

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»**



ДОЛГОВ О.М.

КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

НАВЧАЛЬНИЙ НАОЧНИЙ ПОСІБНИК

Дніпро
НТУ «ДП»
2024

УДК 620.22(075.8)

Д64

Затверджено

вченою радою як навчальний наочний посібник для здобувачів ступеня бакалавра спеціальності 132 Матеріалознавство (протокол № 4 від 20 березня 2024 року)

Рецензенти:

Губенко С.І., академік АН ВШ України, доктор технічних наук, професор кафедри матеріалознавства та обробки Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, м. Дніпро;

Лаухін Д.В., доктор технічних наук, професор кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро;

Урсуляк Л.В., кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри технічної механіки Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро.

Долгов О. М.

Д64 Композиційні матеріали : [Електронний ресурс] : навч. наоч. посіб. / О. М. Долгов ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка» . – Дніпро : НТУ « Дніпровська політехніка » , 2024. – 126 с.

Навчальний наочний посібник складено відповідно до навчальної програми з дисципліни «Композиційні матеріали» за програмою підготовки бакалаврів зі спеціальності 132 Матеріалознавство. Розглянуто структура, властивості та основи механіки композиційних матеріалів. Наведено основні технологічні процеси виготовлення і практичне застосування композитів у різних галузях.

Видання рекомендовано для студентів усіх форм навчання за програмою підготовки здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності Матеріалознавство.

УДК 620.22(075.8)

© О.М. Долгов, 2024

© НТУ «Дніпровська політехніка», 2024

ЗМІСТ

1. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ

1.1. Уявлення про композити

1.2. Властивості композитів, їх переваги та недоліки

1.3. Предмет та завдання курсу

2. КОНСТРУКЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1. Армуючі елементи (волокна)

2.1.1. Скляні волокна

2.1.2. Вуглецеві волокна

2.1.3. Борні волокна

2.1.4. Високомодульні органічні волокна

2.2. Матриці

2.2.1. Термореактивні полімерні матриці

2.2.2. Термопластичні полімерні матриці

2.2.3. Вуглецеві матриці

2.3. Структурні особливості й механічні властивості композитів

2.3.1. Орієнтовані матеріали, армовані неперервними волокнами

2.3.2. Матеріали, армовані тканиною

2.3.3. Композити із хаотичним армуванням

2.3.4. Композити із просторовим армуванням

2.4. Гібридні композити

2.5. Нанокompозити

2.5.1. Наповнювачі для нанокompозитів

2.5.2. Нанокompозити в стоматології

2.5.3. Вогнестійкі полімерні нанокompозити

2.5.4. Бетон, що самоочищується

3. ВЛАСТИВОСТІ ВОЛОКНИСТИХ КОМПОЗИТІВ

3.1. Ефективні модулі пружності односпрямованого матеріалу

3.1.1. Визначення властивостей композитів методами мікромеханіки

3.1.2. Найпростіша мікромодель композиту

3.2. Коефіцієнти лінійного температурного розширення

3.3. Приклади визначення фізико-механічних властивостей односпрямованих шарів композиційного матеріалу

3.4. Міцнісні властивості односпрямованого композиційного матеріалу

3.4.1. Межа міцності композиційного матеріалу при розтягуванні (стисканні) вздовж волокон

3.4.2. Межа міцності композиційного матеріалу при розтягуванні (стисканні) впоперек волокон

3.4.3. Межа міцності композиційного матеріалу при зсуві

3.4.4. Приклад визначення міцності односпрямованих композиційних матеріалів

3.4.5. Питомі характеристики композиційних матеріалів

3.4.6. Приклад визначення питомих характеристик односпрямованих композиційних матеріалів

3.4.7. Визначення залишкових напружень у компонентах односпрямованого композиційного матеріалу

3.5. Приклад проектування шаруватого композиційного матеріалу

4. ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ (ПКМ)

4.1. Вступ

- 4.2. Пресування**
- 4.3. Лиття під тиском**
- 4.4 Пултрузія**
- 4.5. Екструзія**
- 4.6. Контактне формування**
- 4.7. Намотування**
- 4.8. Пневматичне формування**
- 4.9. Спікання**
- 4.10. Штампування**
- 4.11. Напилення**
- 4.12. Формування за допомогою еластичної герметичної оболонки**
- 5. ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**
- 5.1. Ракетно-космічні системи**
- 5.2. Авіація**
- 5.3. Наземний транспорт**
- 5.4. Суднобудування**
- 5.5. Електрорадіотехніка**
- 5.6. Будівництво**
- 5.7. Хімічна промисловість**
- 5.8. Військова справа та засоби безпеки**
- 5.9. Медицина**
- 6. ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ**
- 7. КЛЮЧІ ДО ВІДПОВІДЕЙ**
- Література**

1. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ

1.1. Уявлення про композити

Композитом називається неоднорідний (гетерогенний) матеріал, що складається з двох або кількох взаємно нерозчинних компонентів (фаз). Відповідно до цього визначення до композитів відносяться дисперсійно-зміцнені сплави, бетони, метали з покриттям тощо. Полікристалічні тіла, що складаються з однієї речовини, також можна віднести до цього класу матеріалів, розглядаючи гранули з різною орієнтацією як різні фази. Нарешті, сюди можна віднести і однорідні матеріали з пустотами (останні можна трактувати як включення з нульовим модулем пружності).

Задля зручності одну з фаз називатимемо матрицею (або сполучною), а інші - включеннями (або армуючими елементами). Композиційні матеріали зазвичай класифікуються формою включень. Найпоширенішими серед них є макрочастинки (гранули), короткі (або розірвані) волокна, довгі безперервні волокна (нитки), а також шари.

Композити, армовані елементами, які мають всі розміри одного порядку, називаються гранульованими. Матеріали, які можна віднести до гранульованих композитів, дуже різноманітні за своєю природою. Композити, армовані елементами, два виміри яких набагато більше третього, називаються плоскотекстурованими.

Відзначимо волокнисті композити, які набули найбільшого поширення в сучасних силових конструкціях. Вони складаються з порівняно податливої матриці, армованої високоміцними волокнами з високими значеннями модуля пружності та межі міцності.

Тут розрізняють два основних типи: композити з безперервними волокнами та композити з короткими (розірваними) волокнами. У свою чергу, в першому із зазначених типів довгі волокна можуть бути розташовані строго паралельно одне одному або сплетені у тканину, просочену полімