізняють матрицю і наповнювач. Матриця забезпечує монолітність композита, фіксує форму виробу, забезпечує рівномірне навантаження на волокна. До матриці пред'являють наступні вимоги:

- хороше змочування наповнювача;
- можливість одержання композита;
- невисокі параметри формування (температура, тиск).

Полімерні матриці залежно від зміни властивостей під час нагрівання поділяють на дві групи: термопластичні і терморективні.

Полімери з лінійною та розгалуженою структурою (рис. 1.2а, б) при нагріванні розм'якшуються або плавляться, розчиняються в розчинниках, можуть піддаватись багаторазовому нагріву. Такі полімери називають термопластичними.

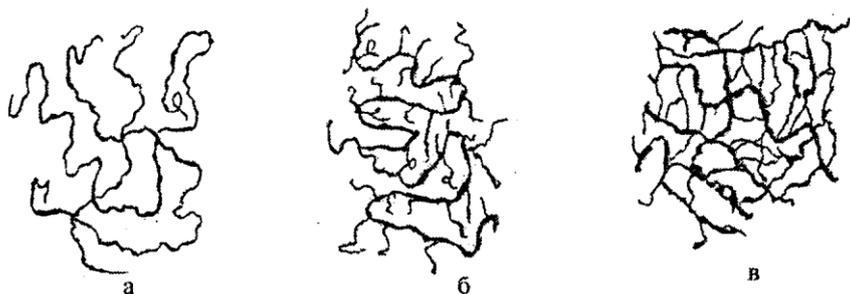


Рисунок 1.2. Структура полімерів: а — лінійні полімери; б — розгалужені полімери; в — сітчасті полімери.

Полімери з сітчастою структурою (рис. 1.1 в) відрізняються тим, що в них макромолекули поряд з міжмолекулярними зв'язками з'єднані між собою міжатомними силами зв'язку шляхом поперечних містків. Вони мають більш високу термостійкість, менш пластичні, більш пружні, нерозчинні у звичайних розчинниках. Ці полімери називають терморективними.

Синтез полімерних композитних матеріалів здійснюється реакціями полімеризації і поліконденсації.

При полімеризації високомолекулярні ланцюги одержують у результаті взаємодій молекул мономера один з одним без утворення побічних продуктів реакції.

При поліконденсації утворення високомолекулярних ланцюгів супроводжується виділенням побічного продукту - води, спирту, вуглекислого газу, аміаку, тощо.

1.1. Методи отверднення

Отверднення полімерних матеріалів являє собою спосіб спрямованого вимірювання побудови, складу та властивостей матеріалів шляхом впливу на полімер в визначених температуро-часових режимах. Термоотвердження суттєво впливає на молекулярну рухомість, структурну впорядкованість на різні фізичні характеристики і є одним з найбільш ефективних засобів покращення експлуатаційних властивостей та розширення меж використання полімерів.

Термоотвердження полягає в тому що виріб або матеріал в визначеному середовищі при нормальному тиску нагрівають до необхідної температури, витримують при цій температурі заданий час а потім охолоджують до кімнатної температури. Тривалість нагрівання виробу визначається теплопровідністю полімеру а також способом нагрівання. Необхідна тривалість витримки при підвищеній температурі залежить від характеристик полімери, товщини стінки виробу та характеру його структури. Чим більше молекулярна маса полімери, товщина стінки і остаточна напруга в виробі, тим більш необхідна тривалість витримки. На практиці приблизна тривалість витримки що рекомендується встановлюється з розрахунку 5-10 хв на 1 мм товщини стінки виробу.

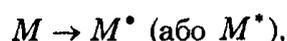
1.1.1. Полімеризація

Принцип цієї реакції полягає в тім, що молекули мономерів під впливом спеціальних речовин (так званих каталізаторів чи ініціаторів) сполучаються між собою в молекули великих розмірів й утворюють довгі ланки лінійної, розгалуженої або сітчастої структури, причому під час сполучення молекул їх хімічний склад не змінюється, тому полімер, що утворюється, не відрізняється за складом від вихідного мономера.

Ланцюговий процес утворення полімерів під час полімеризації можна подати трьома послідовними етапами: початок росту ланцюга, ріст ланцюга, обривання ланцюга.

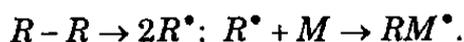
Початок росту ланцюга дають ініціатори, внаслідок чого неактивні молекули мономера перетворюються на вільні радикали.

Схематично це відбиває умовний запис



де M — молекула мономера; M' або M^* — вільний радикал молекули мономера, тобто залишок молекули мономера, що має один неспарений електрон чи вільну некомпенсовану валентність.

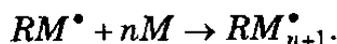
Молекули ініціатора ($R - R$) розщеплюються на вільні радикали ($2R^*$), які, реагуючи з молекулами мономерів (M), утворюють нові вільні радикали — активні центри, що починають полімеризаційний ланцюг (RM^*):



Ріст ланцюга. Під дією вільних радикалів, що утворилися, неактивні молекули мономера перетворюються на активні, які взаємодіють між собою; відбувається ріст ланцюга полімеру:

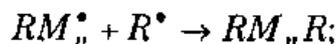


або в загальному вигляді

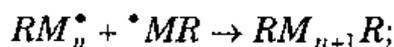


Обривання ланцюга. Утворення молекули полімеру закінчується обриванням ланцюга. Причиною обривання (стабілізації) можуть бути зіткнення зростаючої молекули полімеру

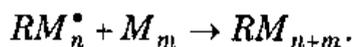
- з вільним радикалом ініціатора:



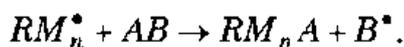
- з активним центром — збудженою молекулою мономера:



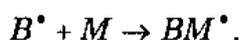
- з іншим зростаючим ланцюгом:



Зіткнення зростаючого ланцюга, що містить на кінці вільну валентність, яка зберігається в процесі росту, з молекулою мономера, полімеру чи іншої речовини (AB) може, зокрема, зумовити стабілізацію структурного і продовження росту реакційного ланцюга, чи так звану передачу ланцюга:



З цього прикладу видно, що поряд зі стабілізованим ланцюгом полімеру (RM_nA) утворюється новий вільний радикал (B^{\bullet}), який продовжує ланцюг реакції початком нового структурного ланцюга:



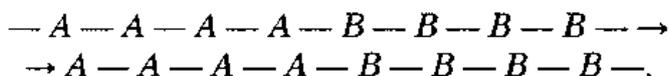
Співполімеризація. Нерідко для одержання полімерів використовують не один, а два або кілька вихідних мономерів. Цей окремий випадок полімеризації називають *співполімеризацією* (спільною полімеризацією). Полімерні молекули в цьому разі складаються з ділянок, що чергуються, які за хімічним складом відповідають кожному з вихідних мономерів. Узявши, наприклад, у реакцію співполімеризації мономер A і B , дістанемо молекули, які схематично можна зобразити так:



Таким методом можна добувати співполімери, що поєднують у собі характерні властивості полімерів, одержуваних з кожного вихідного компонента окремо.

Блок-співполімеризація. У цьому процесі для побудови молекул-

гігантів використовують блоки порівняно невеликої молекулярної маси, які побудовані з різних мономерів і містять реакційноздатні кінцеві точки, що забезпечує зв'язування цих блоків у довгі ланцюги молекул. Схематично молекули блок-співполімерів можна подати ланцюгом

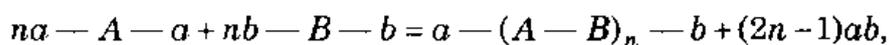


Блок-співполімеризація дає змогу створювати композити з комплексом універсальних властивостей, наприклад високоміцні волокна.

1.1.2. Поліконденсація

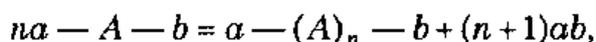
Реакція поліконденсації є окремим випадком реакції заміщення, коли з великого числа однакових або різних молекул мономерів внаслідок взаємодії утворюються молекули полімерів; при цьому виділяються низькомолекулярні продукти (вода, аміак тощо).

Для забезпечення поліконденсації потрібно, щоб мономери мали визначені кінцеві функціональні групи, здатні реагувати між собою. Схему процесу лінійної поліконденсації можна подати в такому вигляді:



де n — число вихідних молекул мономерів; $a - A - a$ і $b - B - b$ — молекули мономерів з кінцевими групами a і b , здатними реагувати між собою з утворенням димера $A - B$ і відщепленням низькомолекулярного продукту ab .

При цьому замість двох мономерів у реакції поліконденсації може брати участь і один, що має різні кінцеві групи:

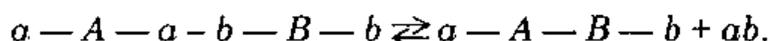


або однакові, здатні взаємодіяти з негативними aa чи bb .

Процес можна розділити на три етапи:

- початок утворення ланцюга макромолекули полімеру;
- процес росту ланцюга;
- зупинка росту ланцюга.

Початок утворення ланцюга макромолекули схематично можна зобразити так:

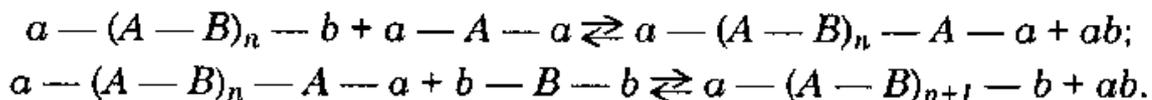


Протилежно спрямовані стрілки вказують, що процес оборотний.

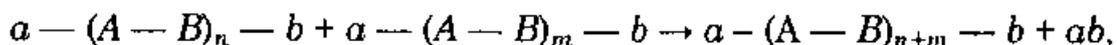
Поліконденсація — ступінчастий процес, що характеризується поступовим, порівняно повільним наростанням ланцюга полімеру за рахунок приєднання мономерів у певній послідовності. Остання обставина вказує на

те, що полімери, які утворюються в результаті поліконденсації, мають переважно регулярну будову і тільки в окремих випадках ця регулярність може бути порушена.

Процес росту ланцюга макромолекули зазвичай схематично зображують так:



Тут йдеться про структурний ланцюг, який утворюється внаслідок перебігу ступінчастого процесу. Ріст ланцюга може бути також результатом взаємодії зростаючих ланцюжків:



причому взаємодія зростаючих ланцюжків посилюється і в міру зменшення кількості молекул вихідних полімерів.

Зупинка росту ланцюга макромолекули може відбуватися під дією фізичних і хімічних факторів.

Здавалося б, маючи на будь-якій стадії росту (за еквівалентного співвідношення мономерів) кінцеві реакційноздатні групи, ланцюжок теоретично має рости до зникнення цих груп, тобто до перетворення всієї маси мономерів на один ланцюг. Однак практично ріст ланцюжка зупиняється раніше.

До фізичних факторів, що спричинюють зупинку росту ланцюга, належать:

- зниження концентрації кінцевих груп у міру їх витрати і зумовлене цим зменшення ймовірності їхнього зіткнення, а отже, і продовження процесу росту ланцюга;
- підвищення в'язкості системи, що утруднює зіткнення груп для здійснення процесу росту ланцюга.

Хімічними факторами, здатними зупинити ріст ланцюга, є:

- порушення еквівалентного співвідношення кінцевих груп внаслідок перебігу побічних реакцій чи випаровування одного з мономерів за високих температур, а також нееквівалентне співвідношення вихідних мономерів;
- деструктивні реакції обривання, ймовірність яких зростає зі збільшенням довжини ланцюга;
- домішки речовини, що має одну кінцеву функціональну групу, аналогічну кінцевим функціональним групам реагуючих полімерів, зупиняють ріст ланцюга.

1.1.3. Вулканізація

Вулканізація — технологічний процес, внаслідок якого каучук перетворюється на гуму. Суть процесу вулканізації полягає у зшиванні

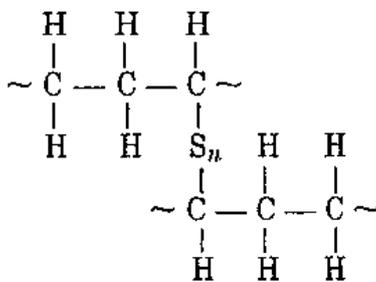
молекулярних ланцюгів каучуку (за допомогою утворення хімічних поперечних зв'язків) у просторові структури.

У результаті вулканізації утворюється тривимірна вулканізаційна сітка, структура якої визначається будовою поперечних зв'язків, функціональністю вузлів, значенням молекулярної маси і характером молекулярно-масового розподілу вихідного полімеру.

Різноманіття методів вулканізації зумовлює можливість створення сітки з різними поперечними зв'язками: від порівняно слабких йонних до міцних ковалентних, наприклад вуглець-вуглецевих.

Вулканізацію здійснюють за участю так званих *вулканізувальних агентів*.

Здебільшого каучуки, які містять у макромолекулі подвійні зв'язки, вулканізують сіркою за температури 413 - 433 К (сірчана, або гаряча, вулканізація). Основний процес сірчаної вулканізації — взаємодія між каучуком і сіркою з утворенням полі-сульфідних зв'язків між макромолекулами:



Поряд із сірчаною широко застосовують також інші способи вулканізації, оскільки сірчані вулканізати не мають достатньо високої термічної і хімічної стійкості.

Каучуки, синтезовані на основі дієнів, можна вулканізувати агентами, які не містять сірки:

- органічними пероксидами (пероксидна вулканізація);
- хінонами та їх оксимами чи імінами;
- алкілфеноло-формальдегідними смолами;
- полігалогеновмісними сполуками;
- діазодикарбосієфірами;
- діазоамідобензолом;
- дією іонізуючої радіації (радіаційна вулканізація);
- дією ультрафіолетового випромінювання (фотовулканізація).

Неолефінові полімери (насичені каучуки) можна вулканізувати тільки безсірчаними вулканізувальними агентами чи дією радіації.

У результаті вулканізації підвищуються міцність, твердість, еластичність, тепло- і морозостійкість каучуку, газонепроникність, знижується його розчинність в органічних розчинниках.

1.1.4. Карбонізація і графітація

Вуглецеві матеріали різняться від інших жароміцних матеріалів

високою *питомою міцністю*. Пояснюють це особливістю вуглеграфітових матеріалів, яка полягає в тому, що за високих температур їхня міцність зростає в кілька разів. Так, більшість конструкційних графітів має максимальну міцність за температури 2700 - 3100 К, за температури понад 3300 К настає знеміцнення, а за 3500 К міцнісні характеристики стають такими, як і за кімнатної температури.

Вдале поєднання невеликих значень модуля пружності і коефіцієнта термічного розширення з високими міцністю і теплопровідністю за підвищених температур зумовлює найвищу термостійкість графіту порівняно з іншими жароміцними матеріалами.

У промисловості штучний графіт одержують з продуктів переробки нафти і вугілля. Як наповнювач тут використовують здрібнений кокс, вугілля, сірку та інші матеріали.

Нині вуглецеві матеріали широко застосовують у ракетній техніці. Їх одержують на основі волокнистих вугільних волокон і смол з високим коксовим числом.

Графітизацією називають процес викотемпературної обробки неграфітизованих матеріалів, за якого вони повністю або частково переходять у стан кристалічного графіту. Під час графітації відбувається різке зниження електричного опору, зниження твердості, реакційної здатності, видалення зольних домішок, поліпшення механічних і антифрикційних властивостей. Добре піддаються графітації неграфітові матеріали з малим вмістом золи. Сюди належать нафтовий і пековий кокси, а також вуглецеві речовини на основі карбонізованих смол з високим вмістом коксу, що має місце в теплозахисних і вуглець-вуглецевих матеріалах.

Кисневмісні речовини належать до числа тих, які повністю не графітуються, наприклад епоксидні смоли. Позитивну роль у процесах високотемпературної перебудови речовини відіграє водень. Він сприяє підвищенню рухливості шестичленних сіток і приводить до зміни їхньої відносної орієнтації аж до укладання в графітові кристаліти.

Вуглецевий і графітований матеріал у ТЗП утворюється в двох випадках.

1. Коксовий і графітовий каркаси утворюються в процесі «роботи» самого теплозахисного покриття за рахунок карбонізації і графітації смол з високим коксовим числом. Це можуть бути феноло-формальдегідні чи феноло-фурфурольні (фезранові) смоли. Як волокнисті наповнювачі можна використати азбестові, скляні чи вугляні волокна, найчастіше у вигляді полотен чи стрічок. Вибирають наповнювач, виходячи з умов роботи ТЗП. Наприклад, якщо наповнювач вуглецевий, то таке ТЗП потрібно експлуатувати за температури понад 3000 К. Звичайно, процеси карбонізації і графітації за такого режиму відбуваються дуже швидко і здійснюються не цілком.

2. Коксування або карбонізація і графітація відбуваються в процесі одержання самого теплозахисного матеріалу. Такі матеріали прийнято

називати вуглець-вуглецевими.

Кінцевою стадією одержання вуглець-вуглецевих матеріалів, як правило, є насичення пористого твердого каркаса або відносно щільної заготовки з вуглецевих волокон. Останні заготовки найчастіше виготовляють плетінням вручну або на спеціальних машинах.

Твердий пористий каркас одержують в такий спосіб:

- а) спочатку методом «морого» чи «сухого» намотування на оправку виготовляють сиру заготовку. Потім її піддають поліконденсації й одержують твердий полімерний каркас чи заготовку;
- б) далі повільно підвищують температуру, доводять її до 1573 К і витримують упродовж певного часу залежно від товщини заготовки без доступу повітря; цей процес називають карбонізацією.

При цьому руйнуються полімерні ланцюги сполучного й утворюються леткі речовини, які безперервно видаляються.

Виробники вуглецевих матеріалів цей процес називають випалом, або спіканням. При цьому також виходять пористі заготовки, які просочують смолами під тиском і знову піддають карбонізації. Цю операцію можна повторювати кілька разів.

У нашому випадку відносно тонкостінні заготовки після карбонізації насичують піровуглецем, продуктом розкладання метану або інших вуглеводнів. Технологію одержання виробів, насичених піровуглецем, розглянуто в технічних розділах книги.

Якщо карбонізований матеріал піддати випалу за температури понад 2673 К, то утвориться графітований матеріал, тобто матеріал з гексагональною шаруватою структурою. Чим вища температура графітації, тим швидше утворюється структура, тим коротший період графітації і вища якість такого матеріалу.

Слід зазначити, що під час графітації також виділяються леткі речовини, в основному ті, що утворилися в процесі карбонізації і залишилися в структурі вуглецю в розчиненому або сорбованому стані.

Отже, під час «роботи» теплозахисного покриття відбуваються обидва зазначених процеси, а леткі речовини, що утворюються, вдуваються в прикордонний шар і знижують його температуру. Таке охолодження дістало назву пористого, або транспіраційного. Іноді з цією метою в структуру вводять спеціальні тверді речовини, які за високих температур перетворюються на пару.

Процес карбонізації термореактивних смол супроводжується поліконденсацією, газовиділенням, зниженням питомого вмісту водню, збільшенням питомої поверхні і появою локалізованих парамагнітних центрів. За температури 925-975 К відбувається спікання, що супроводжується зменшенням пористості, зниженням концентрації радикалів, посиленням виділення водню. Низькотемпературна стадія карбонізації закінчується утворенням полікристалічного вуглецю з нульовим ступенем графітації. Високотемпературною обробкою до 3000 К можна одержати графіт, стійкий

до 5000 К. Процес добування вуглець-вуглецевих КМ описано далі.

Керування процесами синтезу відбувається шляхом нагрівання й охолодження реакційної маси, регулювання тиску, застосування каталізаторів, а також впливу фізичних полів.

1.2 Методи нагрівання під час отверднення та отверднення з використанням фізичних полів

1.2.1. Електричні печі і нагрівники [1]

До числа найважливіших типів печей і нагрівників належать печі опору, індукційні і дугові. Полімерні композиційні матеріали найчастіше виготовляють у печах опору.

Конструкція печей опору дає змогу регулювати робочу температуру в дуже вузьких межах. Найважливішим елементом печі є матеріал, з якого виготовляють нагрівні елементи, що визначають максимальну робочу температуру.

Оскільки температури тверднення полімерних сполучних не перевищують 473 К, то як нагрівні елементи застосовують відкриті або закриті спіралі зі сплавів хромель, ніхром, копель. Наприклад, максимальна робоча температура нагрівників з ніхрому становить 1333 К, хромелю — 1033 К.

Звичайно, температура самих нагрівників значно перевищує температуру в печі, так що ці дані наведено для самих нагрівників. Форму, розміри й об'єми печей розраховують. Їх потужність залежить від температури печі і, зрозуміло, від її об'єму.

Для вирівнювання температури по об'єму в низькотемпературних печах застосовують спеціальні вентилятори. На рис. 1.3 наведено схему поперечного розрізу прямокутної печі.

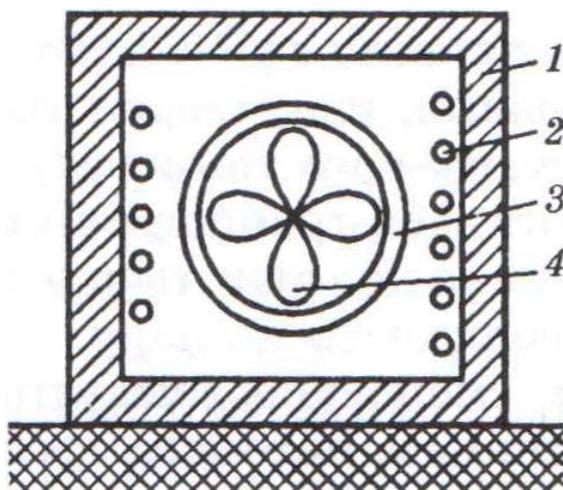


Рисунок 1.3. Схема розрізу печі опору без виробу, що нагрівається:
1 — стінка печі; 2 — електронагрівник; 3 — коробка вентилятора;
4 — вентилятор

Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали добувають у високотемпературних печах опору, де як нагрівники використано графітові стрижні, що сполучені послідовно і знаходяться в контрольованій атмосфері.

Є багато інших матеріалів, які застосовують як нагрівники. Це молібден, вольфрам, карбіди, силіциди тощо. Однак у кожному конкретному випадку вибір має бути обґрунтованим і компромісним. Останнім часом замість електричних печей опору застосовують так звані *аеродинамічні печі*.

Поява цих печей дещо анекдотична: на одному з підприємств міста Дніпропетровська пірометристка, яка стежить за роботою електричних печей, після встановлення належного режиму попрохала чергового електрика, щоб він вимкнув піч через 4 год, а сама пішла додому, оскільки це була друга зміна. Електрик вимкнув електронагрівники, але забув вимкнути вентилятор.

Коли вранці відчинили піч, то з'ясувалося, що теплозахисне покриття, залишене там для тверднення, не тільки заполімеризувалось, а навіть частково обвуглилось. Спочатку вирішили, що вийшли з ладу терморегулятор і ще щось. А розгадка цього явища була у внутрішньому терті в газі, що підлягає закону Ньютона:

$$K = \tau = -\mu \cdot \frac{dv}{dz}$$

де K — питомий потік кількості руху, що дорівнює дотичній напрузі τ у газі у разі вимушеного руху; μ — коефіцієнт внутрішнього тертя, $\frac{dv}{dz}$ — градієнт швидкості вздовж координати z . З молекулярної фізики відомо, що

$$\mu = \frac{1}{3} \cdot m \cdot n \cdot u \cdot \lambda$$

де m — маса молекули; n — число молекул в одиниці об'єму; u — середня квадратична швидкість молекули

$$u = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m}}$$

k — стала Больцмана; T — абсолютна температура.

З останнього виразу випливає, що з підвищенням температури збільшується швидкість, а отже, і коефіцієнт внутрішнього тертя.

З останнього виразу випливає, що з підвищенням температури збільшується швидкість u , а отже, і коефіцієнт внутрішнього тертя μ .

Відомо, що в разі тертя у газі кінетична енергія рухомого тіла перетворюється на теплову енергію газу. Ось і вся розгадка того, що сталося, і принцип роботи аеродинамічних печей.

Потрібно ще раз нагадати, що тут не потрібні жодні нагрівні елементи, потрібен лише вентилятор.

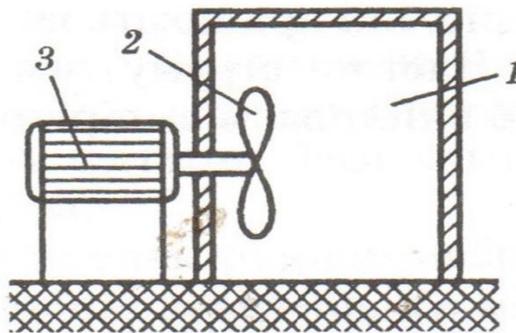


Рисунок 1.4. Схема аеродинамічної печі: 1 – замкнений об'єм з теплоізоляцією; 2 – лопань вентилятора; 3 – електродвигун.

В останні роки вся ракетно- космічна галузь перейшла на аеродинамічні печі (рис. 1.4), максимальна температура в яких становить 873 - 973 К, тобто це та температура, яку витримує матеріал лопаті вентилятора.

Крім того, аеродинамічні печі в два-три рази менше споживають енергії, вони дуже прості і зручні. Нині розроблено понад 20 типів таких печей, їх можна використовувати на будь-якому підприємстві, у сільському господарстві, для опалення приміщень тощо.

Дуже зручні ці печі при отвердненні полімерних матеріалів виробів різних розмірів (до 10 м завдовжки і 3,5 м діаметром).

Якщо вироби формують у механічних прес-формах під пресом, то можна застосовувати індукційний метод нагрівання або нагрівання за допомогою термоелектричних нагрівників (ТЕНів, рис. 1.5).

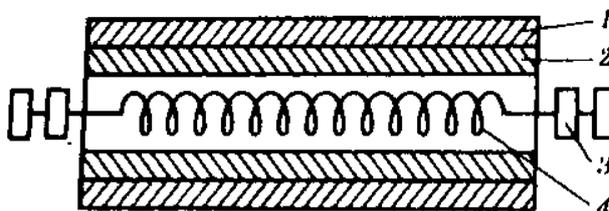


Рисунок 1.5. Схематичне зображення ТЕНа: 1 — сталева трубка; 2 — електроізоляція; 3 — контакти; 4 — спіраль з ніхрону, хромелю або копелю

Індукційна піч, або нагрівник, якщо це прес-форма, — це трансформатор, первинною обмоткою якого є індуктор, а вторинною — виріб, що нагрівається, або прес-форма. Зрозуміло, виріб, що нагрівається, має бути провідним за заданої частоти. Для нагрівання металевих виробів і графіту зазвичай застосовують низькочастотні машинні генератори або перетворювачі частоти (теристори), для діелектриків — дуже високі частоти, які у виробництві полімерів майже не застосовують, оскільки в процесі полімеризації чи поліконденсації смол змінюється електричний опір. Так що це — ще проблема!

Великі металеві прес-форми нагрівають за допомогою індукторів, які працюють на промисловій частоті (50 Гц).

Частота струму тим менша, чим більші розміри прес-форми, що впливає з емпіричної формули

$$\psi_{min} = \frac{25 \cdot 10^3 \cdot \rho_e}{d^2}$$

де ρ_e — питомий електричний опір, Ом*м; d — діаметр пресформи, мм.

Індуктори у вигляді соленоїда зазвичай виготовляють з мідних охолоджуваних водою труб діаметром 10 - 20 мм за місцем призначення, нагрівники омичного опору ТЕНи промисловість постачає у вигляді спіралей, вміщених у металеві труби і відокремлених від стінок фарфоровими ізоляторами.

ТЕНи маркують в такий спосіб: ТЕН-2, ТЕН-1, де цифра означає його потужність у кіловатах (кВт).

ТЕНи можна застосовувати як у прес-формах, так і в печах. Іноді в прес-формах роблять спеціальні канали, куди вставляють теплонагрівники. За такого використання ТЕНів коефіцієнт корисної дії підвищується.

У разі індукційного нагрівання пластиків або інших непровідних матеріалів застосовують товстостінні металеві чи графітові нагрівники (рис. 1.6), температуру яких забезпечують вихрові струми і передають теплоту в простір, де знаходяться деталі, що нагріваються.

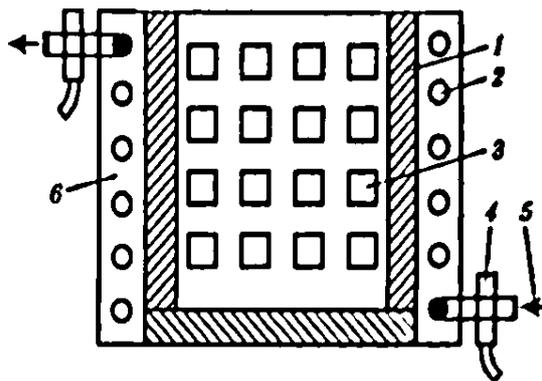


Рисунок 1.6. Схема індукційного нагрівання із застосуванням товстостінних нагрівників: 1 - нагрівник; 2 – індуктор; 3 – деталі; 4 – електричні контакти; 5 – подача холодної води; 6 - теплоізоляція

У техніці є ще чимало інших печей і методів нагрівання, але ми їх для виготовлення виробів з полімерних композиційних матеріалів не застосовуємо, і тому не описуємо.

1.2.2. Інфрачервоне нагрівання [1]

У 1880 р. фізики, розклавши сонячний спектр на кольори і пересуваючи вздовж нього ртутний термометр, виявили невелике підняття ртутного стовпчика в невидимій ділянці спектра, розташованій безпосередньо за червоним світлом. Тим самим було відкрито інфрачервону ділянку спектра.

У 1924 р. у випромінюванні невеличкого електричного вібратора було виявлено інфрачервоні (ІЧ) промені і доведено, що між світловим і електромагнітним випромінюванням є безперервний перехід без будь-яких розривів. Це, з одного боку, дало змогу заповнити останній пробіл у гамі

випромінювань, що починаються з короткохвильових променів, які випускаються радіоактивними речовинами ($\lambda = 5 \cdot 10^{-13}$ м), і аж до герцових (радіо-) хвиль завдовжки в кілька кілометрів. З іншого боку, згідно з відомою теорією Максвелла, інфрачервоні промені виявилися одним з видів електромагнітного випромінювання.

Як різновид електромагнітних коливань ІЧ-випромінювання займає в спектрі електромагнітних хвиль широку ділянку — від $76 \cdot 10^{-8}$ до 10^{-3} м.

Основною характеристикою генератора ІЧ-випромінювання є променистий потік Φ , що визначає потужність випромінювання E . Кількість енергії, яке сприймає тіло, що нагрівається, відповідає енергетичній опромінюваності. Атмосферне середовище є практично прозорим для ІЧ - променів навіть за наявності в ньому диму, пари, туману. У разі поширення ІЧ -променів у щільних середовищах їхнє ослаблення визначається не дифракцією і розсіюванням, а поглинанням променистої енергії. Тому глибина проникнення ІЧ -променів у щільних середовищах є функцією поглинання: чим вища інтенсивність поглинання променів у речовині, тим менша глибина проникнення випромінювання. Певні обмеження щодо глибини проникнення ІЧ-променів у щільні середовища не заважають використанню їх для нагрівання різного роду виробів, у тім числі з ПКМ.

Внаслідок поглинання променистої енергії верхні шари матеріалу розігріваються до певної температури. Подальше поширення теплоти у глибші шари відбувається шляхом теплопровідності. Тим самим уможлиблюється нагрівання досить товстих шарів матеріалу.

Джерелом ІЧ-енергії може бути будь-яке нагріте тіло (газоподібне, рідке, тверде).

Джерела випромінювання в ІЧ-ділянці спектра за фізичною природою генерування енергії можна розділити на п'ять груп: джерела теплового випромінювання, електролюмінесцентні, змішаного випромінювання, електромагнітні й оптичні квантові генератори (лазери).

Нині у багатьох галузях промисловості успішно застосовують ІЧ-нагрівання, для чого використовують генератори теплового (температурного) випромінювання.

Джерела теплового випромінювання різноманітних типів і конструкцій класифікують за довжиною хвилі максимуму випромінювання, що залежить від температури випромінювача. Світлі (короткохвильові) випромінювачі мають температуру 1773 — 2073 К і вище, частина їхньої енергії припадає на видиму ділянку спектра, а максимум інтенсивності — на діапазон $(1...2) \cdot 10^{-6}$ м. Темні (довгохвильові) випромінювачі створюють випромінювання з максимальною інтенсивністю в ділянці $(3,5...5,0) \cdot 10^{-6}$ м. У разі ІЧ-нагрівання до різних випромінювачів можна висунути загальні вимоги і намітити їхні технічні показники. Генератори ІЧ-випромінювання мають задовольняти таким основним вимогам:

- забезпечувати стабільний розподіл інтенсивності випромінювання і максимально можливу рівномірність опромінення оброблюваного матеріалу;

- мати мінімальну теплову інерцію, від якої залежить тривалість приведення випромінювача в робочий стан;
- мати високий енергетичний ККД і щонайбільшу тривалість терміну експлуатації.

Переліченим загальним вимогам у разі застосування ГЧ-нагрівання для низькотемпературних процесів відповідають джерела випромінювання, що використовують електричне нагрівання. До електричних генераторів ГЧ-випромінювання належать дзеркальні лампи розжарювання, випромінювачі з кварцовими трубками й елементи опорів.

Дзеркальні лампи розжарювання — це джерело ГЧ-випромінювання, в якому як випромінювач використано вольфрамову моноспіраль, а відбивачем є внутрішня поверхня колби з нанесеним шаром алюмінію. Зазвичай колба має параболоїдну форму і забезпечує рівномірніший розподіл потоку випромінювання від нитки, розміщеної у фокусі параболі. В середині скляної колби розміщена тугоплавка червона плівка, що слугує фільтром для випромінювання з $\lambda < 65) \cdot 10^{-8}$ м. Робоча температура нитки розжарювання лампи досягає 2273 К, термін служби — $7 \cdot 10^6$ с. За розміщення дзеркальних ламп розжарювання на відстані 1,5 — 4 м від об'єкта, що опромінюється, щільність потоку енергії змінюється від $0,2 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^4$ Вт/м². Однак дзеркальні лампи розжарювання мають низку недоліків, що істотно обмежують ефективність їх застосування для низькотемпературних процесів. У разі нагрівання нитки у вакуумі вольфрам випаровується, утворює наліт на внутрішній поверхні колби, що зменшує інтенсивність потоку випромінювання і збільшує поглинання випромінювання стінками колби за тривалої роботи. Дзеркальні лампи розжарювання створюють нерівномірну щільність променистого потоку на об'єктах, що опромінюються, через особливість конструкції вони мають відносно низький ККД. Для усунення зазначених недоліків сушильні установки зазвичай модифікують створенням комбінованого енергопідведення, використовуючи поряд з дзеркальними лампами розжарювання кварцові і темні ГЧ- випромінювачі.

Лампи з кварцовими трубками за енергетичними, експлуатаційними, конструктивними параметрами перевершують усі ГЧ- випромінювачі. Досвід застосування ГЧ-нагрівання в технологічних процесах термоотверднення ПКМ підтвердив перспективність і доцільність використання галогенних ламп розжарювання. Висока термостійкість і прозорість кварцового скла дає змогу виготовляти лампи невеликих розмірів (діаметр трубки порядку 10^{-2} м), що забезпечує зниження маси апаратури, в якій їх застосовують. Кварцові галогенні лампи розжарювання створюють високу концентрацію енергії (до $4 \cdot 10^3$ Вт/м вздовж трубки), а в разі групового розміщення випромінювачів забезпечують високі значення поверхневої щільності потужності опромінення, що досягають $(6 \dots 10) \cdot 10^4$ Вт/м².

До переваг галогенних ламп розжарювання варто віднести також значний термін експлуатації $((7 \dots 18) \cdot 10^6$ с) при збереженні стабільності променистого потоку упродовж усього терміну, малу термічну інерцію

(номінальний енергетичний потік досягається за час 0,6 с з моменту вмикання), поєднання коротко- і довгохвильового ІЧ-випромінювання.

Недоліком галогенних ламп розжарювання є те, що тривало використовувати їх у групових випромінювачах можна тільки в горизонтальному положенні (за номінальної напруги живлення). Для роботи у вертикальному положенні створюють спеціальні конструкції галогенних ламп розжарювання, знижують напругу живлення. Крім того, застосування цих ламп для нагрівання потребує надійного теплозахисту елементів конструкції нагрівника. Під час термоотверднення речовин, які інтенсивно поглинають ІЧ-промені в діапазоні довжин хвиль $(3...5) \cdot 10^{-6}$ м, використовують електричні випромінювачі, що є елементами опорів, які генерують максимальну енергію в даному діапазоні. У темних низькотемпературних випромінювачах джерелами енергії є металеві або керамічні трубки, всередині яких розміщена спіраль.

Найпоширенішою і найефективнішою конструкцією низькотемпературного ІЧ-випромінювача є герметичний трубчастий електронагрівник. Трубчасті електронагрівники задовольняють основним вимогам, що ставлять до випромінювачів. Вони нескладні за будовою, живляться від промислової електромережі, міцні, довговічні, не мають скляних частин і легко можуть бути зібрані у вигляді панелей різних розмірів. За віддачею променистого потоку трубчасті електронагрівники поступаються ламповим випромінювачам, але перевершують багато які темні випромінювачі. В разі опромінення на горизонтальній поверхні за сприятливих умов світловіддача у вигляді ІЧ-промені в може досягати 50 %.

Недоліком трубчастих електронагрівників є значна теплова інерція (тривалість доведення до робочої температури становить 240-300 °С). Цей недолік позначається тільки під час пуску терморадіаційної установки. Темні ІЧ-випромінювачі мають відносно невисоку температуру поверхні нагрівання, що сприяє створенню «м'яких» режимів термоотверднення. Для забезпечення щонайбільшої щільності потоку ІЧ-випромінювання використовують керамічні панельні електронагрівники, випромінювальна поверхня яких має пористу будову. Такі нагрівники забезпечують можливість нагрівання до відносно високої температури і підбір потрібного спектра випромінювання за рахунок селективної випромінювальної здатності різних компонентів кераміки.

Внаслідок простоти, доступності, відносно невисокої вартості генераторів енергії ІЧ-нагрівання знайшло широке застосування в технологічних процесах як перспективний спосіб прискореного отверднення полімерних матеріалів. ІЧ -нагрівання використовують на різних стадіях виготовлення виробів. Під час намотування попередньо просоченим матеріалом нагрівання потрібне для розм'якшення сполучного, а потім, після закінчення намотування, для його отверднення. У разі намотування «мокрим» методом потрібне нагрівання сполучного в просочувальній ванні для зменшення його в'язкості, і тим самим — поліпшення якості просочення і

швидкості змочування. ІЧ - нагрівання застосовують і під час пошарово-послідовного формування конструкцій. Оскільки швидкість намотування зазвичай намагаються зробити достатньо високою, нагрівник, з одного боку, має забезпечувати максимально швидке нагрівання поверхневого шару, з іншого — максимум його випромінювання має припадати на ту частину спектра, яка краще поглинається матеріалом. Найбільшого ефекту нагрівання досягають у разі відповідності спектральних характеристик випромінювача й оптичних властивостей матеріалу. Експериментально встановлено, що феноло-формальдегідні й епоксидні сполучні добре поглинають ІЧ-випромінювання в діапазоні довжин хвиль $(2,7...4,0) \cdot 10^{-6}$ м і потім понад $5,0 \cdot 10^{-6}$ м. Вибір джерела ІЧ-нагрівання в зазначеному діапазоні довжин хвиль створює оптимальні умови впливу випромінювання на структуру і властивості матеріалів у процесі отверднення.

Під час розрахунку установок найактуальнішим стає визначення потужності генераторів ІЧ-випромінювання, їхньої якості, розмірів і раціонального розміщення в установці.

Основною вимогою при визначенні енергетичних характеристик установок є забезпечення рівномірності опромінення поверхні матеріалу в процесі нагрівання до заданої температури.

ІЧ-установку розраховують на основі диференціального рівняння теплового балансу, згідно з яким енергія, що поглинається опромінюваним матеріалом за час dt , витрачається на нагрівання (dQ_H), віддачу теплоти конвекцією (dQ_K), випромінюванням (dQ_B) і на випарювання розчинників ($dQ_{\text{вип}}$):

$$dQ = dQ_H + dQ_K + dQ_B + dQ_{\text{вип}}$$

Для створення рівномірного поля опромінення, яке б забезпечувало оптимальну температуру на поверхні, велике значення має розміщення джерел ІЧ-нагрівання. Встановлено, що зі збільшенням відстані між об'єктом дослідження і лампою значно зменшується опромінення, і як наслідок — знижується температура нагрівання (рис. 1.7).

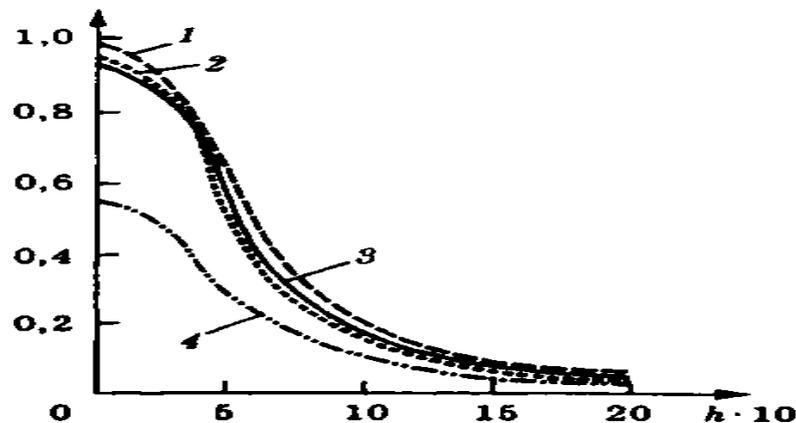


Рисунок 1.7. Розподіл опромінення в поперечному напрямку на висоті $h = 5 \cdot 10^{-2}$ м для галогенних ламп розжарювання КГТ.220-1000-1: 1 - 4 – α відповідно дорівнює 0,12; 0,08; 0,04 і ≥ 0 м

У разі опромінення одиничною лампою об'єкт найбільше опромінюється в середині поля, в поперечному і поздовжньому напрямках опромінення спадає. Досягнення опромінення, близького до рівномірного, на значній площі забезпечується сполученням декількох ламп у групу. За спільної дії групи випромінювачів у результаті додавання кривих розподілу енергії створюється рівномірне поле опромінення, при цьому опромінюваність збільшується майже вдвічі порівняно з одиночним випромінювачем. Зміни значень величини опромінення досягають також регулюванням напруги живлення.

Енергетичне опромінення в міру віддалення від середини поля зменшується й у разі групи випромінювачів. Найекономічнішим шляхом подолання «крайового ефекту» є розміщення відбивачів у безпосередній близькості від зовнішніх випромінювачів системи. Це зумовлює перерозподіл відбитого випромінювання на краї опромінюваного матеріалу. Застосування відбивачів забезпечує також створення потрібного ступеня рівномірності поля опромінення і збільшення значень опромінення об'єкта. На практиці можна застосовувати плоско паралельні, сферичні, параболічні та інші відбивачі, що концентрують енергію.

Ілюстрацією ефективності ГЧ-опромінення слугують порівняльні дані щодо отверднення склопластиків на основі феноло-формальдегідних і епоксидних сполучних, отверднених ГЧ- і конвективним нагріванням.

Рентгенографічні дослідження підтверджують факт інтенсивнішого розвитку реакції синтезу і збільшення ділянок упорядкування в разі отверднення полімерних сполучних під впливом ГЧ - опромінення порівняно з конвективним нагріванням, що відбувається без якісної зміни кінцевих продуктів реакції. Це пов'язано з тим, що під впливом ГЧ -променів у процесі синтезу енергія активації сприймається молекулами безпосередньо, а не за рахунок теплопровідності стверджуваної системи. Ця теза добре підтверджується результатами дериватографічних досліджень. У композитах, оброблених ГЧ-нагріванням, порівняно з конвективним виявлено більшу міцність зв'язків між макромолекулами, що істотно впливає на міцнісні характеристики матеріалу.

Встановлено підвищення міцності за розривних навантажень до 20 % в разі високого ступеня отверднення. Це можна пояснити тим, що синтез сполучних за допомогою ГЧ-випромінювання прискорює процес отверднення. Крім того, за пошарової полімеризації за допомогою ГЧ-випромінювання в процесі укладання препрега кожен наступний шар наносять начебто на «тверду» основу, що сприяє і кращому натягу волокна, і щільнішому укладанню. При цьому сполучне розподіляється рівномірніше, що також сприяє підвищенню міцності композита за значної інтенсифікації (в 5 — 7 разів) процесу формування виробів. Під час реалізації процесу отверднення композитів на основі сполучних поліконденсаційного типу за впливу в процесі формоутворення ГЧ-опромінення відбувається вільний і послідовний вихід летких речовин, що значно поліпшує якість матеріалу.

Механізм впливу ІЧ-опромінення на полімерні композиційні матеріали можна подати так. У разі ІЧ-випромінювання процеси прогрівання й отверднення сумішуються, внаслідок чого різко скорочується час формоутворення виробів. За конвективного підведення теплоти процеси нагрівання й отверднення розвиваються послідовно один за одним. Оскільки теплопровідність композита низька, він нагрівається від поверхні до центра заготовки. Градієнт температур, що виникає по перерізу заготовки, поступово зменшується, подовжуючи як час наскрізного прогрівання, так і тривалість процесу отверднення.

ІЧ-нагрівання інтенсифікує процес отверднення внаслідок впливу квантів енергії $h\nu$ на розвиток хімічних реакцій між макромолекулами, тобто виникають фотохімічні процеси взаємодії.

Якщо цей механізм має місце, можна чекати, що зміна величини $h\nu$ в разі ІЧ-нагрівання впливатиме на процес отверднення.

Виявлені явища дають змогу запропонувати нову енергозберігаючу технологію створення композицій з ПКМ.

У разі заміни термореактивних сполучних на термопластичні типу поліетиленової плівки така технологія дасть змогу усунути операцію просочення наповнювача, запобігти виділенню летких речовин під час нагрівання, одержати високі міцність і герметичність, а також вирішити проблему використання вторинної полімерної сировини.

1.2.3. Отверднення в магнітних полях [1]

І далекі гігантські туманності, і елементарні часточки мають магнітні поля. Ми звикли до магніту і ставимось до нього трішки поблажливо, як до застарілого атрибуту шкільних уроків фізики. Людина знає про магніт дуже багато. В кожному разі цілком достатньо, щоб змусити його служити собі. Завдяки розумінню сутності проявів магнетизму з'явилися нові матеріали, нові магніти, нові дивовижні пристрої, нові ефекти в готових виробках.

Природні магніти — це шматочки магнітного залізняку — магнетиту (31 % Fe_3O_4 і 69 % Fe_2O_3). Перший у світі електромагніт, продемонстрований У. Стердженом 23 травня 1825 р., мав вигляд зігнутого у підкову залізного стрижня, обмотаного ізольованим мідним дротом. На зміну йому згодом прийшли електромагніти з наконечниками різної форми, сталевими магнітопроводами і котушками. Для виготовлення постійних магнітів і полюсів електромагнітів використовували спеціальні матеріали, що мали значну індукцію насичення.

Нині майже в кожній фізичній лабораторії є електромагніт. Він не вражає розмірами, однак за його допомогою можна одержати досить значне магнітне поле (3000-4000 кА/м), потрібне для досліджень.

Причиною магнітних властивостей прийнято вважати обертання заряджених електронів навколо ядра атома та обертання електронів навколо власної осі (спін).

У ненасиченому феромагнетикі магнітний момент тіла загалом дорівнює нулю. Це пояснюють тим, що у феромагнетиках усі атоми поділяють на групи — так звані домени. Кожен з доменів містить атоми з переважною орієнтацією в одному напрямку і має істотний магнітний момент. Однак тіло загалом магнітного моменту не має, оскільки домени розташовані хаотично. Вміщуючи феромагнетик у магнітне поле, ми спряємо тому, що всі домени орієнтуються в напрямку силових ліній зовнішнього магнітного поля, і їхні магнітні властивості додаються.

Знявши зовнішнє магнітне поле, отримаємо новий магніт — феромагнітне тіло, в якому атоми всіх доменів намагнічені в одному напрямку.

У феромагнетиках виникає власне магнітне поле, яке значно більше за його зовнішнє поле, що викликало його. Велику намагніченість феромагнетиків пояснюють існуванням у них «молекулярного» магнетизму, зумовленого квантово-механічною (обмінною) взаємодією некомпенсованих спінових магнітних моментів атомів у кристалічних ґратках.

Установлено, що у феромагнетиках поле зберігає спрямованість до температури Кюрі, а вище неї ділянки самочинної намагніченості розу порядковуються.

Щоб одержати слабкі (до 40 кА/м) і середні (40 — 4000 кА/м) магнітні поля, технологічним рішенням є застосування постійних магнітів з магнітотвердих матеріалів, здатних зберігати велику індукцію після зняття намагнічувального поля. Як джерела магнітного поля значно поширені магніти з фериту барію. Відносно мала їх вартість зумовлена простотою технології виготовлення; можливість одержання пресуванням заготовок різної форми (прямокутні бруски, диски, кільця) у поєднанні з високими магнітними характеристиками дає змогу застосовувати їх як елементи систем, що формують магнітне поле заданої просторової конфігурації.

В основу розрахунку магнітних полів покладено метод скалярного магнітного потенціалу і принцип суперпозиції.

Магнітний стан постійного магніту і розподіл складових магнітного поля можна описати системою рівнянь

$$\begin{aligned}H_{\Sigma} &= H_0 + H; \\ H &= -\text{grad } \Phi; \\ M &= \Phi(H_{\Sigma}),\end{aligned}$$

де H_0 — напруженість зовнішнього намагнічувального поля; H_{Σ} — результуюча напруженість магнітного поля всередині магніту чи поза ним; Φ — скалярний магнітний потенціал; M — намагніченість елемента об'єму тіла.

Аналітичні вирази для визначення складових магнітного поля H_x , H_y і H_z дають змогу розрахувати стаціонарні поля, які формують системи прямокутних магнітів за різних варіантів їх просторового розміщення.

Слабкомагнітні речовини, до яких належать полімери, вивчені недостатньо глибоко, однак є низка загальних положень магнетохімії полімерів, що полегшують розуміння процесів взаємодії елементів структури з магнітним полем.

1. Для полімерів характерна анізотропія магнітної сприйнятливості вздовж і впоперек макромолекул з максимумом у напрямку поздовжньої осі.

2. Різка анізотропія і великі значення магнітної сприйнятливості зумовлені анізотропією бензольного ядра.

3. Орієнтація макромолекул в однорідному магнітному полі відбувається вздовж силових ліній з нерівномірним розподілом по кутах орієнтації.

4. Посилення ефекту орієнтації в неоднорідному полі викликано дією додаткового моменту, що розвертає макромолекули і зміщує їх вздовж градієнта поля.

5. Підвищення ступеня упорядкованості полімерів у магнітному полі забезпечує зближення реакційноздатних груп в олігомерах.

6. У разі зближення макромолекул між ними утворюються додаткові зшивки.

7. Структурні зміни, що відбуваються у в'яз коте куч ому стані, фіксуються в отвердженому полімері.

Орієнтаційному впливу магнітного поля перешкоджає тепловий рух. Справді, енергія магнітного поля мала порівняно з тепловою енергією руху частинок:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{\chi}{N} \cdot H^2 \ll k \cdot T$$

де N — число Авогадро; H — напруженість магнітного поля; k — стала Больцмана. Ступінь орієнтації молекул визначається експонентою $e^{-\beta}$, де

$$\beta = \frac{\Delta\chi \cdot H^2}{2 \cdot k \cdot T}$$

У процесі синтезу в магнітному полі енергія взаємодії поля з діамагнітним кристалом зростає в n разів (n — число молекул у кристалі) порівняно з енергією взаємодії однієї молекули, і може зрівнятися з kT . Енергія магнітного поля передається не окремій молекулі, а всьому кристалу загалом, оскільки час спінгратчастої релаксації більший за час переорієнтації спінів у магнітному полі. Якщо енергія взаємодії діамагнітних кристалів з магнітним полем сумірна з тепловою енергією, то відбувається переорієнтація кристалів, яка приводить до упорядкування структури, що в решті-решт зумовлює зміну фізико-механічних характеристик матеріалів.

Вплив магнітного поля на процес зміни структури як на молекулярному, так і на надмолекулярному рівні можна оцінити за допомогою тонких методів досліджень, таких як рентгенографія, електронна мікроскопія, дериватографія.

Відомі методи рентгеноструктурного аналізу дають змогу встановлювати молекулярну структуру полімерів і контролювати зміни, зумовлені магнітною обробкою. За допомогою рентгенівських досліджень можна одержати якісно нові дані про розміри, форму і способи упакування молекул у надмолекулярні комплекси. Для практичної оцінки структури полімерів визначають ділянки когерентного розсіювання рентгенівських променів на

полімерних зразках, вимірюють характеристики зареєстрованого випромінювання в цих ділянках, визначають ступінь кристалічності досліджуваного матеріалу. Однак за цим методом неможливо врахувати специфіку будови молекул полімерів складної геометричної форми, а також геометрію їхнього взаємного просторового розташування, оскільки структурний аналіз ґрунтується на вивченні інтенсивності розсіювання рентгенівських променів під звичайними кутами ($8 - 80^\circ$) і не дає змоги визначити розміри, більші за атомні. Оскільки ділянки когерентного розсіювання відповідають усередненому розміру молекул, за цим методом не вдається визначити форму молекул.

З метою розширення інформативності контролю структурних змін у полімерах, викликаних впливом магнітного поля, зразок доцільно опромінювати рентгенівськими променями у трьох взаємно перпендикулярних напрямках, один з яких збігається з напрямком напруженості магнітного поля, і реєструвати розсіяне випромінювання для кожного напрямку в двох діапазонах, один з яких відповідає малокутовому розсіюванню ($12' - 12^\circ$), діапазони вибирати такі, що частково перекриваються.

Для якісної оцінки зміни розмірів (орієнтації) молекул полімерів під дією магнітного поля досить порівняти криві інтенсивності малокутового розсіювання рентгенівських променів за положеннями дифракційних рефлексів, їхньою амплітудою і формою, оскільки розміри розсіювальних неоднорідностей однозначно зв'язані з положеннями дифракційних рефлексів.

Інтерпретація вимірів інтенсивності розсіювання під малими і звичайними кутами дає досить повне уявлення про внутрішню будову полімерів і про структурні зміни, викликані магнітною обробкою.

Розсіювання під малими кутами дає змогу визначити розмір молекул, комплексів і спосіб їхнього взаємного просторового розташування. Розсіювання рентгенівських променів під звичайними кутами відбиває внутрішню (атомну) структуру молекул, яку можна встановити, скориставшись даними щодо малокутового розсіювання рентгенівських променів. Ближній порядок у розташуванні атомів визначається внутрішньою структурою комплексів, які на фоні середньої щільності виступають як неоднорідності.

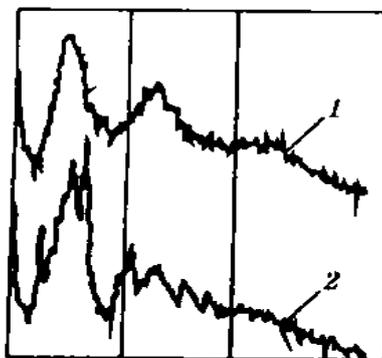


Рисунок 1.8. Інтенсивність розсіювання рентгенівських променів зразком полімеру ЕДТ-10, що піддався отвердненню в магнітному полі (1) та під впливом конвективного нагрівання (2)

На рис. 1.8 наведено суміщені дифракційні картини зразків епоксидного полімеру, що був підданий отвердненню в магнітному полі за напруженості 10 кА/м і поза полем.

Порівняльний аналіз кривих засвідчує, що в магнітооброблених зразках над дифракційною картиною аморфної фази з'являються структурні максимуми слабкої амплітуди (кристалічних піків). Виникнення кристалічної складової на кривих інтенсивності розсіювання рентгенівських променів відбиває перебудову молекул, їхнє упорядкування під впливом магнітного поля. За результатами рентгенівських досліджень можна розрахувати розміри ділянок когерентного розсіювання L_i , періоди ідентичності (dHk_i) і ступінь кристалічності. Зокрема, ступінь кристалічності магнітообробленого епоксидного полімеру становить $(43 - 52) \pm 3 \%$.

Отже, вплив магнітного поля викликає упорядкування структури полімерів і наближення її до класичної об'ємноцентрованої кристалічної ґратки.

Дані електронної мікроскопії добре узгоджуються з результатами рентгеноструктурного аналізу. Внаслідок вивчення надмолекулярної структури полімерів встановлено, що стійкими структурними одиницями є глобули, які під впливом зовнішніх факторів, у тім числі і магнітної обробки, набувають здатності змінювати свої форму і розміри. Встановлено, що в епоксидних сполучних, отверднених у магнітному полі, розміри глобулярних утворів збільшуються (рис. 1.9).

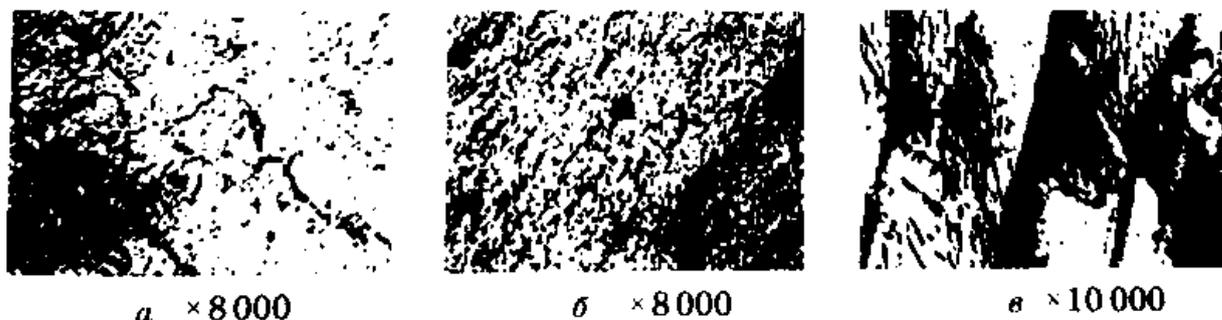


Рисунок 1.9. Структура сполучного ЕДТ -10: а – зразок, отверднений конвективним нагріванням; б, в – зразки, оброблені у магнітному полі

Крім того, глобули, розвертаючись, перебудовуються в лінійні структури (див. рис. 1.8, в). Для пояснення надмолекулярної організації полімерів можна запропонувати кластерну модель.

Під кластерами надалі розумітимемо ділянки, в яких має місце щільніше упакування молекул чи їхніх частин і більш упорядковане їхнє розташування порівняно з аморфною частиною речовини.

У зв'язку з цим полімер можна розглядати як сукупність окремих ділянок, що займають різні частки $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots$ загального об'єму полімеру й організовані різним чином. Грубою апроксимацією кластерної моделі є уявлення аморфного полімеру у вигляді системи, що складається з кристалічних кластерів, розміщених у неупорядкованій матриці. Тоді

щільність аморфного полімеру можна подати залежністю

$$\rho = \varphi_1 \cdot \rho_1 + \varphi_2 \cdot \rho_2 = \varphi_1 \cdot \rho_1 + (1 - \varphi_1) \cdot \rho_2,$$

де ρ_1, ρ_2 — щільності відповідно кристалічних кластерів у даному полімері і неупорядкованої матриці; $\varphi_1, \varphi_2 = (1 - \varphi_1)$ — об'ємні частки відповідно кластерів і неупорядкованої матриці в полімері.

Отже, щільність полімеру прямо пропорційна об'ємній частці кластерів. Магнітна обробка збільшує їхню кількість, зумовлює ріст середніх розмірів цих утворів і впорядковує розміщення полімерних ланцюгів у них. Для того щоб, скориставшись формулою, визначити об'ємну концентрацію кластерів φ_1 у полімері, потрібно знати два параметри: ρ_1 і ρ_2 .

Щільність неупорядкованої матриці ρ_2 можна одержати експериментально, проте визначення щільності ρ_1 залишається наближенням. Якщо як перше наближення взяти $\rho_1 = \rho_k = \rho_k$ (де ρ_k — щільність кристалітів), то для епоксидних полімерів $\varphi_1 = 0,6$.

Відмітною ознакою кластерної моделі є те, що в ній не регламентується характер морфології ланцюгів усередині кластера. В епоксидному полімері кластер складається з макромолекул, які мають складчасту конформацію, що добре узгоджується з моделлю Ієха. Характер морфології ланцюгів у кластерах визначається хімічною будовою полімеру, його молекулярною масою і значною мірою параметрами сітки зачеплень. Установлено, що коли відстань між сусідніми вузлами сітки зачеплень відповідає довжині в кілька десятків мономерних ланок, то найімовірнішою всередині кластерів буде складчаста конформація ланцюга. У межах такої моделі стає зрозумілим, що максимально можлива для полімеру об'ємна концентрація $\varphi \cdot \varphi_1$ кластерів задається параметрами сітки зачеплень. Кластер на модель встановлює і дає змогу простежити тісний «генетичний» зв'язок між аморфним і кристалічним полімерами.

Структурні перетворення в процесі нагрівання композитів можна оцінити методом дериватографії. Результати дериватографічних досліджень епоксидних полімерів засвідчують, що отверднення їх у магнітному полі підвищує теплостійкість з 480 до 520 К. Крім того, встановлено неординарний факт зміни на термограмах профілю кривої ДТА в магнітообробленому матеріалі. Після завершення процесу деструкції, що відбиває поява максимуму на кривій ДТА, виникають екстремуми на ділянці позитивного і негативного приросту енергії, зумовлені принципово новим явищем — «вторинною деструкцією». Це явище пов'язане з руйнуванням ділянок — кластерів, у яких під впливом магнітного поля створювалися міцніші зв'язки й у більшій кількості. Кристалічні ділянки виявляються дуже стійкими, і тому для їх руйнування потрібно більше енергії.

Виявлене явище впливу магнітного поля на отверднення композитів відкриває нові можливості для створення теплостійких полімерів.

Магнітні поля широко застосовують у технології створення виробів з полімерних композиційних матеріалів як один з фізичних методів модифікації полімерних сполучних і армованих пластиків. За існуючою технологією

формоутворення конструкцій ракетної техніки з композитів (органопластиків, склопластиків) є тривалим трудомістким процесом, що потребує значних витрат електроенергії і виробничих площ.

Вплив магнітних полів на композити в процесі отверднення дає змогу знизити трудомісткість процесу і підвищити експлуатаційні характеристики матеріалу.

Позитивно вирішити проблему можна у разі впливу полів на різних стадіях технологічного процесу одержання виробів. Це, наприклад, може бути попередня магнітна обробка на операціях просочення і формування.

Ефективнішим засобом спрямованого регулювання властивостей композитів є термомагнітна обробка, за якої магнітне поле накладають під час отверднення або кристалізації композита, що забезпечує підвищення ступеня впорядкованості, сприяє підвищенню адгезійної міцності сполучного і наповнювача. Під час термомагнітної обробки можна застосовувати різні джерела магнітного поля — електромагніти, провідники, розміщені всередині композита, підданого отвердненню, через які пропускають електричний струм, постійні магніти з магнітотвердих матеріалів тощо.

Найтехнологічнішим вирішенням накладання магнітних полів на заготовки типу тіл обертання є безконтактний спосіб, який не спричинює ускладнення технології виготовлення виробів. Як джерело магнітного поля в цьому разі доцільно застосовувати постійні магніти з фериту барію, що мають форму прямокутних пластин і дають змогу стверджувати у магнітному полі великогабаритні конструкції літальних апаратів з полімерних композиційних матеріалів. На рис. 1.10 наведено схему формування магнітного поля для термомагнітної обробки з використанням постійних магнітів.

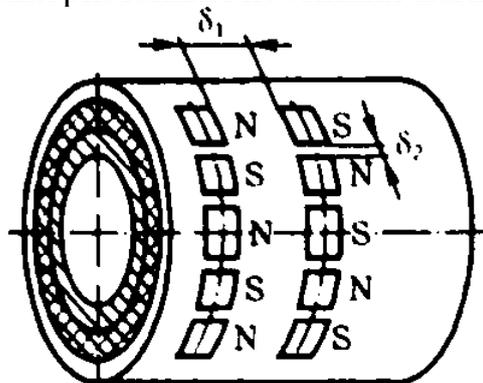


Рисунок 1.10. Схема формування магнітного поля для термомагнітної обробки: δ_1 , δ_2 – зазори відповідно по твірній і по дузі циліндричної поверхні

Режими термомагнітної обробки визначаються природою і структурними особливостями полімеру. Для конкретних матеріалів потрібно відпрацювати оптимальні параметри — тривалість обробки, величину і напрямок поля, що впливає, температуру та ін. Експериментально встановлено поліекстремальний характер залежності фізико-механічних властивостей термоактивних полімерів (епоксидних, феноло-формальдегідних) від напруженості магнітного поля, що діє упродовж процесу отверднення.

Результати досліджень, проведених у діапазоні 0 - 100 кА/м, засвідчують, що підвищення міцнісних показників зазначених полімерів

залежить від величини напруженості магнітного поля. Найбільше підсилення фізико-механічних властивостей до 30 % спостерігається за напруженостями 10 і 80 кА/м (в ділянці слабких магнітних полів). Під час обробки полімерних композиційних матеріалів важливим моментом є встановлення стадії реакції синтезу, за якої магнітне поле починає впливати на структуру композиції, що стверджується, оскільки орієнтувальний ефект магнітного поля і вплив температурного фактора є конкуруючими процесами.

Магнітне поле інтенсифікує процес отверднення, при цьому швидкість перебігу реакцій полімеризації чи поліконденсації залежить як від напруженості поля, так і від тривалості нагрівання. Зміщення інтервалу силування, за якого магнітне поле впливає на процес структуроутворення в низькотемпературну ділянку, дає змогу використовувати режими отверднення, які виключають застосування високих температур, що є істотним фактором при визначенні технологічних режимів формування полімерних композиційних матеріалів на термореактивних сполучних. Як ілюстрацію можна навести приклад отверднення органопластиків за двома технологічними процесами.

Так, у разі отверднення композиції на основі сполучного ЕДТ- 10 і наповнювача ДСВМ із застосуванням тільки конвективного нагрівання за термочасовим режимом, прийнятим для синтезу зазначеного композита, межа міцності за вигину становить 510, за стиску — 200 МПа.

Результати фізико-механічних випробувань цього самого органопластика, отвердненого за відпрацьованими режимами у магнітному полі напруженістю 10 кА/м, засвідчили, що термомагнітна обробка в діапазоні слабких магнітних полів забезпечує істотне зміцнення композита. Межа міцності за вигину становить 540, за стиску — 230 МПа.

Отже, раціонально підібрані режими термомагнітної обробки полімерних композиційних матеріалів дають змогу підвищити міцнісні показники до 20 — 25 %.

Наведені фрагменти технології зміцнення органопластиків і застосування отверднення в магнітному полі можна використовувати в разі виготовлення елементів конструкцій у машинобудуванні, суднобудуванні, хімічній промисловості (корпуси, посудини високого тиску, труби тощо).

1.2.4. Отверднення з електронним опроміненням [1]

Радіаційний метод вважають одним з найшвидших методів отверднення полімерних матеріалів: час тверднення найменш реакційноздатних сполучних вимірюється секундами. У разі радіаційного отверднення утворення ініціювальних центрів не пов'язане з наявністю отвердників і відбувається рівномірніше в часі й об'ємі полімеру. Енергія, потрібна для радіаційного отверднення, у 3 — 4 рази нижча, ніж для термохімічного. У разі отверднення феноло-формальдегідних смол енергетичні витрати становлять 21,0 — 26,2 кДж/моль.

Принципово процеси радіаційного отверднення можуть відбуватися під дією випромінювань різних типів джерел з регульованими інтенсивністю і дозою. При цьому значно скорочується час обробки через вищу, ніж у разі термічного отверднення, швидкість утворення активних центрів. Радіаційне отверднення дає змогу точніше контролювати реакцію ініціювання полімеризації, температуру і швидкість процесу за рахунок зміни інтенсивності опромінення. Час отверднення знижується в 10 — 20 разів, ступінь завершеності хімічного процесу досягає 100 % порівняно з 88 - 95 % за термохімічного отверднення.

У разі радіаційного опромінення близько 30 % енергії витрачається на хімічні реакції, а решта переходить у теплоту. Щоб процес отверднення не спричинював спінення сполучного, його проводять з певною потужністю дози, запобігаючи перевищенню температурою деякого критичного значення. Одним з технологічних рішень є застосування безперервного опромінення.

Для перебігу радіаційної полімеризації (поліконденсації) термоактивних епоксидних і феноло-формальдегідних смол потрібні дози відповідно 0,6 — 0,9 і 1,4—1,8 мГр, але за цих доз процес отверднення не відбувається цілком. Підвищення доз опромінення до 2 - 8 мГр забезпечує високий ступінь отверднення, однак погіршує чимало фізико-механічних показників полімерів. На характер радіаційного отверднення композитів значно впливає наповнювач. Сполуки, що містяться у волокнах, а також у замащювачах і апретах (зокрема, оксиди бору), здатні поглинати більші дози опромінення (1,5 - 3 мГр), через що зростають дози, потрібні для отверднення композита порівняно з отвердненням сполучних. Застосування вищих доз опромінення може викликати деструкцію, що спричинює погіршення властивостей матеріалу. З метою зниження рівня доз застосовують стабілізуючі добавки, однак при цьому погіршують фізико-механічні показники отвердненого полімеру.

Незважаючи на зазначені обмеження, радіаційну технологію досить широко застосовують під час виготовлення виробів і покриттів з полімерних композиційних матеріалів. Найперспективнішим напрямом є використання комбінованих методів отверднення, що включають термохімічне і радіаційне отверднення в різних поєднаннях.

Використання енергії випромінювання для отверднення полімерних сполучних зумовлено тим, що здійснення радіаційного отверднення полімерних матеріалів не викликає технічних труднощів і може бути використане для виготовлення виробів практично будь-якої товщини.

Технологічні схеми радіаційного отверднення виробів з полімерних матеріалів можуть бути найрізноманітнішими:

- виріб отримано цілком, і радіаційну обробку проводять окремо від операції формування в камері з прискорювачем;
- отверднення відбувається одночасно з формуванням виробу (намотуванням); ця схема економічніша, ніж попередня;
- отверднення відбувається в процесі формування, але з метою

інтенсифікації реакцій, зниження потрібних доз перед формуванням просочений наповнювач підігривають; згідно з цією схемою можна поліпшити якість матеріалу, підданого отвердненню;

- після формування і попереднього одночасного з формуванням радіаційного отверднення виріб остаточно стверджують термохімічним способом поза зоною дії прискорювача. У схемі використовують комбіноване отверднення, що включає процес радіаційної обробки за низьких доз і термічне отверднення, що дає змогу зменшити час отверднення порівняно із суто термічним способом у 2 — 3 рази, збільшити пропускну здатність прискорювача і поліпшити якість матеріалу і виробу;

- опромінюють тільки просочений наповнювач, який спрямовують на формування поза прискорювачем чи під ним. В обох випадках процес потребує менших доз опромінення.

Оптимальне поєднання способів і параметрів радіаційної обробки забезпечує одержання вищих і стабільніших характеристик матеріалу і виробу.

Широкого застосування набуло отверднення прискореними електронами, одержуваними за допомогою низькоенергетичних прискорювачів прямої дії. Оскільки всі електрони зовнішніх атомів чи молекул майже однаково доступні активації швидкими електронами, дія їх на речовину не носить специфічного характеру.

На відміну від γ -випромінювання, лише невелика частина енергії якого передається електронам атомів опромінюваної речовини, прискорені електрони безпосередньо взаємодіють з атомами та ядрами атомів речовини, що призводить до великих втрат їхньої кінетичної енергії у відносно нетовстому шарі матеріалів. Тому порівняно з γ -випромінюванням установки з прискорювачами електронів за значно меншої проникної здатності забезпечують одержання великих потужностей дози (до 10^6 — 10^8 рад/с), що робить технологічні процеси виготовлення виробів з ПМК продуктивнішими.

Глибина проникнення електронів у матеріали відносно невелика. Так, електрони з енергією 1 МеВ мають максимальний вільний пробіг у склопластику порядку $2 \cdot 10^{-3}$ м. Внаслідок цього найдоцільнішим методом виготовлення виробів з використанням радіаційної обробки прискореними електронами є пошаровий (полімеризація, поліконденсація).

Адгезійний зв'язок здійснюється між шарами матеріалу з різним ступенем отверднення. Описаний метод значно скорочує тривалість процесу виготовлення виробів внаслідок поєднання операцій формування й отверднення, істотно знижує рівень усадочних і термічних напруг, забезпечує задану кількість сполучного та його рівномірний розподіл по периметру і товщині виробу. Істотним є також та обставина, що міцнісні показники ствердлого матеріалу зберігають стабільність за значних коливань технологічних параметрів (дози поглиненої енергії, натягу нитки наповнювача). Це уможливорює автоматизацію процесу формування у разі поєднання його з отвердненням під локальним впливом пучка електронів.

1.2.5. Отверднення із застосуванням надвисоких частот [1]

Із самого початку свого розвитку людство використовувало процес нагрівання: за допомогою вогню люди розігрівали їжу й обігрівали житло, обробляли метали для виготовлення зброї та інструментів.

Після відкриття електрики у виробничих цілях для нагрівання почали застосовувати електронагрівники, що, крім значних переваг порівняно з відкритим вогнем, мають і недоліки. Особливо чітко це виявляється в технології отверднення полімерних композиційних матеріалів, що мають низьку теплопровідність. Для досягнення рівномірної температури по всьому об'єму матеріалу потрібен досить тривалий процес нагрівання. Це призводить до значного подорожчання виробництва виробів. Крім того, у разі нагрівання матеріалу зовнішнім джерелом теплоти за умови низької його теплопровідності складається ситуація, коли в середніх шарах відбувається процес отверднення, зовнішні шари починають розтріскуватись, а внутрішні шари ще не досягли температури ініціювання процесу полімеризації (поліконденсації). Кардинальним вирішенням питання рівномірного отверднення ПКМ є можливість використання такого методу нагрівання, який би не залежав від теплопровідності матеріалу. До моменту постановки завдання уже використовували властивість матеріалів поглинати (відбивати) електромагнітні хвилі. Отже, завдання зводилось до забезпечення максимального поглинання енергії електромагнітної хвилі опромінюваним матеріалом. Так виник новий напрям у дослідженнях — електромагнітне нагрівання, що нині багатьом відоме на прикладі печей НВЧ.

Наведений приклад не вичерпує можливості методу НВЧ-нагрівання. Цей метод широко досліджували в лісопереробній галузі для пристосування його до просушування деревини. Наше ж завдання — продемонструвати можливість методу для виробництва ПКМ. Під час високочастотного нагрівання відбувається одночасне і рівномірне підвищення температури по всьому перерізу однорідного матеріалу. Крім того, нагрівання припиняється одночасно з вимиканням напруги на конденсаторі. На відміну від звичайного нагрівання, незалежно від стану навколишнього середовища легко регулюється температура матеріалу. Це має місце для частот від середньохвильового до метрового діапазону за рівномірного розподілу в матеріалі, що нагрівається, електричного поля. Розподіл частот, які застосовують для нагрівання в електричному полі, наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Розподіл частот нагрівання в електричному полі

| Діапазон електромагнітних хвиль | Довжина хвилі λ , м | Частота f , МГц |
|---------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| Середньохвильовий | 1000 – 100 | 0,3-3 |
| Короткохвильовий | 100-10 | 3-30 |
| Метровий | 10-1 | 30-300 |

| | | |
|---------------|----------|---------------|
| Дециметровий | 1-0,1 | 300-3000 |
| Сантиметровий | 0,1-0,01 | 3000 - 30 000 |

У разі підвищення частоти до сантиметрового діапазону довжин хвиль глибина проникнення електромагнітної хвилі стає сумірною з товщиною матеріалу, що нагрівається.

Особливістю високочастотного методу нагрівання, що принципово відрізняє його від інших методів, є виділення теплової енергії в самій масі матеріалу, що нагрівається. Залежно від електричних властивостей матеріалу використовують два способи високочастотного нагрівання: індукційне нагрівання провідних матеріалів у магнітному полі і нагрівання непровідних матеріалів в електричному полі.

До непровідних матеріалів, нагрівання яких в електричному полі доцільне, належать: деревина, полімери, харчові продукти, папір тощо. Полімерні матеріали за малої вологості і досить низької температури зараховують до діелектриків, а за підвищеної вологості чи вищої температури вони поведуться як напівпровідники.

Є матеріали, такі як скло чи скляна шихта, що різко змінюють свої електричні властивості залежно від температури. Так, у холодному стані вони добрі діелектрики, з підвищенням температури набувають властивостей напівпровідників, з подальшим нагріванням стають провідниками.

Нагрівають непровідний матеріал між пластинами конденсатора або опроміненням його електромагнітною хвилею перед хвилеводом. В обох випадках принцип нагрівання однаковий, відмінність полягає в тому, що в разі нагрівання електромагнітною хвилею використовують вищі частоти.

Нині визначилися дві галузі промислового застосування НВЧ-нагрівання: з метою термообробки і з метою сушіння вологих матеріалів. Насамперед потрібно розвивати високочастотне нагрівання різних полімерних композиційних матеріалів, де новий метод нагрівання найбільшою мірою сприяє збільшенню продуктивності і поліпшує якість продукції. Після впровадження високочастотного підігрівання прес-порошків продуктивність пресів збільшується на 30 — 40 %. Це засвідчує перспективність і доцільність впровадження цього методу нагрівання з поступовим переходом до вищого діапазону використовуваних частот, що приведе до такого скорочення часу нагрівання, за якого операцію нагрівання можна буде включити в загальний цикл роботи прес-автомата.

Під час виготовлення виробів з термопластичних матеріалів можна застосовувати високочастотне зварювання як один з методів поліпшення якості продукції.

За умовами високочастотної термообробки до полімерів близько підходять продукти вулканізації гуми, шаруваті ізоляційні матеріали та ін.

У разі виготовлення виробів з термореактивних композиційних матеріалів використовують їхню властивість розм'якшуватися з підвищенням температури, а після досягнення певної температури синтезуватися, тобто переходити в незворотний стійкий стан.

У процесі отверднення композитів, залежно від термочасових режимів, між макромолекулами мономера діють ковалентні або вандерваальсові сили, які спричиняють зближення молекул і хімічну «усадку» сполучного. Між молекулами виникають значні напруги. Ступінь завершеності процесу синтезу оцінюють за показниками міцності (модуль зсуву, поверхнева міцність і т.д.) або електрофізичними характеристиками (тангенс кута діелектричних втрат).

Потужність, що розсіюється (поглинається) у діелектрику під дією змінного електричного поля, називають *діелектричними втратами*. Поширення хвиль у речовині приводить до їх поглинання. В результаті енергія електромагнітних хвиль перетворюється на інші види енергії. Зазвичай для оцінки діелектричних втрат використовують тангенс кута діелектричних втрат. Для наочності на рис. 1.11 наведено зразок діелектрика, як паралельну еквівалентну схему конденсатора. Векторна діаграма цієї схеми показує, що зміщення фаз між струмом у конденсаторі з втратами і напругою φ дає величину, що не перевищує 90° .

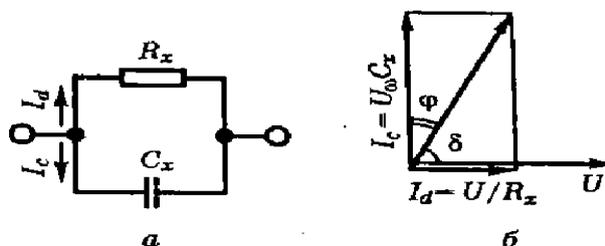


Рисунок 1.11. Паралельна еквівалентна схема (а) і векторна діаграма (б) для конденсатора з втратами

Додатковий кут δ , що дорівнює $\frac{\pi}{2} - \varphi$, називають кутом *діелектричних втрат*:

$$tg\delta = \frac{I_0}{I_c} = \frac{U/R_x}{U\omega \cdot C_x} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_x \cdot R_x} \quad \text{або} \quad \frac{1}{R_x} = 2 \cdot \pi \cdot C_x \cdot R_x \cdot tg\delta .$$

Діелектричні втрати для цієї схеми

$$P = U^2 / R_x \quad \text{або} \quad P = U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_x \cdot tg\delta ,$$

де P — діелектричні втрати; U — напруга; f — частота електричного струму; C_x — ємність конденсатора; $tg\delta$ — тангенс кута діелектричних втрат.

З наведених залежностей випливає, що діелектричні втрати можна характеризувати значенням $tg\delta$. Значення тангенса кута діелектричних втрат прямо пропорційне діелектричним втратам, тобто чим нижчий $tg\delta$, тим менші діелектричні втрати, тим кращі електроізоляційні властивості матеріалу.

Діелектрична проникність ізотропного діелектрика (відносна) — скалярна величина ϵ_e , що дорівнює відношенню напруженості електричного поля у вакуумі до напруженості електричного поля в однорідному нескінченному діелектрику за незмінних значень і розташування вільних електричних зарядів. *Діелектрична проникність* показує, у скільки разів

зменшується сила кулонівської взаємодії електричних зарядів у разі переміщення їх з вакууму в однорідний ізотропний діелектрик за незмінної відстані між ними. Діелектрична проникність пов'язана з діелектричною сприйнятливістю k співвідношенням

$$\varepsilon = 1 + k.$$

Стосовно теми, що розглядається, можна дати таке визначення: діелектричною проникністю ε_e (діелектричною сталою ізоляційного матеріалу) називають число, яке показує, у скільки разів зросте ємність вакуумного конденсатора, якщо, не змінюючи його геометричних параметрів, заповнити простір між електродами досліджуваною речовиною:

$$\varepsilon_e = C_x / C_v,$$

де C_x — ємність досліджуваного зразка; C_v — ємність вакуумного конденсатора. Діелектрична проникність — безрозмірна величина. Діелектрик тим кращий, чим менша ємність конденсатора з даним матеріалом, чим менша його діелектрична проникність.

Спираючись на швидкісний характер процесу високочастотного нагрівання, легко можна організувати потоковий метод нагрівання, тобто застосувати прогресивну технологію. Вдосконалення процесу нагрівання сприяє створенню вищої культури виробництва.

Питання до першого розділу

1. Поняття про полімерні композиційні матеріали?
2. З яких компонентів складаються полімерні композиційні матеріали?
3. Призначення матриці?
4. Призначення наповнювача?
5. Вимоги, що пред'являються до матриці?
6. На які групи поділяють полімерні матриці в залежності від зміни властивостей під час нагрівання?
7. Які полімери відносяться до термопластичних?
8. Які полімери відносяться до термореактивних?
9. Яка особливість твердіння термореактивних полімерів?
10. Особливість твердіння термопластичних полімерів?
11. Що таке лінійні полімери?
12. Визначення розгалужених полімерів?
13. Особливості сітчатих полімерів?
14. Основні полімерні матеріали які застосовуються в ракетно-космічній техніці?
15. Визначення реакції полімеризація?
16. Визначення реакції поліконденсації?
17. Що таке гетерофазні системи?
18. Назвіть суцільні фази полімерних композиційних матеріалів?
19. Як поділяються макромолекули полімерів за складом основного ланцюга?

20. Що таке гетероланцюгові полімерні сполуки?
21. Співполімеризація, визначення та поняття?
22. Блок-співполімеризація, визначення та поняття?
23. Фізичні фактори, що спричиняють зупинку поліконденсації?
24. Хімічні фактори, що спричиняють зупинку поліконденсації?
25. Вулканізація, визначення та поняття?
26. Карбонізація, визначення та поняття?
27. Графітізація, визначення та поняття?
28. Методи нагрівання під час отверднення, печі опору?
29. Особливості отримання вуглець-вуглецевих матеріалів?
30. В яких печах найчастіше виготовляють полімерні композиційні матеріали?
31. Печі аеродинамічного нагріву, поняття?
32. Застосування індукційних печей при виробництві полімерних композиційних матеріалів?
33. В чому заключається індукційний метод нагрівання?
34. Застосування термоелектричних нагрівників при виробництві полімерних композиційних матеріалів?
35. Інфрачервоне нагрівання при виробництві полімерних композиційних матеріалів?
36. Який спектр електромагнітних коливань ІЧ-випромінювання займає в спектрі електромагнітних хвиль?
37. Джерела ІЧ-енергії?
38. Групи джерел випромінювання в ІЧ-ділянці спектра за фізичною природою генерування енергії?
39. Переваги ІЧ випромінювання при виробництві полімерних композиційних матеріалів?
40. Назвіть електричні генератори ІЧ-випромінювання?
41. Основна характеристик ІЧ випромінювання?
42. Механізм впливу ІЧ випромінювання на полімерні композиційні матеріали?
43. Яка основна перевага використання інфрачервоного нагрівання?
44. В наслідок якого впливу скорочується час формоутворення виробів при затвердженні?
45. Джерела теплого випромінювання?
46. Що таке «світлі» випромінювачі ІЧ нагрівання?
47. Поняття про «темні» випромінювачі ІЧ нагрівання?
48. Поняття про дзеркальні лампи розжарювання?
49. Переваги та недоліки дзеркальних ламп розжарювання?
50. Поняття про кварцеві галогенні лампи розжарювання?
51. Основні вимоги при визначенні енергетичних характеристик установок?
52. Кластерна модель в надмолекулярних організаціях полімерів?

53. Відмітні ознаки кластерної моделі в полімерних композиційних матеріалів?
54. Поняття про кластери аморфних матеріалах?
55. Поняття про феромагнетики?
56. Сучасні магніти з магнітотвердих матеріалів?
57. Чому дорівнює магнітне поле Землі?
58. Методи розрахунку магнітних полів?
59. Поняття про магнітно-скалярний потенціал?
60. Що таке принцип суперпозиції?
61. Назвіть характеристику інтенсивності протікання процесу зшивання макромолекул під впливом магнітного поля?
62. Вплив магнітних полів на різних стадіях технологічного процесу отримання виробу?
63. Як визначаються режими термомагнітної обробки?
64. Механізм впливу магнітних полів на реакції полімеризації чи поліконденсації?
65. Назвіть інтервал напруг магнітного поля при обробці композитів?
66. Яка характеристика використовується в процесі протікання зшивки макромолекул?
67. Що таке орієнтаційний ефект в композитах під впливом магнітного поля?
68. Поняття про радіаційний метод отверднення полімерних композиційних матеріалів?
69. Назвіть технологічні схеми радіаційного отверднення виробів із полімерних композиційних матеріалів?
70. Поняття про отверднення із застосуванням надвисоких частот?
71. Термомагнітна обробка при виготовленні полімерних композиційних матеріалів?

2. Полімерні композиційні матеріали

Основними полімерними матрицями, які застосовують у техніці при виготовленні полімерних композиційних матеріалів, є епоксидні, феноло-формальдегідні, сіліційорганічні смоли, поліетилен, поліпропілен, полістирол, фторопласти, органічне скло, поліаміди, полііміди, полівінілхлорид.

Для придбання різної якості в полімери вводять домішки:

- для підвищення пластичності — пластифікатори, що знижують сили механічної взаємодії між макромолекулами — це висококиплячі рідини;
- для надання гнучкості й еластичності в полімери додають камфору, рослинні й мінеральні олії;
- для уповільнення термічної деструкції і захисту від взаємодії світла в полімери вводять термо- і світлостабілізатори — це стеарати кальцію, барію, свинцю;
- для якісного видалення полімерів із пресформи додають речовини, що змазують, — парафін, віск;
- для забарвлення полімерів у різні кольори використовують різні пігменти.

Важливе місце в полімерних композиційних матеріалах посідають наповнювачі – армувальні хімічні волокна, що є протяжними тілами з поперечними розмірами від одиниць до сотень мікрметрів. Промисловість випускає як моноволокна, так і волокна в вигляді філаментних і текстильних ниток з найрізноманітніших матеріалів. До армувальних матеріалів ставлять чимало вимог, головними з яких є: високі модуль пружності, міцність; високі тепло- і термостійкість, які забезпечуються умовами одержання ПКМ; добра адгезія і задовільна довговічність адгезійного контакту між армувальними волокнами і сполучним; стійкість компонентів композита до впливу експлуатаційних факторів.

У залежності від виду наповнювача композиційні матеріали поділяються на дві групи:

- дисперсійно-зміцнені;
- волокнисті.

У дисперсійно-зміцнених композиційних матеріалах частки створюють сильне гальмування пересуванню дислокацій і матеріал деформується при більш високих напруженнях. У якості таких часток-наповнювачів застосовуються карбіди, нітриди, бориди, оксиди, що характеризуються високою жаростійкістю і міцністю.

У волокнистих композиційних матеріалах волокна сприймають основне навантаження, а податлива матриця забезпечує їхню спільну роботу за рахунок власної твердості і взаємодії на границі матриця—волокно.

Таким чином, властивості композитів визначаються трьома основними параметрами:

- високою міцністю армованих волокон;
- твердістю матриці;

- зв'язку на границі матриця—волокно.

Для підвищення адгезійної міцності застосовують наступні технологічні прийоми:

- нанесення спеціальних тонких покриттів — апретів;
- "розпушують" волокна повітряним струменем;
- застосовують пористі наповнювачі.

До волокон висувають вимоги міцності, твердості, стабільності властивостей у визначеному температурному інтервалі й інші специфічні властивості. Синтезують матеріали з такими властивостями, використовуючи H_2 , Be , B , N , O_2 , Al , Si . Відповідно до закону Гука теоретична міцність матеріалу зростає зі збільшенням модуля пружності E і поверхневої енергії γ речовини і падає зі збільшенням відстані між сусідніми атомними площинами:

$$\delta_m = \sqrt{\frac{\gamma \cdot E}{a_0}}$$

Отже, високоміцні матеріали повинні мати високі E та γ і максимально можливий вміст атомів в одиниці об'єму, тобто мале a_0 . Цим матеріалам найбільше повно задовільняють H_2 , Be , B , C , N , O_2 , Al , Si .

На практиці застосовують високоміцні органічні волокна, скловолокна, вуглеродне волокно, керамічне, борні і карбідні волокна [2-6].

Композиційні матеріали можуть бути ізотропними, анізотропними й ортотропними.

Ізотропні — це дисперсійно-зміцнені композиційні матеріали (наповнені чи армовані) порошковими матеріалами.

Анізотропні — волокнисті матеріали, у яких дуже відрізняються властивості вздовж волокон чи m шарів і впоперек.

Ортотропні — матеріали, що являють собою об'ємні сплетення, що мають однакові характеристики за двома чи трьома напрямками [7].

2.1 Сполучні

Епоксидні сполучні. Утворені речовини, що мають складну будову ланцюга, називають епоксидними сполучними. Епоксидні полімери, отримані внаслідок реакції полімеризації, є твердими крихкими речовинами з низькою температурою розм'якшення ($300-360^\circ K$) і невисокою молекулярною масою. Вони добре розчиняються в ацетоні, толуолі та інших органічних розчинниках.

Розчини епоксидних полімерів — це в'язкі, тягучі речовини з клеючими властивостями. Внаслідок введення в епоксидні полімери ароматичних імінів, двохосновних органічних кислот або фенолів вони тверднуть і втрачають здатність плавитись під час нагрівання, розчиняються в органічних розчинниках і набувають комплексу нових фізичних властивостей.

Залежно від співвідношення полімеру й отвердника у вихідній суміші, а також хімічного складу і будови, тверднення відбувається за різних

температур (ід звичайної до 470°K). Є щонайменше 10 хімічних типів епоксидних сполучних, ям тверднуть під дією 20 різних отвердників. Затверділі епоксидні полімери мають низку цінних властивостей: малу щільність (1,14—1,25 г/см³), високу стійкість до дії різних хімічних реагентів, а також чудову міцність зчеплення (адгезію) з поверхнями неметалів і металів, технологічні. Великою перевагою епоксидних полімерів є їх здатність добре поєднуватись з іншими полімерами (наприклад, феноло-формальдегідними) й доповнювати своїми властивостями недостатні властивості інших компонентів композицій, але епоксидні полімери мають коксове число 3-5%.

Феноло-формальдегідні сполучні. Це тверда кристалічна речовина, розчинна у воді й у багатьох органічних розчинниках. Добутий полімер у техніці називають феноло-формальдегідним сполучним. Реакцію поліконденсації фенолу з формальдегідом проводять за наявності каталізаторів: кислот або лугів. Залежно від вмісту одного з компоненте вихідної суміші і характеру середовища одержують полімери, різко відмінно за властивостями. Полімери, отримані за наявності кислот, є термопластичними, їх називають новолаком. Полімери, отримані за наявності лугів, є термоактивними, їх називають резолами. Феноло-формальдегідні сполучні виявляють високу механічну міцність, електроізоляційні властивості, антикорозійну стійкість, мають коксове число 55-70 %.

Силіційорганічні сполучні. Силіційорганічними полімерами називають високомолекулярні сполуки, в елементарні ланки макромолекул яких входять атоми силіцію, сполучені з атомами кисню, деяких металів і вуглецю - залежно від складу елементарних ланок макромолекул силіційорганічні полімери поділяють на перелічені нижче групи:

- полісиланові,
- полісилоксанові,
- полікарбоксиланові;
- полікарбоксілоксанові;
- поліорганометалсилоксанові.

Велика розмаїтість складу і будови елементарних ланок макромолекул силіційорганічних полімерів визначає надзвичайно широкий діапазон фізико-механічних і хімічних властивостей цих сполук. Характерною особливістю всіх силіційорганічних сполук є їх високі теплостійкість, морозостійкість, діелектричні властивості та адгезійна здатність.

Поліетилен. Найпростішим представником органічних ненасичених сполук з одним подвійним зв'язком у молекулі є етилен ($H_2C = CH_2$). Поліетилен одержують полімеризацією газу етилену двома способами: при високому тиску (до 300 МПа), температурі близько 470 К і за наявності кисню як ініціалізатора реакції; при низькому тиску (0,15—0,20 МПа), температурі близько 430 К і за наявності каталізаторів.

Поліетилен, отриманий при високому тиску, є твердим матеріалом білого кольору. У тонких плівках прозорий. При температурі 380 К розм'якшуються і стає еластичним; при температурі нижче 250 К ламкий. Має добрі діелектричні властивості, хімічностійкий, характеризується низьким коефіцієнтом тертя.

Поліетилен, добутий при низькому тиску, менш еластичний, іноді майже жорсткий, має більшу міцність, щільність і розм'якшуються при високій температурі.

Поліпропілен. Поліпропілен за фізичними властивостями подібний до поліетилену, але відрізняється більшою міцністю, еластичністю, плавиться при температурі 430 К, водонепроникний, має малу паро- і газопроникність. Плівка з поліпропілену зовсім прозора.

Полістирол. Вихідна речовина для одержання полімеру — стирол. Це безбарвна рідина з температурою кипіння 420 К, добре розчиняється в спирті, естері та інших органічних розчинниках.

Залежно від умов полімеризації можна одержати полістирол з різною молекулярною масою (від 50 000 до 300 000 вуглецевих одиниць), що, в свою чергу, впливає на властивості отриманого полімеру. Полістирол прозорий, добре забарвлюється, має достатню міцність (межа міцності на стиск до 40 МПа), високу хімічну стійкість, добрі діелектричні властивості і, що головне, підвищену вологостійкість.

Поліметилметакрилат. Отриманий полімер має високий ступінь прозорості, термопластичний, легко формується. Листовий матеріал використовують як скло, яке називають органічним. Він не затримує ультрафіолетові промені, має високу ударну в'язкість, добру адгезію.

Фторопласт. Полімер винятково хімічно пасивний, на нього не діють міцні луги, кислоти, навіть "царська горілка", що є найсильнішим окисником, не чинить на полімер жодного хімічного впливу. До інших особливостей полімеру належать висока термостійкість, підвищені електроізоляційні властивості, що дає змогу використовувати його в установках, які працюють на великих частотах і за високої напруги.

Поліаміди. До них належать групи синтетичних полімерів, в основний ланцюг макромолекул яких, крім атомів вуглецю, входить амінна група.

Відмітними властивостями поліамідів є їх здатність при продавлюванні в розплавленому стані крізь фільтри діаметром близько 0,06- 0,1 мм утворювати волокна, які мають надзвичайно високу міцність на розрив, високу еластичність, великий коефіцієнт подовження, високу стійкість до зношування, стирання. Поліаміди — це тверді термопластичні полімери блідо-жовтого кольору з високою температурою плавлення. Застосовують їх як

високоміцні матеріали.

Полііміди. Полімери, що містять в основному або бічному ланцюзі циклічну імідну групу. Фізико-механічні характеристики імідних полімерів не змінюються впродовж тривалого часу в досить широкому діапазоні температур: від 70 до 570 К. Іміди мають добрі діелектричні властивості, характеризуються високою стабільністю розмірів, низькими повзучістю і коефіцієнтом тертя, високими термостійкістю і стійкістю до опромінення гамма-променями, прискореними електронами і нейтронами, хімічно стійкі.

Полівінілхлорид. Особливістю полівінілхлориду є важкість його займання і погана горючість, що пояснюється наявністю атомів хлору в макромолекулах полімеру. Має високу межу міцності на розтяг, велику ударну в'язкість, підвищену хімічну стійкість, термопластичний. Недоліками є невисока температура розм'якшення (340 К) і термічна нестійкість [8-11].

2.2 Армуючі матеріали

Органічне волокно. Процес одержання волокон складається з двох стадій: синтезу поліамідів і формування. Синтез поліамідів — це низькотемпературна поліконденсація хлорангідридів ароматичних дикарбонових кислот і ароматичних діамінів. З отриманого продукту витягають волокна через фільтри зі швидкістю 60 м/с.

Волокнистий наповнювач може бути різної текстильної переробки (волокно, джгут, нитка). Внаслідок низької щільності за питомою міцністю і модулем пружності в разі розтягу органічні волокна з амідними тупами перевершують усі відомі на сьогодні армувальні волокна і сплави, поступаючись за цими показниками лише вуглецевим і борним волокнам. У зв'язку з цим такі волокна часто називають високомодульними і високоміцними (міцність досягає 4,5 ГПа, а модуль пружності — до 160 ГПа).

Скловолокно. Скляні волокна широко застосовують під час створення полімерних конструкцій композитів — склопластиків.

За порівняно малої щільності вони мають високу міцність, низьку теплопровідність, теплостійкі, стійкі до хімічного і біологічного впливу.

Як вихідні матеріали для волокон використовують лужне алюмосилікатне або мало лужне алюмоборосилікатне скло.

Найбільш поширена схема виготовлення безперервних скловолокон діаметром 9—20 мкм способом витягування їх зі скломаси.

Із суцільного скляного волокна виготовляють армувальні матеріали для склопластиків:

- нитки і волокна односпрямовані;
- нитки комплексні некручені і кручені;
- рівниці і ровінги (джгути);

- сітки, тканини і стрічки;
- неткані рулонні матеріали.

Вуглецеве волокно. Серед жароміцних матеріалів найбільш практичне застосування одержали вуглецеві волокна, оскільки вони характеризуються високим модулем пружності, що перевищує модуль скловолокна більше ніж у 5 разів, низьким коефіцієнтом теплового розширення, доброю роботоздатністю в умовах вібрації, стійкістю до впливу температури, високою міцністю до втомлюваності технологічністю.

Вуглецеві волокна поділяють на карбонізовані, вугляні і графітові, які відповідно містять не більше ніж 90 %, 91—98 % і понад 98 % вуглецю. Вони утворюються з волокнистих полімерів під час термічної обробки в інертних середовищах.

Залежно від вихідної сировини і технології обробки можна одержати вуглецеві волокна з різними характеристиками.

Карбідне волокно. Волокна цього типу жароміцні і жаростійкі, тому дуже перспективні для створення жароміцних матеріалів на металевій основі.

Основний спосіб виготовлення суцільних карбідних волокон діаметром до 150 мкм — осадження з газової фази карбиду силіцію на підкладку.

У карбідних волокнах як підкладку використовують волокна вольфраму діаметром 12 мкм, вуглецеві моноволокна.

Карбід силіцію використовують і як покриття для підвищення жаростійкості борних волокон. При цьому стає можливим введення борних волокон у деякі металеві матриці, з якими той активно взаємодіє, наприклад у розплавленій алюміній.

Волокна бору, вкриті карбідом силіцію, дістали назву борсик. Наносять покриття за такою самою реакцією, за якою одержують суцільні волокна карбиду силіцію.

При підвищених температурах на повітрі міцність волокон борсику і карбиду силіцію значно вища, ніж волокон бору. Тому такі волокна намагаються використовувати у високотемпературних матеріалах на основі титану і жароміцних сплавів.

Борне волокно. Композити на основі борних волокон мають високі міцнісні й втомленісні характеристики, а також високий модуль пружності. Волокна бору, карбиду силіцію, борсику I (B/Si), що мають високі міцність, твердість і малу щільність, найперспективніші для зміцнення матриць на основі легких металів та їхніх сплавів. Борні волокна — це суцільні моноволокна діаметром 5-200 мкм, неоднорідні за структурою й анізотропні, мають кристалічну структуру $\beta\beta$ -ромбічної модифікації. Традиційним методом одержання волокон бору є його хімічне осадження при високій температурі (1400 К) із суміші газів на вольфрамову підкладку у вигляді ниток діаметром 12 мкм у реакторі.

Міцність волокон бору істотно залежить від їхньої довжини. Зафіксоване зниження міцності вдвічі в разі збільшення довжини волокна з 24,4 до 6000 мм.

Волокна бору широко застосовують у виробництві композитів на основі полімерної та алюмінієвої матриць. Композити на основі борних волокон і алюмінієвої матриці можуть працювати при температурі 640 К.

Борні волокна належать до числа напівпровідників, тому їхня наявність у композиті зумовлює зниження тепло- та електропровідності.

Керамічне волокно. Керамічне волокно — це клас наповнювачів — тонких полікристалічних ниток (волокон) різних керамічних матеріалів. Поняття "полікристалічні" волокна варто розуміти так, що вони складаються з кристалів, розміри яких значно менші за розміри поперечного перерізу волокна (1—2 мкм). Власне кажучи, ці волокна мають структуру кераміки з неорієнтованими зернами. Полікристалічні волокна виготовляють з найміцніших тугоплавких хімічно і механічно стійких матеріалів, таких, як оксид алюмінію, діоксид цирконію, вуглець і графіт, оксид хрому, оксид алюмінію — оксид хрому, діоксид силіцію, оксид хрому — діоксид силіцію та інш.

Волокна з зазначених матеріалів мають високу міцність і менший її розкид, підвищені твердість, ерозійну стійкість і абляційну ефективність. Щоб підвищити ефект зміцнення, волокна мають бути орієнтованими в потрібному напрямку в матриці і міцно з нею зв'язаними. [8-11].

2.3 Дисперсні наповнювачі

Композиції з дисперсними наповнювачами поділяють на два основних класи: дисперсійно-зміцнені і зміцнені часточками. В обох випадках композицію утворюють матриця і розподілена в ній друга фаза, яку додають з метою зміни тих чи інших властивостей.

Ці класи різняться один від одного структурою. Дисперсійно-зміцнені композиції є матрицею з елементарної речовини, в якій рівномірно розподілені щонайдрібніші часточки розміром 0,01—0,1 мкм й об'ємною часткою 1—15 %.

Композиції, зміцнені часточками, характеризуються тим, що розмір часточок у них перевищує 1,0 мкм, а їх об'ємний вміст досягає 25 %.

Як такі часточки застосовують карбіди, нітриди, бориди, оксиди, не розчинні в матриці і не когерентні з нею.

У дисперсно-зміцнених матеріалах матриця несе основне навантаження, ступінь її зміцнення пропорційний опору, який часточки чинять руху дислокацій. Основними параметрами, від яких залежить ефективність зміцнення, є середній вільний шлях у матриці між часточок і їхньою об'ємною концентрацією. Головна перевага дисперсно-зміцнених матеріалів полягає навіть не в підвищенні міцністних характеристик за

кімнатної температури, а в їхній здатності зберігати ці властивості в широкому інтервалі – аж до 80% температури плавлення матриці.

За своєю важливістю матриця в композиційних матеріалах, зміцнених часточками, відіграє проміжну роль між двома іншими класами композицій. У дисперсно-зміцнених композиціях вона є основним компонентом, що несе навантаження. У разі зміцнення часточками, навантаження розподіляється між матрицею і ними. Дисперсні часточки починають виявляти зміцнювальну дію на композиції тоді, коли обмежують деформацію матриці за допомогою механічного стиснення, тобто коли відстань між часточками через флуктуаційні щільності розподілу перешкоджає її подальшому зближенню в цих об'ємах. Величина цього підкріплення є функцією відношення відстані між часточками до їхнього діаметра, а також відношення пружних характеристик матриці і часток [8,10,11].

Питання до другого розділу

1. Назвіть основні полімерні матриці?
2. Домішки, що додаються в полімери задля зміни їх властивостей?
3. Наповнювачі в полімерних композиційних матеріалах, поняття?
4. На які групи поділяють наповнювач в залежності від виду?
5. Основні параметри, якими визначаються властивості композитів?
6. Поняття адгезії в полімерних композиційних матеріалах?
7. Методи підвищення адгезійної міцності?
8. Визначення ізотропних композиційних матеріалів?
9. Визначення анізотропних композиційних матеріалів?
10. Визначення ортотропних композиційних матеріалів?
11. Епоксидні сполучні та її особливості?
12. Реакція синтезу епоксидних полімерів?
13. Приклади застосувань епоксидних полімерів і ракетно-космічній техніці?
14. Переваги і недоліки епоксидних полімерів?
15. Специфіка ґрунтування гетерогенних систем?
16. Види сумісності матриці та наповнювача?
17. Поняття про механічну сумісність матриця-наповнювач?
18. За рахунок чого здійснюється механічний зв'язок зчеплення матриця-сполучне?
19. Назва високомолекулярних сполук епоксидних полімерів що утворюються під час полімеризації.
20. Яка кількість типів епоксидних сполучних що твердіють під дією різних отвердників.
21. Основні переваги епоксидних полімерів при отриманні композитів.
22. Чому дорівнює коксовий залишок епоксидних полімерів?
23. Основні характеристики епоксидних полімерів?

24. Феноло-формальдегідні сполучні та їх особливості?
25. Назвіть реакцію синтезу феноло-формальдегідних сполучних?
26. Реакція поліконденсації фенолу з формальдегідом за наявності кислот та лугів?
27. Властивості феноло-формальдегідних полімерів?
28. Чому дорівнює коксове число феноло-формальдегідних полімерів?
29. Приклади застосування феноло-формальдегідних сполучних в ракетно-космічній техніці?
30. Основні переваги та недоліки феноло-формальдегідних сполучних?
31. Сіліційорганічні сполучні та їх особливості?
32. Поліетилен та методи отримання?
33. Реакція синтезу поліетилену?
34. Основні властивості поліетилену?
35. Характеристики поліетилену отриманого за високого тиску?
36. Характеристики поліетилену отриманого за низького тиску?
37. Поліпропілени та його особливості?
38. Полістирол та його особливості?
39. Поліметилметакрилат та його особливості?
40. Приклади застосування термопластичних полімерних композиційних матеріалів в ракетно-космічній техніці?
41. Поняття про технологічність?
42. Фторопласт та його особливості?
43. Унікальні властивості фторопласту?
44. Реакція синтезу фторопласту?
45. Приклади застосування фторопласту в промисловості?
46. Поліаміди та його особливості?
47. Полііміди та його особливості?
48. Полівінілхлориди та його особливості?
49. Якими основними параметрами визначають міцність композитів?
50. Які основні вимоги до армувальних матеріалів?
51. Що таке адгезійний контакт в композиті?
52. Асортимент армувальних волокон?
53. Як поділяються полімерні композити за матеріалом армувальних волокон?
54. Поняття про ізотропні матеріали?
55. Які наповачі використовують в ізотропних композитах?
56. Як називаються орієнтовані композити?
57. Органічні волокна, синтез та особливості?
58. Поняття про органічні волокна?
59. Що таке високомодульні і високоміцні органічні волокна?
60. Яка будова органічних волокон?
61. Процеси одержання органічних волокон?

62. Які типи органічних волокон для виробів РКТ є найперспективнішими?
63. Які волокна використовуються при виготовленні склопластиків?
64. Скляні волокна, метод отримання та особливості?
65. Які вагомні характеристики склопластиків?
66. Основні способи одержання скловолокна?
67. Найбільш поширена схема виготовлення безперервних скло волокон?
68. Чому дорівнює теоретична міцність скляного волокна?
69. Які армувальні матеріали виготовляють із суцільного скляного волокна?
70. Що таке ровінг?
71. Назвіть матеріал який має найбільше практичне застосування в ракетно-космічній техніці?
72. Вуглецеві волокна та їх особливості?
73. Фізико-механічні властивості вуглецевих волокон?
74. Що таке карбонізація і графітізація для створення вуглецевих волокон?
75. Поняття про високомодульні та високоміцні волокна?
76. Карбідні волокна та їх особливості?
77. Борні волокна та їх особливості?
78. Керамічні волокна та їх особливості?
79. Дисперсні наповнювачі, визначення?
80. Назвіть два основні класу композитів з дисперсними наповнювачами?
81. Що таке дисперсне зміцнення наповнювачів?
82. Що за наповнювачі зміцнені часточками?
83. Який розмір часточок в дисперсно-зміцнених композиціях?
84. Розмір часточок в полімерних композиціях?
85. Який матеріал часточок в дисперсних наповнювачах?
86. Яка головна перевага дисперсно зміцнених матеріалів?
87. Технологічні і економічні переваги властивостей композиційних матеріалів?

3 Армуючі волокнисті наповнювачі. Основні види та особливості отримання.

3.1 Особливості армуючих матеріалів

Широкий набір різних волокнистих структур диктується необхідністю їх одержання з різними механічними, технологічними та функціональними властивостями. Властивості волокнистих полімерних композитів, особливо їх механічні властивості, визначаються, насамперед, армуючими волокнами і нитками - їх виглядом і властивостями, розмірами та розташуванням, тобто будовою армуючого волокнистого наповнювача. В якості армуючих волокнистих наповнювачів використовуються волокна (різної природи та довжини різання), нитки, джгути та ровінги (джгутики), стрічки, шнури, тканини, плетені полотна, трикотажні полотна, неткані полотна, мати та інші. Таким чином, використовуючи різні види армуючих матеріалів і технологічні прийоми їх розташування в волокнистому композиті, можна оптимізувати розташування армуючих волокон і ниток у готовому композиті або виробі на його основі і досягти такого найбільш раціонального варіанту, при якому більша частина армуючих волокон розташована в напрямку головних механічних діючих напруги в умовах експлуатації.

Вибір виду наповнювача визначається декількома факторами:

- просторовою будовою для отримання заданого розташування армуючого компонента (волокон або ниток) — у напрямку зусиль, що діють (для механічно навантажених композитів) або рівномірного розташування (для ізотропних видів композитів);
- досягненням оптимального (часто максимального) ступеня армування;
- можливістю рівномірного розташування армуючого матеріалу по заданій поверхні виробу складної форми (наприклад, двоякої кривизни);
- доступністю та економічними міркуваннями (для композитів з невисоким рівнем властивостей) та ін.

3.2. Схеми армування

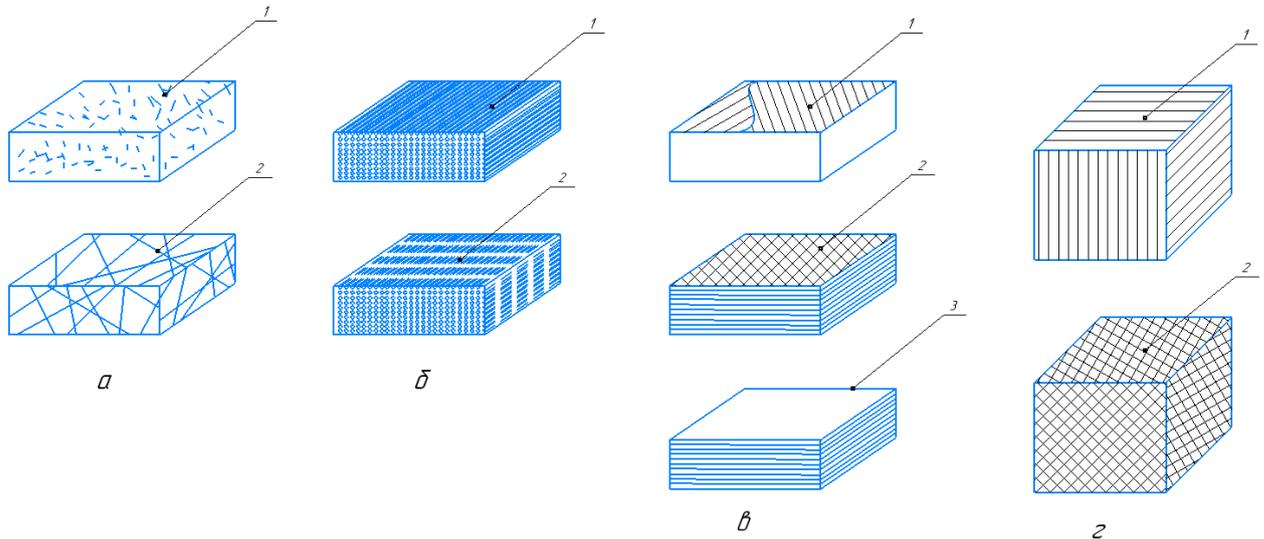
Вибір структури армуючого волокнистого наповнювача є дуже важливим, оскільки він багато в чому визначає ступінь реалізації механічних властивостей волокон або ниток готового композиту. У композитах при навантаженні розташування волокон змінюється незначно, хоча деформуються до руйнації композиту. Вплив довжини волокон на властивості композитів є суттєвим, але тільки до довжини, що становить кілька критичних розмірів.

За розташуванням структурних елементів (волокон, ниток) полімерні композиційні матеріали можуть бути умовно поділені на такі види [9]:

- 1D - односпрямовані (нитки, стрічки, джгути та ін.);
- 2D - двонаправлені (ткані, в'язані або плетені полотна);

- 3D - тривимірно орієнтовані (тривимірні тканини та ін.);
- з хаотичним розташуванням волокон або ниток у площині (волокнисті шари, полотна, більшість нетканих матеріалів, паперу);
- з хаотичним розташуванням волокон у тривимірному просторі (спеціальні текстильні структури).

Основні варіанти розташування волокон в армуючих наповнювачах та відповідно, отриманих з їхньої основи композитах наведені на схемах рисунку 3.1.



- а - хаотично армовані коротким (1) та безперервним (2) волокном; б - однімірноармовані безперервним (1) і коротким (2) волокном; в - двомірноармовані безперервними нитками (1, 2) та тканинами (3); г - просторовоармовані трьома сімействами ниток (1) і сімействами ниток (2)

Рисунок 3.1 Основні варіанти розташування волокон в армуючих наповнювачах

3.3 Типи армуючих наповнювачів

Кожна з перерахованих волокнистих структур має велику кількість варіантів, що залежать від технології їх отримання та заданих властивостей. Використовуючи різні види наповнювачів і технологічні прийоми їх розташування в композиті, можна оптимізувати розташування армуючих волокон або ниток і досягти такого найбільш раціонального варіанту, при якому більша частина армуючих волокон розташована в напрямку головних механічних напруг, що діють в умовах експлуатації.

Основними видами армуючих волокнистих наповнювачів є такі:

Короткі волокна. Є одним із основних видів армуючих наповнювачів. Діапазон довжин різаних (рубаних) волокон може бути дуже широким – від 3-10 мм (для виготовлення матів або преміксів на основі термопластів) до 30-40 мм (у волокнах на основі реактопластів).

Нитки, джгути (ровінги), джгути та стрічки на їх основі є односпрямованими наповнювачами та застосовуються для виготовлення високоміцних, односпрямованих композитів, а також виробів що отримують методом намотки. Односпрямовані наповнювачі також використовуються і для отримання шаруватих пластиків шляхом викладання шарів у взаємно перпендикулярних напрямках або під різними кутами. Таке пошарове розташування наповнювача особливо важливе у разі пресування композитів на основі крихких ниток, де в текстильних структурах наявність перегинів призводить до зниження механічних властивостей волокон (ниток) або їх руйнування при пресуванні.

Ткані структури є найбільш поширеними текстильними матеріалами, що використовуються для одержання шаруватих пластиків типу текстолітів у вигляді листових, намотаних та формованих напівфабрикатів. Вони використовуються також для виготовлення пресованих виробів з великим радіусом кривизни. Для отримання текстолітів застосовують тканини полотняного, саржового, сатинового та інших простих переплетень, причому наявність у рапорті довгих перекриттів сприяє одержанню композитів із вищим рівнем механічних властивостей. Для виготовлення текстолітів використовуються тканини різної поверхневої щільності – легкі (до 150 г/м²), середні (до 300 г/м²) та важкі (понад 300 г/м²).

Плетені текстильні матеріали. Останнім часом для виробництва текстолітів все більшого застосування знаходять плоскі плетені текстильні структури із заданим кутом розташування наповнювачів та рапортом переплетень, що забезпечують максимально високі механічні характеристики у напрямку дії зовнішніх навантажень. Зазвичай рапорт вибирається з досить довгими перекриттями ниток, оскільки в цьому випадку забезпечується досягнення більшої міцності та жорсткості структури в заданому напрямку. Крім того, використовуються плетені стрічки та шнури, застосування яких диктується особливостями профілю та механічних властивостей композиційних деталей та виробів. У більшості випадків плетені структури виготовляються на основі оптимізаційних розрахунків за попередніми замовленнями цільового призначення.

Трикотажні (в'язані) полотна та інші структури поки що порівняно мало використовуються при виробництві масових текстолітів та виробів із них. Проте можливість створення структур із заданим розташуванням ниток, необхідним найбільш відповідальних видів текстолітових деталей і виробів, що несуть високі навантаження, має у випадках певні переваги. Трикотажні полотна внаслідок високої податливості дозволяють отримувати деталі та вироби з малими радіусами кривизни.

Тривимірні ткани, плетені, в'язані структури широко застосовуються при виготовленні деталей та виробів, що несуть високі механічні навантаження. Ці види наповнювача виготовляються зазвичай на основі високоміцних та/або високомодульних ниток: параарамідних, вуглецевих або різних видів неорганічних. Отримані об'ємні структури мають зовнішню форму деталей або виробів, що виготовляються. У цих структурах нитки розташовуються таким чином, щоб вони були орієнтовані у напрямку найбільшої механічної напруги. Деталі та вироби отримують зазвичай шляхом просочення об'ємних структур компонентами реактопластів з подальшим затвердінням матриці.

Неткані матеріали та інші волокнисті шари (полотни, мати) є поширеним видом наповнювача для отримання листових текстолітів та гетинаксів з помірними механічними характеристиками. Вони широко використовуються при виготовленні виробів методами пресування та контактного формування (викладки), оскільки вони більш податливі, ніж ткани та інші структури з ниток, внаслідок рухливості окремих волокон один щодо одного, що забезпечує можливість виготовлення виробів з порівняно малими радіусами вигину при збереженні цілісності та незначним витонченням волокнистого шару під час пресування. Тому неткані полотна краще для отримання формованих виробів складної форми.

Комбіновані та гібридні волокнисті матеріали на основі волокнистих шарів, ниток та різних текстильних структур застосовуються в деяких випадках для забезпечення заданих механічних характеристик композитів та виробів на їх основі, особливо у випадках надміцних органічних волокон та ниток, що мають високий рівень питомих механічних характеристик при розтягуванні, але високу анізотропію властивостей і тому недостатній їхній рівень у трансверсальному напрямку та при зрушенні. Це викликає необхідність підвищення поперечних властивостей в анізотропних композитах (шаруватих пластиках та інших односпрямованих структурах).

Гібридні наповнювачі можуть бути отримані у вигляді волокнистих шарів, тканин, плетених структур, трикотажних в'язаних матеріалів. Ще однією метою застосування гібридних наповнювачів є надання їм деяких додаткових фізичних чи інших властивостей. Так, наприклад, для отримання електропровідних композитів і виробів з них вводяться вуглецеві електропровідні волокна або нитки. Таким шляхом створюються композити із заданою електропровідністю або мають антистатичні властивості [8-11].

3.4 Наповнення армуючими волокнами/філаментами

Розташування армуючих волокон має визначальне значення і задається будовою армуючого наповнювача. Основні варіанти розташування волокон в

армуючих наповнювачах, і, відповідно, в композитах, що одержуються на їх основі, наведені на схемах рисунку 2. У всіх випадках вибору армуючого волокнистого наповнювача необхідно прагнути до найповнішої реалізації його механічних характеристик у композиті і виробі, що отримується. Це залежить від вибору виду, структури та розташування армуючого волокнистого наповнювача та об'ємного ступеня армування (об'ємної частки волокон у композиті). Зі збільшенням ступеня армування механічні властивості пропорційно зростають. Однак ця залежність витримується тільки в певних межах, тому що на неї впливають при малих ступенях армування особливості властивостей волокон - їх модуль пружності та крихкість. Так, наприклад, для вуглецевих волокон (з високим модулем пружності та малою деформацією до розриву і тому крихких) пряма пропорційність не витримується при малих ступенях армування, оскільки матриця (сполучна) під час деформування, захоплюючи волокна за собою, призводить до їх руйнування

При великих ступенях армування недолік сполучного для заповнення міжволоконного простору вище критичного значення (67-70%) призводить до порушення монолітності композиту і, відповідно, появі в ньому нерівномірності напруги, а тому до руйнування при менших значеннях механічних напруг, ніж для монолітних зразків.

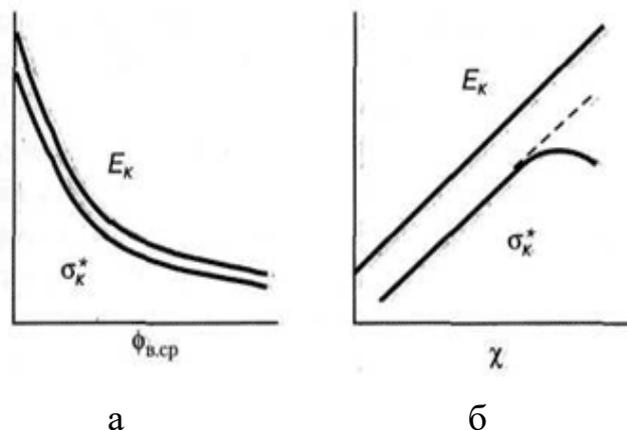


Рисунок 3.2. Залежності механічних властивостей композиту від орієнтації армуючих волокон(а) та об'ємного ступеня армування χ (б).

Граничний ступінь наповнення (Рис.3.2 б) або армування (Рис. 3.2 а) можна розрахувати, виходячи із щільного геометричного укладання куль або циліндрів (Рис. 3.3).

Вона становить такі величини:

- для найбільш щільного укладання куль $\chi = 0,524$;
- при найбільш щільному укладанні циліндрів трикутником (гексагональна упаковка) $\chi = 0,907$;
- при укладанні циліндрів за квадратом $\chi = 0,785$;
- при перехресному шаровому укладанні циліндрів $\chi = 0,785$;
- при щільному тривимірному укладанні циліндрів $\chi = 0,59$.

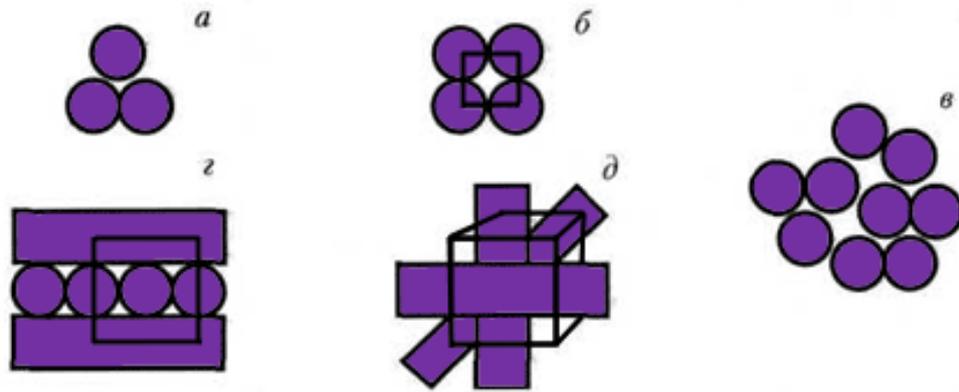


Рисунок 3.3. Схема щільного та реального укладання волокон в армованих композитах: а - гексагональна (по трикутнику); б - по квадрату; в - реальне односпрямоване укладання; г - перехресна; д – тривимірна

Однак таке щільне укладання не є технологічним рішенням, оскільки необхідно, щоб кожне волокно було оточене шаром матриці (сполучного) для забезпечення найбільш високої адгезії волокон і отримання монолітності композиту та виробу. Практично застосовуються такі об'ємні ступені армування при отриманні композитів та виробів з оптимальними механічними характеристиками:

- при армуванні дисперсними наповнювачами $\chi < (0,3 - 0,45)$;
- при армуванні однонаправленими волокнистими армуючими наповнювачами $\chi < (0,6 - 0,75)$;
- при армуванні тканинами та плетеними полотнами $\chi < (0,45 - 0,55)$;
- при армуванні в'язаними структурами (трикотажем) $\chi < (0,3 - 0,35)$;
- при армуванні нетканими матеріалами $\chi < (0,3 - 0,4)$;
- при армуванні паперами та картонами $\chi < (0,35 - 0,5)$.

Існують методи підвищення об'ємного ступеня армування. Це застосування суміші наповнювачів різних розмірів, оскільки вони щільніше заповнюють об'єм. Що стосується односпрямованих наповнювачів — це армування з урахуванням елементарних ниток різних поперечних розмірів, що дозволяє трохи підвищити об'ємну ступінь армування. Для органічних волокон запропоновано їхнє профілювання шляхом вальцювання або протяжки через фільтри при нагріванні, так що їх профіль наближається до багатогранника (близького до правильного шестигранника), а це помітно підвищує можливий ступінь армування. Слід також звернути увагу на те, що в практиці отримання композитів і виробів з них зазвичай вказується співвідношення компонентів масою, яке у разі конструювання високоміцних виробів з високими ступенями армування необхідно перераховувати на об'ємний ступінь армування з урахуванням щільностей компонентів [8-11].

Питання до третього розділу

1. Види схем армування в полімерних композиційних матеріалах?
2. Короткі армуючі волокна, поняття?
3. Нитки та джгути, поняття?
4. Ткані структури, поняття?
5. Плетені текстильні матеріали, поняття?
6. Трикотажні полотна, поняття?
7. Тривимірні структури, поняття?
8. Неткані структури, поняття?
9. Комбіновані та гібридні волокнисті матеріали, поняття?
10. Гібридні наповнювачі, поняття?
11. Визначення граничної ступеня наповнення в полімерних композиційних матеріалах?
12. Назвіть величини наповнення для різних структур?
13. Методи підвищення об'ємного ступеню армування?
14. Основні варіанти розташування волокон в армуючих матеріалах?
15. Діапазон довжин різаних (рубаних)волокон?
16. Ступінь об'ємного армування дисперсними наповнювачами?
17. Ступінь об'ємного армування однонаправленими волокнистими армуючими наповнювачами?
18. Ступінь об'ємного армування тканинами та плетеними полотнами?
19. Ступінь об'ємного армування вязаними структурами?
20. Ступінь об'ємного армування нетканими матеріалами?
21. Ступінь об'ємного армування папером та картонами?

4. Інтелектуальні матеріали

4.1. Поняття про інтелектуальні матеріали

Відносно недавно виникла і почала стрімко розвиватися нова галузь матеріалознавства, що вивчає матеріали, властивості яких можуть змінюватися в залежності від зовнішніх факторів. Це нове покоління матеріалів називається «розумні» або «інтелектуальні» матеріали (англ. - «smart materials») [12]. До інтелектуальних, або розумних відносяться матеріали і елементи конструкцій, які реагують певним чином на зміни стану (умов або складу) навколишнього середовища (температури, тиску, концентрації компонентів і адсорбованих молекул, рН середовища) або впливу механічного, гравітаційного, електричного і магнітних силових полів, вібрацій або коливань і випромінювання, змінюючи свої властивості і геометрію і адаптуючись до змін умов експлуатації. Інтелектуальні конструкційні матеріали поєднують в собі інтелектуальність з наявністю структурних або вбудованих елементів мікро- або нано- розмірів, що забезпечують істотне підвищення їх основних конструкційних (несучої здатності) і функціональних властивостей. По складу такі матеріали є композиційними або гібридними, а за ступенем інтелектуальності або категорії розумності вони можуть бути поділені на чутливі, адаптивні, активні, керовані, і ін. Основними принципами і цілями створення інтелектуальних конструкційних матеріалів є: кероване зміна або регулювання механічного стану (конструкційних властивостей, геометрії, положення, швидкості, прискорення, вібрацій і демпфірування при впливі механічних сил, тиску, температури і інших чинників), поглинання і відбиття електромагнітного випромінювання будь-якого діапазону і ін [13].

Відмінними рисами «розумних» матеріалів є їх додаткові функціональні можливості, які виходять за межі властивостей, що визначаються структурою матеріалу [14]. Також, окрім традиційних функцій сприйняття експлуатаційних навантажень і забезпечення несучої здатності і міцності несучих конструкцій і їх елементів - обшивок і силових елементів в авіаційній і ракетно-космічній техніці, інших наземних і водних транспортних засобах, технологічному обладнанні, будівельних конструкціях, спортивної, медичної, побутової та іншої техніки інтелектуальні конструкційні матеріали повинні забезпечувати самоконтроль за виникненням і розвитком втомних пошкоджень, їх ідентифікацію та локалізацію, здатність активно реагувати на зовнішній вплив і коригувати напружений стан конструктивного елемента з метою ліквідації критичної ситуації. Матеріал в таких конструкціях може містити сукупність вбудованої в його структуру електроніки (різноманітних електронних пристроїв і антенних систем), які здійснюють функції прийому, обробки і передачі інформації в різних частотних діапазонах і володіють стійкістю до впливу зовнішніх факторів. Конкретні вимоги до таких матеріалів визначаються призначенням і умовами експлуатації конструкцій і їх

елементів. Так, одним з найважливіших напрямків розвитку інтелектуальних конструкційних матеріалів є виробництво трансформованих великогабаритних космічних конструкцій, що складаються в наземних умовах, та розгортаються у космосі. Вони виконують свої задані функції по команді з Землі. Матеріали для таких конструкцій повинні володіти ефектом пам'яті форми, забезпечуючи крім того все інші необхідні властивості в реальному часі. Для авіаційної техніки найважливіше значення має розробка інтелектуальних конструкційних матеріалів, що володіють керованою взаємодією з електромагнітними випромінюванням в широкому діапазоні довжин хвиль для радіолокаційної маскуванню і саморегульованою інтенсивністю світіння для активної світломаскуванню. При цьому забезпечення адаптації до постійно змінюваних умовами експлуатації за рахунок саморегулюванню жорсткості, поглинання вібрацій, формо стабільності, здатності до відновлення дефектів і пошкоджень та інших ефектів самоорганізації не стає менш важливим завданням[13]. Найцікавіше, що прообразом таких матеріалів служать здатності природних об'єктів, як з рослинної, так і з тваринного світу. Як приклад можна привести відкриття-закриття пелюсток квітки в залежності від освітленості, «ефект лотоса», листя якого не змочуються водою, або загоєння ран у людей і тварин. Ясно, що якщо здатності біологічних систем розвивалися протягом тисячоліть, то вони гідні вивчення і, може бути об'єктом наступного копіюванню в інженерному контексті [14].

Інтелектуальні матеріали і конструкції на їх основі, будучи примітивними аналогами біологічних систем, повинні включати в себе сенсорні, контролюючі та виконавчі підсистеми (датчики, процесори) і використовувати елементи зворотного зв'язку, самодіагностики і самовідновлення. У біологічних системах кожна підсистема і її елементи мають задану функціональність, а система в цілому інтегрує їх таким, щоб реагувати на зовнішній вплив контрольованим чином. Створення біо-імітаційних інтелектуальних матеріалів та конструкцій отримало назву біомімікрія. У переважній більшості випадків розробляються інтелектуальні конструкційні матеріали та конструкції, які є фізичними небіологічними системами, хоча їх розробка також спрямована на створення аналогічних біологічним сенсорних, контролюючих і виконавчих підсистем з використанням елементів зворотного зв'язку, самодіагностики і самовідновлення. Функції таких підсистем і їх елементів, в першу чергу, сенсорні і виконавчі, а також функції самодіагностики і самовідновлення можуть виконувати матричні або армуючі компоненти композиційних матеріалів або вбудовані безпосередньо в матеріали мікро- та нано-електромеханічні і оптико електромеханічні системи функціональне інтегрування компонентів композиційних матеріалів як сенсорів отримало в Японії назва технології Кен-матеріалів тоді як створення гібридних механіко-електронних підсистем, які об'єднують в матеріалі або конструкційні сенсори, що не є безпосередньо компонентами матеріалу, отримали назву

механотроніки. У всіх випадках сенсорні і виконавчі підсистеми і їх елементи зв'язуються контролюючими та керуючими підсистемами в єдину інтелектуальну систему зі зворотним зв'язком. Тому при створенні таких матеріалів і конструкцій з них комбінуються підходи і рішення, досягнуті не тільки в сучасному матеріалознавстві і технології матеріалів, але і в інформатиці та технології мікро- і нано-процесорної техніки.

Інтелектуальні матеріали і конструкції на їх основі, повинні включати в себе 5 основних компонентів:

1. Збір даних: метою цього компонента є збір необроблених даних, необхідних для відповідного зондування і моніторингу конструкції.

2. Передача даних метою цієї частини є пересилання необроблених даних до місцевих і / або центральні органи управління і контролю.

3. Блок управління і контролю: роль цього блоку полягає в управлінні і контролі всієї системи шляхом аналізу даних, отримання відповідного висновку і визначення необхідних дій.

4. Інструкції до даних: функція цієї частини - передавати рішення і пов'язані з ними інструкції назад членам структури.

5. Актюатор (виконавчий орган) мета цієї частини полягає в тому, щоб зробити дію шляхом спрацьовування керуючих пристроїв / одиниць (рис.4.1).

Багато полімерів використовують у якості конструкційних матеріалів для виготовлення різних виробів і встаткування загального й спеціального призначення. Такі матеріали повинні мати певні механічні й експлуатаційні характеристики, а їх виробництво відрізнятися достатньою простотою й економічністю.

Інша група матеріалів, призначення й застосування яких в основному визначається їхніми особливими й часом унікальними властивостями — це так звані **функціональні полімерні матеріали**. Їхні типові представники — полімери й полімерні композити, що володіють здатністю до відновлення форми.



Рисунок 4.1. Блок-схема «Компоненти інтелектуальної системи».

Розвиток технологій інтелектуальних матеріалів і конструкцій несе величезний інноваційний потенціал, а одержувані при цьому результати дозволять вирішити багато проблем авіаційної і космічної техніки, будівництва, транспорту, медицини, енергетики, спорту та побуту, безпеки[13].

До смарт-матеріалів відносять п'єзоелектричні, електрострикційні, магнітострикційні, сплави з ефектом пам'яті форми, самовідновлювальні та інші. Розглянемо властивості і можливість їх застосування в ракетно-космічній техніці докладніше.

4.2. П'єзоелектрики

П'єзоелектрики - одні з найдивовижніших матеріалів в світі. З них буквально можна видавити електрику, тобто, електричний заряд з'являється в момент здавлювання (або розтягування) матеріалу [14]. Прямі та зворотні електро-механічні ефекти проявляються в електроактивних матеріалах, до яких відносяться переважно діелектричні матеріали (діелектрики), рідше напівпровідники. До цих ефектів належить:

- прямий ефект, що приводить до появи електричних зарядів або моментів (диполів) і, відповідно, виникнення різниці потенціалів або струму при прикладенні механічних сил (напружень) і зсувів або деформацій ;

- зворотній ефект, що призводить до виникнення механічних сил, зсувів або деформацій при впливі зовнішнього електричного поля.

Електромеханічні ефекти обумовлюють можливість використання електро- активних матеріалів в якості елементів електромеханічних перетворювачів або активних компонентів інтелектуальних матеріалів сенсорних в разі прояву прямих електромеханічних ефектів і актюаторних - в разі зворотних ефектів [14]. П'єзоелектричний ефект може спостерігатися в кристалах, що не мають центру симетрії. Якщо елементарний осередок кристалічної решітки така, що << центр ваги >> позитивних іонів не збігається з центром ваги негативних зарядів, то створюється постійний << диполь >>, і осередок стає електрично асиметричною, як показано на рисунку. 4.2.

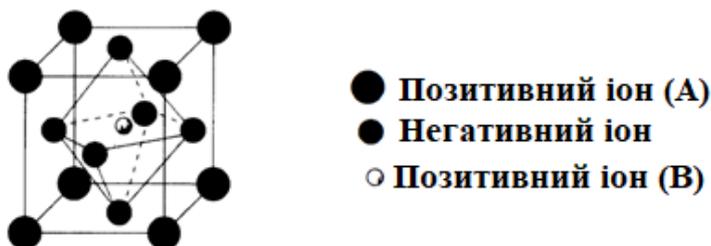


Рисунок 4.2. Схема створення постійного електричного диполя

П'єзоелектричний ефект може спостерігатися і при відсутності і східного диполя решітки, оскільки диполь може співаючи витися внаслідок поляризації під дією зовнішнього електричного поля або механічного навантаження. Так поведуться кристали кварцу. Макроскопічна поляризація з'являється, якщо диполі орієнтовані переважно в одному напрямку. Зовнішня механічне навантаження змінює поляризацію диполів, і на поверхні кристала з'являються електричні заряди. Це називають прямим п'єзоелектричним ефектом (рис. 4.3, а). Навпаки, додаток до кристалу зовнішнього електричного поля деформує диполі, в результаті чого з'являється деформація кристала, яка

змінює його раз заходи. Це явище називають зворотним п'єзоелектричним ефектом (рис. 4.3, б).

Найбільш сильними з п'єзо ефектів і, відповідно, найбільш важливим класом п'єзоелектриків є сегнетоелектрики (СЕ), зазвичай названі в іноземній літературі ферроелектриками (ФЕ). При цьому всі сегнетоелектрики є п'єзоелектриками, але не всі п'єзоелектрики є сегнетоелектриками. Сегнето- або ферроелектрикі є кристалічні сильно полярні діелектрики або напівпровідники, що володіють в певному діапазоні температур здатністю до спонтанної поляризації не тільки в присутності, а й у відсутності зовнішнього електричного поля, тобто до виникнення залишкової поляризації - утворення пов'язаного поверхневого заряду і відповідного електричного моменту (макроскопічного диполя). У кристалах таких діелектриків відсутня центр симетрії в упорядкуванні іонів або диполів. При наявності рухомих носіїв зарядів (іонів, вільних електронів або «дірок») їх рух до протилежно зарядженим пов'язаним зарядів може призводити до екранірованню спонтанної поляризації і зникнення залишкового електричного моменту, який здатний знову відновлюватися при впливі на кристал механічного навантаження або електричного поля [26].

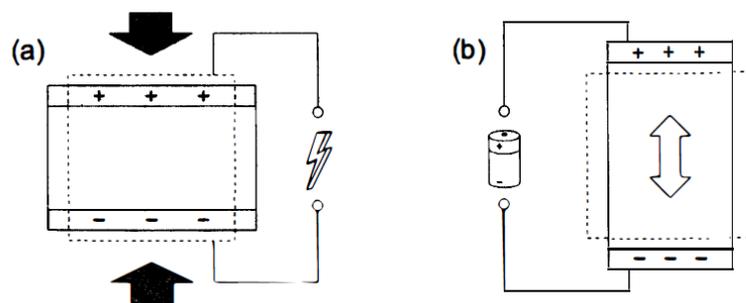


Рисунок 4.3. «Схематичне зображення прямого (а) і зворотного (б) п'єзоелектричного ефекту» [1*]

Взаємодія між електричними та механічними змінними, для п'єзоелектричних матеріалів може бути описана лінійними рівняннями:

$$\sigma = C\varepsilon - e^T E$$

$$D = e\varepsilon + kE$$

де σ – механічні напруження; C – матриця пружних модулів; ε – механічна деформація; e – матриця п'єзоелектричних модулів; E – напруженість електричного поля; D – зміщення електричного поля; k – матриця діелектричних модулів. Властивості кожного п'єзоелектрика описуються трьома матрицями. Дані рівняння, перше (1) з яких описує прямий, а друге (2) - зворотній, дозволяють враховувати як пружні, так і електричні складові властивостей п'єзоматеріалів.

П'єзоелектричні матеріали в даний час умовно можна розбити на три групи: Природні п'єзоелектричні матеріали, які мають досить високу вартість. У зв'язку з цим в даний час використовуються штучні монокристали. Які називаються п'єзоелектрична кераміка - за фізичними властивостями це полікристалічний сегнетоелектрик, який представляє собою хімічну сполуку

або твердий розчин. Одним з найпопулярніших п'єзоелектриків став титанат-цирконат-свинцю (ТЦС). Останньою групою є полімерні п'єзоелектрики, що складаються з органічних полімерів найкращими п'єзоелектричними та електрострикційними властивостями володіють полімери вініліденфторида – ПВДФ (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 - П'єзоконстанти п'єзокераміків типу ТЦС и ПВДФ [14]

| П'єзоелектрик | e_{31} ($\times 10^{-12}$ м/В) | e_{33} ($\times 10^{-12}$ м/В) |
|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| ТЦС-4 | 289 | -123 |
| ТЦС-5Н | 593 | -274 |
| ПВДФ | -33 | 2-14 |

Полімерний п'єзоелектрик володіє більш низькими п'єзоелектричними властивості в порівнянні з п'єзокераміками, значення п'єзоелектричних модулів для поперечної деформації e_{31} , та для деформації при розтягуванні e_{33} на порядок нижчі чим у п'єзокераміків. Але за рахунок поєднання властивостей цих полімерів з підвищеними п'єзоконстантами кераміків створюють полімерні композитні п'єзоелектричні матеріали (ПКПМ) з різноманітними приведи ними характеристикам (рис.4.4) [24-25].

П'єзоелектричні і електрострикційних матеріали (п'єзоелектрики і електрети) здатні змінювати розміри під дією електричного поля [13]. Електрострикція пропорційна квадрату напруженості електричного поля і не залежить від зміни його напрямку. Електрострикція — явище, аналогічне магнітострикції і протилежне п'єзоелектричному ефекту (рис. 4.5).

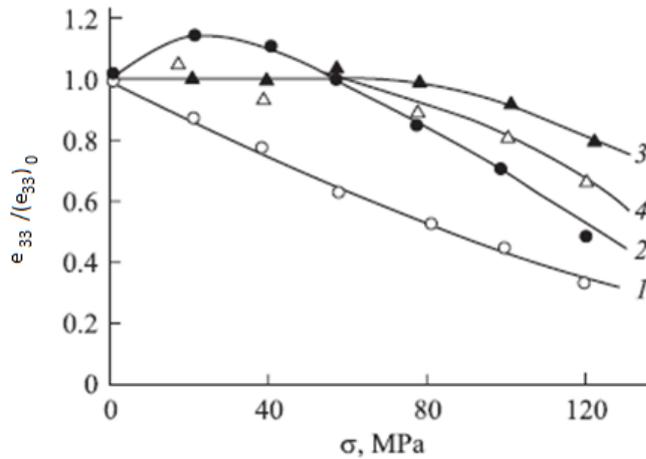
При відсутності залишкової поляризації електрострикція в полярному діелектрику обумовлена тільки процесами індукованої поляризації, і її ефект дуже малий. У разі наявності зворотного п'єзоефекту з лінійним зв'язком між електричним напруженням і деформацією електрострикція виступає в якості малої нелінійної добавки до нього, але на відміну від п'єзоефекту у електрострикції не має зворотного ефекту, але є термодинамічний зв'язаний ефект - зміна діелектричної проникності при додатку механічної сили. Сила, що виникає в результаті електрострикції, теоретично не може бути розрахована, і експериментально може бути оцінена за формулою:

$$F = Cl(E - E_0)$$

де, l , довжина зразка, C - емпірична константа, E_0 , E - початкова і задана напруженість електричного поля відповідно.

Основним представником електрострикційних матеріалів є полімери вініліденфторида – ПВДФ [26]. Емпірично встановлено, що для цих полімерів, які також володіють помітним п'єзоелектричним ефектом (полімер вініліденфторида, оброблений електронним пучком, з модулем пружності при зсуві близько 1 ГПа, напругою на розрив 43 МПа і граничної деформацією близько 4,3%) при додатку електричного поля зразок скорочується, і при електричному напрузі 3 кВ забезпечується механічне напруження до 2,15 МПа

і деформація до 1,2% при релаксації 200 мс, причому при частотах до 8 кГц реалізується 90% напруги [13].



1 - для п'єзокераміки: ПКР-3М; 2-для п'єзокераміки: ПКР-7М;
 3 - для композита: ПВДФ +ПКР-3М; 4-Для композита: ПВДФ+ПКР-7М.
 Умови поляризації: $E_n = 3.5 \text{ MV/m}$, $T_n = 393 \text{ K}$, $t = 0.5 \text{ h}$.

Рисунок 4.4. Залежність п'єзоелектричного модуля e_{33} ПКПМ від поздовжнього стиснення [24]

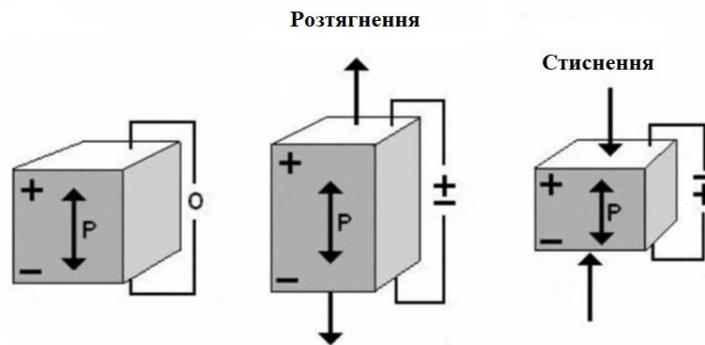


Рисунок 4.5. Схематичне зображення електрострикційного ефекту [27]

Здатність регулювати електромеханічні, п'єзоелектричні, діелектричні та еластичні властивості електрострикційних матеріалів за допомогою електричного поля відкриває безліч можливостей їх використання в якості перетворювачів, а також в області формування балок [28].

Можна виділити такі види п'єзоактюаторів, які відповідають конструкційно-технологічним вимогам для створення адаптивних смарт-матеріалів та структур:

- пакетні (лінійні) п'єзоактюатори;
- трубчасті актюатори;
- біморфи та мультиморфи;
- зсувні п'єзоактюатори;
- ламінарні п'єзоактюатори;

- актюатори з підсилювачем важеля;
- композиційні актюатори із п'єзоелектричними волокнами.

Необхідно звернути увагу на останній вид актюаторів як найбільш перспективний з точки зору впровадження в елементи конструкцій за рахунок наявності композиційного матеріалу з ділянкою активного п'єзокерамічного волокна, укладеного в ділянку полімерної матриці, коли пластична нежорстка структура полімерної матриці не тільки захищає волокно і призводить до підвищення рівня його у міцності, але й дозволяє матеріалу легше узгоджуватися з криволінійними поверхнями.

Існує кілька підвидів таких актюаторів. Найбільш широко використовуються так звані 1-3 композиційні актюатори, що включають п'єзоелектричні стрижні, укладені полімерну матрицю і розташовані лінійно по всій товщині пристрою. На рис. 4.6 показаний даний тип пристрою з активними пікселями, які можуть бути прямокутними (80 мікрон з 120-мікронними проміжками), або круглими (70 мікрон в діаметрі з 50-мікронними проміжками) [29].

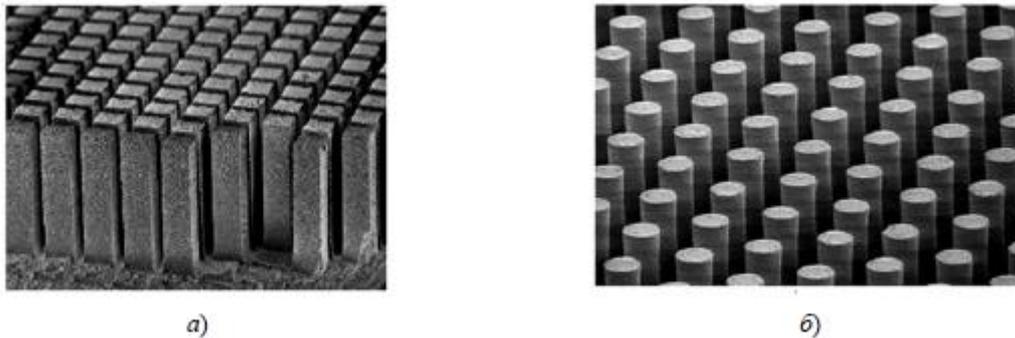


Рисунок 4.6. П'єзоелектричні стрижні, укладені в полімерну матрицю і розташовані лінійно по всій товщині пристрою (п'єзокерамічна складова розподіляється в одному напрямку, крізь шар, матеріал матриці з'єднується за трьома напрямками): а – прямокутні активні пікселі (80 мікрон із 120-мікронними проміжками); б – круглі активні пікселі (70 мікрон у діаметрі з 50-мікронними проміжками)

Композити можуть бути використані в адаптивних смарт-матеріалах та структурах, як показано на рис. 4.7 [30, 31].

Будучи прикріпленими до такої структури, як фюзеляж літака, дані структури здатні знизити рівні власного шуму, виступаючи в ролі датчиків тиску і актюаторів для вимірювання умов зовнішнього середовища і зниження рівня широкодіапазонної вібрації аж до 20 дБ.

Наступний підвид аналізованих актюаторів - композити з активного волокна. У даному типі пристрою одноосно поєднуються п'єзокерамічні волокна, оточені полімерною матрицею, крім того, можуть бути неактивні скловолокна для підвищення рівня конструкційної міцності. Міцний зв'язок між матрицею та волокнами дозволяє через матрицю стабільно та послідовно передавати навантаження, прикладене на волокна, на основну структуру. Гребінчасті електроди передають напругу електричного поля, необхідне активації п'єзоелектричного ефекту у волокнах, як показано на рис. 4.8 [30, 31].

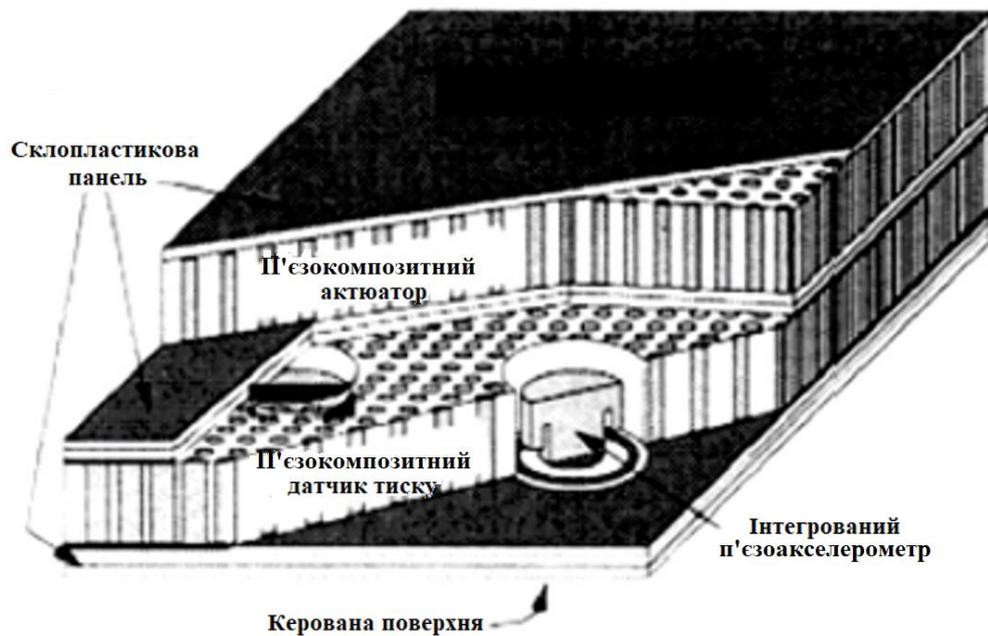


Рисунок 4.7. Застосування 1–3 композиційних актюаторів у адаптивних смарт-матеріалах та структурах з метою зниження рівня власного шуму, вібрацій

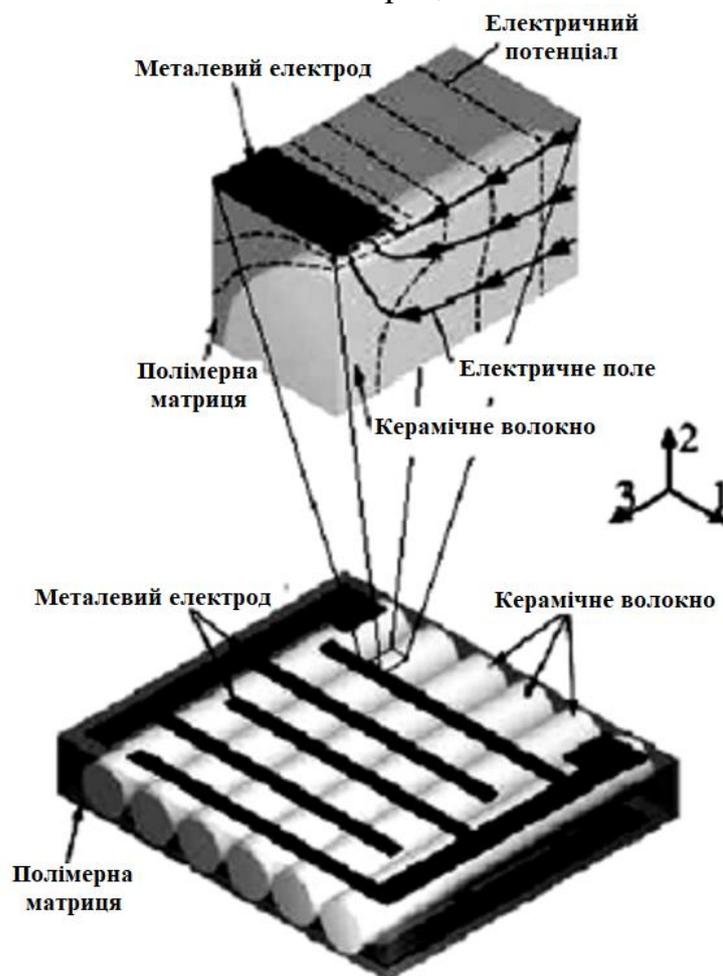


Рисунок 4.8. Композити із активного волокна

Процес виготовлення композитів із активного волокна полягає в наступному. Спочатку нижній електрод розміщується на алюмінієву вакуумну пластину з використанням центрвальних штифтів. Потім п'єзокерамічні волокна поєднуються в єдиний шар. Потім волокна наноситься епоксидна смола, легована реагентом, а шар верхнього електрода розміщується поверх волокон. Після цього дана збірка поміщається під прес, де додаються нагрівання та тиск для затвердіння епоксидної смоли та мінімізації простору між активними волокнами та електродами (рис. 4.9) [30, 31].

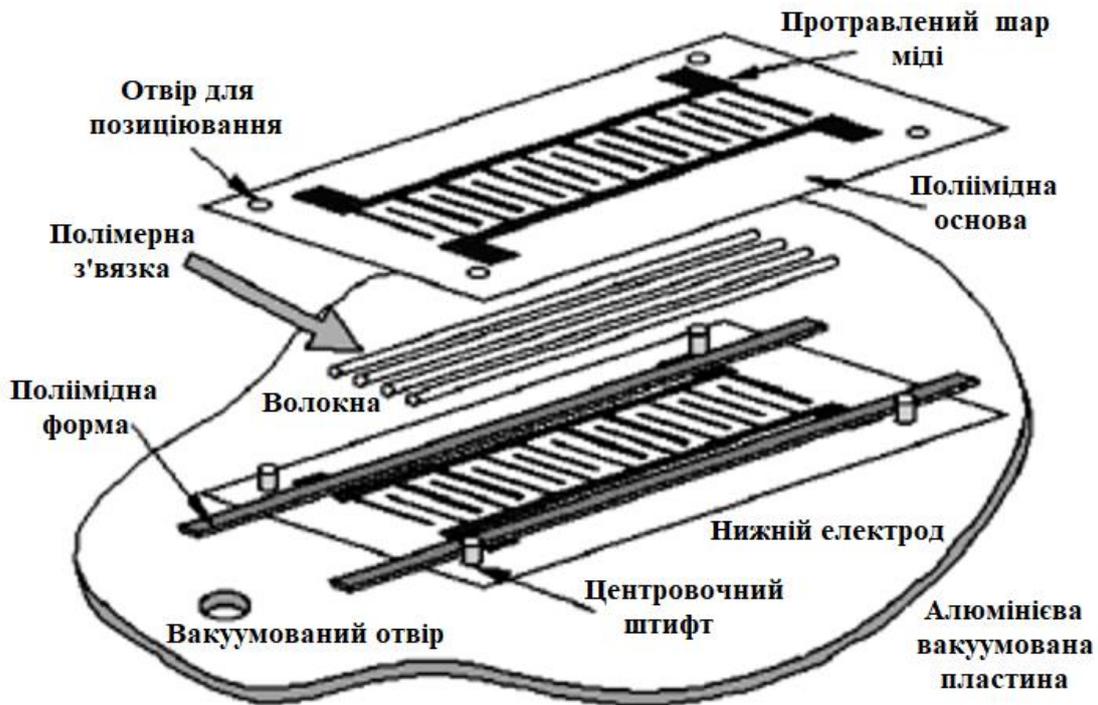


Рисунок 4.9. Процес виготовлення композитів із активного волокна

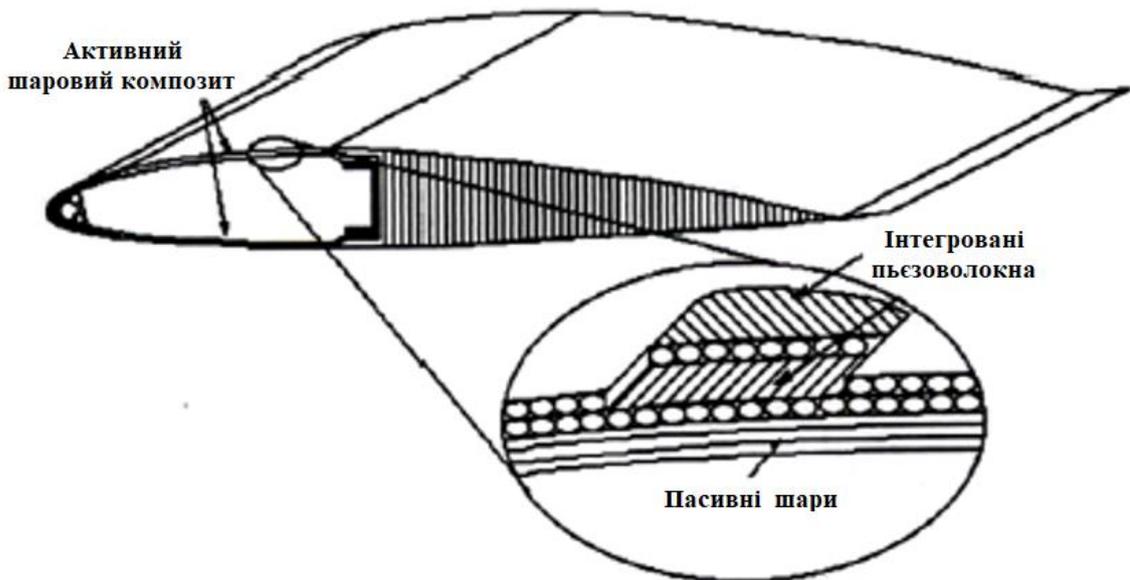


Рисунок 4.10. Застосування композитів з активного волокна в лопатях вертольота з метою зменшення рівня шуму, придушення вібрацій, регулювання обертання лопатей

Даний тип актюаторів характеризується легкістю, з якою вони впроваджуються в будь-яку багатошарову композитну структуру, зокрема, лопаті несучого гвинта вертольота, що характеризуються значним шумом і вібрацією в польоті через високі аеродинамічні навантаження (рис. 4.10) [30, 31].

Третій підвид актюаторів, у якому використовуються і активні, і композитні матеріали, до того ж до гребінчастих електродів, називається макрволоконним композитом (рис. 4.11) [30, 31].



Рисунок 4.11. Макрволоконний композит

Цей активний елемент також включає одночасно суміщені волокна, оточені полімерною матрицею, але волокна мають прямокутний поперечний зріз. Тут також використовується гребінчастий електрод, що поширює напругу електричного поля по всій довжині волокон, спираючись при цьому на міцний зв'язок між матрицею та волокнами, щоб належним чином перетворювати заряд приведення в дію. Дані актюатори призначені для нейтралізації напружень при крученні та напружень вигину, які додаються на стабілізатори літаків під час польоту внаслідок ударного навантаження.

Найбільше практичне застосування при створенні інтелектуальних матеріалів та конструкцій з них і електро-механічних перетворювачів

актюаторного і сенсорного типів знаходять штучні сегнетоелектрики на основі іонних кристалів сімейства перовскитів - титанатів барію (BaTiO_3) і свинцю (PbTiO_3), що володіють високими п'єзоелектричними і електрострикційними властивостями. Найбільш важливими їх похідними являються титанати цирконієвокислого свинцю $\text{PbZr}_{0,55}\text{Ti}_{0,45}\text{O}_3$ - PZT (ТЦС) з нестехіометричними добавками оксидів різних металів (ніобію, хрому, лантану, заліза) в якості доданка, які різко (до 3 разів) збільшують пьезоконстанти. Їх використовують у вигляді так званих п'єзокераміка, що представляють собою агрегати мікрокристалів (зерен) мікронних розмірів, одержувані напиленням або компаундированим і спіканням тонких порошоків відповідних оксидів. Так як зерна мають випадкову орієнтацію, то навіть в сегнетоелектричних стані загальна залишкова поляризація п'єзокераміка і, відпоного, п'єзоелектричні властивості незначні. Тому пьезокераміки попадають під вплив сильного електричного поля при охолодженні нижче точки Кюрі T_k , досягають 80% -го ступеня залишкової поляризації. При цьому отримують «м'які» та «жорсткі» п'єзокераміки, що відрізняються величиною коерцитивної сили E_c , п'єзоелектричного ефекту і площі петлі гістерезису на кривих $P(E)$, що визначає дисипації енергії (тепловиділення) при їх роботі. М'які п'єзокераміки володіють великим п'єзоелектричним ефектом, тобто великими деформаціями при зворотному п'єзо ефекті і великими тепловтратами, тому їх краще використовують в квазістатичних п'єзоелектричних перетворювачах. Жорсткі п'єзокераміки, навпаки, мають більш низькими деформації і тепловтрати, що робить ефективним їх застосування в високочастотних перетворювачах.

П'єзоелектричні матеріали здатні спрацьовувати та зондувати і знайшли застосування у застосуваннях, включаючи ультразвукові перетворювачі, гідрофони, пристрої для мікропозиції, акселерометри та структурні приводи. Недавня розробка п'єзоелектричних керамічних волокон в діаметрі <100 мкм дозволила реалізувати цю концепцію. Передбачається, що ці композити знайдуть застосування в контурному контролі, неруйнівних випробуваннях, придушенні вібрацій та контролі шуму. Можливість комп'ютерного керування за допомогою систем із замкнутим циклом призвела до того, що ці композити стають потенційними «розумними» матеріалами та структурами. З часу їхньої концепції менше десятиліття тому було досягнуто значних успіхів у багатьох сферах, що стосуються складної продуктивності, таких як волоконно-матрична технологія та оптимізація конфігурації. Ці досягнення є трендом за яким переглядаються технології волокон, матриць та електродів, а також обговорюється виробництво, моделювання та застосування цих нових п'єзоелектричних композитів, відомих як композити з активного волокна.

Для п'єзоелектричних волоконних композитів досліджено різноманітні програми, включаючи контроль вібрації та шуму, моніторинг здоров'я, морфірування конструкцій та збирання енергії, в яких композити відіграють ключову роль і демонструють необхідність подальшого розвитку.

Здатність п'єзоматеріалів перетворювати механічну енергію в електричну і навпаки обумовила її широке використання: як датчиків [32-33], п'єзоелектричних двигунів [34-35], п'єзоелектричних перетворювачів для моніторингу стану конструкцій [36-37] електромеханічних перетворювачів [38-38], та пристроїв, що застосовуються в ехолокації, електроакустиці та ультразвуковій діагностиці [40]. Проте справжній прорив у науці і техніці відбувся з відкриттям можливостей застосування п'єзоматеріалів для демпфування коливань конструкції, що працюють в умовах динамічних навантажень [41]. Наприклад використання п'єзоелектричних матеріалів для зменшення вібрацій конструкції за рахунок здатності демпфувати динамічні переміщення, що обумовлює затухання вільних та обмеження амплітуд коливань. Коли матеріал з п'єзоелементами згинається за рахунок вібрації в одному напрямку, система зниження вібрації реагує на вигин і посиляє електричну енергію на п'єзоелемент для вигину в іншому напрямку. Будучи прикріпленими до такої структури, як фюзеляж літака, дані структури здатні знизити рівні власного шуму.

4.3. Сплави з ефектом пам'яті

Сплави з пам'яттю форми (СЕПФ)- загальна назва сплавів, які мають незвичайну властивість пам'ятати про деформації. Цей ефект полягає в каучуко-подібній поведінці, при якій відновлюються великі деформації при постійній температурі (ефект суперпружності), а також в повному відновленні деформації в результаті зміни температури. Така поведінка обумовлена зміною структури кристалічного стану, що складається в появі мікрочастин мартенситної фази. Мартенситний перехід обумовлений поліморфним переходом кристалічної структури від вихідної фази до мартенситної [15].

На рис.4.12 представлений процес фазового переходу з аустеніту в мартенсит і назад. Сплав з «ефектом пам'яті» фіксують у вихідній формі, яку він і «запам'ятовує», потім піддають відпалу при 500 °С. У процесі відпалу утворюється непружна тверда високотемпературна фаза сплаву - аустеніт. При подальшому охолодженні зразка формується пружна, легко деформується низькотемпературна фаза - мартенсит. При подальшій деформації і нагріванні сплаву атоми утворюють аустенітну решітку і форма зразка відновлюється.

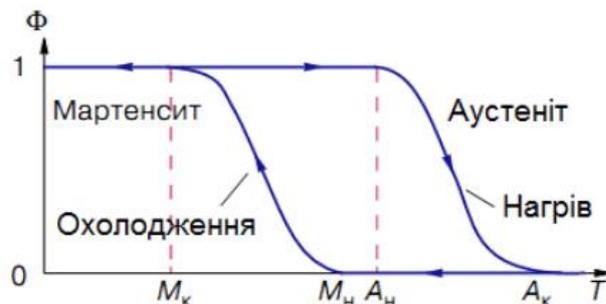


Рисунок 4.12. Схема температурної залежності змісту мартенситної фази при прямому і зворотному мартенситних перетвореннях [16]

Найбільш відомим сплавом з ефектом пам'яті є нікелево-титановий сплав нитинол [17]. З великого числа СЕПФ найбільш перспективними для практичного застосування є сплави на основі міді (Cu) та нікелю (Ni). СЕПФ на основі міді мають більш високу в порівнянні з сплавами на основі нікелю температуру переходу (в діапазоні від -200 до +200 °C), що дозволяє використовувати їх при температурах вище 100 °C. Відновлювання після деформації для СЕПФ на основі міді лежить в межах від 3% для Cu-Al-Ni до 4% для сплаву Cu-Zn-Al. Недоліками мідних сплавів є низька міцність і корозійна стійкість. Сплави Ni-Ti мають найбільшу відновлювану деформацію, яка досягає 7%, а їх недоліком залишається невисока температура фазового переходу (від -200 до +100 °C) [13]. Відновлювана деформація до 7%, що в поєднанні з високою міцністю і корозійною стійкістю сплавів Ni-Ti є основою їх успішного застосування. Для розрахунку властивостей та поведінки цих матеріалів використовують діаграми деформації (рис. 4.13) [18].

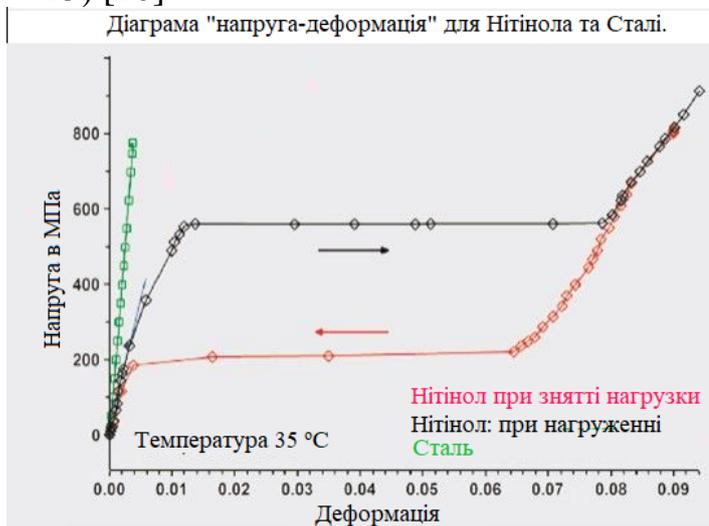


Рисунок 4.13. Діаграма деформування матеріалу з ефектом пам'яті форми [18]

Існують також і полімери з «пам'яттю форми», які повертаються до вихідної форми після впливу світла, електрики, магнітного поля і розчинників [19, 20]. Термін «ефект пам'яті форми» (ЕПФ) спочатку використовували головним чином для металевих сплавів. Для високомолекулярних з'єднань частіше використовували поняття «термічна усадка», тому що в більшості досліджень, присвячених даному питанню, розглядали особливості відновлення розмірів після орієнтованої витяжки. Це в першу чергу поведінка полімерів після різних видів деформації (розтягання, стиску, вигину), тому застосування такого терміна, як «ефект пам'яті форми», представляється виправданим. Зазначений ефект проявляється в основному в повному або частковому відновленні первісних розмірів зразків простої геометричної форми під впливом зовнішнього впливу. Однак у ряді випадків (наприклад, при зміні форми за схемою стрижень-спіраль-стрижень) доречно говорити саме про форму.

Полімери з пам'яттю форми (SMP) - це полімерні інтелектуальні матеріали, які можуть повернення з деформованого стану (тимчасова форма) до вихідної (постійної) формі, викликаний зовнішнім стимулом (тригером), таким як зміна температури.

Властивості полімерів з пам'яттю форми. SMP можуть зберігати два або іноді три форми, і перехід між ними викликаний температурою. Крім зміни температури, зміна форми SMP також може бути викликана електричним або магнітним полем, світлом або розчином. Як і полімери в цілому, SMP також мають широкий діапазон властивостей - від стабільних до біорозкладні, від м'яких до твердих і від еластичних до твердих, залежно від структурних одиниць, що становлять SMP. SMP містять у собі термопластичні й термореактивні (ковалентно зшиті) полімерні матеріали. Відомо, що SMP можуть зберігати в пам'яті до трьох різних форм. SMP продемонстрували відновлювану деформацію більш 800%. Двома важливими величинами, які використовуються для опису ефектів пам'яті форми, є швидкість відновлення деформації (R_r) і швидкість фіксації деформації (R_f). Швидкість відновлення деформації описує здатність матеріалу запам'ятовувати свою постійну форму, у той час як швидкість фіксації деформації описує здатність перемикання сегментів для фіксації механічної деформації.

Хоча більшість традиційних полімерів з пам'яттю форми можуть зберігати тільки постійну й тимчасову форму, останні технологічні досягнення дозволили впровадити матеріали з потрійною пам'яттю форми. Подібно тому, як традиційний полімер з подвійною пам'яттю форми зміниться від тимчасової форми назад до постійної форми при певній температурі, полімери з потрійною пам'яттю форми будуть перемикатися з однієї тимчасової форми на іншу при першій температурі переходу, а потім назад до постійна форма при іншій, більш високій температурі активації. Звичайно це досягається об'єднанням двох полімерів з подвійною пам'яттю форми з різними температурами склування або нагріванням полімеру із запрограмованою пам'яттю форми спочатку вище температури склування, а потім вище температури плавлення перехідного сегмента.

Полімери, що проявляють ефект пам'яті форми, мають як видиму, тимчасову форму, так і збережену (постійну) форму. Після того, як останній був виготовлений звичайними методами, матеріал перетвориться в іншу тимчасову форму шляхом обробки шляхом нагрівання, деформації й, нарешті, охолодження. Полімер зберігає цю тимчасову форму доти, поки зміна форми в постійну не активується заданим зовнішнім стимулом. Секрет цих матеріалів полягає в їхній молекулярній сітчастій структурі, яка містить як мінімум дві окремі фази.

Склоподібні полімери. В основі процесу відновлення форми деформованих полімерів лежить «прагнення» системи до досягнення термодинамічної рівноваги. Останнє визначається мінімальним значенням відповідного термодинамічного потенціалу, який являє собою різниця між внутрішньою енергією й ентропією компонентів макромолекул, що

становлять полімерну систему. Орієнтація полімерних ланцюгів, обумовлена деформацією, знижує ентропію системи. Стабільність форми деформованого полімеру буде залежати від зміни внутрішньої енергії. Якщо остання при деформуванні зменшується й компенсує зниження ентропії, формується стійка структура. Така ситуація може бути реалізована в полімерах, що кристалізуються, коли зчеплення між полімерними ланцюгами досить сильне.

Склоподібні полімери, що проявляють ЕПФ, знайшли широке практичне застосування. Наприклад, з таких полімерів виготовляють плівки що термічно усаджуються, які використовують у якості пакувального матеріалу; роблять трубки що термічно усаджуються для електричної ізоляції; деталі й профілі в підгорнутому стані, зручному для транспортування; заклепки; фітинги, призначені для створення нероз'ємних муфтоклеяних з'єднань стрижнів або труб. Зокрема, такі фітинги з ефектом пам'яті (насамперед муфти) дозволяють формувати міцні й герметичні конструкції з різних (у тому числі різнорідних) матеріалів внутрішні тиски, що витримують без руйнування значні, газу або рідини. Дана якість досягається за рахунок того, що разом з муфтою що термічно усаджується, виготовленої з матеріалу з гарною адгезією до різних субстратів, використовують спеціальний епоксидне сполучне. Температурно-часові режими усадки муфти й отверднення підбирають таким чином, щоб спочатку відбувалася усадка, а потім отверднення; за рахунок цього усуваються непроклеї й утворюється найтонший клейовий шар, що забезпечує максимальну міцність з'єднання.

Полімери, що кристалізуються. На відміну від розглянутих вище аморфних полімерів, молекулярні орієнтації обох фаз в аморфно-кристалічних гомополімерах можуть фіксуватися при температурах, що перевищують аморфної фази, оскільки стабільність орієнтації визначається мережею кристалічних елементів. Зв'язок між ступенем молекулярної орієнтації й стабільністю орієнтованого матеріалу в них більш складна. Зростання молекулярної орієнтації може привести до формування структури з високим ступенем безперервності, що підвищує стабільність, незважаючи на високий рівень внутрішніх напружень. Реалізація ЕПФ при збільшенні температури відбувається за рахунок структурної перебудови аморфної фази з її можливою кристалізацією; деструкції й рекристалізації кристалитів, що мають недосконалу форму, а також стовщення кристалічних блоків і плавлення кристалічної фази. Такі матеріали можуть після створення в ньому термоусадочних напруг залишатися в напруженому стані більш 10 років.

Полімерні суміші й наповнені композити. Технологія змішування полімерів дозволяє плавно змінювати їхні фізико-механічні властивості, включаючи й параметри ЕПФ (температуру й швидкість відновлення; формостійкість; напруги, що розвиваються при відновленні форми, і т.д.). Температура склування змішаної фази плавно міняється при зміні состава суміші. І хоча ці зміни незначні, початкова температура відновлення форми в такої полімерної системи нижче, чим у ПВХ. Така поведінку зв'язують зі

зміною відносини модулів пружності в склоподібні і вискоеластиних станах при варіюванні состава суміші.

Фізично зшиті SMP. Типовими полімерами з пам'яттю форми в цій категорії є поліуретани, поліуретани з іонними або мезогенними компонентами, вироблені форполімерний метод.

Хімічно зшиті SMP. Основним обмеженням фізично зшитих полімерів для застосування з пам'яттю форми є необоротна деформація під час програмування з пам'яттю через повзучість. сітчастий полімер може бути синтезований або полімеризацією з багатофункціональним (3 або більш) агентом, що зшиває, або наступним зшиванням лінійного або розгалуженого полімеру. Вони утворюють нерозчинні матеріали, які набухають у певних розчинниках.

Світлоіндуцировані SMP. Полімери з пам'яттю форми (LASMP) що активуються світлом використовують процеси фото-зшивання й фото-розщеплення. Фото-Зшивання досягається за рахунок використання однієї довжини хвилі світла, у той час як друга довжина хвилі світла оборотне розщеплює фото-зшиті зв'язки. Досягнутий ефект полягає в тому, що матеріал може бути оборотне переключений між еластомером і твердим полімером. Світло не змінює температуру, тільки щільність зшивки усередині матеріалу.

Електроактивні SMP. Використання електрики для активації ефекту пам'яті форми полімерів бажане для застосувань, де неможливо використовувати тепло і є ще однієї активною областю досліджень. У деяких поточних зусиллях використовуються провідні композити SMP з вуглецевими нанотрубками, короткими вуглецевими волокнами (SCF), вуглецевою сажею або металевим порошком Ni. Ці провідні SMP одержують хімічно поверхневим способом.

В інтелектуальних структурах матеріали з ефектом пам'яті форми використовують двома способами. По-перше, в якості механічних і силових перетворювачів, що створюють рух. У інтелектуальних структурах СЕП замінює складні механічні пристрої приведення в рух, причому в цьому випадку рух задається електричним сигналом системи управління, що діє на підставі показань датчиків. Цей клас виробів включає в себе і інтелектуальні механізми, до яких відносяться, наприклад, літальні апарати зі змінною геометрією крила. У цих механізмах активатори з матеріалів з пам'яттю форми змінюють геометричну форму гнучкий структур подібна до дії людських м'язів. Дія силового перетворювача з СЕП полягає в поступовій зміні розмірів в процесі нагрівання внаслідок фазового переходу. СЕП часто використовують для створення руху в більш складних системах. Прикладів є кроквяні ферми, в яких активні елементи демпфірують резонансні коливання. Головну проблему зазвичай представляють собою низькочастотні коливання і включення в структуру балок вузьких силових перетворювачів із СЕП вирішує цю проблему. В активних стропильних балках СЕП перебувають в стані частково обмеженого відновлення і в дію наводяться електричним сигналом. Другий підхід до використання сплав з ефектом пам'яті, в інтелектуальних

структурах відрізняється від звичайних технологій більш радикально. В цьому випадку силові перетворювачі з сплавом з ефектом пам'яті, розподіляють за обсягом або по поверхні конструкції. Наприклад, силові перетворювачі у вигляді дроту вводять в структуру композиційних матеріалів. Такі перетворювачі ефективно демпфують вібрацію і змінюють форму деталей з композиційних матеріалів. Крім того, вже перші дослідження виявили потенціал подібних активаторів для контролю ступеня пошкодження композиту. СЕПФ також застосовуються для моніторингу контрольних поверхонь аерокосмічних конструкцій [21] для роботи високими ударними навантаженнями, таких як шарикопідшипники і шасі [22-23].

4.4. Самовідтворюванні матеріали

Це матеріали, які можуть самостійно заліковувати виникаючі в них дефекти [8, 9]. На сьогоднішній день самовідновлення найбільш успішно реалізовано в полімерах, завдяки їх відносно великих швидкостей дифузії через наявність поперечних молекулярних зв'язків. Необхідною умовою для самовідновлення пошкодження є формування рухомої фази, яка зможе «затягнути» тріщину. Залежно від матеріалу, що використовується може змінюватися необхідна температура: температура навколишнього середовища для бетону, низькі температури ($<120^{\circ}\text{C}$) для полімерів (і їх з'єднань), високі температури для металів ($<600^{\circ}\text{C}$) і кераміки ($> 800^{\circ}\text{C}$). Один із способів створення самовідновлюються полімерів полягає в використанні термореактивних полімерів і їх здатності до зміцнення за рахунок зшивання полімерних ланцюгів. У полімер впроваджують тонкостінні інертні тендітні капсули з заліковує речовиною, при виникненні тріщини капсула ламається, заліковує агент вивільняється і поширюється в тріщину по капілярах. При цьому він змішується з каталізатором і затверджувачем, заздалегідь впровадженими в матеріал (окремо один від одного), твердне і герметизує тріщини (рис. 4.14) [42].

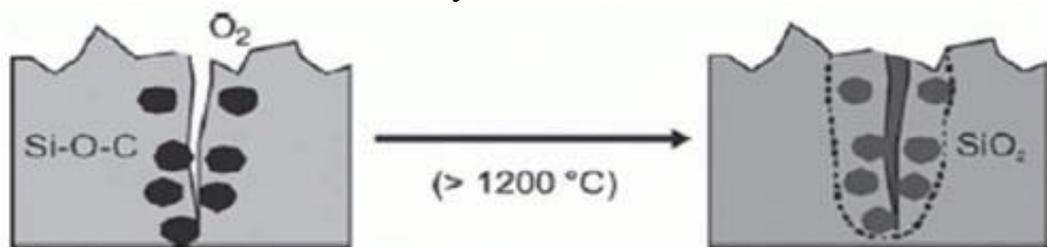
Велика кількість робіт присвячено вивченню такого типу матеріалів на прикладі композитів на епоксидної основі з мікрокапсулами з дициклопентадієну [43-45] і введенням до складу матеріалу каталізатором Граббса або мікрокапсулами з поліефірної смоли в оболонці з полікарбамід-формальдегіду [43]. Інший підхід включає використання термопластичних полімерів з різними способами включення заліковує агента в матеріал. При цьому часто потрібний нагрів для ініціювання відновлення, так як термопласти розм'якшуються і стають текучими при підвищенні температури [46]. Цікавим способом є нагрів самовідновлюючого композиту, який відбувається за рахунок протікання струму по наповнювача - вуглецевим волокнам [47, 48].

Крім полімерів, в даний час розробляються керамічні самовідтворюваними матеріали. У самовідновлюються керамічних матеріалах часто використовуються окислювальні реакції, при цьому обсяг оксиду

перевищує обсяг вихідного матеріалу. Як результат, продукти цих реакцій через збільшення обсягу можуть бути використані для заповнення невеликих тріщин, що зображено на рисунку 4.15 [49].



Рисунок 4.14. Самовідновлення матеріалу з капсулами з речовиною, що заліковує пошкодження.



Ремонтний наповнювач (MoSi₂)

Рисунок 4.15. Самовідновлення тріщини шляхом окислення SiC-кераміки

Самовідновлення бетону присвячено багато досліджень [50]. Дефекти бетону заліковували за допомогою водного розчину, що містить іони кальцію [51] або за допомогою суперабсорбуючого полімеру, який при впливі вологості набухає і герметизує тріщини [52]. Композит з порожніх скляних волокон і герметика, вбудованого в бетонну матрицю, також демонстрував ефект самовідновлення, але у нього спостерігалася значна (10-40%) втрата жорсткості в порівнянні зі стандартним бетоном через наявність волокон [53]. Слід зазначити, що виникає ситуація, коли слід шукати компроміс між самовідновлення і механічними властивостями композиту.

Металеві матеріали набагато важче самовідновлюються в порівнянні з полімерами, оскільки атоми металу сильно пов'язані між собою, мають невеликі розміри і низькі коефіцієнти дифузії. В даний час існує три основних напрямки, на основі яких конструюються самовідтворюваними металеві системи.

По-перше, це формування осаду на дефектних місцях, який зупиняє подальше зростання руйнування. Даний механізм отримав назву "запобігання пошкодження", тому що ідея полягає в запобіганні утворення порожнин дифузійним осаду з перенасиченого твердого розчину (сплаву) [54].

Крім того, використовується інший підхід: зміцнення матриці зі сплаву мікрОВОлокнами або нитками, виготовленими зі сплаву з пам'яттю форми, наприклад, нітінолу. Якщо композит піддається розтріскуванню, нагрів

матеріалу активує відновлення форми ниток з «ефектом пам'яті», які стискають тріщини і закривають їх [55] (рис. 4.16).

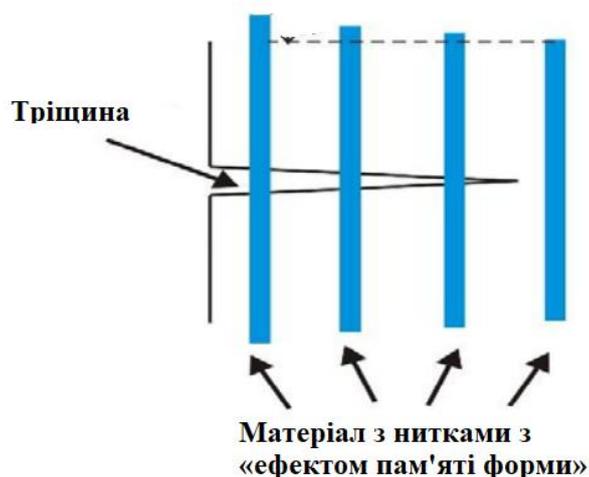


Рисунок 4.16. Матеріал, що самовідновлюється завдяки ниткам з «ефектом пам'яті форми».

Третій підхід полягає у використанні сплаву з низькою температурою плавлення, вбудованого в металеву матрицю, аналогічно тому, як це робиться в полімерах [56].

Існують і інші способи самовідновлення матеріалів. Наприклад, наявність в композитах мікромасштабних каналів, заповнених рідиною [57], або самовідновлення за допомогою акустичної енергії [58]. Існують самовідновлювальні композити, в яких за рахунок п'єзоелектричного ефекту механічна енергія, що прикладається до матеріалу, перетворюється в електрику, яке, в свою чергу, призводить до електрохімічного процесу самовідновлення за допомогою електролізу [59]. Епоксидна матриця з наночастинками Ag, мінералами Гант / гідромагnezит, частками гексаферриту барію і хітозаном є мультифункціональний матеріал - самовідновлюється, антибактеріальний, вогнестійкий і радіопоглощаючий [60]. Ефект самовідновлення використовують в аерокосмічній промисловості [61], для антикорозійного захисту металів [62], там де потрібно відновлювати механічні та геометричні властивості [63] і загоювати пошкодження після балістичного удару снаряда [64].

4.5. Магніострикції

У створенні інтелектуальних конструкційних наноматеріалів вельми перспективними є магніто-активні, переважно неорганічні (металеві та неметалеві) матеріали (провідники, напівпровідники і діелектрики), в яких виявляються магнітомеханічні ефекти, аналогічні електрострикційним і зворотним п'єзоелектричним ефектів: виникнення механічних сил, зсувів або деформацій при впливі зовнішнього магнітного поля. Ці ефекти обумовлюють можливість використання таких матеріалів як актюаторних елементів магнітомеханічних перетворювачів або активних компонентів

інтелектуальних матеріалів [13]. Інтелектуальні матеріали здатні «відчувати» і реагувати на зовнішній вплив (наприклад, електричне або магнітне). з цієї причини їх все ширше і ширше застосовують в промисловості і військової техніці. Всесвітній збут інтелектуальних матеріалів вже зараз перевищує 1 млрд доларів на рік. Вибір інтелектуального матеріалу залежить від характеру поведінки, яка вимагається від нього в залежності від умов експлуатації.

У цьому розділі описуються властивості і застосування нового покоління магнітострикційних матеріалів - **магнітостриктики**. Це загальна назва матеріалів, в яких при впливі зовнішнього магнітного поля відбувається виникнення механічних сил, зсувів або деформацій [65]. Це називається магнітострикційним ефектом (рис.4.17). Магнітострикційний ефект називають позитивним, якщо при одноосьовому стисканні матеріал намагнічується перпендикулярно осі стиснення. Якщо до такого матеріалу прикладається сила, що розтягує, він намагнічується уздовж напрямку дії сили. Для магнітострикційних матеріалів з негативним ефектом напрямком намагнічування є зворотним.

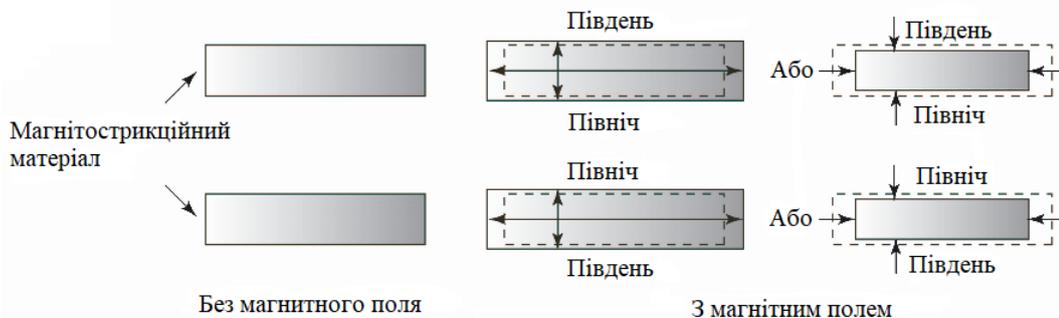


Рисунок 4.17. Схематичне зображення магнітострикційного ефекту
 Магнітострикція - самовільна деформація кристала при зміні магнітного порядку або орієнтації вектору намагніченості в ньому. Магнітострикція оцінює значення відносної деформації зразку в напрямку магнітного поля $\lambda = \frac{\Delta l}{l}$, де Δl - зміна довжини зразка при намагнічуванні, l - довжина зразку при відсутності магнітного поля. При цьому лінійна магнітострикція може бути як позитивною, так і негативною, тобто розміри зразка можуть як збільшуватися, так і зменшуватися. Відносну магнітострикційному деформацію, що виникає при магнітному насиченні зразка, називають константою магнітострикції. Константа магнітострикції зменшується при нагріванні і дорівнює нулю при температурі Кюрі ферромагнетика. Приведене нижче рівняння описує залежність напруженості магнітної поля E_σ через магнітострикційному постійну λ , прикладене механічне напруження σ і кута φ між віссю сили і напрямком легкого намагнічування [40]:

$$E_\sigma = -\frac{3}{2}\lambda\sigma\cos\varphi$$

Магнітострикційні матеріали створюють механічне переміщення під дією магнітного і електричного поля відповідно. З обох матеріалів роблять активні перетворювачі. Останнім часом з'явилися магнітострикційні матеріали

на основі рідкоземельних елементів, магнітострикція в яких є дуже сильною. Магнітострикційні матеріал і останнього покоління є інтерметалічні з'єднання, містять залізо, тербий і диспрозій. Їх потенціал починає поступово реалізовуватися в різних виробках, наприклад сонар, активних клапанах і системах активного контролю коливань конструкцій [66, 67]. Один з кращих нових магнітострикційних матеріалів відомий під промислової маркою Терфенол-Д, основним компонентом якого є $Dy_{0.7}Tb_{0.3}Fe_{1.95}$. Цей матеріал здатний розвивати магнітострикційному деформацію до 0,14%. Він з'явився в результаті дослідження магнітного поведінки рідкоземельного елемента тербія (Tb), деформація якого при температурі нижче 200 К досягає 1%. Легування тербія залізом (Fe) дозволило підняти робочу температуру до кімнатної, а введення диспрозія (Dy) - знизити величину магнітного поля [68]. Робоча температура цього сплаву знаходиться в інтервалі від $-10^{\circ}C$ до $+120^{\circ}C$ [26]. Однак, в його склад входять тербий і диспрозій - два рідкоземельних металу, видобуток і обробка яких є шкідливим виробництвом, що сильно збільшує його собівартість. Проте недавно створений сплав залізо-галій, або, як його прийнято називати, Галфенол [65], внаслідок гігантської магнітострикції (табл. 4.1), а також відсутності в його складі рідкоземельних металів, став його основним конкурентом.

Характеристика сплавів Терфенол-Д і Гальфенолпредставлені в таблиці 4.2. Протягом багатьох років значні зусилля були витрачені на розробку цих матеріалів у формі аморфних стрічок, дротів і тонких плівок. Поведінка такого матеріалу визначається фізичною природою явища магнітострикції. Ефект магнітострикції, званий також ефектом Джоуля, складається в зміні розмірів при намагнічуванні або зміні магнітного стану [69]. Розрізняють лінійний і об'ємний магнітострикційний ефекти. Лінійний ефект полягає в зміні довжини зразка з феромагнітного матеріалу під дією магнітного поля, а об'ємний - в зміні його об'єму .

Оскільки зміна обсягу зазвичай невелика, під магнітострикцією, як правило, розуміють саме лінійну магнітострикцію. Магнітострикційну поведінку часто плутають з механострикційною. Їх відмінність полягає в тому, що механострикційна поведінку є більш загальним і включає зміну не тільки довжини, але і модуля пружності. Обидва ефекти обумовлені зв'язком пружною і магнітної енергії. Магнітострикція полягає в мимовільному деформації атомної решітки феромагнітного матеріалу під дією магнітного поля внаслідок зниження при цьому загальної енергії, яка дорівнює сумі енергій пружного деформування і енергії магнітного поля. Теорії механострикції враховують міжатомні взаємодії [71].

Таблиця 4.2 -Характеристики сплавів Терфенол–Д і Гальфенол [70]

| | Терфенол – Д ($Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.92}$) | Гальфенол ($Fe_{81.6}Ga_{18.4}$) |
|------------------------------|---|---------------------------------------|
| Механічні властивості | | |
| Густина, $кг/м^3$ | 9200 | 7800 |

| | | |
|---|-----------|----------|
| Міцність на розрив, МПа | 28-40 | 350 |
| Міцність на стиснення, МПа | 300-880 | |
| Модуль Юнга, ГПа (залежить від напруженості магнітного поля) | 18-55 | 40-60 |
| Об'ємний модуль пружності, ГПа | 90 | 125 |
| Мінімальна товщина зразку, мм | 1 | 0.25 |
| Магніострикційні властивості | | |
| Деформація, ppm | 800 -1200 | 200 -250 |
| П'єзомагнетична константа, нм/А | 6-10 | 20-30 |
| Густина енергії, кДж/м ³ | 4.9 -25 | 0.3 -0.6 |
| Електричні властивості | | |
| Температура Кюрі, °С | 380 | 670 |

Явище магніострикції відкрив Джоуль в 1842 році [69]. Він виявив, що при намагнічуванні залізо подовжується в напрямку магнітного поля і скорочується в перпендикулярному напрямку. В 1882 році Бере показав, що при додатку магнітного поля нікель стискається і при цьому змінюється його обсяг. Протягом першої половини ХХ століття при різних температурах вивчали поведінку заліза, кобальту, нікелю та інших сплавів в магнітному полі. Досліджував і як монокристали, так і полікристалічні матеріали. Однак інтерес до дослідження магніострикції поступово згас [72], що було обумовлено малою величиною ефекту.

На даний час магніострикційні матеріали використовуються як актуаторні елементи магнітомеханічних перетворювачів або активних компонентів інтелектуальних матеріалів, як перетворювачі електромагнітної енергії (наприклад, в механічну енергію) [73], як датчики тиску, а також як магніострикційні двигуни.

4.6. Інтелектуальні структури в природі

Основним елементом живих організмів є клітка, і вже на цьому рівні організм здатний реагувати на зовнішній вплив. Найбільш важливим елементом передачі та обробки інформації в клітині є мембрана. У ній зовнішні впливи перетворюються в хімічні сигнали. Цей сигнал може бути посилений і оброблений, після чого клітина виробляє сигнал, який знову повинен перетнути мембрану. Клітина здатна як посилювати, так і підсумовувати входні сигнали. Слід мати на увазі, що біологічні організми дуже складні, і тому приклади, що ілюструють роботу їх органів почуттів, доводиться вибирати з великою обережністю. У клітці відбувається велика кількість життєвих процесів. Однак при виборі біологічної моделі бажано мати більш просту систему, яка виконує переважно одну функцію, що типова для великих організмів, в яких клітини спеціалізовані. У межі, чутливість рецепторів біооб'єкту обмежена квантовими ефектами [12]. Тому в принципі до біосистеми бажано застосовувати квантовий підхід. У багатьох випадках є

специфічні вимоги, що пред'являються до механізмів обробки і посилення сигналу рецепторних клітин. Щоб з'ясувати принцип роботи рецептора, необхідно знати біологічні особливості організму. Принципи функціонування біооб'єктів набагато складніше створених людиною виробів, і тому сліпе копіювання біологічних механізмів є помилкою. На жаль, часто нам не вдається виявити принципи роботи багатофункціонального біоорганізму, і ми не розуміємо принципів його роботи. Є принцип, що найпростіший інтелектуальний біо імітаційний пристрій, імовірно, буде і самим успішним. Системи в природі мають простоту і функціональність біметалічної стрічки. Перевагою само організованих матеріалів і структур типу рідкого кристала є легкість зміни їх властивостей [74]. Рідкокристалічні структури часто зустрічаються в живій природі. Відзначимо також, що дуже легко робляться полімери, в яких відбувається мимовільний поділ фаз і утворюється структура [75].

Рідкі кристали поширені в біологічних системах виключно широко. Рідкі кристали «само збираються» з неупорядкованого стану, в результаті чого в неупорядкованою хімічної системі з'являється порядок і морфологія. Так як життя з'явилося в результаті упорядкування та розподілу хімічних речовин, є великий інтерес до механізмів упорядкованих структур. Рідкі кристали утворюють цілий ряд упорядкованих структур простих молекул, причому можливі переходи від одного типу структури до іншої у відповідь на зміну зовнішніх умов (наприклад зміни концентрації солі, температур и, рН середовища і т.д.). Рідкі кристали задовольняють загальній критерій, висунутій до біосистеми, а саме їх дія досягається з мінімальною витратою енергії. Наприклад, енергія переходу із нематичної рідкокристалічної структури (в якій молекули орієнтовані паралельно) в спиралевидну при товщині шарів 1 мкм. Утворення нематичної структури з енергетичної точки зору часто вигідніше, якщо молекули орієнтовані перпендикулярно поверхні підкладки. У біології з енергетичної точки зору само впорядкування системи більш вигідні в порівнянні з матеріалами, які не мають власного порядку, і тому потребують ферментованого управління у підводі енергії. Як наслідок, рідкокристалічні структури в біології поширені надзвичайно широко. Деякою проблемою є не знання механізмів їх появи в біосистемах. Клітина ділиться утворюючи рідкокристалічну морфологічну структуру, внутрішню властивістю якої є її стабільність. Технічні рідкокристалічні матеріали мають особливі оптичні (наприклад колір), а також діелектричні і механічні властивості (реологічні або пружні) і т.д.

Морфологія рідких кристалів може змінюватися в результаті зміни концентрації, температури, вмісту солей, рН системи і т.д. Так як регулярно упакований рідкий кристал має більш високу щільність і меншу енергію, ніж неупорядкована рідина, збільшення тиску і зниження температури сприяють переходу в рідкокристалічний стан. Білок захисної оболонки яйця богомола має спіралеподібну структуру, якщо рН середовища вище 5, і ізотропну, якщо нижче. Як було переконливо показано, колаген оболонки яйця акули має

рідкокристалічну структуру [75], однак при зміні солоності навколишнього води він змінює структуру упаковки. Таким чином, є безліч способів зміни рідкокристалічної структури. Ці зміни можна використовувати для отримання інформації про стан навколишнього середовища, що є основою створення датчиків. Опитування датчика зручно проводити за допомогою поляризованого світла методом віддаленого контролю. За типом утворилася морфології можна також судити про умови її формування. Біологічні системи представляють інтерес для створення інтелектуальних структур композитних матеріалів та робототехніки. Тому природно звернутися до природи, щоб з'ясувати, як можна використати набутий нею досвід для створення штучних сенсорних систем або «smart materials» з необхідними властивостями. Природа може служити підказкою не тільки при створенні нових матеріалів і структур, але і при розробці технологій виробництва, а також методів їх розумного використання. Природні системи само організовані на різних масштабних рівнях. На молекулярному і мікро структурному рівнях це обумовлено рідкокристалічною структурою матеріалу. Але на макрорівні це майже напевно управляється сукупністю властивостей різних елементів конструкції. Це може бути незручно для інженера (який повинен бути впевнений, що структура буде надійно нести розрахункові навантаження) і тим більше для користувача. Ймовірно, структури, що самі розвиваються з'являться і в космосі, де дорожнеча корисного вантажу, відсутність гравітаційних сил температурний перепад, вимоги до підтримки життя роблять такий вибір дуже привабливим. Але це майбутнє можливо за рахунок пізнання інтелектуальних структур природи та створення «smart materials».

4.7. Самозмазуючі матеріали

Самозмазуючі матеріали зменшують тертя або знос. Існує кілька методів зменшення тертя або зносу поверхонь матеріалів. Один з них - це нанесення самозмащувальних покриттів, які або досить міцні, щоб зменшувати знос, або мають низьку поверхневу енергію і за рахунок цього зменшують адгезію і тертя. Також розробляються самозмазуючі металеві, полімерні і керамічні композити. Наприклад, в нанокompозитах наповнювач, вуглецеві нанотрубки або фулерени C₆₀, грають роль «підшипників» і зменшують тертя. У композит, виготовлений на основі міді методом порошкової металургії, додавали політетрафторетилен [76], а пористий поліфеніленсульфідний композит модифікували додаванням 1% маси цеоліту і просочили складом на літієвої основі, що дозволило зменшити коефіцієнт тертя на 90% [77]. Один з методів створення самозмащувальних матеріалів полягає в формуванні шару мастила в процесі тертя за рахунок хімічної реакції. Така реакція може відбуватися внаслідок механічного контакту. Захисний шар міді, наприклад, утворюється при терті на металевій поверхні за рахунок переносу іонів міді з мідномісних сплавів (наприклад, бронзи) або мастила.

Також захисний шар може бути утворений при хімічній реакції окислення або реакції з водяною парою. Оксид бору реагує з водяними парами в повітрі з утворенням захисного покриття з борної кислоти: $B_2O_3 + 3H_2O = 2H_3BO_3$.

Захисне покриття, в свою чергу, призводить до зниження тертя і зносу. Завдяки шаруватій кристалічній структурі, борна кислота схожа на інші тверді частинки, з хорошими змащувальними властивостями (наприклад, MoS_2 , графіт і гексагональний нітрид бору) [78-81]. Для пояснення механізму самозмащування деякими дослідниками запропонована модель триклинної кристалічної структури борної кислоти. Атоми, що становлять кожен молекулу борної кислоти, розташовані в щільно упакованих шарах, що знаходяться на відстані 0,318 нм один від одного, які пов'язані слабкими силами, такими як Ван дер Ваальсові. Автори припустили, що під час ковзання ці шари можуть вирівнюватися паралельно напрямку відносного руху і потім вони легко ковзають один відносно одного, забезпечуючи низький коефіцієнт тертя [82].

Ще один спосіб створення самозмащувальних матеріалів - це створення мікротекстурованої поверхні, за рахунок чого утворюється рельєф з мікровпадіннями, які грають роль резервуарів для змащення.

Для проектування конструкцій з композитних матеріалів необхідно створення адекватних фізичних моделей. Складність структури композитів вимагає урахування всі особливостей матеріалу тому розробка моделей мікромеханіки композитів є важливою для прогнозування поведінки цих матеріалів під навантаженням. Ці моделі дозволяють враховувати взаємодію між різними компонентами композиту на мікрорівні, що допомагає розуміти механізми пошкоджень та визначити оптимальні параметри для досягнення бажаних властивостей. Вони також використовуються для вдосконалення процесів виготовлення та оптимізації дизайну композитних матеріалів у різних галузях, включаючи ракетну, авіаційну та автомобільну промисловість, будівництво та спортивні технології. Моделі мікромеханіки композитів враховують різноманітні фізичні явища на мікроскопічному рівні, такі як інтеракції між волокнами, міжфазні ефекти та деформації в матриці. Використання таких моделей дозволяє ефективно прогнозувати механічні властивості композитів за різних умов, що є ключовим для їхнього успішного впровадження. Крім того, розвиток моделей мікромеханіки композитів сприяє зрозумінню деградаційних процесів, таких як зміна міцності чи тріщинуватість під впливом зовнішніх чинників, а також створювати Smart матеріали. Це дозволяє покращити прогнозовану тривалість експлуатації композитних конструкцій та зменшити витрати на їх обслуговування. Моделі мікромеханіки також допомагають у визначенні оптимальних стратегій посилення або модифікації композитних матеріалів з метою покращення їхніх властивостей та збільшення конкурентоспроможності на ринку.

4.8 Специфічні інтелектуальні матеріали

Матеріали, що самоочищаються, відштовхують воду, органічні рідини та інші забруднення. Властивість самоочищення мікроструктурованих поверхонь полягає в тому, що мікроструктури та візерунки можуть підтримувати крапельку води з повітрям, укладеним у проміжках між структурами. Такий тип зіткнення збільшує кут контакту з водою завдяки поверхневому натягу і, отже, крапелька води може перекочуватися мікроструктурованої поверхні, видаляючи цим пил, тобто. забезпечуючи самоочищення [83, 84]. Формули, що описують основні співвідношення [83]:

$$\cos\theta_r = r \cdot \cos\theta_e$$
$$\cos\theta_r = f_s \cdot \cos\theta_e + f_s - 1 = f_s(1 + \cos\theta_e) - 1$$

В цих рівняннях θ_r – крайовий кут змочування; θ_e – крайовий кут змочування краплі рідини на плоскій поверхні, виготовленій із матеріалу поверхні; r - відношення фактичної площі контакту рідина-тверде тіло до площі проекції горизонтальну площину; f_s – частка площі контакту рідина-тверде тіло (рис 4.18). Водовідштовхувальна здатність на поверхні характеризується крайовим кутом змочування - параметром θ_r .

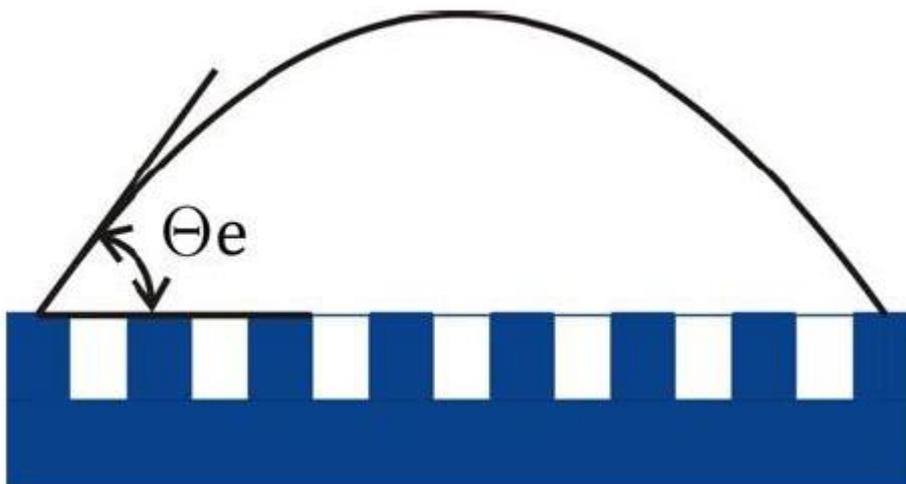


Рисунок 4.18. – Крапля рідини на мікроструктурованій поверхні

Новий метод дозволяє створювати самоочисні покриття шляхом об'єднання двох поширених матеріалів - тефлону і термоусаджуваної пластмаси. Дослідники, які проводили описуване дослідження, вирішили, що ключем до хорошої супергідрофобної поверхні є поєднання мікро-і нанорозмірних візерунків. Вони нанесли тефлон на пластик, що термоусаджується, потім нагріли і отримали зморшкувату поверхню тефлону. Кут контакту крапель з такою поверхнею дорівнює 172° , це означає, що кульки води ледве торкаються поверхні. Розроблене покриття є майже таким самим міцним, як алюмінієве. З появою подряпин водовідштовхувальні властивості покриття зберігаються [85].

Супервідштовхувальні властивості надають тканинам функцію самоочищення, що включає як фізичне очищення від забруднень, процес хімічного самоочищення, який полягає в деградації кольорових плям і

розчинів при впливі УФ-опромінення, і біологічну - антибактеріальні властивості. Наприклад, властивості самоочищення надає тканини з бавовни додавання наночастинок TiO_2 [86-89] або ZnO [90, 91]. Покриття, що самоочищається, на основі TiO_2 може також використовуватися для захисту історичних будівель і пам'яток [92-94].

Полімери, що проводять, (полімери з власною провідністю).

Існування електропровідності в полімерах, що проводять, пояснюється тим, що в місцях дефектів їх структури виникає неспарений електрон, який може пересуватися вздовж полімерного ланцюга. Легування провідного полімеру акцепторами або донорами електронів призводить до збільшення його електропровідності за рахунок зменшення енергії, яка потрібна для утворення рухомого електрона. Найвідомішими та широко застосовуваними провідними полімерами є поліанілін та поліпіррол [87].

Максимальна електропровідність спостерігається у чистих орієнтованих полімерах із великою молекулярною масою. Найбільші отримані значення становлять $\sim 10^7 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ для поліацетилену та $2 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ для поліаніліну [88]. Мрія про те, що полімери, що проводять, замінять мідь в електричних проводах, поки не здійснилася. Поліанілін для цього досить стабільний, але його електропровідність набагато нижча і питома теплоємність менша у порівнянні зі звичайними металами, тому будь-яка неоднорідність у складі може призвести до локального перегріву та виходу такого полімерного провідника з ладу [89].

Застосовують провідні полімери як хімічні сенсори, що засноване на зміні їх властивостей при взаємодії зі сполуками та іонами, що мають окислювально-відновну активність. Найпростіший сенсор такого типу є полімерною плівкою, що знаходиться між електродами, опір якої контролюється при дії активної хімічної сполуки. Наприклад, властивість поліаніліну оборотно змінювати колір залежно від кислотності середовища, що використовується для створення вимірювача рН. Датчик наявності газів на основі поліаніліну, зокрема, на газоподібний аміак та на діоксид азоту має досить високу чутливість.

Електропровідність поліуретану з покриттям з поліаніліну чутлива до прикладеного тиску в діапазоні $0-100 \text{ Н/м}^2$, отже, такий матеріал можна використовувати як датчик тиску [90]. Крім цього, провідні полімери можуть використовуватися як антистатичні покриття [91, 92], підвищення вогнестійкості тканин [93] створення біосумісних матеріалів, акумуляторів, конденсаторів та ін.

На основі поліаніліну роблять композити, наприклад, з нікелевими феритовими наночастинами як наповнювач [94] або додаванням різних хімічних речовин, при цьому покращуючи його властивості, наприклад, механічні та електричні [95-97]. Композит із поліакрилонітрилу з додаванням 3 % мас. поліаніліну та 1 % мас. $AgNO_3$ демонструє антимікробну активність [98]. Композити з поліаніліну та гуми пропонують використовувати для електромагнітного екранування [99]. При використанні суміші

поліанілін/полівінілхлорид як захисне покриття електричних контактів зменшувалася фреттинг-корозія та знос контактів [100].

Електрохромні матеріали змінюють оптичні властивості при електричних впливах на деякі неорганічні сполуки. Особливо на оксиди багатовалентних металів та демонструють зміну кольору, що залежить від ступеня окислення їх катіонів. Ця властивість призводить до електрохромізму, який є оборотним. Такі окислювально-відновні реакції індукуються низькою електричною напругою (близько ± 1 В постійного струму). Електрохромні властивості мають і деякі полімери, наприклад, що містять карбазол [101]. Композитні плівки з поліаніліну та поліакрилової кислоти змінюють колір від жовтого до пурпурового [102].

Електрохромний пристрій являє собою багатошарову конструкцію, в якій один із шарів має електрохромні властивості. Цей пристрій працює за принципом гальванічного елемента. Найвідоміший електрохромний матеріал – триоксид вольфраму (WO_3), який утворює луг глибокого синього кольору при відновленні.

Як правило, низьковольтні електрохромні пристрої з катодом, що змінює колір, забарвлюються в зарядженому стані і знебарвлюються при розряді.

Нині основне застосування електрохромних пристроїв – це «розумні вікна», тобто. вікна з електронним керуванням, які можуть бути прозорими або затемненими і пристосовуватися до кількості сонячного світла в залежності від часу дня і сезону. «Розумні вікна» дозволяють зменшити енергоспоживання у будинках та створити комфортну атмосферу всередині [103, 104].

Композити, що самоадаптуються.

Іншим напрямом у галузі створення інтелектуальних матеріалів є розробка композитів, що самоадаптуються – матеріалів, здатних до спрямованого поліпшення своїх параметрів у складній або екстремальній ситуаціях з метою збереження працездатності конструкції.

Композиційні матеріали, що мають керовану анізотропію, можуть бути використані в конструкціях, де проявляються їх властивості пристосовуваності до змін зовнішнього середовища. У ВІАМ розроблено матеріал із регульованою деформацією при зовнішньому впливі. Матеріал складається з шарів, що чергуються, або блоків шарів, що мають незбалансовану структуру щодо обраних осей анізотропії, яка при зовнішньому впливі створює відмінні від нуля сумарний вектор або сумарний момент щодо цих осей, що викликає просторову деформацію матеріалу. В результаті неврівноваженості суми сил і моментів щодо обраних осей, в матеріалі з'являються дотичні напруги кручення, і внаслідок крутного моменту, що виникає, матеріал (виріб, виконаний з нього) деформується, згинаючись в площині. У разі навантаження матеріалу напругою вигину відбуваються два види деформацій, що змінюють форму, - прогин і кручення.

Величини цих деформацій взаємопов'язані і залежать від багатьох факторів, але в першу чергу від жорсткості матеріалу та виробу з нього, тобто від модуля пружності матеріалу у напрямку укладання шарів, а також від товщини та геометричної форми виробу. Зміна форми виробу та її повернення у початкове положення відбуваються автоматично без втручання людини внаслідок зростання або зменшення поля напруги, що діють у матеріалі конструкції. У вуглепластику цей ефект досягається не тільки при навантаженні, але і при нагріванні - внаслідок пропускання електричного струму або при аеродинамічному нагріванні.

Незбалансованість структури в шаруватому композиційному матеріалі досягається декількома способами:

- шляхом укладання всіх шарів або їх частини під кутами φ несиметрично щодо вибраних осей анізотропії, причому $0 < \varphi < 90$ град, при цьому

$$\sum_{i=0}^n \sigma_{\varphi_1} + \dots + \sigma_{\varphi_i} + \dots + \sigma_{\varphi_n} \neq 0;$$

- шляхом укладання шарів під однаковими кутами φ (симетрично або несиметрично щодо обраних осей анізотропії), але що знаходяться на різних відстанях від площини, що проходить через середню площину пластини, при цьому

$$\sum_{i=0}^n \sigma_{\varphi_1} \cdot h_1 + \dots + \sigma_{\varphi_2} \cdot h_2 + \dots + \sigma_{\varphi_n} \cdot h_n \neq 0; \text{ якщо } h_{1\varphi_+} \neq h_{2\varphi_+};$$

- шляхом використання в конструкційному композиційному матеріалі різномодульних шарів, виконаних з однорідних (наприклад, вуглепластику з волокнами різного модуля пружності) або різнорідних шарів (вуглепластику та склопластику), при цьому $E_{\varphi_+} \neq E_{\varphi_+}$.

Матеріали, що самоадаптуються, вже сьогодні знаходять застосування в ряді відповідальних конструкцій. Вперше у світі на практиці реалізована можливість досягнення високих вагових та аеродинамічних характеристик конструкції при використанні вуглепластику КМУ-7у (АКМ-1у), що самоадаптується, в крилі зворотної стріловидності винишувача Су-47 «Беркут» АТ «ОКБ Сухого». Відмінною особливістю самоадаптованого вуглепластику АКМ-1у є особливий тип структурної анізотропії, що створюється нетрадиційним укладанням моношарів. Завдяки цьому під впливом аеродинамічного навантаження відбувається цілеспрямована зміна геометрії конструкції, що сприяє перерозподілу та зниження діючих навантажень. Адаптація конструкції забезпечує стабільність кутів атаки і, як наслідок, високі аеродинамічні характеристики при польотах з великими кутами атаки та високу маневреність літака [105].

Ефект адаптації може проявлятися і в конструкції лопаток осьового компресора газо-турбинного двигуна, яка виконана з шаруватого композиційного матеріалу, що складається з шарів, що чергуються, або пачок шарів, орієнтованих під кутами щодо поздовжньої осі лопатки.

Композиційний матеріал такої лопатки має незбалансовану структуру щодо обраних осей анізотропії, має можливість адаптуватися при навантаженні відцентровими силами від повітряного потоку і забезпечує авторегулювання та узгодження режиму роботи ступенів компресора.

В результаті лопатки робочих коліс компресора набувають підвищену пружну розкрутку під впливом відцентрових сил, при максимальній частоті обертання ротора профілі лопаток приймають крайнє розкрите положення. При зниженні частоти обертання ротора профіль пера лопатки автоматично «прикриватиметься», завдяки чому послаблюється тенденція до зростання кута атаки, тобто відбувається авторегулювання роботи ступеня. Розкрутка або закрутка пера профілю лопатки змінюються в широких межах в діапазоні, що визначається характеристиками матеріалів, що застосовуються: модулями пружності при розтягуванні і зрушенні, коефіцієнтами взаємного впливу 1-го і 2-го роду і коефіцієнтами Ченцова. Максимальних значень (≥ 2) коефіцієнти взаємного впливу досягають при несиметричній орієнтації всіх шарів матеріалу щодо обраної осі анізотропії на кут φ оптимальні значення якого залежать від виду армуючих волокон і типу матриці. Це означає, що додаткові, «побічні» зсувні деформації у 2 та більше разів перевищуватимуть деформації у напрямку дії нормальних напружень.

Лопатка осьового компресора може бути використана в конструкціях лопаткових вінців, що адаптуються, перших ступенів компресора для забезпечення авторегулювання режиму роботи його ступенів, усунення небезпеки формування змивної течії і порушення газодинамічної стійкості при неузгодженні режимів роботи ступенів компресора і для оптимізації напружено-деформованого стану матеріалу лопатки.

Питання до четвертого розділу

1. Що таке інтелектуальні матеріали та як вони відрізняються від традиційних матеріалів?
2. Які основні властивості інтелектуальних матеріалів дозволяють їм реагувати на зовнішні впливи або змінювати свої характеристики?
3. Які технології використовуються для створення інтелектуальних матеріалів?
4. Які принципи лежать в основі дизайну інтелектуальних матеріалів для певних застосувань?
5. Які сфери застосування інтелектуальних матеріалів в сучасному інженерії та технологіях?
6. Які можливості надають інтелектуальні матеріали для розвитку нових продуктів та технологій?
7. Як відбувається управління характеристиками інтелектуальних матеріалів під час їх експлуатації?
8. Які виклики та обмеження існують у розробці та використанні інтелектуальних матеріалів?

9. Як впливає розвиток інтелектуальних матеріалів на підвищення продуктивності та якість життя?
10. Які перспективи розвитку інтелектуальних матеріалів у майбутньому і як вони можуть змінити наш підхід до виробництва та споживання товарів?
11. Що таке п'єзоелектричні інтелектуальні матеріали і які основні властивості вони мають?
12. Які принципи п'єзоелектричності лежать в основі функціонування цих матеріалів?
13. Які матеріали частіше за все використовуються для створення п'єзоелектричних інтелектуальних систем?
14. Які потенційні застосування п'єзоелектричних інтелектуальних матеріалів у сучасних технологіях та інженерії?
15. Як підвищення чутливості п'єзоелектричних матеріалів впливає на їхню ефективність?
16. Які методи виготовлення та обробки використовуються для п'єзоелектричних інтелектуальних матеріалів?
17. Які властивості п'єзоелектричних матеріалів забезпечують їхню здатність до вироблення електричної енергії з механічного впливу та навпаки?
18. Які методи керування характеристиками п'єзоелектричних матеріалів використовуються для підтримки їхньої стабільності та ефективності?
19. Які переваги і обмеження існують у використанні п'єзоелектричних інтелектуальних матеріалів у порівнянні з іншими типами інтелектуальних матеріалів?
20. Які перспективи розвитку п'єзоелектричних інтелектуальних матеріалів у майбутньому і як вони можуть вплинути на наші технології та щоденне життя?
21. Які конкретні компоненти техніки можуть бути побудовані з використанням п'єзоелектричних інтелектуальних матеріалів?
22. Як п'єзоелектричні матеріали застосовуються для створення датчиків і датчиків руху?
23. Як використовуються п'єзоелектричні матеріали для створення пристроїв для контролю та діагностики техніки?
24. Як п'єзоелектричні інтелектуальні матеріали використовуються для позиціонування та приведення в рух в техніці?
25. Які можливості надають п'єзоелектричні матеріали для створення акустичних та ультразвукових пристроїв?
26. Як п'єзоелектричні інтелектуальні матеріали використовуються для адаптивного демпфування і активного контролю вібрацій в техніці?
27. Як п'єзоелектричні матеріали використовуються для створення енергетичної системи, яка використовує механічну енергію для вироблення електроенергії?
28. Які можливості надають п'єзоелектричні матеріали для створення систем автоматичного регулювання та стабілізації в техніці?
29. Як використовуються п'єзоелектричні матеріали для активного адаптивного контролю форми та структури в техніці?

30. Які переваги та обмеження використання п'єзоелектричних інтелектуальних матеріалів у порівнянні з іншими технологіями у техніці?
31. Що таке сплави з ефектом пам'яті форми і як вони працюють?
32. Які основні характеристики сплавів з ефектом пам'яті форми визначають їхню ефективність та застосування?
33. Які механізми відновлення форми працюють у сплавах з ефектом пам'яті форми?
34. Які сплави найчастіше використовуються для створення виробів з ефектом пам'яті форми і чому?
35. Які можливості надають сплави з ефектом пам'яті форми для застосувань у виробництві та інженерії?
36. Як відбувається програмування сплавів з ефектом пам'яті форми і які технології використовуються для цього?
37. Як впливають умови навколишнього середовища на роботу сплавів з ефектом пам'яті форми?
38. Які методи контролю і тестування використовуються для оцінки ефективності сплавів з ефектом пам'яті форми?
39. Які переваги та обмеження використання сплавів з ефектом пам'яті форми у порівнянні з іншими технологіями?
40. Які напрямки досліджень та розвитку існують у галузі сплавів з ефектом пам'яті форми і як вони можуть змінити майбутнє технологій та інженерії?
41. Які галузі техніки в основному використовують сплави з ефектом пам'яті форми?
42. Як використовуються сплави з ефектом пам'яті форми в медицині та біомедичних застосуваннях?
43. Які переваги має використання сплавів з ефектом пам'яті форми в аерокосмічній промисловості?
44. Які можливості надає використання сплавів з ефектом пам'яті форми для автомобільної промисловості?
45. Як використовуються сплави з ефектом пам'яті форми у виробництві електроніки та мікромеханіки?
46. Які конкретні застосування сплавів з ефектом пам'яті форми можна знайти в будівництві та інфраструктурних проектах?
47. Як сплави з ефектом пам'яті форми використовуються для створення датчиків і систем контролю?
48. Які перспективи використання сплавів з ефектом пам'яті форми в сферах, таких як робототехніка та штучний інтелект?
49. Які вимоги ставляться до виробів із сплавів з ефектом пам'яті форми у сферах, де вони застосовуються?
50. Які переваги і обмеження має використання сплавів з ефектом пам'яті форми порівняно з іншими матеріалами у різних галузях техніки?
51. Що таке самовідтворюванні інтелектуальні матеріали і як вони працюють?
52. Які основні принципи лежать в основі функціонування самовідтворюваних інтелектуальних матеріалів?

53. Які матеріали частіше за все використовуються для створення самовідтворюваних інтелектуальних систем?
54. Які можливості надають самовідтворюванні інтелектуальні матеріали для автономного ремонту та підтримки своєї функціональності?
55. Як самовідтворюванні інтелектуальні матеріали можуть бути використані у виробництві та будівництві?
56. Як відбувається програмування та керування характеристиками самовідтворюваних інтелектуальних матеріалів?
57. Які методи контролю і тестування використовуються для оцінки ефективності самовідтворюваних інтелектуальних матеріалів?
58. Як впливають умови навколишнього середовища на роботу самовідтворюваних інтелектуальних матеріалів?
59. Які переваги та обмеження використання самовідтворюваних інтелектуальних матеріалів у порівнянні з іншими технологіями?
60. Які перспективи розвитку самовідтворюваних інтелектуальних матеріалів у майбутньому і як вони можуть змінити майбутній підхід до виробництва та споживання матеріалів?
61. Які застосування самовідтворюваних інтелектуальних матеріалів вже існують на ринку?
62. Як самовідтворювані матеріали можуть допомагати зменшити витрати на обслуговування та ремонт інфраструктури?
63. Як вони можуть використовуватися у медицині для автономного лікування та регенерації тканин?
64. Які переваги має використання самовідтворюваних матеріалів у виробництві та будівництві?
65. Як вони можуть бути використані для створення "розумних" поверхонь, які бсамі відновлюють свою структуру після пошкоджень?
66. Як вони можуть бути застосовані у виробництві автомобілів для створення автономних систем ремонту?
67. Які технології використовуються для програмування та керування характеристиками самовідтворюваних матеріалів?
68. Як вони можуть впливати на сферу збереження довкілля та сталого розвитку?
69. Як вони можуть бути використані у виробництві електроніки та мікромеханіки для створення самовідновлювальних систем?
70. Які перспективи розвитку використання самовідтворюваних інтелектуальних матеріалів і як це може вплинути на наші щоденні життя та технології у майбутньому?
71. Що таке магнітострикційні інтелектуальні матеріали і як вони працюють?
72. Які основні властивості магнітострикційних матеріалів визначають їхню придатність для інтелектуальних застосувань?
73. Які матеріали найчастіше використовуються для створення магнітострикційних інтелектуальних систем?

74. Які можливості надає використання магнітострикційних інтелектуальних матеріалів для актуаторів і сенсорів?
75. Як магнітострикційні матеріали використовуються у виробництві та будівництві?
76. Як відбувається програмування та керування характеристиками магнітострикційних інтелектуальних матеріалів?
77. Як впливають умови навколишнього середовища на роботу магнітострикційних інтелектуальних матеріалів?
78. Які методи контролю і тестування використовуються для оцінки ефективності магнітострикційних інтелектуальних систем?
79. Які переваги та обмеження використання магнітострикційних інтелектуальних матеріалів у порівнянні з іншими технологіями?
80. Які перспективи розвитку магнітострикційних інтелектуальних матеріалів у майбутньому і як вони можуть змінити майбутній підхід до виробництва та споживання матеріалів?
81. Які основні принципи роботи магнітострикційних інтелектуальних матеріалів?
82. Які галузі техніки найчастіше використовують магнітострикційні матеріали?
83. Які переваги магнітострикційних інтелектуальних матеріалів у порівнянні з іншими актуаторами?
84. Як магнітострикційні інтелектуальні матеріали використовуються для створення сенсорів та датчиків?
85. Які можливості надає використання магнітострикційних матеріалів у виробництві робототехніки?
86. Як впливає температура на характеристики магнітострикційних інтелектуальних матеріалів?
87. Як вони можуть бути використані у виробництві автомобілів для покращення роботи гальм та підвіски?
88. Які методи керування характеристиками магнітострикційних матеріалів використовуються для оптимізації їхньої роботи?
89. Як вони можуть бути застосовані у виробництві медичного обладнання та біомедичних пристроїв?
90. Які перспективи розвитку використання магнітострикційних інтелектуальних матеріалів в майбутньому і як це може вплинути на наші технології та щоденне життя?
91. Які основні принципи роботи самозмазуючих інтелектуальних матеріалів?
92. Які переваги надає використання самозмазуючих матеріалів у порівнянні з традиційними мастилами та смазками?
93. Як самозмазуючі інтелектуальні матеріали можуть бути використані для зменшення тертя та зносу в механічних системах?
94. Як вони впливають на тривалість та надійність роботи механізмів та пристроїв?

95. Які матеріали найчастіше використовуються для створення самозмазуючих інтелектуальних систем?
96. Як виробництво самозмазуючих матеріалів відрізняється від традиційних підходів до виготовлення матеріалів?
97. Які фактори можуть впливати на ефективність самозмазуючих інтелектуальних матеріалів у різних умовах експлуатації?
98. Як вони можуть бути використані у виробництві автомобілів та інших транспортних засобів?
99. Які перспективи розвитку самозмазуючих інтелектуальних матеріалів у майбутньому та як вони можуть вплинути на різні галузі промисловості?
100. Як використання самозмазуючих інтелектуальних матеріалів може сприяти зменшенню екологічного впливу та збільшенню сталості виробничих процесів?
101. Як самозмазуючі інтелектуальні матеріали сприяють зменшенню тертя та зносу в механічних системах?
102. Які конкретні вироби та пристрої можуть бути поліпшені за допомогою використання самозмазуючих матеріалів?
103. Як вони можуть бути використані для підвищення ефективності механізмів у різних галузях, таких як автомобільна промисловість або аерокосмічна?
104. Які переваги має використання самозмазуючих матеріалів у порівнянні з традиційними методами змащення, такими як мастила чи силіконові герметики?
105. Як вони можуть бути застосовані у виробництві підшипників та інших деталей машин та обладнання?
106. Як використання самозмазуючих інтелектуальних матеріалів впливає на довговічність та надійність технічних систем?
107. Які методи виробництва і застосування дозволяють досягти оптимального ефекту використання самозмазуючих матеріалів?
108. Як вони можуть бути використані для покращення роботи електронних пристроїв та механізмів з малою тертям?
109. Які вимоги ставляться до виробів, виготовлених із самозмазуючих матеріалів, з точки зору безпеки та експлуатаційних характеристик?
110. Як використання самозмазуючих інтелектуальних матеріалів може змінити підходи до технічного обслуговування та ремонту машин і пристроїв у майбутньому?
111. Які приклади інтелектуальних структур можна знайти в природі?
112. Які принципи побудови і функціонування природних інтелектуальних структур можна використовувати у технологічних рішеннях та інженерії?
113. Як використання природних інтелектуальних структур може вплинути на розвиток біоінспірованих технологій та робототехніки?
114. Наведіть приклади впровадження в інженерні розробки природних інтелектуальних структур?

5 Основи мікромеханики композитів

5.1 Вступ до мікромеханики композитів.

При проектуванні прийнято розглядати не самі конструкції, а їх розрахункові схеми, які є спрощеними моделями реальних конструкцій з відомими теоретичними рішеннями.

Для вибору вірної розрахункової схеми реальної конструкції необхідно добре уявити призначення кожного силового елемента, характер його навантаження і особливості роботи усєї конструкції в цілому.

Перш за все відбувається схематизація за геометричними розмірами та формою силового елемента конструкції, тобто представлення силових елементів у вигляді простих по формі тіл (стрижень, балка, пластина, панель, оболонка), для яких відомі принципи та методи розрахунків в опорі матеріалів та будівельній механіці.

Стрижень – це повздовжній елемент конструкції, який працює на розтягнення-стискання. Один геометричний параметри якого значно більший за два інші. Прикладами застосування стрижневої моделі в конструкції ЛА можуть бути різні стойки, елементи фермових конструкцій, стрингери підкріплених відсіків.

Балкою – це елемент конструкції, який працює на згинання від дії поперечних сил. Прикладами є подовжені елементи кріплення приладів. Крило в цілому може розглядатися як консольна балка.

Панель – це плоска або вигнута пластина, яка сприймає нормальні та дотичні напруження. Панель зазвичай підкріплюється повздовжнім та(або) поперечними силовими наборами. Плоскі та слабовигнуті панелі широко застосовуються при аналізі конструктивних елементів крил, для аналізу роботи обшивки в підкріплених баках і сухих відсіках, в елементах конструкції корпусу КЛА.

Оболонка – найбільш складний елемент, який сприймає усі види навантажень. Відрізняють циліндричні, сферичні, торові та конічні оболонки, непідкріплені та підкріплені. Розрахункові моделі оболонок використовуються про розрахунках паливних баків, сухих відсіків, балонів високого тиску, корпусів КЛА, корпусів РДТП тощо.

Наступний етап вибору розрахункової схеми полягає в аналізі навантаження елемента конструкції. Зовнішні навантаження, які діють на конструкцію також представляють у спрощеному, зручному для розрахунків вигляді. Розділяють поверхневі та масові, розподілені та зосереджені, статичні та динамічні сили. Розподілені навантаження як правило представляють рівномірними або лінійними.

Важливою складовою розрахункової моделі є схема з'єднання елемента, що розглядається, з іншими конструктивними елементами, які заважають переміщенню його під дією навантажень. Використовуються жорстке залаштування, шарнірне спірання, пружно податливе з'єднання тощо.

При виборі розрахункової схеми поряд з переліченим необхідно враховувати властивості матеріалу, з якого виготовлені елементи конструкції. Основне припущення при схематизації властивостей матеріалу полягає в тому, що він приймається суцільним. Для розрахунків напружень і деформацій в елементах конструкції необхідно мати залежності між напруженнями та деформаціями (закон Гука або закон пластичного деформування). Матеріал може бути ізотропний або анізотропний. Метали та їх сплави – ізотропні матеріали; Композиційні матеріали з направленим армуванням – ортогонально-анізотропні.

Таким чином, при виборі розрахункової схеми необхідно вирішити задачі схематизації:

- геометричних розмірів та форми,
- умов закріплення,
- навантажень,
- властивостей матеріалів.

Процес схематизації реальної конструкції неминуче веде до похибок у розрахунках. Приймаючи припущення та спрощення необхідно чітко уявляти собі, як вони можуть вплинути на результат розрахунку. Необхідно відстежувати те, щоб допущення приймалися лише в запас міцності.



Проектування та розрахунок будь-яких конструкцій ґрунтується на створенні розрахункової моделі. Розрахункова модель – це спрощене уявлення виробу, що проектується або розраховується, в якій враховується вплив зовнішнього світу, геометрична схематизація конструкції і реакція конструкції на зовнішній вплив. Спрощено розрахункова модель представлена на рис.5.1.

Рисунок 5.1 Розрахункова модель конструкції ЛА

Композитні матеріали, це складні структури, які складаються з двох і більше матеріалів з різними фізико-механічними властивостями. Розрахунок та проектування конструкцій із композитних матеріалів вимагає використання фізичних моделей композитів. Побудова цих моделей ґрунтується на експериментальній поведінці композитних матеріалів та мікромеханіці композитів.

5.2 Властивості односпрямованого матеріалу

Найбільш ефективними щодо питомих характеристик композитами є орієнтовані матеріали, утворені з безперервних волокон та полімерної або

металевої матриці. Такі композити мають два рівні неоднорідності: мікронеоднорідності, пов'язаної з наявністю двох фаз (волокон і матриці) і макронеоднорідністю, пов'язаної з наявністю в матеріалі різним чином орієнтованих мікронеоднорідних однонаправлених шарів.

При розрахунку та проектуванні конструкцій зазвичай враховують лише другий рівень неоднорідності матеріалів. Вважається, що складається з сукупності квазіоднорідних елементарних шарів, властивості яких відомі. Визначення цих властивостей є предметом мікромеханіки композитів. Основне завдання полягає у обчисленні ефективних модулів, які визначаються як коефіцієнти, що зв'язують усереднені за обсягом напруги та деформації. Ефективні модулі залежать від форми та розташування волокон та їх об'ємного вмісту у матеріалі.

Розглядаючи односпрямований матеріал (рис. 5.2), то експериментально підтверджуються такі закономірності на прикладі діаграм деформування вуглепластика.

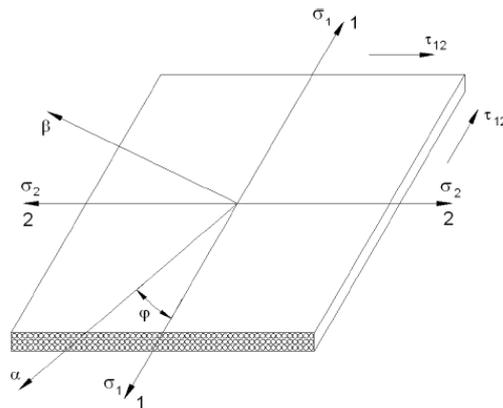


Рисунок 5.2. Зразок односпрямованого композиту:

1-1 напрямок армування; 2-2 напрямок перпендикулярний армуванню

Характерні для КМ діаграми « σ - ϵ » при розтягуванні та при стисканні односпрямованого вуглепластика при навантаженні у площині шару наведені на рис. 5.3 [106]:

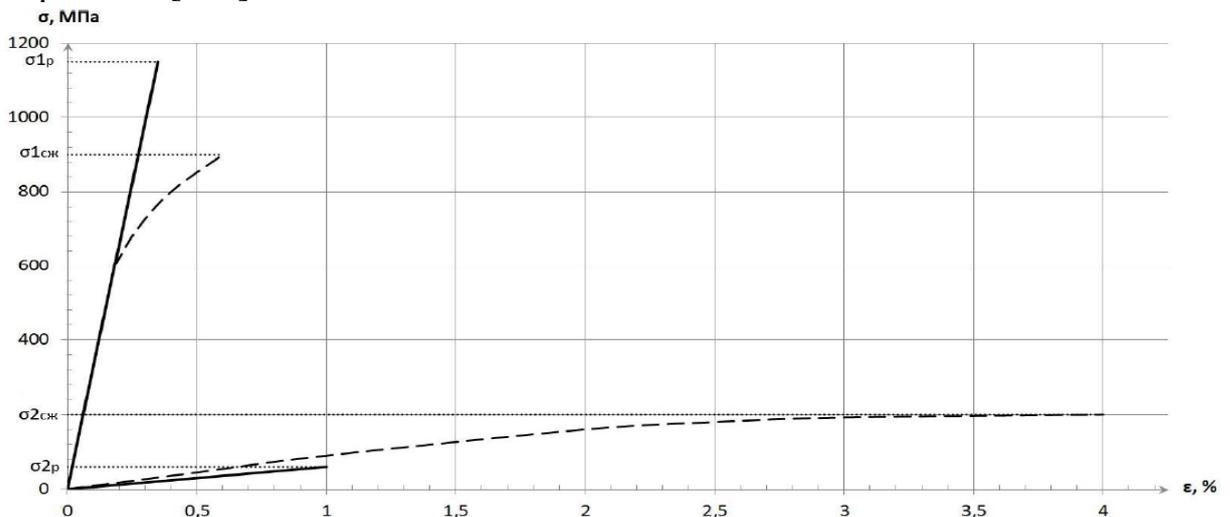


Рисунок 5.3. Діаграми односпрямованого вуглепластика (-розтягування; - - - - стиск.)

Криві деформування (див. рис. 5.3) показують, що:

- при поздовжньому (у напрямку армування) розтягуванні (σ_{1p}) залежність "σ-ε" лінійна до руйнування;
- при поздовжньому стисканні ($\sigma_{1сж}$) крива «σ-ε» має слабку нелінійність;
- при поперечному (перпендикулярному армуванню) розтягуванні (σ_{2p}) залежність "σ-ε" майже лінійна до руйнування;
- при поперечному стисканні ($\sigma_{2сж}$) крива «σ-ε» має деяку нелінійність;
- діаграма «σ-ε» при поздовжньому розтягуванні визначається переважно властивостями волокон, тоді як вид інших діаграм значно залежить від матриці.

Подані закономірності характерні для всіх односпрямованих композитів. Якщо вважати, що на елемент шару діють деякі середні рівномірно розподілені по його боковим граням напруження σ_1 , σ_2 і τ_{12} (рис. 5.2), які викликають відповідні середні відносні деформації ε_1 , ε_2 і γ_{12} , то залежність між напруженнями та деформаціями може бути описана законом Гука у наступному вигляді:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \mu_{12} \frac{\sigma_2}{E_2}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} - \mu_{21} \frac{\sigma_1}{E_1}, \quad \gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}}. \quad (5.1)$$

Тут E_1, E_2 – ефективні модулі пружності шару вздовж і поперек волокон; G_{12} – модуль зсуву у площині шару; μ_{12}, μ_{21} – коефіцієнти Пуассона, що характеризують зміну розміру по осі 1 або 2 при дії розтягування вздовж осі 2 або 1. Матеріал з такою формою запису фізичних рівнянь називається ортотропним. Для ізотропного матеріалу властивості у всіх напрямках однакові: $E_1 = E_2 = E$, $\mu_{12} = \mu_{21} = \mu$, $G_{12} = \frac{E}{2(1+\mu)}$. У представлених рівняннях закону Гука входять п'ять величин $E_1, E_2, \mu_{12}, \mu_{21}, G_{12}$. Однак через симетрію властивостей $E_1 * \mu_{12} = E_2 * \mu_{21}$ незалежними пружними константами шару матеріалу є: E_1, E_2, G_{12} и μ_{21} .

Завдання мікромеханіки полягає в тому, щоб пов'язати ці властивості з властивостями волокон та матриці композиту.

5.3 Найпростіша модель композиту

Основною характеристикою односпрямованого композиту є відносний об'ємний вміст волокон або коефіцієнт армування ν . Об'єм композитного матеріалу V_K складається з суми об'ємів волокон V_B і матриці V_M : $V_K = V_B + V_M$, тоді коефіцієнт армування визначиться: $\nu = V_B / V_K$. Якщо W_B, W_M, ρ_B і ρ_M – відповідно ваги та щільності волокна та сполучного(матриці), то щільність композиту ρ_K визначиться:

$$W_K = W_B + W_M, \quad W_K = \rho_K * V_K = \rho_B * V_B + \rho_M * V_M, \quad \rho_K = \rho_B * V_B / V_K + \rho_M * V_M / V_K.$$

$$\rho_K = \rho_B * \nu + \rho_M * (1 - \nu). \quad (5.2)$$

Найпростіша модель односпрямованого композиту, яка не враховує форму волокон, будується на підставі таких припущень:

- волокна композиту мають постійні властивості, діаметр та вони паралельні між собою по всій довжині композиту;
- між волокнами та матрицею існує ідеальне з'єднання;
- деформації, що виникають у волокні, у матриці та в композиті, при розтягуванні-стисканні вздовж волокна, однакові;
- при розтягуванні-стиску поперек волокна деформація композиту дорівнює сумі деформацій волокна і матриці, а напруги в композиті, волокнах і матриці в даному напрямку однакові.

Схема моделі представлена на рис. 5.4.

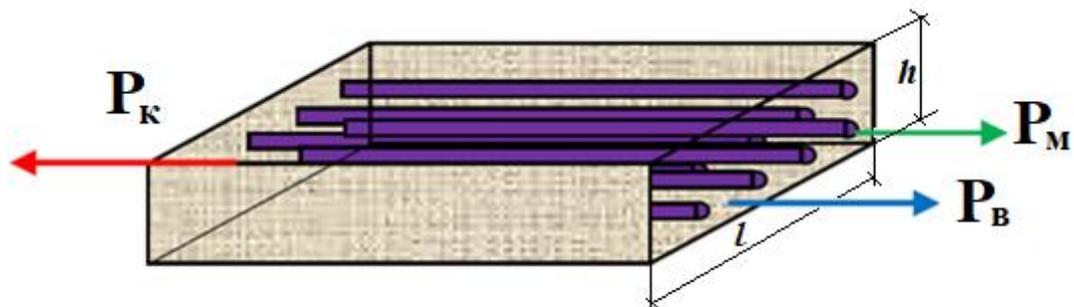


Рисунок 5.4. Схема найпростішої моделі композиту

Рівняння рівноваги при розтягуванні-стиску в односпрямованому композиті: $P_K = P_B + P_M$. У композиті в поперечному перерізі A перпендикулярному волокнам діє рівномірно розподілена за перерізом нормальне напруження σ_K . У волокнах і матриці відповідно виникають напруги σ_B і σ_M . Тоді $\sigma_K * A = \sigma_B * v * A + \sigma_M * (1 - v) * A$. Рівність деформацій матриці, волокон і композиту при розтягуванні-стиску визначає співвідношення: $\epsilon_B = \epsilon_M = \epsilon_K$. Фізичні рівняння матриці, волокна та композиту описуються законом Гука:

$$\sigma_K = E_1 * \epsilon_K ; \sigma_B = E_B * \epsilon_B ; \sigma_M = E_M * \epsilon_M , \quad (5.3)$$

тут E_1, E_B, E_M – ефективний модуль пружності композиту вздовж волокон, модулі пружності волокон та матриці. Після підстановки та спрощень ефективний модуль односпрямованого композиту вздовж волокон визначається через модулі пружності волокон та матриці та коефіцієнт армування:

$$E_1 = E_B * v + E_M * (1 - v). \quad (5.4)$$

Оскільки $E_B \gg E_M$, то $E_1 \approx E_B * v$, тобто поздовжній модуль пружності визначається модулем пружності волокон та їх відносним вмістом у матеріалі.

При навантаженні односпрямованого композиту впоперек волокон деформація композиту ΔL_K дорівнює сумі деформацій які зазнають волокна ΔL_B і матриця ΔL_M : $\Delta L_K = \Delta L_B + \Delta L_M$. При цьому напруження в цьому напрямку в композиті σ_K , у волокнах σ_B і матриці σ_M рівні між собою: $\sigma_K = \sigma_M = \sigma_B$. Якщо визначити лінійний розмір, який займає волокно у поперечному перерізі площею $A = h * l$ у вигляді: $l_B = (A * v) / h$, тоді лінійний розмір, який займає

матриця у поперечному перерізі, запишеться: $l_M = (A^*(1-\nu))/h$. Відносні деформації волокна, матриці та композиту пов'язані з абсолютними деформаціями: $\Delta l_B = \varepsilon_B * l_B$, $\Delta l_M = \varepsilon_M * l_M$ и $\Delta l_K = \varepsilon_K * l$.

Відносна деформація в поперечному напрямку пов'язана з напруженням законом Гука: $\sigma_2 = E_2 * \varepsilon_K$, тут E_2 – ефективний модуль пружності композиту впоперек волокон, а $\varepsilon_K = \varepsilon_2$. Спростимо залежність: $\varepsilon_K * l = \varepsilon_B * l_B + \varepsilon_M * l_M$; $\varepsilon_2 = \varepsilon_B * \nu + \varepsilon_M * (1 - \nu)$. Враховуючи залежності (5.3) та рівність напружень $\sigma_K = \sigma_M = \sigma_B$, отримуємо: $\varepsilon_2 = \sigma_2 * (\nu/E_B + (1 - \nu)/E_M)$. Порівнюючи цю формулу з другим співвідношенням (3.1) при $\mu_{21} = 0$, знаходимо:

$$\frac{1}{E_2} = \frac{\nu}{E_B} + \frac{1-\nu}{E_M}. \quad (5.5)$$

Оскільки $E_B \gg E_M$, то першим доданком в (5.5) можна знехтувати. Поперечний модуль пружності композиту більше за модуль пружності матриці $E_2 \approx E_M / (1 - \nu)$. Залежність аналогічна (5.5) може бути отримана для середнього модуля зсуву:

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{\nu}{G_B} + \frac{1-\nu}{G_M}, \quad (5.6)$$

де G_B , G_M – модулі зсуву волокон і матриці. Повний аналіз моделі з урахуванням коефіцієнтів Пуассона μ_B , μ_M волокон і матриці дозволяє визначити пружні характеристики односпрямованого композиту. Ефективні модулі пружності односпрямованого композиту та коефіцієнта Пуассона залежностей (5.1) визначаються за такими співвідношеннями:

$$E_1 = E_B * \nu + E_M * (1 - \nu),$$

$$\frac{1}{E_2} = \frac{\nu}{E_B} + \frac{1-\nu}{E_M} + \frac{(\mu_B * \nu + \mu_M * (1 - \nu))^2}{E_B * \nu + E_M * (1 - \nu)},$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{\nu}{G_B} + \frac{1-\nu}{G_M}, \quad \mu_{12} = \mu_B * \nu + \mu_M * (1 - \nu),$$

де μ_{12} визначається з умови симетрії $E_1 * \mu_{12} = E_2 * \mu_{21}$. Якщо у відносних деформаціях врахувати коефіцієнти лінійного розширення ізотропних волокон і матриці α_B , α_M , то коефіцієнти лінійного розширення композиту вздовж волокон α_1 і поперек волокон α_2 визначаються за співвідношенням:

$$\alpha_1 = \frac{E_B * \alpha_B * \nu + E_M * \alpha_M * (1 - \nu)}{E_B * \nu + E_M * (1 - \nu)},$$

$$\alpha_2 = \alpha_B * (1 + \mu_B) * \nu + \alpha_M * (1 + \mu_M) * (1 - \nu) -$$

$$- [\mu_B * \nu + \mu_M * (1 - \nu)] * \frac{E_B * \alpha_B * \nu + E_M * \alpha_M * (1 - \nu)}{E_B * \nu + E_M * (1 - \nu)}.$$

Розглянуто найпростішу модель односпрямованого композиту. До теперішнього часу розроблено велику кількість мікромоделей, наприклад, у більш складних моделях враховують форму волокон, а в сучасних Computer Adding Engenering (CAE) системах існують спеціальні модулі проектування властивостей матеріалу (Material Design). Практично всі теорії задовільно узгоджуються між собою та з експериментом тільки щодо поздовжнього модуля пружності E1. Щодо модулів E2 та G12 результати відрізняються на 15-20%. Це з тим, що структура реального матеріалу відрізняється від ідеалізованої. Наприклад, наявність пір в матриці практично не впливає на модуль E1 але значно впливає на E2 що призводить до зниження поперечної жорсткості на 50%.

У зв'язку з цим представлені співвідношення застосовують для орієнтовних оцінок у завданнях проектування конструкцій з композиційних матеріалів. Завжди у завданнях проектування та розрахунку констукцій із композиційних матеріалів використовують експериментальну оцінку фізико-механічних властивостей композиту. Пружні постійні та межі міцності композиту знаходяться при відповідних випробуваннях плоского, кільцевого або трубчастого зразка з поздовжнім або поперечним укладанням волокон, виготовленого тим же технологічним методом, яким виготовлятиметься конструкція. Розглянемо приклади реалізації знаходження фізико-механічних властивостей композиту за допомогою програми MaterialDesigner CAE Ansys.

5.4 Визначення фізико-механічних властивостей композиту за допомогою MaterialDesigner CAE Ansys

Приклад реалізації визначення фізико-механічних властивостей односпрямованого композиту за допомогою додатка **MaterialDesigner** представлений на рис.5.5 – 5.7. Процедура розрахунку ортотропних властивостей має такий алгоритм:

- визначається фізико-механічні властивості наповнювача та матриці композиту. Як наповнення використано вуглеволокно Cabon Fiber (230GPa), а матриці епоксидна смола Resin Epoxy. Характеристики матеріалів взяті з бази даних матеріалів програми Engineering Data Sources. Вуглеволокно задано ортотропними властивостями, а епоксидна смола ізотропними. Ця операція представлена на рис. 5.

- вибір у MaterialDesigner моделі композиту. Система дозволяє моделювати різноманітні композити: односпрямовані «UD Composite», тканинні «Woven Composite», з випадково армованими волокнами «Random UD Composite», з коротко амірованими волокнами «Short Fiber Composite», пухирчасті «Particle», випадково-бульбашкові «Random Particle» та спеціальні RVE «User Defined». На рис. 6 представлений послідовний вибір моделі односпрямованого композиту, матеріалу матриці та наповнювача, структури, що визначає геометрію моделі, відсоток армування та діаметр волокна.

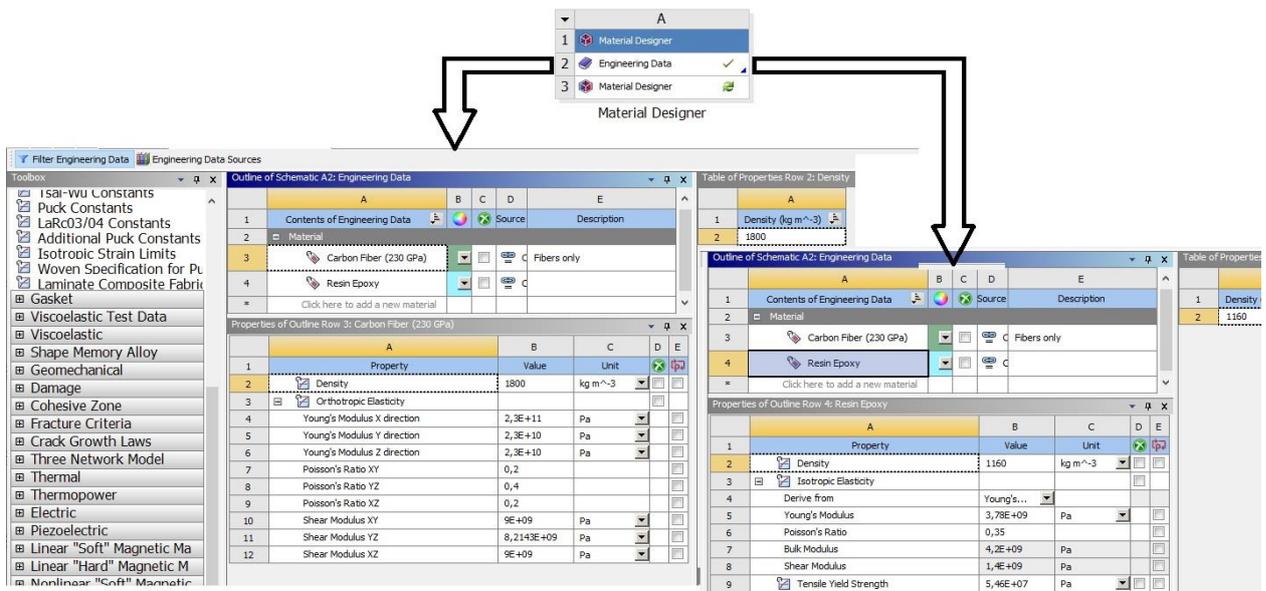


Рисунок 5.5. Операція визначення фізико-механічних властивостей наповнювача та сполучного односпрямованого композиту

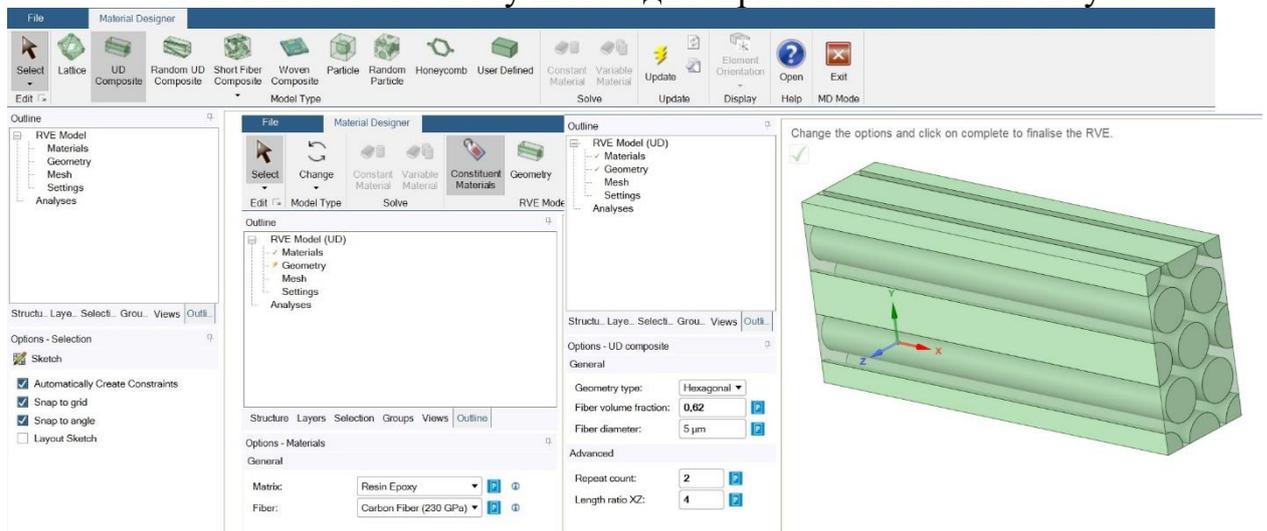


Рисунок 5.6 Вибір параметрів моделі односпрямованого композиту

- виконання процедури визначення властивостей композиту. Вона складається з послідовної підготовки параметрів для кінцево-елементної розбивки моделі, розбивка на кінцеві елементи (операція "Mesh"), встановлення граничних умов "Setting", вибору моделі подання фізико-механічних властивостей композиту, назва матеріалу та розрахунок його характеристик. На рис. 5.7 представлені послідовно перелічені операції для односпрямованого композита.

Розрахунок фізико-механічних властивостей односпрямованого композиту виконаний для діаметра волокна в 5μм, відсоток армування 62%, обрані симетричні граничні умови, одержувані властивості представлені ортотропною моделлю, назва композиту прийнята «UD-Carbon». Система дозволяє визначати властивості композиту за ортотропною моделлю поведінки матеріалу. В результаті розрахунку виводиться значення

ефективного модуля вздовж волокон E_1 , поперек волокон E_2, E_3 , модулі зсуву G_{12}, G_{13}, G_{23} , відповідні коефіцієнти Пуассона $\mu_{12}, \mu_{13}, \mu_{23}$ і щільність ρ_k . Цифрам 1, 2, 3 відповідає напрямок осей OX, OY та OZ моделі.

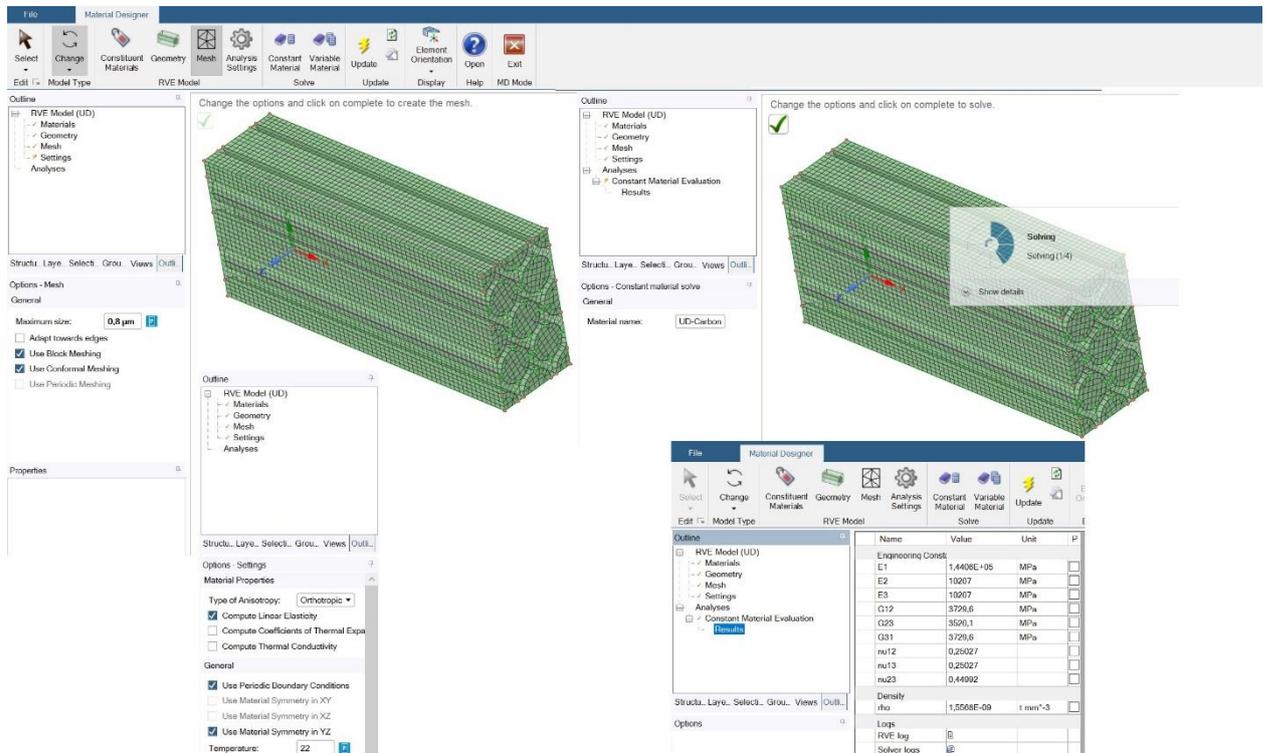


Рисунок 5.7 Процедура визначення ортотропних властивостей композиту

Подібна процедура виконується для будь-якого виду композиту за допомогою використання моделі користувача «User Defined». На рис. 5.8-5.11 представлено процедуру визначення ортотропних властивостей тканинного композиту саржевого плетіння.

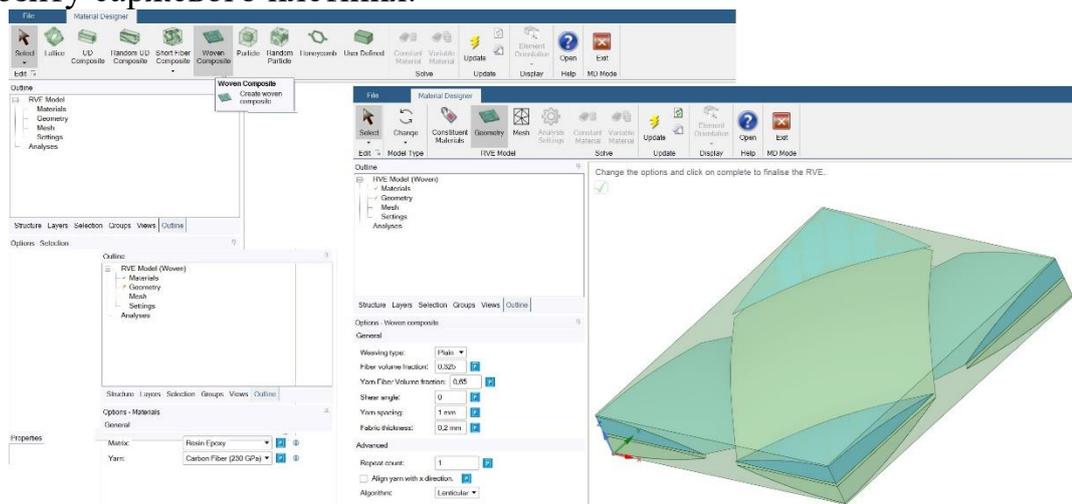


Рисунок 5.8. Завдання матеріалів та структури саржевого плетіння RVE моделі

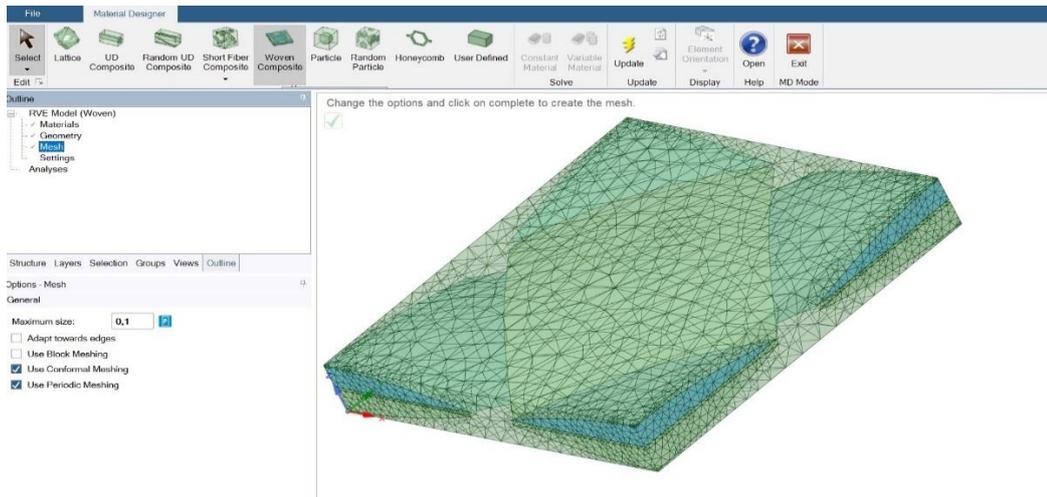


Рисунок 5.9 Побудова кінцево-елементної сітки RVE моделі

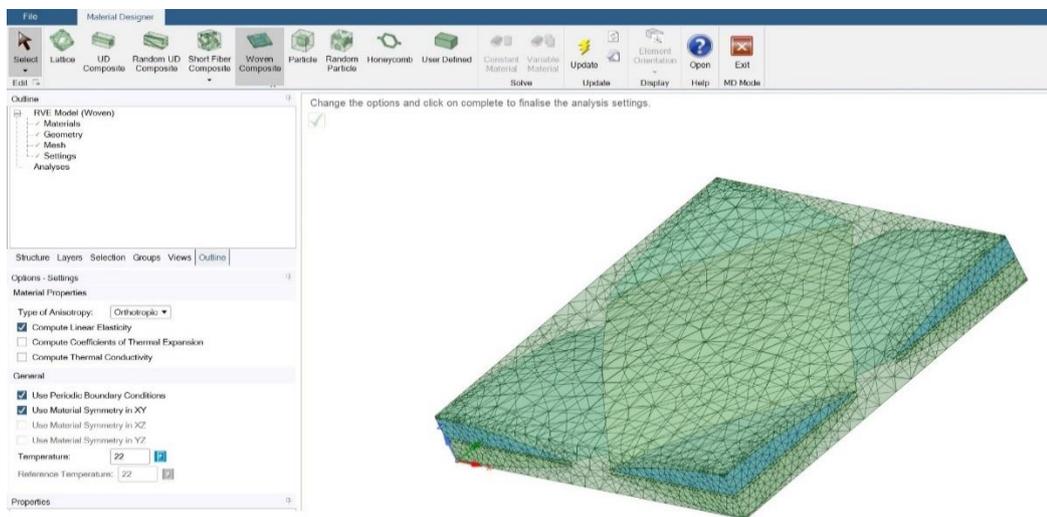


Рисунок 5.10 Завдання граничних умов RVE моделі

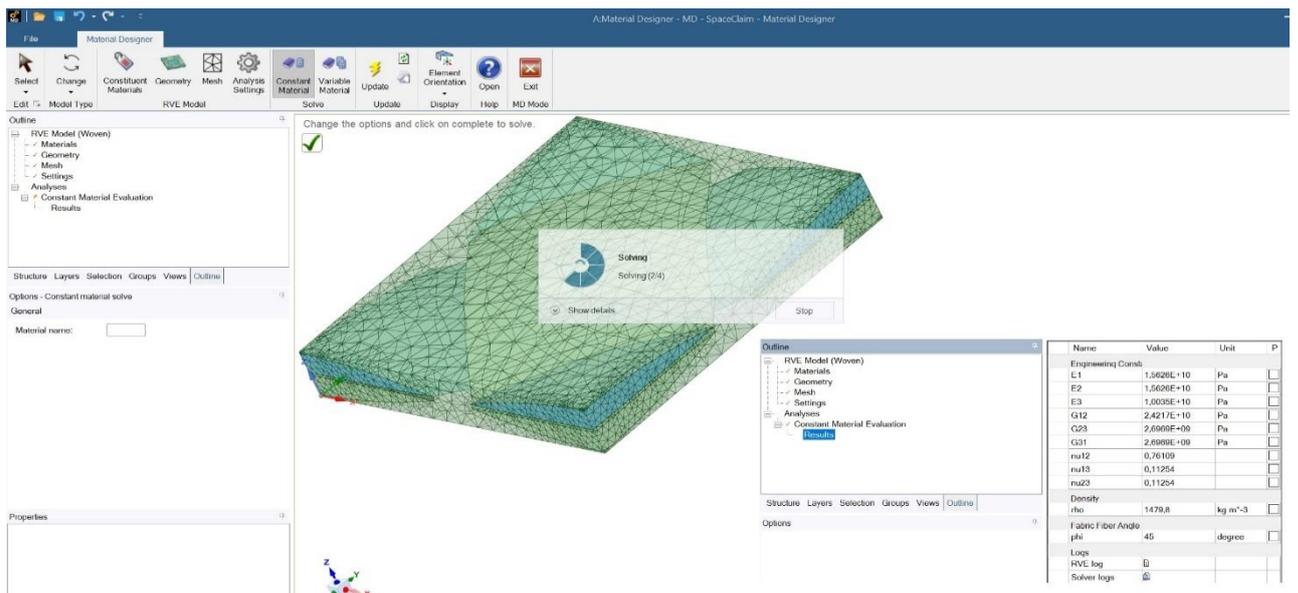


Рисунок 5.11 Розрахунок та визначення ортотропних властивостей тканевого композиту саржевого плетіння

5.5 Фізико-механічні характеристики односпрямованого композиту для визначення міцності матеріалу

Оцінка міцності односпрямованого композиту заснована на даних про п'ять найпростіших напружених станів: розтягання-стискання вздовж волокон, розтягання-стискання уперек волокон і зсуву в площині армування. На рис. 5.12 представлені ці напружені стани.

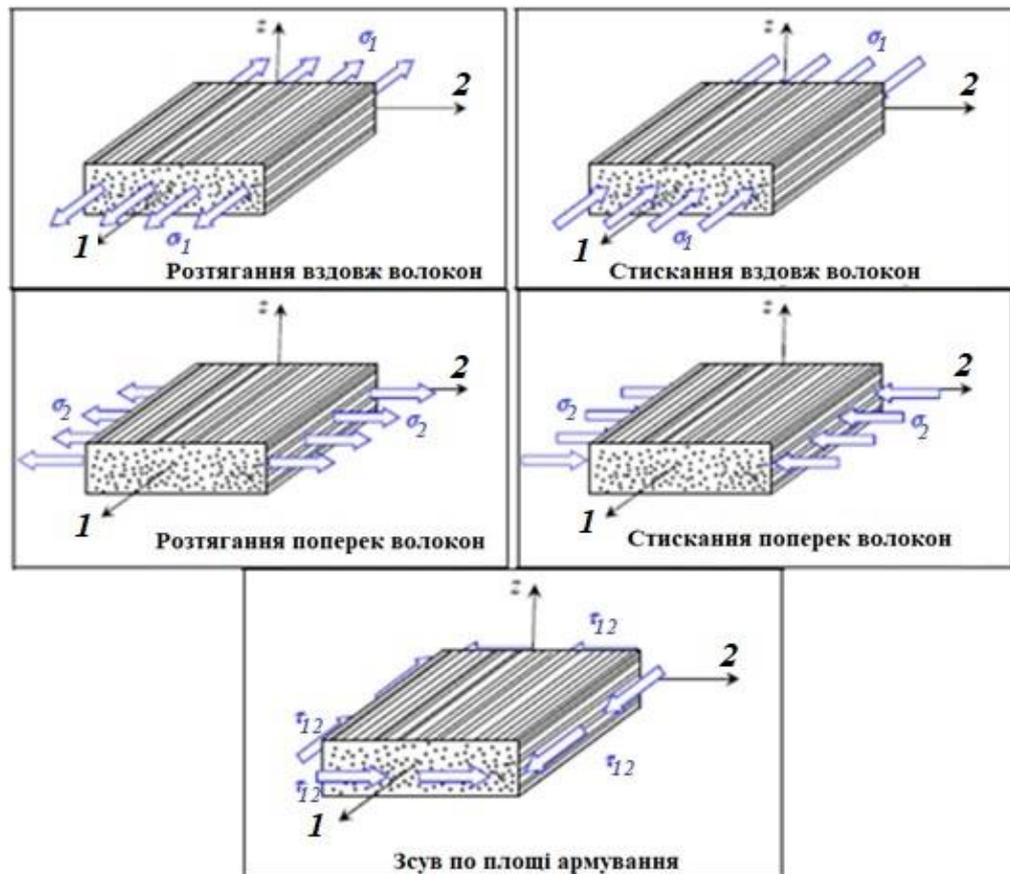


Рисунок 5.12 П'ять найпростіших напружених станів односпрямованого композиту

Типова діаграма деформування представлена на рисунку 5.3. Як видно з рисунка, що властивості односпрямованого композиту при розтягуванні та стисканні різні. Для кожного виду напружено-деформованого стану досліджуваного односпрямованого композиту експериментально визначаються максимальні напруження, при яких відбувається його руйнування. Ці напруження є основними параметрами, за якими оцінюється міцність композитної конструкції. Позначимо їх відповідно:

- σ_1^p – межа міцності вздовж волокон при розтягуванні;
- σ_1^c – межа міцності вздовж волокон при стисканні;
- σ_2^p – межа міцності уперек волокон при розтягуванні;
- σ_2^c – межа міцності уперек волокон при стисканні;
- τ_{12}^f – межа міцності на зсув у площині армування.

Крім механічних характеристик також експериментально визначаються модулі пружності вздовж волокон E_1 і поперек волокон E_2 , модуль зсуву і коефіцієнти Пуассона. Перелічені напруження застосовують з метою оцінки працездатності композитної конструкції. Композитні конструкції найчастіше є «сендвіч» (багатошарові конструкції), що складається з шарів орієнтованого композиту. Кожен шар має відому орієнтацію волокон і товщину. Наприклад, якщо композит має товщину 1,5 мм і десять шарів з товщиною шару 0,15 мм, то на рисунку 5.13 представлено 4 випадкові варіанти шарової структури композиту. Для варіанта а) всі шари мають кут армування $\theta = 0^\circ$ вони утворюють один стек. Композит варіанта б) складається з трьох стеків. Зовнішні стеки містять два шари з кутом армування $\theta_i = 90^\circ$, а середній стек 6 шарів з кутом армування $\theta_i = 0^\circ$. Композит варіанта в) складається з 5 стеків. Середній стек має 6 шарів з кутом армування $\theta_i = 0^\circ$, а зовнішні з кутами армування $+45^\circ, -45^\circ$ і мають по одному шару. Композит варіанта г) складається з 7 стеків. Середній стек має 4 шари з кутом армування $\theta_i = 0^\circ$, а зовнішні з кутами армування, $+45^\circ, -45^\circ, 90^\circ$ мають по одному шару. Представлені випадково вибрані структури композиту завтовшки 1,5 мм за рахунок зміни орієнтації стеків односпрямованого композиту та їх кількості дозволяють створювати композити з різними властивостями.

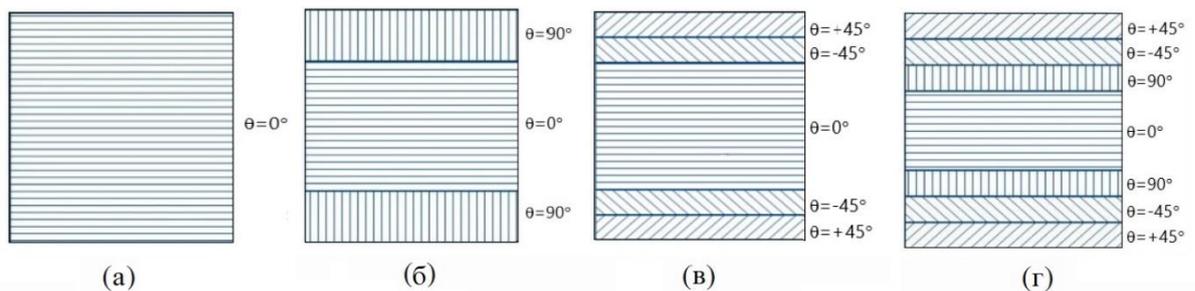


Рисунок 5.13 Чотири види структури композиту із кутами орієнтації армування шару θ_i .

Для ілюстрації відмінностей фізико-механічних властивостей розглянутих структур використовуємо властивості вуглепластику T300/914 [107]. Він має такі характеристики: $\sigma_1^p = 1500$ МПа, $\sigma_2^c = -1400$ МПа, $\sigma_t^p = 50$ МПа, $\sigma_2^c = -200$ МПа, $\tau_{12}^f = 75$ МПа, $E_1 = 181$ GPa, $E_2 = 10,3$ GPa, $G_{12} = 7,17$ GPa, $\mu_{12} = 0,28$. Зміна товщини кожного шару дозволяє додатково керувати фізико-механічними властивостями композиту. На рисунку 13 представлено розподіл відносних товщин шарів за наступною закономірністю:

- варіант а) : $\delta_{\theta=0} = 1,0$

- варіант б) $\delta_{\theta=90} : \delta_{\theta=0} : \delta_{\theta=90} = 0,25:0,5:0,25$;

- варіант в) $\delta_{\theta=+45} : \delta_{\theta=-45} : \delta_{\theta=0} : \delta_{\theta=-45} : \delta_{\theta=+45} = 0,25:0,5:0,25$

- варіант г) $\delta_{\theta=+45}:\delta_{\theta=-45}:\delta_{\theta=90}:\delta_{\theta=0}:\delta_{\theta=90}:\delta_{\theta=-45}:\delta_{\theta=+45}=0,1:0,1:0,1:0,4:0,1:0,1:0,1$.

Графічно розходження властивостей розглянутих структур композитів можна показати на рисунках 5.14-5.17. Дане графічне представлення отримано за допомогою модуля ACP пакета ANSYS.

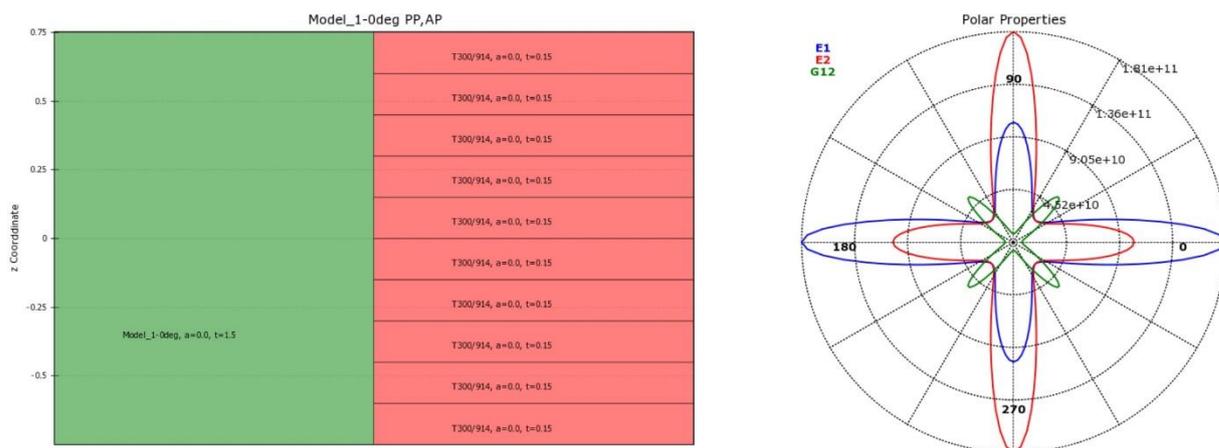


Рисунок 5.14. Структура та властивості моделі а) односпрямованого композиту Т300/914

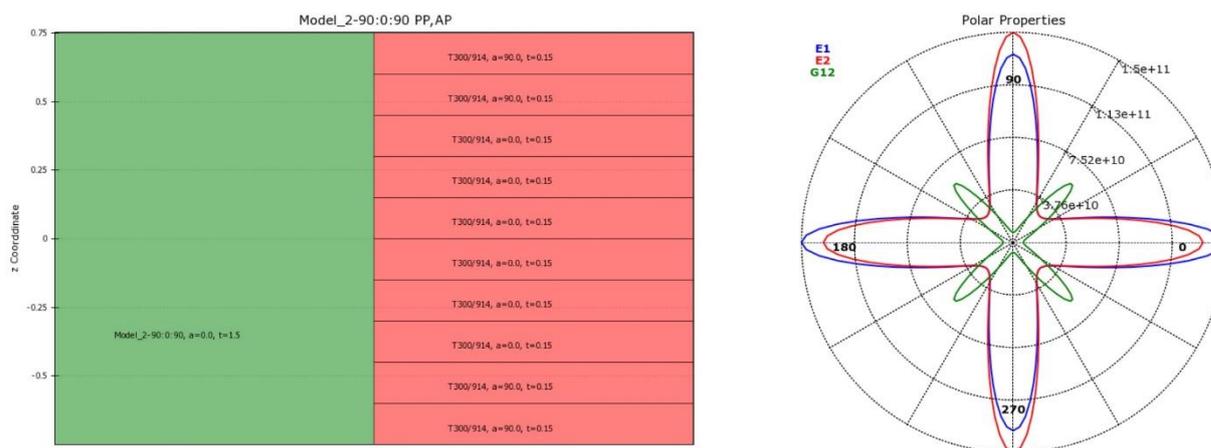


Рисунок 5.15 Структура та властивості моделі б) односпрямованого композиту Т300/914

В інженерних методиках розрахунку на міцність виконується визначення середніх за товщиною напружень і деформацій, викликаних діючими навантаженнями. За значеннями цих напружень та деформацій за допомогою формул перетворення визначають значення робочих напружень та деформацій у кожному шарі у напрямку осей ортотропії властивостей односпрямованого композиту. Порівнюючи отримані напруги та деформації з допустимими у кожному шарі роблять оцінку міцності композиту у кожному шарі.

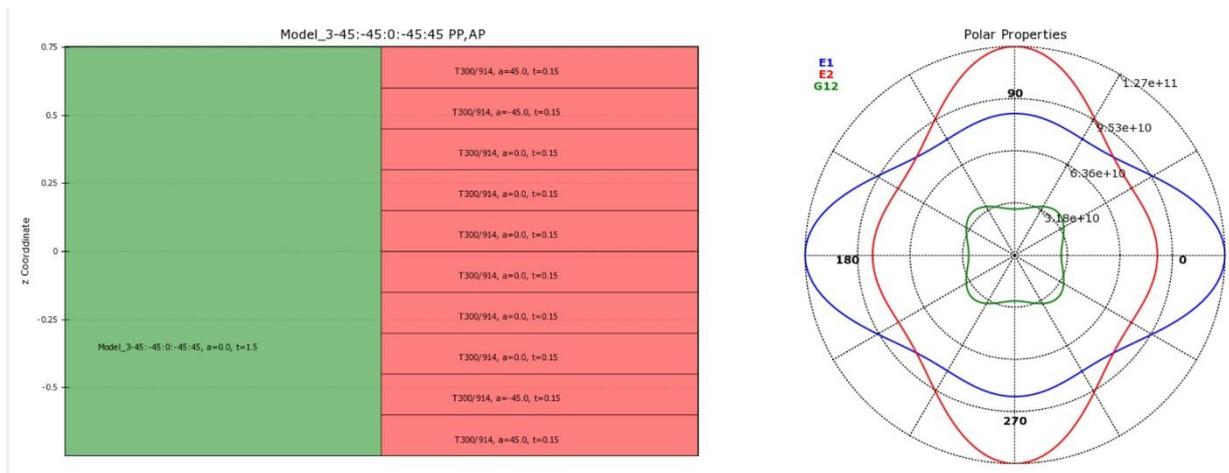


Рисунок 5.16 Структура та властивості моделі в) односпрямованого композиту T300/914

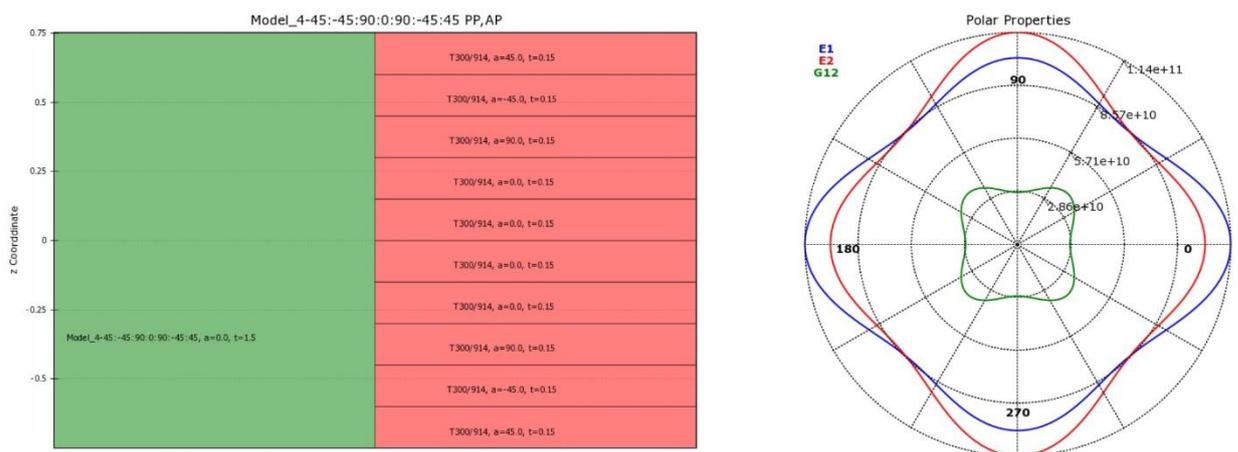


Рисунок 5.17 Структура та властивості моделі г) односпрямованого композиту T300/914

Для оцінки міцності використовують теорії міцності. Розглянемо поетапне перетворення робочих середніх напружень і деформацій у напруження та деформації шару композиту, а потім оцінку працездатності композиту за теоріями міцності.

5.6. Зв'язок робочих напружень композита з напруженнями шарів вздовж та поперек волокон

Розглянемо композиційний матеріал, що складається з “n” шарів односпрямованого композиту, кожен з яких має свою орієнтацію наповнювача (рис. 5.18).

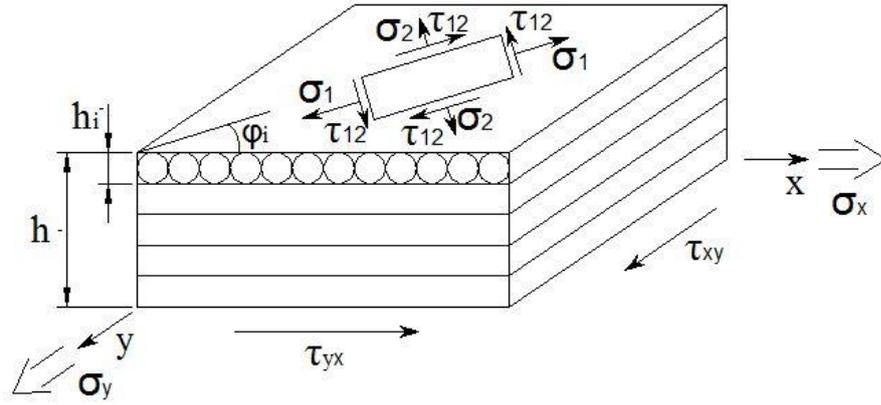


Рисунок 5.18 Схема багатошарового композитного матеріалу

Визначимо зв'язок напружень і деформацій, що виникають у даному композиті, якщо відомо по кожному шару нормальні та дотичні напруги вздовж і поперек волокон та орієнтація волокна φ_i , $\sigma_1^i, \sigma_2^i, \tau_{12}^i, \varphi_i, h_i, h$. Очевидно, середнє напруження, яке сприймає композит у напрямку осі “x” та “y” складається із суми напружень у цих напрямках від кожного шару. Ця закономірність визначається з рівняння рівноваги для одиничного паралелепіпеда заввишки h .

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x h = \sum_{i=1}^n h_i \sigma_x^i \\ \sigma_y h = \sum_{i=1}^n h_i \sigma_y^i \\ \tau_{xy} h = \sum_{i=1}^n h_i \tau_{xy}^i \end{array} \right. ; \quad \text{при } \bar{h}_i = \frac{h_i}{h} : \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = \sum_{i=1}^n \bar{h}_i \sigma_x^i \\ \sigma_y = \sum_{i=1}^n \bar{h}_i \sigma_y^i \\ \tau_{xy} = \sum_{i=1}^n \bar{h}_i \tau_{xy}^i \end{array} \right.$$

$$\sigma = f(\varepsilon) \quad \sigma = \left\{ \sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy} \right\}^T \quad \varepsilon = \left\{ \varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy} \right\}^T .$$

Визначимо для кожного i -го шару величину робочих напружень $\sigma_x^i, \sigma_y^i, \tau_{xy}^i$ через напруження, що діють в односпрямованому композиті, якщо в кожному шарі відома орієнтація волокна φ_i . Для цього скористаємося принципом суперпозиції, представленим на рисунку 5.19 та отримаємо ці залежності:

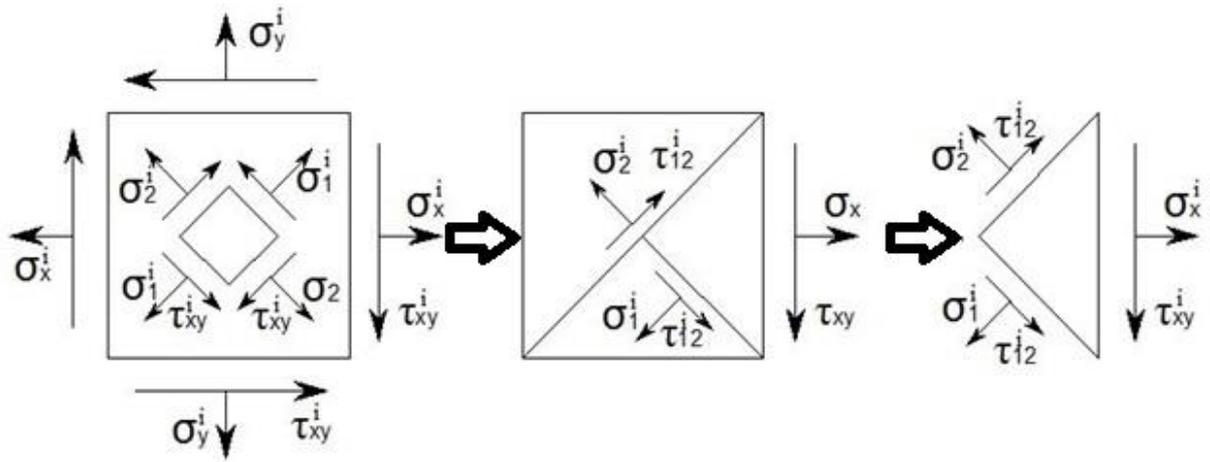


Рисунок 5.19. Геометричне подання принципу суперпозиції

$$\begin{cases} \sigma_x^i = \sigma_1^i \cos^2 \varphi_i + \sigma_2^i \sin^2 \varphi_i + \tau_{12}^i \sin 2\varphi_i \\ \sigma_y^i = \sigma_1^i \sin^2 \varphi_i + \sigma_2^i \cos^2 \varphi_i - \tau_{12}^i \sin 2\varphi_i \\ \tau_{xy}^i = \left(\frac{\sigma_1^i - \sigma_2^i}{2} \right) \sin 2\varphi_i - \tau_{12}^i \cos 2\varphi_i \end{cases} \quad (5.7)$$

Даним співвідношенням відповідають зворотні:

$$\begin{cases} \sigma_1^i = \sigma_x^i \cdot \cos^2 \varphi_i + \sigma_y^i \cdot \sin^2 \varphi_i + \tau_{xy}^i \cdot \sin 2\varphi_i \\ \sigma_2^i = \sigma_x^i \cdot \sin^2 \varphi_i + \sigma_y^i \cdot \cos^2 \varphi_i - \tau_{xy}^i \cdot \sin 2\varphi_i \\ \tau_{12}^i = (\sigma_y^i - \sigma_x^i) \cdot \sin \varphi_i \cdot \cos \varphi_i + \tau_{xy}^i \cdot \cos 2\varphi_i \end{cases} \quad (5.8)$$

Якщо підсумувати всі ці напруження по кожному шару, отримаємо, що робочі нормальні та дотичні напруження, що виникають у композиті, визначаються через напруги в кожному шарі:

$$\begin{cases} \sigma_x = \sum_{i=1}^n \bar{h}_i \left(\sigma_1^i \cos^2 \varphi_i + \sigma_2^i \sin^2 \varphi_i + \tau_{12}^i \sin 2\varphi_i \right) \\ \sigma_y = \sum_{i=1}^n \bar{h}_i \left(\sigma_1^i \sin^2 \varphi_i + \sigma_2^i \cos^2 \varphi_i - \tau_{12}^i \sin 2\varphi_i \right) \\ \tau_{xy} = \sum_{i=1}^n \bar{h}_i \left[\left(\sigma_1^i - \sigma_2^i \right) \sin \varphi_i \cos \varphi_i - \tau_{12}^i \cos 2\varphi_i \right] \end{cases} \quad (5.9)$$

Робочі деформація, що виникають у кожному i -му шарі позначимо через ε_x^i , ε_y^i , γ_{12}^i . Вони дозволять визначити сумарну деформацію композиту за принципом суперпозиції. Відносні деформації у напрямку x , y , z запишуться:

$$\begin{cases} \varepsilon_x^i = \varepsilon_1^i \cos^2 \varphi_i + \varepsilon_2^i \sin^2 \varphi_i + \gamma_{12}^i \sin \varphi_i \cos \varphi_i \\ \varepsilon_y^i = \varepsilon_1^i \sin^2 \varphi_i + \varepsilon_2^i \cos^2 \varphi_i - \gamma_{12}^i \sin \varphi_i \cos \varphi_i \\ \gamma_{xy}^i = (\varepsilon_1^i - \varepsilon_2^i) \sin \varphi_i \cos \varphi_i - \gamma_{12}^i \cos 2\varphi_i \end{cases} \quad (5.10)$$

За даними деформаціям всього композиту визначають деформації, що виникають у кожному і-му шарі вздовж і поперек волокон (1 – вздовж волокон, 2 – поперек волокон):

$$\begin{cases} \varepsilon_1^i = \varepsilon_x \cos^2 \varphi_i + \varepsilon_y \sin^2 \varphi_i + \gamma_{xy} \sin \varphi_i \cos \varphi_i \\ \varepsilon_2^i = \varepsilon_x \sin^2 \varphi_i + \varepsilon_y \cos^2 \varphi_i - \gamma_{xy} \sin \varphi_i \cos \varphi_i \\ \gamma_{12}^i = (\varepsilon_x - \varepsilon_y) \cos 2\varphi_i - \gamma_{xy} \sin 2\varphi_i \end{cases} \quad (5.11)$$

Ці деформації дозволяють кожному і-го шару обчислити робочі напруження, односпрямованого композита:

$$\begin{cases} \sigma_1^i = E_1^{*i} \cdot \varepsilon_1^i - \frac{\mu_{xy}^i}{E_2^{*i}} \cdot \varepsilon_2^i; & \sigma_2^i = E_2^{*i} \cdot \varepsilon_2^i - \frac{\mu_{yx}^i}{E_1^{*i}} \cdot \varepsilon_1^i; \\ \tau_{12}^i = G_{12}^{*i} \cdot \gamma_{12}^i; & E_1^{*i} = \frac{E_1^i}{1 - \mu_{12}^i \cdot \mu_{21}^i}; \quad E_2^{*i} = \frac{E_2^i}{1 - \mu_{12}^i \cdot \mu_{21}^i} \end{cases}$$

У кожному і-му шарі виконуються співвідношення закону Гука:

$$\begin{cases} \varepsilon_1^i = \frac{\sigma_1^i}{E_1^i} - \frac{\mu_{12}^i}{E_2^i} \cdot \sigma_2^i; & \varepsilon_2^i = \frac{\sigma_2^i}{E_2^i} - \frac{\mu_{21}^i}{E_1^i} \cdot \sigma_1^i; \\ \gamma_{12}^i = \frac{\tau_{12}^i}{G_{12}^i}; & E_1^i \cdot \mu_{12}^i = E_2^i \cdot \mu_{21}^i. \end{cases}$$

Знайдені значення робочих напружень і деформацій односпрямованого композиту у кожному шарі дозволяють за відомих гранично допустимих характеристик композиту дати оцінку міцності кожного шару. Для цього використовують теорії міцності. Розглянемо деякі з них.

5.7 Критерії міцності односпрямованого композиту

5.7.1 Теорія максимальних напружень

Перша теорія міцності – **теорія максимальних напружень**. Відповідно до цієї теорії руйнування односпрямованого композиту відбудеться тоді, коли одно з робочих напружень у шарі буде більшою за граничну при розтягуванні, стисканні або зсуві:

$$\begin{cases} \sigma_1^c \leq \sigma_1^i \leq \sigma_1^p \\ \sigma_2^c \leq \sigma_2^i \leq \sigma_2^p \\ |\tau_{12}^i| \leq \tau_{12}^f \end{cases} \quad \begin{cases} \sigma_1^c \leq 0 \\ \sigma_2^c \leq 0 \end{cases},$$

де σ_1^p – межа міцності вздовж волокон при розтягуванні; σ_1^c – межа міцності вздовж волокон при стисканні; σ_2^p – межа міцності поперек волокон при розтягуванні; σ_2^c – межа міцності поперек волокон при стисканні; τ_{12}^f – межа міцності на зсув у площині армування. ; σ_1^i – значення нормального напруження, що виникає в і-му шарі вздовж волокон; σ_2^i – значення нормального напруження, що виникає в і-му шарі поперек волокон; τ_{12}^i – значення дотичного напруження, що виникає в і-му шарі за напрямками вздовж і поперек волокон. Наприклад, на рисунку 5.20 для односпрямованого композиту Т300/914 робоча зона, де виконується умови міцності з теорії максимальних напружень, обмежено блакитним прямокутником.

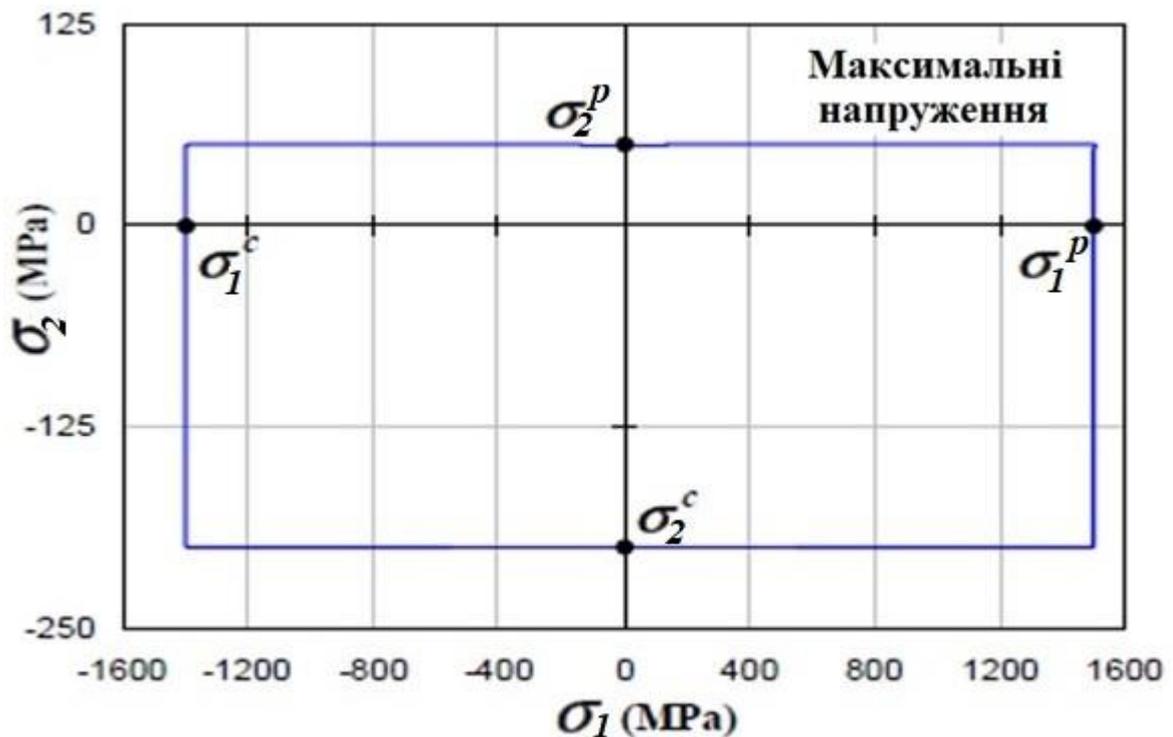
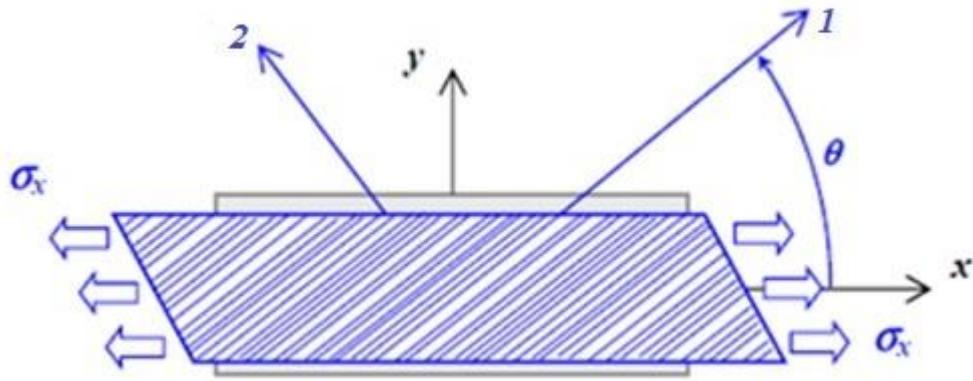


Рисунок 5.20. Зона виконання першої теорії міцності для односпрямованого композиту Т300/914

На рисунку 5.21 розглянемо розтяг одношарового композиту Т300/914 напруженням σ_x , що діє під кутом θ до напрямку армування.



Розтягання під кутом θ до напрямку армування

Рисунок 5.21. Розтягування одношарового композиту Т300/914 напругою σ_x

Тоді умови міцності з урахуванням формул перетворення робочих напружень

(5.8) запишуться:

$$\begin{cases} \sigma_1^c \leq \sigma_1 = \sigma_x \cdot \cos^2 \theta \leq \sigma_1^p \\ \sigma_2^c \leq \sigma_2 = \sigma_x \cdot \sin^2 \theta \leq \sigma_2^p \\ |\tau_{12} = \sigma_x \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta| \leq \tau_{12}^f \end{cases}$$

Межі зон руйнування для цього випадку навантаження представлені на рисунку 5.22. Заштрихована зона показує область працездатності композиту Т300/914.

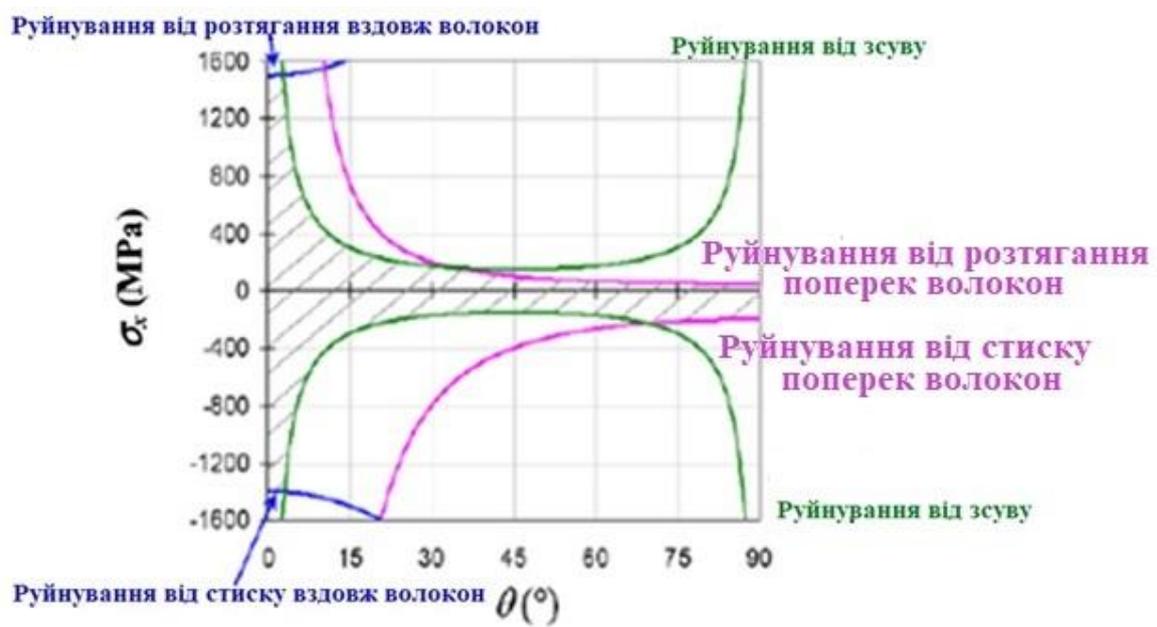


Рисунок 5.22. Межі зон руйнування при розтягуванні одношарового композиту Т300/914 напруженням σ_x за п'ятьма умовами міцності

Розглянемо випадок чистого зсуву одношарового композиту Т300/914 напругою τ_{xy} , що діє під кутом θ до напрямку армування. На рисунку 5.23 представлений цей випадок навантаження.

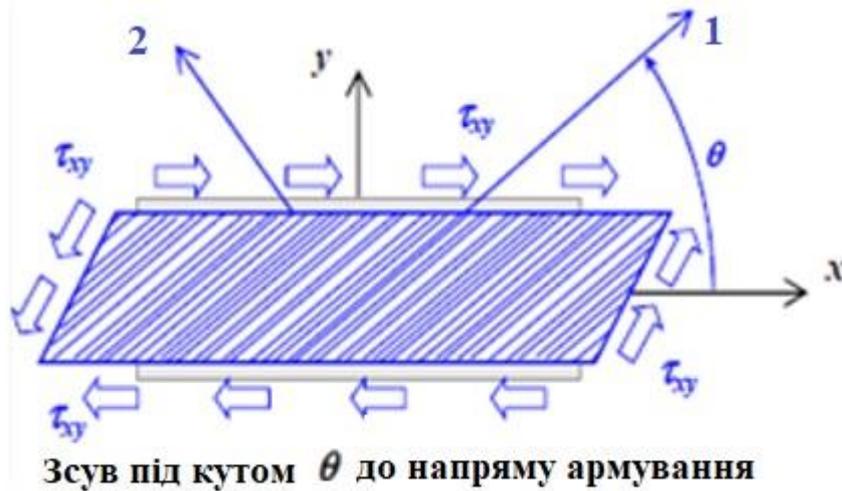


Рисунок 5.23. Зсув одношарового композиту Т300/914 під кутом θ до напрямку армування

Тоді умови міцності з урахуванням формул перетворення робочих напружень (5.8) запишуться:

$$\begin{cases} \sigma_1^c \leq \sigma_1 = 2 \cdot \tau_{xy} \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \leq \sigma_1^p \\ \sigma_2^c \leq \sigma_2 = -2 \cdot \tau_{xy} \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \leq \sigma_2^p \\ |\tau_{12} = \tau_{xy} \cdot (\cos^2\theta - \sin^2\theta)| \leq \tau_{12}^f \end{cases}$$

Межі зон руйнування для даного випадку навантаження представлені на рисунку 5.24. Заштрихована зона показує область працездатності композиту Т300/914.

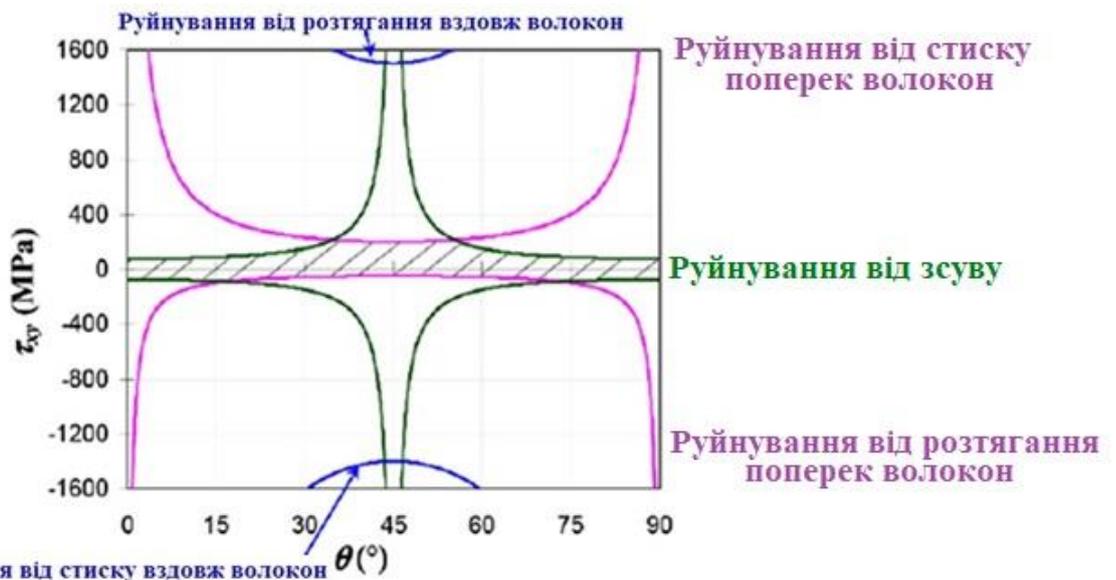


Рисунок 5.24. Межі зон руйнування при зсуві одношарового композиту Т300/914 напруженням τ_{xy} за п'ятьма умовами міцності

Слід зазначити, що чистий зсув з напругою τ_{xy} , що діє під кутом 45° до напрямку армування створює плоский напружений стан з головними напруженнями спрямованими вздовж і поперек волокон. Тому доцільно використовувати пошарове армування із кутами $\pm\theta$. Ця закономірність ілюстрована на рисунку 5.25.

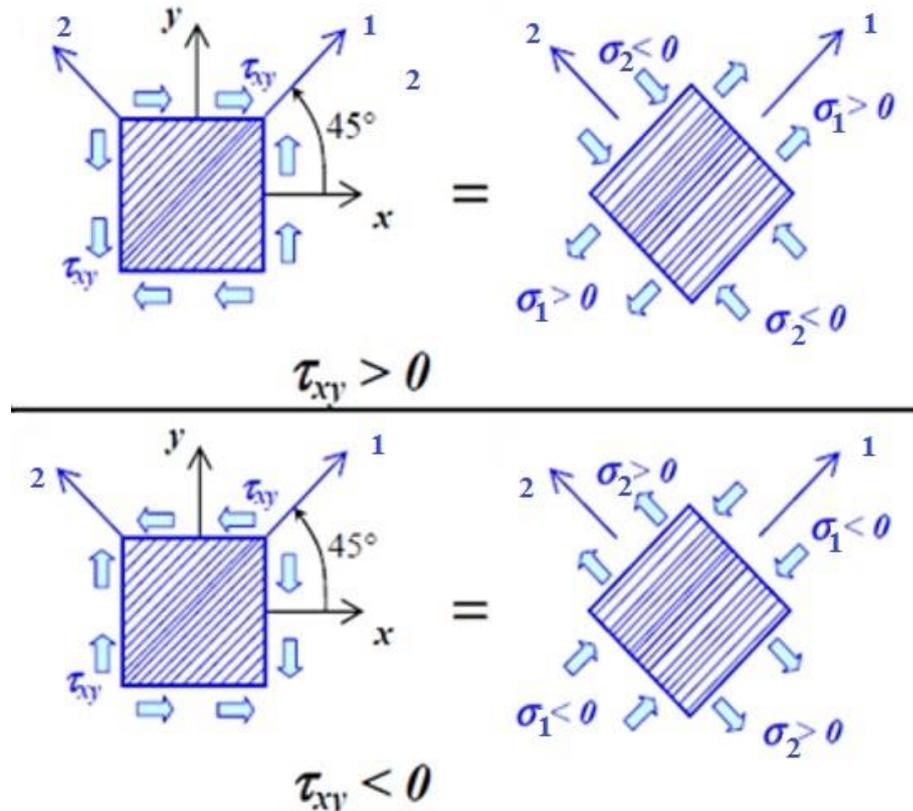


Рисунок 5.25. Створення двовісного напруженого стану композиту при зсуві для кута орієнтації напрямку армування $\pm\theta = 45^\circ$.
Друга теорія міцності – теорія максимальних деформацій.

5.7.2 Теорія максимальних деформацій

Відповідно до цієї теорії руйнування односпрямованого композиту відбудеться якщо одне з робочих відносних подовжень вздовж або поперек волокон у шарі буде більше граничного при розтягуванні, стисканні або зсуві:

$$\begin{cases} \epsilon_1^c \leq \epsilon_1^i \leq \epsilon_1^p \\ \epsilon_2^c \leq \epsilon_2^i \leq \epsilon_2^p \\ |\gamma_{12}^i| \leq \gamma_{12}^f \end{cases} \quad \begin{cases} \epsilon_1^c \leq 0 \\ \epsilon_2^c \leq 0 \end{cases},$$

де ϵ_1^p - граничне відносне подовження вздовж волокон при розтягуванні; ϵ_1^c – граничне відносне подовження вздовж волокон при стисканні; ϵ_2^p – граничне відносне подовження поперек волокон при розтягуванні; ϵ_2^c – граничне відносне подовження поперек волокон при стисканні; γ_{12}^f - граничне відносне кутове зміщення при зсуві в площині армування; ϵ_1^i – значення відносного подовження, що виникає в i -му шарі вздовж волокон; ϵ_2^i –

значення відносного подовження, що виникає в і-му шарі поперек волокон; γ_{12}^i – значення відносної зміни прямого кута, що виникає в і-му шарі між напрямками вздовж і поперек волокон. Граничні відносні деформації пов'язані з граничними напруженнями за різних видів навантаження наступними співвідношеннями:

$$\begin{cases} \varepsilon_1^c = \frac{\sigma_1^c}{E_1}; & \varepsilon_1^p = \frac{\sigma_1^p}{E_1}; \\ \varepsilon_2^c = \frac{\sigma_2^c}{E_2}; & \varepsilon_1^p = \frac{\sigma_1^p}{E_1}; & \gamma_{12}^f = \frac{\tau_{12}^f}{G_{12}}. \end{cases}$$

Ці рівняння можна записати через напруження та коефіцієнт Пуассона:

$$\begin{cases} \sigma_1^c \leq \sigma_1 - \mu_{12} \cdot \sigma_2 \leq \sigma_1^p \\ \sigma_2^c \leq \sigma_2 - \mu_{21} \cdot \sigma_1 \leq \sigma_2^p \\ |\tau_{12}| \leq \tau_{12}^f \end{cases}$$

Слід зазначити, що перше рівняння показує вплив напруження упоперек волокон σ_2 на руйнування волокон, а друге відповідно вплив напруження вздовж волокон σ_1 на руйнування поперек волокон (матриці). Оскільки для односпрямованого композиту існує значна відмінність меж міцності вздовж волокон і поперек волокон, практично використовують перше рівняння міцності цієї теорії. Ця теорія неправильно визначає руйнування односпрямованого композиту поперек волокон та при зсуві. На практиці цією теорією міцності виконують оцінку працездатності волокна: $\varepsilon_1^c \leq \varepsilon_1^i \leq \varepsilon_1^p$. Ця теорія міцності використовується для композитів з плетеними шарами для оцінки міцності у двох напрямках. У цьому випадку кожен шар плетіння складається з волокон спрямованих вздовж і поперек напрямку плетіння, наприклад, сатиновий, саржовий, полотняний, жаккардовий та інші. На рис. 5.9 представлений такий вид плетіння. Умови міцності мають такий вигляд:

$$\begin{cases} \varepsilon_1^c \leq \varepsilon_1^i \leq \varepsilon_1^p \\ \varepsilon_2^c \leq \varepsilon_2^i \leq \varepsilon_2^p \end{cases}$$

Графічно ця умова міцності визначає межі працездатної зони композиту у вигляді паралелограма та представлена на рис. 5.26 для односпрямованого композиту Т300/914.

На рисунку 5.21 розглянуто розтягнення одношарового композиту Т300/914 напруженням σ_x , що діє під кутом до напрямку армування. Це навантаження за теорією максимальних деформацій визначає межі працездатності композиту за такими співвідношеннями:

$$\begin{cases} \sigma_1^c \leq \sigma_x(\cos^2\theta - \sin^2\theta \cdot \mu_{12}) \leq \sigma_1^p \\ \sigma_2^c \leq \sigma_x(\sin^2\theta - \cos^2\theta \cdot \mu_{12}) \leq \sigma_2^p \\ |\tau_{12} = \sigma_x \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta| \leq \tau_{12}^f \end{cases}$$

На рисунку 5.27 представлені межі зон руйнування для цього випадку навантаження за теорією максимальних деформацій. Заштрихована зона показує область працездатності композиту Т300/914.

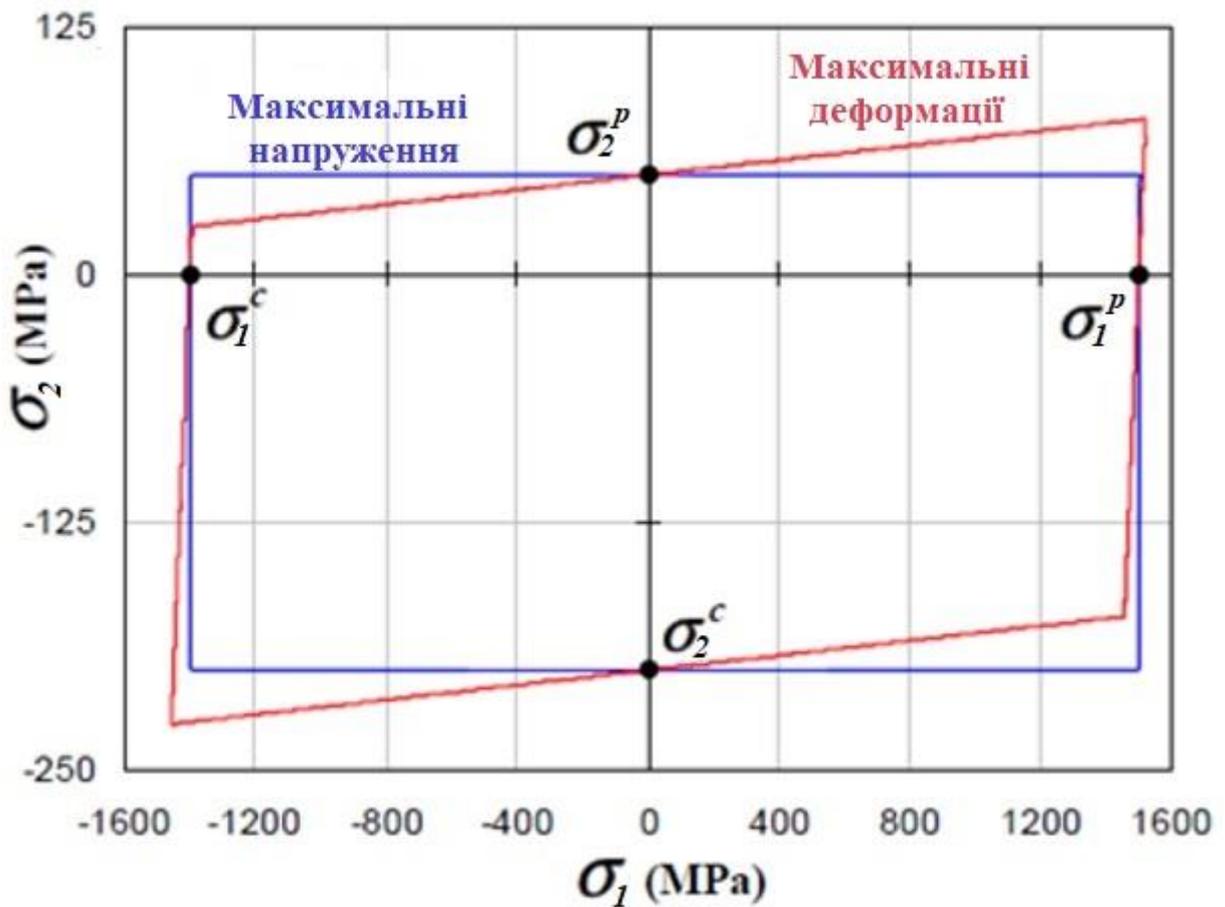


Рисунок 5.26 Зони виконання першої та другої теорій міцності для односпрямованого композиту T300/914

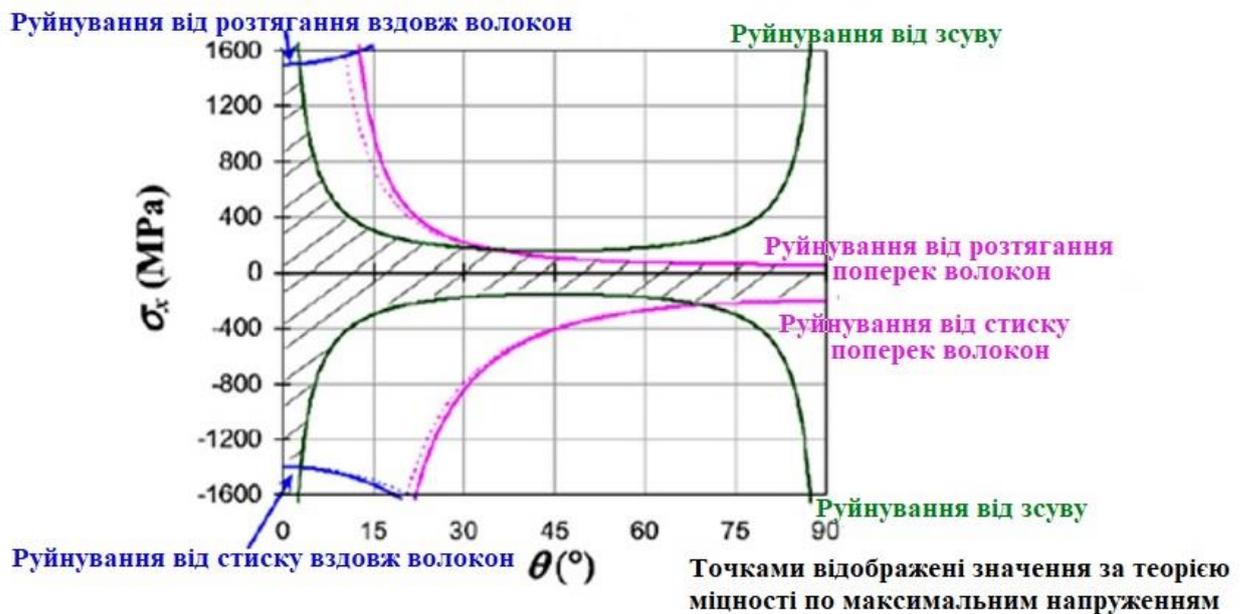


Рисунок 5.27 Межі зон руйнування при розтягуванні одношарового композиту T300/914 напругою σ_x за двома теоріями міцності

Наступні теорії міцності краще описують вплив напружень вздовж волокон і поперек волокон на міцність односпрямованого композиту. До цих

теорій належать теорія Мізеса-Хілла (**Hill's**), **Tsai-Wu**. Розглянемо критерій міцності Мізеса-Хілла.

5.7.3 Теорія міцності Хілла (**Hill's**) [108]

Цей критерій заснований на ідеї Мізеса (Von Mises) про те, що існує така максимальна енергія пружної деформації, при якій відбувається руйнування матеріалу. У разі двовимірного напруженого стану композиту, викликаного напругами для кожного i – шару $\sigma_1^i, \sigma_2^i, \tau_{12}^i$ енергії пружного деформування можна поставити у відповідність таку ж енергію від еквівалентної напруження одновісного пружного навантаження σ_e . Тоді за Мізесом умова міцності запишеться:

$$\sqrt{(\sigma_1^i)^2 + (\sigma_2^i)^2 - \sigma_1^i \cdot \sigma_2^i + 3 \cdot (\tau_{12}^i)^2} \leq \sigma_e$$

Хілл припустився, що подібна гранична поверхня існує і в односпрямованого композиту, яка визначає умови руйнування і може бути представлена у вигляді:

$$A \cdot (\sigma_1^i)^2 + B \cdot (\sigma_2^i)^2 + C \cdot \sigma_1^i \cdot \sigma_2^i + D \cdot (\tau_{12}^i)^2 \leq 1$$

Константи цього рівняння можна визначити за максимальними напруженнями композиту, а саме: σ_1^p – за межею міцності вздовж волокон при розтягуванні; σ_2^c – за межі міцності вздовж волокон при стисканні; σ_2^p – за межі міцності поперек волокон при розтягуванні; σ_2^c – за межі міцності поперек волокон при стисканні; τ_{12}^f – за межі міцності на зсув у площині армування.

Наприклад, при розтягуванні вздовж волокон до руйнування $\sigma_1^i = \sigma_1^p$, а решта напружень дорівнюють нулю, тоді: $A = \frac{1}{(\sigma_1^p)^2}$. У разі розтягування поперек волокон до руйнування $\sigma_2^i = \sigma_2^p$, а решта напружень дорівнюють нулю, тоді: $B = \frac{1}{(\sigma_2^p)^2}$. У разі чистого зсуву волокон до руйнування $\tau_{12}^i = \tau_{12}^f$, а решта напружень дорівнюють нулю, тоді: $D = \frac{1}{(\tau_{12}^f)^2}$. Остання константа C визначається для випадку двовісного напруженого стану під дією напружень $\sigma_1^i = \sigma_2^i$, и $\tau_{12}^i = 0$. Тоді $C = \frac{-1}{(\sigma_1^p)^2}$. У загальному випадку критерій міцності по Хіллу запишеться:

$$\left(\frac{\sigma_1^\pm}{\sigma_1^\pm}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2^\pm}{\sigma_2^\pm}\right)^2 - \frac{\sigma_1^i \cdot \sigma_2^i}{(\sigma_1^\pm)^2} + \left(\frac{\tau_{12}^i}{\tau_{12}^f}\right)^2 \leq 1, \text{ здесь}$$

$$\begin{cases} \sigma_1^\pm = \sigma_1^p & \text{если } \sigma_1^i > 0 \\ \sigma_1^\pm = \sigma_1^c & \text{если } \sigma_1^i < 0 \\ \sigma_2^\pm = \sigma_2^p & \text{если } \sigma_2^i > 0 \\ \sigma_2^\pm = \sigma_2^c & \text{если } \sigma_2^i < 0 \end{cases}$$

Графічне уявлення критерію міцності по Хіллу для одношарового композиту T300/914 представлено на рисунку 5.28. На цьому графіку також зображено

поверхню залежності напружень в односпрямованому композиті для випадку навантаження $\tau_{12}^f / \tau_{12}^c = 0,75$.

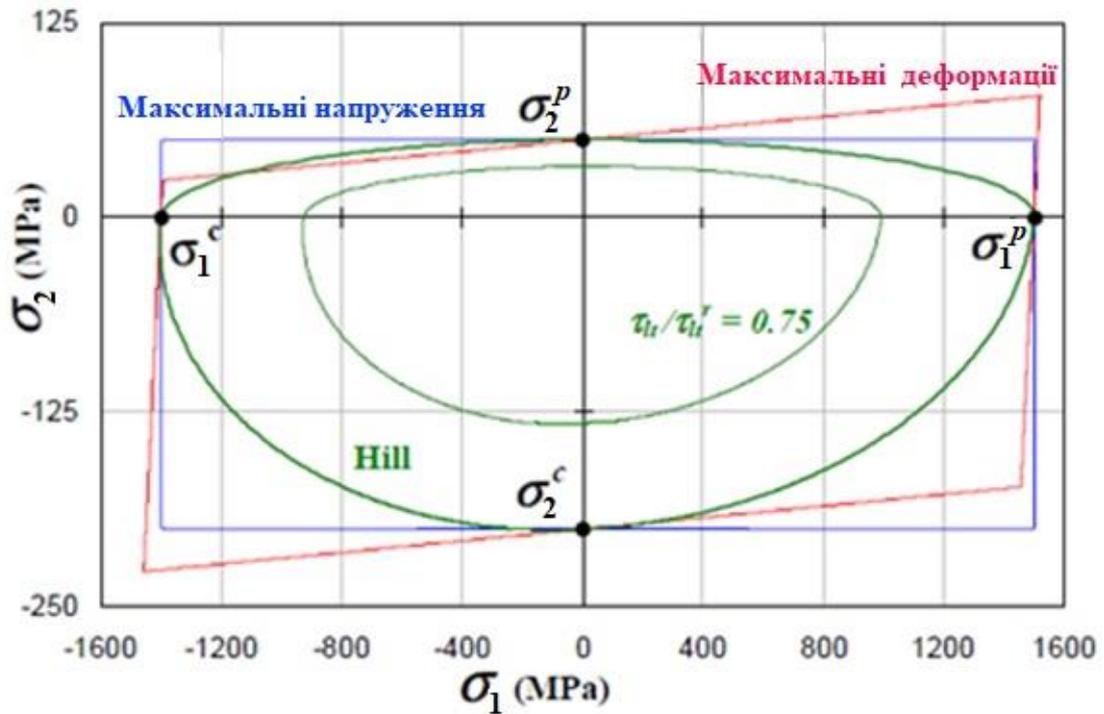


Рисунок 5.28. Графічне подання умов міцності для композиту T300/914 за трьома теоріями міцності

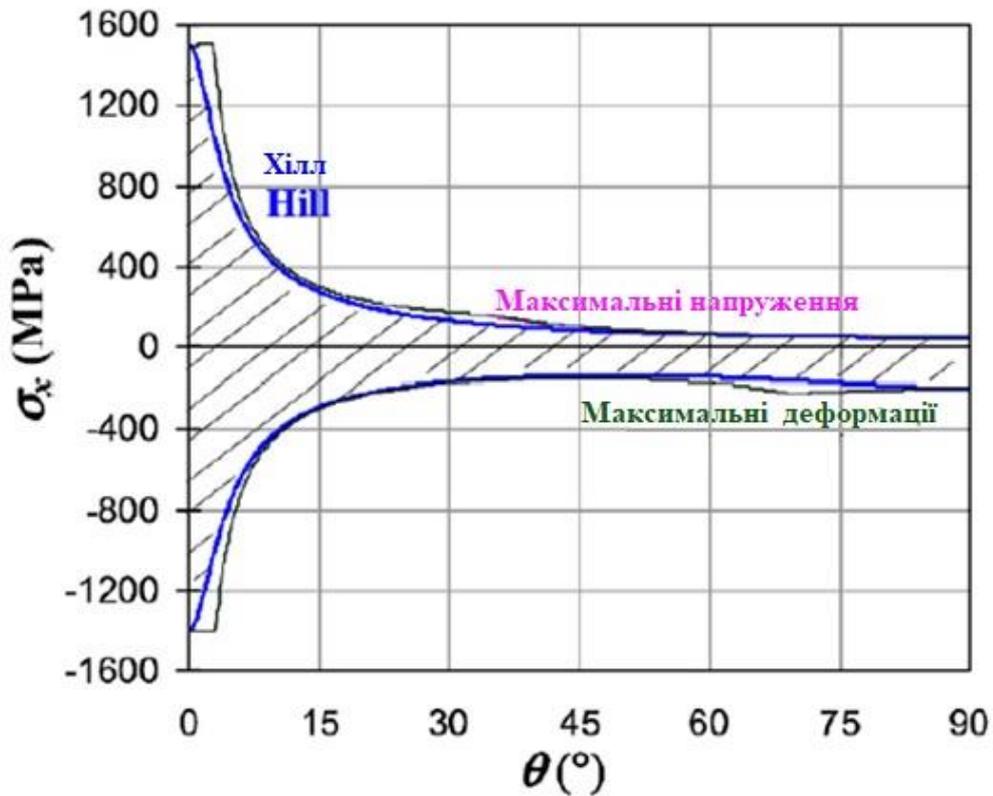


Рисунок 5.29. Межі зон руйнування при розтягуванні одношарового композиту T300/914 напругою σ_x за трьома теоріями міцності

Для розглянутого раніше прикладу розтягування одношарового композиту T300/914 напругою σ_x , що діє під кутом θ до напрямку армування (Рис. 5.21) критерій Хілла запишеться:

$$\sigma_x^2 \cdot \left[\left(\frac{\cos^2 \theta}{\sigma_1^\pm} \right)^2 + \left(\frac{\sin^2 \theta}{\sigma_2^\pm} \right)^2 - \frac{\cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta}{(\sigma_1^\pm)^2} + \left(\frac{\cos \theta \cdot \sin \theta}{\tau_{12}^f} \right)^2 \right] \leq 1.$$

Порівняємо з розглянутими раніше теоріями міцності межі працездатності композиту. На рисунку 5.29 представлені межі зон руйнування при розтягуванні одношарового композиту T300/914 напруженням σ_x за двома теоріями міцності. Заштрихована зона показує область працездатності композиту T300/914.

За допомогою критерію міцності Хілла можна ідентифікувати руйнування, але неможливо розрізнити форми руйнування. Цей критерій застосовується в більшості випадків до композитних оболонок, і найкраще застосовувати його до шаруватих матеріалів, коли сили розтягування та стискування рівні. Основним недоліком критерію є неможливість визначення причини руйнування моношару: відбулося руйнування матриці чи волокна. Це може бути перешкодою при подальшій оцінці міцності композиційного пакета, так як руйнуванням матриці окремого моношару міцність пакета може не вичерпуватися. У програмах, які використовують цей критерій і розрізняють первинне і вторинне руйнування композиційного матеріалу, зазвичай апіорі вважають, що сталося руйнування матриці, і коректують відповідність жорсткість моношару.

Розглянемо критерій міцності **Tsai-Wu**.

5.7.4 Теорія міцності Tsai-Wu [109]

Критерій міцності Tsai-Wu є модифікацією критерію Hill's та феноменологічною матеріальною теорією руйнування, яка широко використовується для анізотропних композиційних матеріалів, що мають різні міцності при розтягуванні та стисканні. Цей критерій не вимагає постійної перевірки знака напруження при розтягуванні та стисканні. Це досягається за рахунок додавання лінійних та квадратичних членів до критерію Хілла, додаючи інформацію про знак напруження. Загалом квадратичний критерій руйнування для плоского напруженого стану має вигляд:

$$F_{11} \cdot (\sigma_1^i)^2 + F_{22} \cdot (\sigma_2^i)^2 + F_{66} \cdot (\tau_{12}^i)^2 + 2 \cdot F_{12} \cdot \sigma_1^i \cdot \sigma_2^i + F_1 \cdot \sigma_1^i + F_2 \cdot \sigma_2^i \leq 1$$

Це рівняння описує у просторі напруження граничну поверхню, вихід за яку означає руйнування шару композиту. Цей критерій у вигляді полінома другого порядку вважається найбільш універсальним і міститься у всіх сучасних розрахункових програмних пакетах. Поліноміальні коефіцієнти у ньому виражаються так:

$$F_{11} = \frac{1}{(\sigma_1^p) \cdot (\sigma_1^c)}, F_{22} = \frac{1}{(\sigma_2^p) \cdot (\sigma_2^c)}, F_{66} = \frac{1}{(\tau_{12}^f)^2}, F_1 = \frac{1}{(\sigma_1^p)} - \frac{1}{(\sigma_1^c)}, F_2 = \frac{1}{(\sigma_2^p)} - \frac{1}{(\sigma_2^c)}$$

Коефіцієнт F_{12} виражає зв'язок властивостей матеріалу в напрямках вздовж і поперек волокон і визначається при випробуванні на двовісне навантаження, для якого одержують межу міцності $\sigma_1^i = \sigma_2^i = P$ (всі інші компоненти тензора напружень дорівнюють нулю), і виражається формулою:

$$F_{12} = \frac{1}{2 \cdot P^2} \left[\mathbf{1} - P \cdot \left(\frac{1}{\sigma_1^p} - \frac{1}{\sigma_1^c} + \frac{1}{\sigma_2^p} - \frac{1}{\sigma_2^c} \right) - P^2 \left(\frac{1}{(\sigma_1^p) \cdot (\sigma_1^c)} + \frac{1}{(\sigma_2^p) \cdot (\sigma_2^c)} \right) \right].$$

Однак двовісне розтягування може бути замінене на одновісне випробування односпрямованих зразків композитів з укладанням волокон ± 45 градусів. Тоді значення компонент становитиме $\sigma_1^i = \sigma_2^i = \tau_{12}^i = V/2$ (решта компонентів тензора напружень дорівнює нулю), де V – межа міцності зразка при розтягуванні:

$$F_{12} = \frac{2}{V^2} \left[\mathbf{1} - \frac{V}{2} \cdot \left(\frac{1}{\sigma_1^p} - \frac{1}{\sigma_1^c} + \frac{1}{\sigma_2^p} - \frac{1}{\sigma_2^c} \right) - \frac{V^2}{4} \cdot \left(\frac{1}{(\sigma_1^p) \cdot (\sigma_1^c)} + \frac{1}{(\sigma_2^p) \cdot (\sigma_2^c)} + \frac{1}{(\tau_{12}^f)^2} \right) \right].$$

Можна виразити коефіцієнт F_{12} також через межу міцності при зсуві (U) при розтягуванні односпрямованого зразка з волокнами, покладеними під кутом 45 градусів: $+\sigma_1^i = -\sigma_2^i = U$ (всі інші компоненти тензора напруження дорівнюють нулю):

$$F_{12} = \frac{1}{2 \cdot U^2} \left[\mathbf{1} - U \cdot \left(\frac{1}{\sigma_1^p} - \frac{1}{\sigma_1^c} - \frac{1}{\sigma_2^p} + \frac{1}{\sigma_2^c} \right) - U^2 \left(\frac{1}{(\sigma_1^p) \cdot (\sigma_1^c)} + \frac{1}{(\sigma_2^p) \cdot (\sigma_2^c)} \right) \right].$$

Як видно з представленого опису критерію, його серйозним недоліком є складне експериментальне визначення коефіцієнта F_{12} . При відсутності даних з двовісних випробувань застосовують апроксимацію $F_{12} = \varphi \cdot \sqrt{F_{11} \cdot F_{22}}$, де коефіцієнт φ підбирають у межах $-1 < \varphi < 1$ або ж приймають рівним $\varphi = -1/2$.

Як видно з представленого опису критерію, його серйозним недоліком є складне експериментальне визначення коефіцієнта F_{12} . При відсутності даних з двовісних випробувань застосовують апроксимацію $F_{12} = \varphi \cdot \sqrt{F_{11} \cdot F_{22}}$, де коефіцієнт φ підбирають у межах $-1 < \varphi < 1$ або приймають рівним $\varphi = -1/2$.

З урахуванням наведених коефіцієнтів граничної поверхні напружень умови міцності за Цая-Ву запишеться:

$$\left(\frac{1}{\sigma_1^p} + \frac{1}{\sigma_1^c} \right) \cdot \sigma_1^i - \frac{(\sigma_1^i)^2}{\sigma_1^i \cdot (\sigma_1^c)} + \left(\frac{1}{\sigma_2^p} + \frac{1}{\sigma_2^c} \right) \cdot \sigma_2^i - \frac{(\sigma_2^i)^2}{(\sigma_2^p) \cdot (\sigma_2^c)} - \frac{\sigma_1^i \cdot \sigma_2^i}{\sqrt{\sigma_1^p \cdot \sigma_1^c \cdot \sigma_2^p \cdot \sigma_2^c}} + \left(\frac{\tau_{12}^i}{\tau_{12}^f} \right)^2 \leq 1$$

Графічно критерій Цая-Ву представляє витягнутий ексцентрично розташований еліпс, представлений на рисунку 5.30.

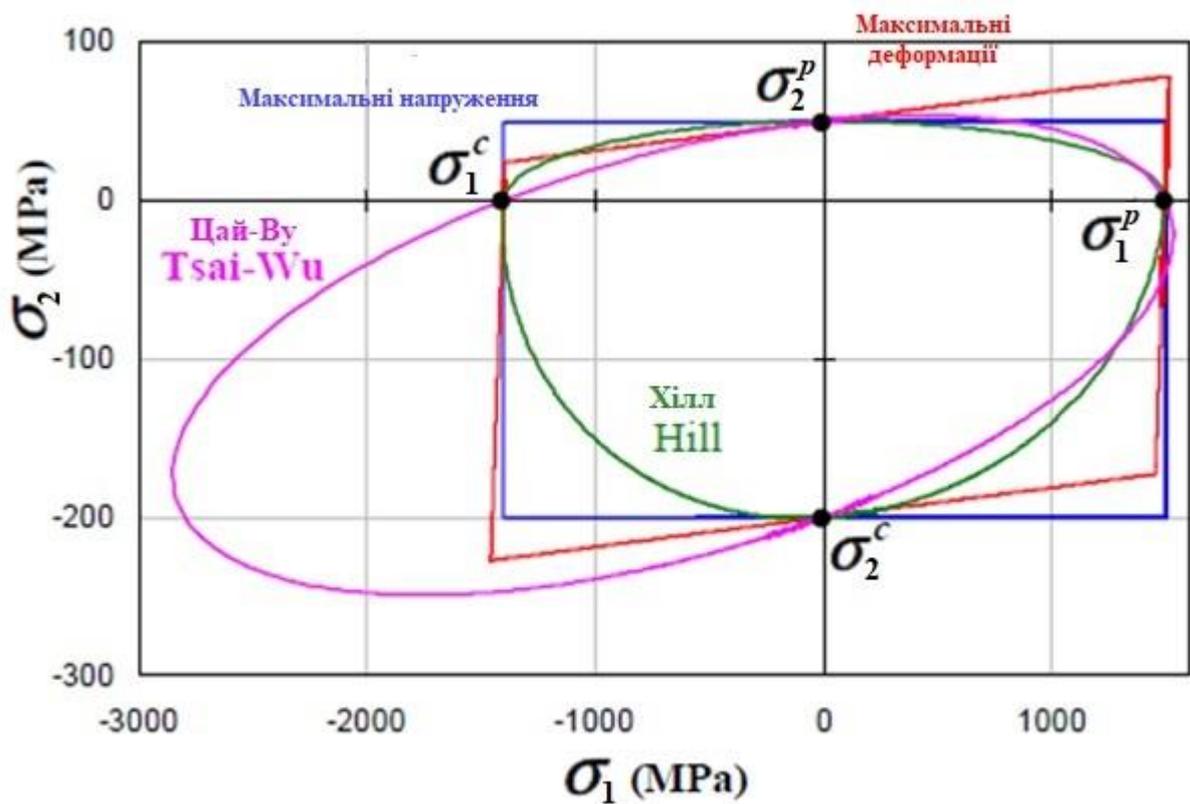


Рисунок 5.30. Графічне подання 4-х теорій міцності

Недоліком цього критерію є те, що він, як і критерій Мізеса-Хілла, не прогнозує різні форми руйнувань, включаючи руйнування волокон і матриці. На рисунку 5.31 представлені межі зон працездатності односпрямованого композиту T300/914, навантаженого напруженням σ_x .

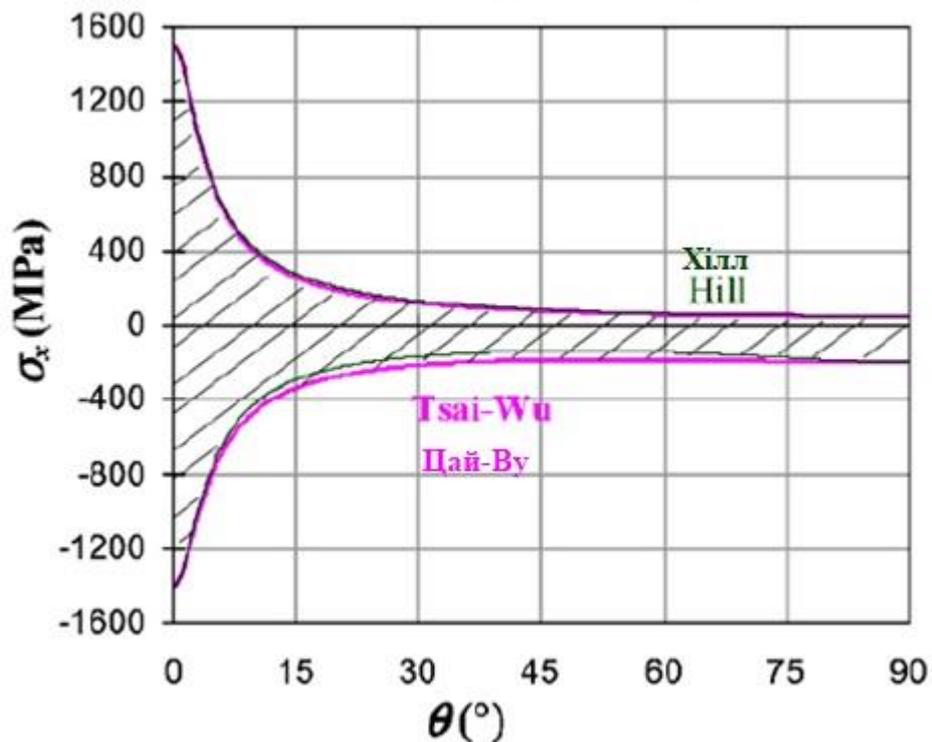


Рисунок 5.31. Порівняння зон міцності за теоріями Цай-Ву та Хілла для односпрямованого композита T300/914 навантаженого напруженням σ_x

Цей критерій краще застосовувати тоді, коли сили розтягування та стискування не рівні. Критерії максимальної напруги Мізеса-Хілла і Цая-Ву не несуть інформацію про те, що сталося в моношарі - зруйнувалася матриця або волокно. Руйнування матриці окремо взятого моношару не завжди веде до вичерпання його несучої здатності, і пакет матеріалу може продовжувати нести навантаження, що зростає. Тому все більшого поширення набувають критерії, у яких окремо аналізуються запаси міцності як матриці, так і волокна, - наприклад, критерії Хашина, Пака і *LaRC*.

Критерій міцності Хашина [110] ідентифікує чотири різні способи руйнування композиційного матеріалу: волокна – при розтягуванні чи стисканні; матриці – при розтягуванні чи стисканні. В рівняннях за критерієм Хашина враховуються міжшарові дотичні напруження, тому потрібно визначити додаткові компоненти тензора дотичних напружень, що ускладнює розрахунок та вимагає проведення додаткових випробувань зразків.

Критерій міцності Пака [111] ідентифікує руйнування волокна та міжволоконну руйнацію в односпрямованому композиційному матеріалі (в основі лежить теорія міцності Мора). Критерій визначає дві різні форми руйнування волокна. Перша є руйнуванням при розтягуванні, друга – руйнуванням при стисканні з перекручуванням. Рівняння критерію Пака враховують тріщиноутворення в матриці. Цей критерій виглядає так само, як і критерій максимальної напруги. Відмінність між ними полягає в тому, що пружні характеристики матриці можуть мати нелінійний характер і деформаційні критерії дають можливість якоюсь мірою врахувати цей фактор.

Критерій міцності LaRC використовують для армованих волокнами композиційних матеріалів [112]. Він ґрунтується на фізичних моделях для кожної форми руйнування. При розгляді стиснення волокон можливий варіант руйнування хвилеподібного перегину волокон при локальній втраті стійкості в одному напрямку.

Слід зазначити, що складно описати одним критерієм руйнування композиту різних видів навантаження.

5.8. Огляд сучасних теорій міцності композитів: WWFE-I, WWFE-II, WWFE-III

Нині немає однозначного визначення універсальної теорії міцності. Тільки експеримент для конкретного виду композиту та заданого виду навантаження дозволяє дати відповідь на питання міцності і жорсткості композитної конструкції. Очевидно, що були необхідні нейтральні, незалежні та міжнародні зусилля для обґрунтування використання критеріїв працездатності для різних композитів з обґрунтуванням надійного моделювання експериментів. Починаючи з 1992 року група вчених Оксфордського університету розпочала серію скоординованих досліджень. Ці дослідження відомі як "*World-Wide Failure Exercise - WWFE-I*".

Першими об'єктами дослідження були односпрямовані композити зі скловолокна та епоксидної смоли. Усі дослідження було проведено у строго контрольованому форматі. На міжнародному конгресі в 2003 році ці результати були представлені оглядовою доповіддю координаторами Hinton M. J., Kaddour A. S. та Soden P. D. [113]. Ускладнення композитів, що створювалися, призвело до продовження досліджень у форматі **WWFE**. Ці дослідження були представлені на чергових міжнародних конгресах у 2012 та 2013 роках і вони отримали назву **WWFE-II**, **WWFE-III** [114-117]. На рисунку 5.32 представлені експериментальні результати з оглядової доповіді **WWFE-I** та порівняння їх з теоріями міцності. У всіх експериментальних дослідженнях формалізація полягала у конкретизації матеріалу композиту із заданими характеристиками та тестовими видами навантаження. Наприклад, на рисунку 5.33 представлені 13 тестових випадків випробувань двошарових та багатошарових односпрямованих композитів із заданою орієнтацією шарів, представлених в огляді **WWFE-III** [118]. Тут тести 1 та 2 проведені для двох шарових односпрямованих композитів, а тести 3-13 для багатошарових композитів.

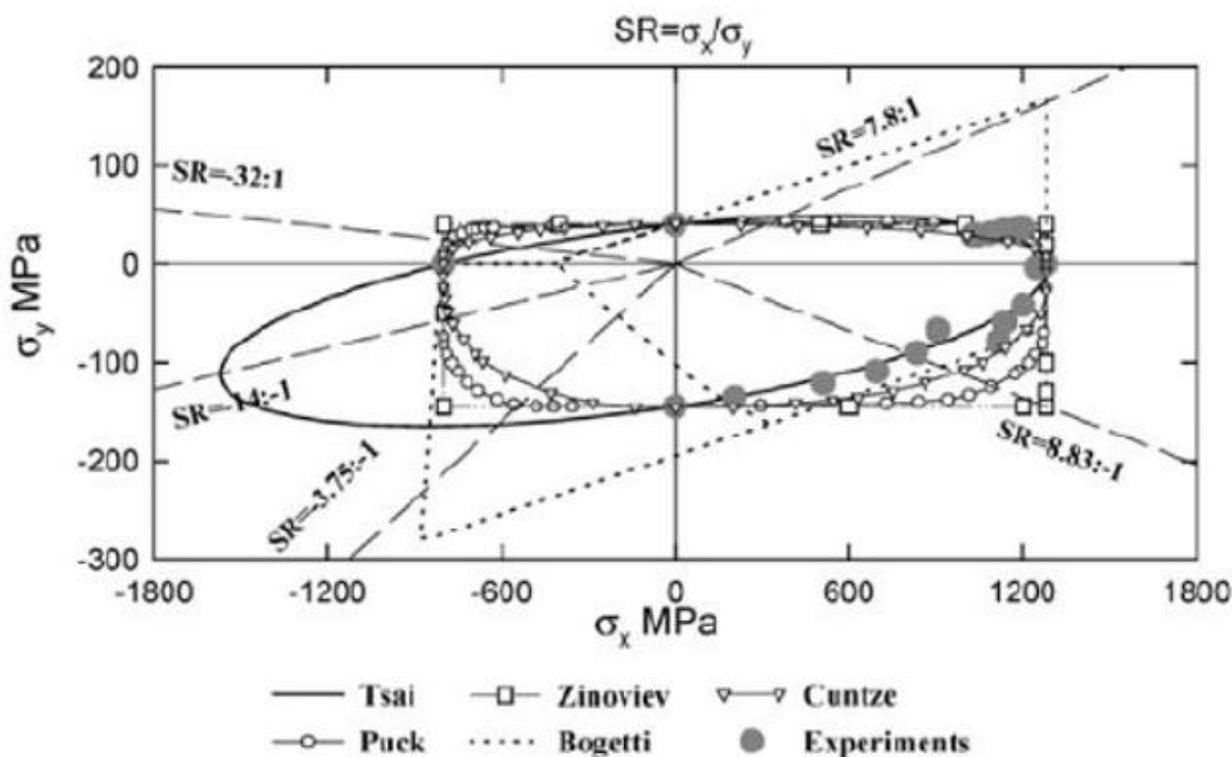


Рисунок 5.32. Порівняння експериментальних результатів з теоріями міцності: Tsai-Wu, Zinoviev, Cuntze, Puck та Bogetti [114]

Вивчення композитів продовжується і в даний час. Зараз основним інструментом проектувальника конструкцій з композитних матеріалів є програмні кінцево-елементні комплекси – **CAE (Computer-aided engineering)**. У цих системах для підготовки усереднених моделей композиційних оболонок та обчислення міцності за шарами, як правило, використовують окремі модулі у складі розрахункового комплексу. Так в CAE-системі ANSYS використовується модулі ACP-POST і ACP-PRE.

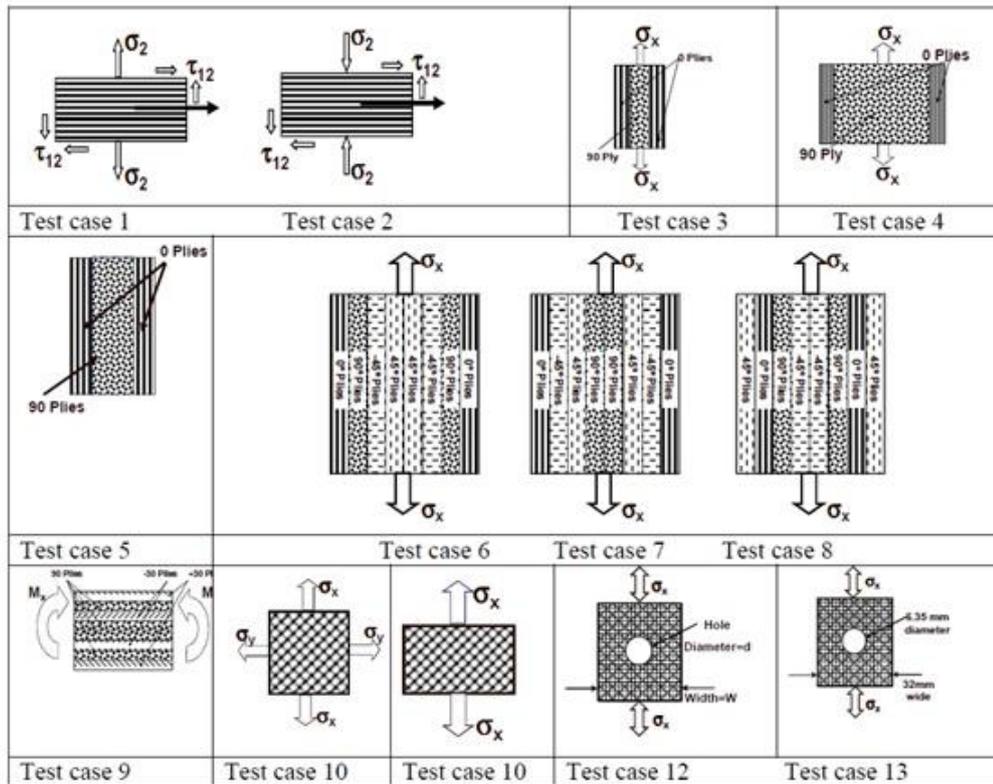


Рисунок 5.33. Схеми 13 тестових випадків використаних у WWFE-III.

Основні програмні комплекси та застосовувані у яких критерії наведено на рисунку 5.34. Наведено також критерії міцності, які вказали розробники комплексів; їх список може змінюватись в залежності від розвитку програмних комплексів, зміни складу модулів, їх наповнюваності, а також ліцензійної політики фірм-розробників [119].

Основні критерії руйнування композитних матеріалів, які використовують різні пакети САЕ - систем

| Програмне забезпечення | Ansys | Abaqus (Dassault Systemes SE) | MSC. Nastran (MSC. Software) | NX Nastran (Siemens) | Nastran In-CAD (Autodesk) | Helius (Autodesk) | Comsol | Hyper-Works (Altair) |
|---------------------------------|----------------|--|------------------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|-------------------------|
| Критерій міцності | | | | | | | | |
| Максимальні напруження | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Максимальні деформації | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Цай-Бу (Tsai-Wu) | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Цай-Хилла (Tsai-Hill) | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Аззи-Цай-Хилла (Azzi-Tsai-Hill) | - | + | - | - | - | - | + | - |
| Хоффмана (Hoffman) | + | + | + | + | + | - | + | + |
| Хашина (Hashin) | + | - | - | - | - | + | - | + |
| Пака (Puck) | + | - | - | + | + | + | - | + |
| LaRC | + | - | - | + | + | + | - | - |
| Особые | Кунце (Cuntze) | Ханкинсона (Hankinson), Коуина (Cowin) | | - | - | Кристенсена (Christensen) | Норриса (Norris) | Ямада-Суна (Yamada-Sun) |

Рисунок 5.34. Основні критерії руйнування композитних матеріалів САЕ - систем

На етапі ескізного проектування розрахунків конструкцій із композитних матеріалів слід скористатися рекомендаціями щодо застосування критеріїв міцності, представлених у роботі [120]. Рекомендації щодо застосування критеріїв міцності для композитів та відсоток їх використання у розрахунках представлені у таблиці 1.

Таблиця 5.1. Рекомендації до застосування теорій міцності

| Критерій міцності | Тип шару композиту | | | Процент використання |
|-------------------------|--------------------|-----------------|--------|-------------------------|
| | Ізотропний | Односпрямований | Тканий | |
| Максимальних деформацій | - | + | + | 30% |
| Максимальних напружень | - | + | + | 22% |
| Мізеса | + | - | - | - |
| Мізеса-Хілла | - | + | - | 18% |
| Цай-Бу | - | + | + | 13% |
| Хоффмана | - | + | + | Всі решта 17% |
| Хашина | - | + | - | |
| Пака | - | + | + | |
| Кунце | - | + | - | |
| LaRC | - | + | - | |

Питання до п'ятого розділу

1. Які основні фізичні властивості, що впливають на міцність, можуть відрізнитися в композитних матеріалах порівняно з ізотропними матеріалами?
2. Які теорії використовуються для прогнозування механічної міцності композитних матеріалів?
3. Як впливає орієнтація волокон на міцність та міцність композитів?
4. Які методи використовуються для моделювання процесів пошкодження та руйнування в композитних матеріалах?
5. Як враховується роль міжфазного зв'язку в теоріях міцності композитів?
6. Які параметри впливають на перехід від локального до глобального пошкодження в композитних матеріалах?
7. Як враховується нелінійна поведінка матеріалів в теоріях міцності композитів?
8. Які аспекти термомеханічної поведінки важливі для розуміння міцності композитних матеріалів?
9. Як враховується вплив виробничих дефектів на міцність та тривалість служби композитних матеріалів?
10. Які фактори визначають оптимальну структуру композитних матеріалів для максимізації їх міцності при конкретних умовах застосування?

11. Які методи експериментального тестування використовуються для визначення міцності композитних матеріалів і порівняння їх з теоретичними моделями?
12. Як впливає розподіл волокон та матриці на міцність та деформаційні характеристики композитних матеріалів?
13. Які основні механізми пошкодження працюють в композитних матеріалах під впливом різних видів навантаження?
14. Які аспекти враховуються при розрахунках міцності композитних конструкцій з урахуванням взаємодії між різними шарами матеріалу?
15. Які параметри впливають на динамічну міцність композитів та їх здатність до амортизації енергії удару?
16. Які властивості композитних матеріалів визначають їх здатність до стійкості проти корозії та інших агресивних середовищ?
17. Як відбувається процес руйнування композитних матеріалів під впливом високих температур?
18. Які перспективи розвитку теорій міцності композитних матеріалів в контексті застосування нових технологій виробництва?
19. Як впливає архітектура композитної структури (наприклад, направлені волокна, матричні мікроструктури) на її механічні властивості та міцність?
20. Які методи математичного моделювання використовуються для прогнозування міцності композитних матеріалів за різних умов та навантажень?
21. Які основні припущення лежать в основі теорії міцності композитів за критерієм максимальних напружень і як вони застосовуються до реальних інженерних задач?
22. Які властивості композитних матеріалів враховуються при обчисленнях максимальних напружень і деформацій?
33. Яку геометричну форму має зона працездатності односпрямованого композиту за теорією міцності по критерію максимальних напружень?
34. Як враховуються граничні умови при моделюванні максимальних напружень і деформацій в композитних конструкціях?
35. Які аналітичні та числові методи використовуються для розв'язання задач міцності композитів за критеріями максимальних напружень і деформацій?
36. Як впливає форма та розмір області навантаження на розподіл напружень і деформацій у композитних матеріалах?
37. Які методи використовуються для експериментального визначення максимальних напружень і деформацій у композитних матеріалах?
38. Які фактори впливають на точність та надійність результатів обчислень задач міцності композитів?
39. Яку геометричну форму має зона працездатності односпрямованого композиту за теорією міцності по критерію максимальних деформацій?
40. Як враховуються температурні зміни при розрахунках максимальних напружень і деформацій конструкцій з композитних матеріалів?
41. Які основні припущення лежать в основі теорії Хілла?

42. Які основні поняття використовуються в теорії Хілла для опису механічної поведінки матеріалів?
43. Як враховуються різноманітні типи навантажень (наприклад, термічні, механічні) в рамках теорії Хілла?
44. Як теорія Хілла використовується для прогнозування міцності та деформацій матеріалів під різними умовами?
45. Які основні області застосування теорії Хілла в інженерії?
46. Які методи експериментального тестування використовуються для валідації теорії Хілла?
47. Як теорія Хілла співвідноситься з іншими підходами до аналізу механічної поведінки матеріалів, такими як теорія максимальних напружень чи теорія деформацій?
48. Яку геометричну форму має зона працездатності односпрямованого композиту за теорією міцності по критерію Хілла?
49. Які основні принципи та припущення лежать в основі теорії Цай-Ву?
50. Яку геометричну форму має зона працездатності односпрямованого композиту за теорією міцності по критерію максимальних деформацій?
51. Яку геометричну форму має зона працездатності односпрямованого композиту за теорією міцності по критерію Цай-Ву?
52. Як використовуються моделі деформації та руйнування у теорії Цай-Ву для прогнозування міцності матеріалів?
53. Які основні методи експериментального та числового моделювання використовуються для перевірки теорії Цай-Ву?
54. Як теорія Цай-Ву враховує різні умови навантаження, такі як статичне, циклічне, імпульсне тощо?
55. Які переваги та обмеження має теорія Цай-Ву порівняно з іншими моделями міцності матеріалів?
56. Які сучасні методи використовуються для числового моделювання мікроструктури композитів і прогнозування їх механічних властивостей?
57. Які алгоритми та підходи використовуються для врахування нелінійності та неоднорідності в мікроструктурі композитів?
58. Як аналізується вплив орієнтації волокон на міцність та деформаційні характеристики композитних матеріалів?
59. Які новітні тенденції в сфері синтезу даних та штучного інтелекту використовуються для покращення розуміння мікромеханіки композитів?
60. Як ви оцінюєте міцність композитів з використанням числового моделювання, і які аспекти цього моделювання вважаються найбільш важливими?
61. Які типи навантажень розглядаються при аналізі міцності композитних матеріалів і чому?
62. Як впливає температурні зміни на міцність композитів і як це враховується в розрахунках?
63. Які критичні параметри впливають на міцність композитів, і як вони використовуються в інженерних розрахунках?

ВИСНОВКИ

Композити є складними об'єктами у яких фізико-механічні характеристики значно залежать від технології виготовлення та не мають точного опису мікромеханіки їхньої поведінки в різних умовах навантаження. Всі представлені моделі та розглянуті критерії не є абсолютними істинами: це моделі, які намагаються інтерпретувати реальність, яка майже завжди залишається набагато складнішою, чим ретельніше ми її вивчаємо. Фактично, критерій руйнування вважається правильним доти, доки не буде доведено його хибність або, точніше, доти, доки експериментальні випробування не спростують його. Це рано чи пізно станеться, оскільки критерій залишається істинним лише у локальній області мікромеханіки композита.

Постійний прогрес у розробці композитних матеріалів та моделей мікромеханіки дозволить подальшому розвитку ракетної техніки і забезпечить високу конкурентоспроможність космічних програм у майбутньому. Використання композитів у ракетній техніці відкриває нові перспективи для дослідження та вивчення космосу, що робить їх невід'ємною складовою сучасних космічних програм.

Радості пізнання у світі композитів!!!

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці: Підручник / Є.О. Джур, Л.Д. Кучма, Т.А. Манько та ін. – К.: Вища школа, 2003. – 399 с.
2. Гуль В.Е. Структура и прочность полимеров. – М.: Химия, 1978. – 328с.
3. Францевич И.М., Карпинос Д.М. Композиционные материалы волокнистого строения. К., 1970. – 187 с.
4. Фитцер Э. Углеродные волокна и углекомпозиаты / М.: Мир. 1988. – 336 с.
5. Васильев В.В. Протасов В.Д., Болотин В.В. Композиционные материалы. Справочник. М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
6. Справочник по композиционным материалам: В 2-кн. Кн. 1 / под ред. Дж. Любьяка: Пер. с англ.- М.: Машиностроение, 1999. – 448 с.
7. Лехницкий С. Г . Теория упругости анизотропного тела. - М.: Наука,1977. – 416 с.
8. Спеціальне матеріалознавство: Підручник / Т.А. Манько, Л.Д. Кучма, С.І. Губенко, Є.О. Джур, В.Г. Сітало. . – Д.: АРТ-ПРЕС. 2004. – 216 с.
9. Комков, М.А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражений / М.А. Комков, В.А. Тарасов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 431 с.
10. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы / Издательство Томского политехнического университета, 2013. – 117 с.
11. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы / Сборник.: Научные основы и технологии, 2008. – 822 с.
12. Materials: engineering, science, processing and design: Fourth edition/ Mike Ashby, Hugh Shercliff, and David Cebon. Kidlington:University of Cambridge, Elsevier Ltd. 2019. – 810 p.
13. Encyclopedia of smart materials: Vol 3/ Editor-in-Chief Abdul- Ghani Jlabi - New York: Publisher: Elsevier, 2021. – 524p
14. Encyclopedia of smart materials/ [redactor Mel Schwartz]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 2002 – 1193 p.
15. Kessler M. Self-healing: a new paradigm in materials design // Proc. IMechE Part G: J. Aerospace Engineering. 2007. Vol. 221. P. 479-495
16. Струк В.А., Пинчук Л.С., Мышкин Н.К., Гольдаде В.А., Витязь П.А. Материаловедение в машиностроении и промышленных технологиях. - М.: Интеллект, 2010. – 536 с
17. Mechanics of Composite Structural Elements / Н. Altenbach, • J. Altenbach, W. Kissing – Magdeburg: Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018. . – 518p. , <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8935-0>
18. Chen, V. Wickramasinghe, and D.G. Zimcik, “Development of Adaptive Seat Mounts for Helicopter Vibration Suppression”. Cansmart 2006, Proceedings: International Workshop Smart Materials and Structures, Ed. G. Akhras, Toronto, ON, pp.9-19.

19. Y. Li et al. Controlled Shape Memory Behavior of a Smectic Main-Chain Liquid Crystalline Elastomer // *Macromolecules*. 2015. Vol. 48. № 9. P. 2864–2874.
20. Yu K., Liu Y., Leng J. Conductive Shape Memory Polymer Composite Incorporated with Hybrid Fillers: Electrical, Mechanical, and Shape Memory Properties // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2011. Vol. 22. P. 369-379.
21. Salvatore Ameduri, Antonio Concilio, Nunzia Favaloro and Lorenzo Pellone. “A Shape Memory Alloy Application for Compact Unmanned Aerial Vehicles”, Published: 31 May 2016.
22. Naresh, C.; Bose, P. S. C.; Rao, C. S. P., “Shape memory alloys: a state of art review”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 149, Issue 1, pp. 012054 (2016).
23. Kessler M. Self-healing: a new paradigm in materials design // *Proc. IMechE Part G: J. Aerospace Engineering*. 2007. Vol. 221. P. 479-495.
24. Г.А. Мамедов, А.Е. Панич, М.А. Курбанов, И.С. Султанахмедова, А.А. Мехтил, Ф.Ф. Яхъяев, Ф.Н. Татардар, “Пьезоэлектрические композиты с высокой устойчивостью пьезомодуля к воздействиям механического и температурного полей” // *Физика твердого тела*, 2010, том 52, вып. 6
25. V. V. Shvartsman, D. A. Kiselev, A. V. Solnyshkin, D. C. Lupascu M. V. Silibin, “Evolution of poled state in P(VDFTrFE)/(Pb,Ba)(Zr,Ti)O₃ composites probed by temperature dependent Piezoresponse and Kelvin Probe Force Microscopy”//*Scientific Reports*. 10 January 2018
26. К. Уорден. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. Свойства и применение. Пер. с англ. –М.: Техносфера, 2006. - 223 с.
27. Helicopter rotor blade vibration control on the basis of active/passive piezoelectric approach / Sergey Shevtsov, Arcady Soloviev, Vladimir Acopyan, Ivan Samochen // *PHYSCON 2009*, Catania, Italy. <https://www.youtube.com/watch?v=JMHEQ-c9sAI/>
28. А.В. Шапорев. Магниторезистивные свойства бинарных сплавов на основе железа и редкоземельных металлов. Москва, 2017, 24стр.
29. Волков, В. С. Автоматизация разработки диагностического обеспечения интеллектуальных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // *Приборы*. – 2009. – № 12. – С. 20–26
30. Kim, B. Active Vibration Attenuation of Smart Material Systems With Model-Based and Nonlinear Multispectral Controllers / B. Kim, G. N. Washington, R. Singh // *ASME-2009 : Conference on Smart Materials, Adaptive Structures & Intelligent Systems*. Vol. 1: Active Materials, Mechanics and Behavior; Modeling, Simulation and Control. – Oxnard, California, USA, 2009. – P. 529–537.
31. Kim, B. Control of modulated vibration using an enhanced adaptive filtering algorithm based on model-based approach / B. Kim, G. N. Washington, R. Singh // *Journal of Sound and Vibration*.– 2012. – Vol. 331, issue 18. – August. – P. 4101–4114.
32. Jin J., Wang Q., Quek S.T. Lamb wave propagation in a metallic semi-infinite medium covered with piezoelectric layer. *Int. J. Solids Struct.*2002; 39:2547–2556.

33. Jin J., Quek S.T., Wang Q. Analytical solution of excitation of Lamb waves in plates by inter-digital transducers. *P Roy. Soc. A-Math. Phys.* 2003; 459:1117–1134.
34. Wang S.Y., Tai K., Quek S.T. Topology optimization of piezoelectric sensors/actuators for torsional vibration control of composite plates.
35. Duan W.H., Quek S.T., Lim S.P. Finite element solution for intermittent-contact problem with piezoelectric actuation in ring type USM.
36. Tua P.S., Quek S.T., Wang Q. Detection of cracks in cylindrical pipes and plates using piezo-actuated Lamb waves.
37. Tua P.S., Quek S.T., Wang Q. Detection of crack in thin cylindrical pipes using piezo-actuated lamb waves. In: Tomizuka M., editor.
38. Proceedings Smart Structures and Materials 2005: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace; San Diego, CA, USA. 2005;
39. Jin J., Quek S.T., Wang Q. Wave boundary element to study Lamb wave propagation in plates. *J. Sound Vibr.* 2005; 288:195–213
40. Jin J., Quek S.T., Wang Q. Design of interdigital transducers for crack detection in plates. *Ultrasonics.* 2005; 43:481–493.
41. Duan W.H., Quek S.T., Wang Q. A novel ring type ultrasonic motor with multiple wavenumbers: design, fabrication and characterization.
42. Yoshioka S., Nakao W. Methodology for evaluating self-healing agent of structural ceramics // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures.* 2015. Vol. 26. №11. P. 1395–1403.
43. Moll J., White S., Sottos N. A Self-sealing Fiber-reinforced Composite // *Journal of Composite Materials.* 2010. Vol. 44. № 22. P. 2573-2585.
44. Haiyan L., Rongguo W., Wenbo L. Preparation and self-healing performance of epoxy composites with microcapsules and tungsten (VI) chloride catalyst // *Journal of Reinforced Plastics and Composites.* 2012. Vol. 31. № 13. P. 924-932.
45. Sanada K., Mizuno Y., Shindo Y. Damage progression and notched strength recovery of fiber-reinforced polymers encompassing self-healing of interfacial debonding // *Journal of Composite Materials.* 2015, Vol. 49. №14. P. 1765–1776.
46. Tripathi M. et al. Application of microencapsulated unsaturated polyester toward temperature-triggered healing in epoxy composites // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures.* 2015. doi: 10.1177/1045389X15600083.
47. Pingkarawat K. et al. Healing of fatigue delamination cracks in carbon–epoxy composite using mendable polymer stitching // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures.* 2014. Vol 25. №1. P. 75–86.
48. Kwok N., Hahn H. T. Resistance Heating for Self-healing Composites // *Journal of Composite Materials.* 2007. Vol. 41. № 13. P. 1635-1654.
49. Park J. et al. Towards Development of a Self-Healing Composite using a Mendable Polymer and Resistive Heating. *Journal of Composite Materials.* 2008. Vol. 42. № 26. P. 2869-2881
50. Yoshioka S., Nakao W. Methodology for evaluating self-healing agent of structural ceramics // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures.* 2015. Vol. 26. №11. P. 1395–1403.

51. Han B. et al. Smart concretes and structures: A review // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2015. Vol. 26. №11. P. 1303–1345.
52. Huang H., Ye G. Self-healing of cracks in cement paste affected by additional Ca²⁺ ions in the healing agent // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2015. Vol. 26. №3. P. 309–320.
53. Snoeck D. et al. Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2014. Vol 25. №1. P. 13–24.
54. Li V.C., Lim Y.M., Chan Y.-W. Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite // *Composites Part B: Engineering*. 1998. Vol. 29(6). P. 819–827.
55. Shinya N., Kyono J., Laha K. Self-healing Effect of Boron Nitride Precipitation on Creep Cavitation in Austenitic Stainless Steel // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2006. Vol. 17. P. 1127-1133.
56. Bor T. et al. Modeling of Stress Development During Thermal Damage Healing in Fiber-reinforced Composite Materials Containing Embedded Shape Memory Alloy Wires // *Journal of Composite Materials*. 2010. Vol. 44. № 22. P. 2547-2572.
57. M. Nosonovsky, P.K. Rohatgi. *Biomimetics in material science*. Springer, 2012. 415 p.
58. Olugebefola S. et al. Polymer Microvascular Network Composites // *Journal of Composite Materials*. 2010. Vol. 44. № 22. P. 2587-2603.
59. Fehrman B., Korde U. Targeted delivery of acoustic energy for self-healing // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2013. Vol. 24. № 15. P. 1865-1887.
60. Soroushian P., Nassar R., Balachandra A. Piezo-driven self-healing by electrochemical phenomena // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2013. Vol. 24(4). P. 441–453.
61. Atay H., Celik E. Multifunctional polymer composites: Antibacterial, flame retardant, radar absorbing and self-healing // *Journal of Composite Materials*. 2015. Vol. 49. № 20. P. 2469–2482.
62. Williams H., Trask R., Bond I. A probabilistic approach for design and certification of self-healing advanced composite structures // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part O: J. Risk and Reliability*. 2011. Vol. 225. P. 435-449.
63. Brancart J. et al. Atomic force microscopy–based study of self-healing coatings based on reversible polymer network systems // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2014. Vol 25. №1. P. 40–46.
64. Phillips D., Baur J. A Granular Core for Self-healing, Variable Modulus Sandwich Composites // *Journal of Composite Materials*. 2010. Vol. 44. № 22. P. 2527-2545.
65. Stewart Sherrit and Benoy K. Mukherjee "Electrostrictive materials: characterization and applications for ultrasound", *Proc. SPIE 3341, Medical Imaging 1998: Ultrasonic Transducer Engineering*, (1 May 1998);

66. Greenough, R. D., Jenner, A. G., Schulze, M. and Wilkinson, A. J. (1991) *J. Magn. & Magn. Mat.*, 101, 75-80.
67. Greenough, R. D., Jenner, A. G., Schulze, M. and Wilkinson, A. J. (1991) *IEEE Trans. on Magnetics*, 27, 5346-5348
68. Clark, A. E. (1974) *AIP Conf. Proc.*, 18, 10 15
69. Joule, J. P. (1842) *Phil. Mag.*, 930, 30, 76 and 225
70. Y. Kikuchi, "Performance of magnetostrictive transducers made of aluminum-iron alloy or nickel-copper ferrite", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 29, pp. 569-573, May 1957.
71. Kittel, C (1949) *Rev. Mod. Phys.*, 21, 555.
72. Yu K., Liu Y., Leng J. Conductive Shape Memory Polymer Composite Incorporated with Hybrid Fillers: Electrical, Mechanical, and Shape Memory Properties // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2011. Vol. 22. P. 369-379.
73. Y. Kikuchi, H. Shimizu and T. Uekusa, "Force factor of magnetostriction vibrators under hydrostatic pressure of 70 atm", *Acoust. Soc. of Japan Repts. Spring Meeting*, no. 1-1-8, 1964-May.
74. Arridge, R. G. C. and Folkes, M. J. (1972) "The Mechanical Properties of, a «Single Crystall of S B S Copolymer - A Novel Composite Material «, *J. Phys. D5*, 344-358
75. Knight, D. P. and Vollrath, F. (1999). Liquid Crystals and Flow Elongation in a Spider's Silk Production Line, *Proc. Roy. Soc. London B*, 266, 519-523.
76. Chen S. et al. Preparation of novel polytetrafluoroethylene/copper-matrix self-lubricating composite materials // *Journal of Composite Materials*. 2014. Vol. 48. № 13. P. 1561–1574.
77. Wang H. et al. Tribological performances on porous polyphenylene sulfide self-lubricating composites with super wear resistance // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2014. Vol 27. №1. P. 82–92.
78. Srikant R.R., Ramana V., Vamsi Krishna P. Development and performance evaluation of self-lubricating drill tools // *Journal of Engineering Tribology*. 2015. Vol. 229. № 12. P. 1479–1490.
79. Suiyuan C. et al. Synthesis of New Cu-based Self-lubricating Composites with Great Mechanical Properties // *Journal of Composite Materials*. 2011. Vol. 45. № 1. P. 51-63.
80. Suiyuan C. et al. Effect of BN fraction on the mechanical and tribological properties of Cu alloy/BN self-lubricating sleeves // *Journal of Composite Materials*. 2015. Vol. 49. №30. P.
81. Singh S. et al. Microstructural analysis and tribological behavior of aluminum alloy reinforced with hybrid alumina/nanographite particles // *Journal of Engineering Tribology*. 2015. Vol. 229. № 5. P. 597–608.
82. M. Nosonovsky, P.K. Rohatgi. *Biomimetics in material science*. Springer, 2012. 415 p.
83. Kong L. B., Cheung C. F., To S. Design, fabrication and characterization of three-dimensional patterned microstructured surfaces with self-cleaning properties

from hydrophilic materials // Journal of Engineering Manufacture. 2012. V. 226. №9. P. 1536–1549.

84. Vorobyev A., Guo C. Multifunctional surfaces produced by femtosecond laser pulses // J. Appl. Phys. 2015. V. 117. № 3. DOI: 10.1063/1.4905616.

85. Scarratt L. et al. Durable Superhydrophobic Surfaces via Spontaneous Wrinkling of Teflon AF // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2016. DOI: 10.1021/acsami.5b12165.

86. Ibrahim N., Refaie R., Ahmed A. Novel Approach for Attaining Cotton Fabric with Multi-Functional Properties // Journal of Industrial Textiles. 2010. Vol. 40. № 1. P. 65-83.

87. Sundaresan K. et al. Influence of nano titanium dioxide finish, prepared by sol-gel technique, on the ultraviolet protection, antimicrobial, and self-cleaning characteristics of cotton fabrics // Journal of Industrial Textiles. 2012. Vol. 41. № 3. P. 259-277.

88. Qi K., Wang X., Xin J. H. Photocatalytic self-cleaning textiles based on nanocrystalline titanium dioxide // Textile Research Journal. 2011. Vol. 81. № 1. P. 101-110.

89. Lee H. J., Kim J., Park C. H. Fabrication of self-cleaning textiles by TiO₂-carbon nanotube treatment // Textile Research Journal. 2014. Vol 84. № 3. P. 267–278.

90. Ashraf M. et al. Study the multi self-cleaning characteristics of ZnO nanorods functionalized polyester fabric // Journal of Industrial Textiles. 2014. doi: 10.1177/1528083714562086.

91. Ashraf M. et al. Photocatalytic solution discoloration and self-cleaning by polyester fabric functionalized with ZnO nanorods // Journal of Industrial Textiles. 2015. Vol. 44. № 6. P. 884–898.

92. Ranogajec J. et al. Protection of Cultural Heritage Objects with Multifunctional Advanced Materials // Progress in Cultural Heritage Preservation – EUROMED. 2012. P.255-258.

93. Goffredo G. B. et al. TiO₂ nanocoatings for architectural heritage: Self-cleaning treatments on historical stone surfaces // Journal of Nanoengineering and Nanosystems. 2014. Vol. 228. № 1 P. 2–10.

94. Hadnadjev M. et al. Design of self-cleaning TiO₂ coating on clay roofing tiles // Philosophical Magazine. 2010. V. 90. № 22. P. 2989-3002.

95. Yanilmaz M., Sarac A. S. A review: effect of conductive polymers on the conductivities of electrospun mats // Textile Research Journal. 2014. Vol. 84. № 12. P. 1325–1342.

96. Проводящие полимеры // Мир современных материалов. 2014. URL: <http://worldofmaterials.ru/spravochnik/special-materials/200-provodyashie-polimeri> (дата обращения 13.03.2016).

97. Блайт Э.Р., Блур Д. Электрические свойства полимеров / Пер. с англ. - М: Физматлит, 2008. - 376 с.

98. Muthukumar N., Thilagavathi G., Kannaian T. Polyaniline-coated polyurethane foam for pressure sensor applications // *High Performance Polymers*. 2015. doi: 10.1177/0954008315583703.
99. Kumar V. et al. Mechanical and electrical properties of PANI-based conductive thermosetting composites // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2015. Vol. 34. № 16. P. 1298–1305.
100. Kizildag N. et al. Polyacrylonitrile/polyaniline composite nano/microfiber webs produced by different dopants and solvents // *Journal of Industrial Textiles*. 2015. doi: 10.1177/1528083715598654.
101. Kizildag N. et al. Polyacrylonitrile/polyaniline composite nanofiber webs with electrostatic discharge properties // *Journal of Composite Materials*. 2016. doi: 10.1177/0021998316630583.
102. Eren O. et al. Synergistic effect of polyaniline, nanosilver, and carbon nanotube mixtures on the structure and properties of polyacrylonitrile composite nanofiber // *Journal of Composite Materials*. 2015. doi: 10.1177/0021998315601891.
103. Al-Ghamdi A.A. et al. On the prospects of conducting polyaniline/natural rubber composites for electromagnetic shielding effectiveness applications // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2014. Vol. 27. № 6. P. 765–782.
104. Lam Y.-Z., Swingler J., McBride J. W. The Contact Resistance Force Relationship of an Intrinsically Conducting Polymer Interface // *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*. 2006. Vol. 29. № 2. P. 294-302.
105. Каблов Е.Н., Гуняев Г.М., Бирюк В.И., Голован В.И. Крыло летательного аппарата: Пат. 2191137 (РФ) // *БИ*, 2002, № 29.
106. А.К. Линник, Р.Д. Красникова, В.И. Ліповський, Е.Ю. Баранов КОМПОЗИТИ В КОНСТРУКЦІЇ КОРПУСІВ РАКЕТ-НОСІЇВ. – Дніпро: «Ліра ЛТД», 2018, 260с.
- 107 Structural optimization of a light aircraft composite wing// Phyo Wai Aung, Oleg Tatarnikovand, Naing Lin Aung// *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 709 (2020) 044094 doi:10.1088/1757-899X/709/4/044094
108. Hill R. *The Mathematical theory of plasticity*. London: Oxford University Press, 1950. 317 p.
109. Tsai S.W., Wu E.M. A General Theory of Strength for Anisotropic Materials // *Journal of Compo-site Materials*. 1971. No. 5 (1). P. 58–80. DOI: 10.1177/002199837100500106.
110. Knops M. *Analysis of Failure in Fiber Polymer Laminates*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008. 205 p. DOI:10.1007/978-3-540-75765-8.
111. Puck A., Kopp J., Knops M. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models // *Computer Science Technology*. 2002. Vol. 62. P. 1633–1662.
112. Lin C.S., Scordelis A.C. Nonlinear analysis of RC shells of general form // *Journal of structural division*. 1975. Vol. 101. No. ST3. P. 523–538.
113. Hinton M J, Kaddour A S and Soden P D, ‘Failure Criteria In Fibre Reinforced Polymer Composites: The World-Wide Failure Exercise’, published by Elsevier Science Ltd, Oxford, UK, 2004.

114. Kaddour A S and Hinton M J (Editors), 'Evaluation of Theories for Predicting Failure in Polymer Composite Laminates Under 3-D States of Stress: Part A of the Second WorldWide Failure Exercise (WWFE-II)', Special issue of J Composite Material, September 2012; 46 (19-20).
115. Kaddour A S and Hinton M J (Editors), 'Evaluation of Theories for Predicting Failure in Polymer Composite Laminates Under 3-D States of Stress: Part B of the Second WorldWide Failure Exercise (WWFE-II)', Special issue of J Composite Materials, March 2013; 47 (6-7).
116. Kaddour A S, Hinton M J, Smith P A and Li S (Editors), 'Damage, Matrix cracking Criteria for Fibre Reinforced Polymer Composites, Part A of the 3rd World-Wide Failure Exercise', Special issue of J Composite Materials, V 47, Nos 20-21, 2013.
117. Kaddour A S, Hinton M J, Smith P A and Li S, 'A comparison between the predictive capability of current matrix cracking, continuum damage and fracture criteria for fibre reinforced composite laminates: Part B of WWFE-III', to be published.
118. Kaddour A S, Hinton M J, Smith P A and Li S, The world-wide failure exercises: how can composites Design and manufacture communities build their Strength, DOI: 10.1177/0021998313499475
119. D.V. Grinevich, N.O. Yakovlev, A.V. Slavin/ The criteria of the failure of polymer matrix composites (review) // DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111
120. [Review of criteria of durability of materials /E.I. Oreshko, V.S. Erasov, D.V. Grinevich, P.V. Shershak // DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-108-126

Навчальне видання

МАНЬКО Тамара Антонівна,
ЛПОВСЬКИЙ Володимир Іванович

**КОМПОЗИТИ: МЕХАНІКА АРМОВАНИХ
МАТЕРІАЛІВ**

електронний навчальний посібник

ПОСІБНИК ВИДАНО В АВТОРСЬКІЙ РЕДАКЦІЇ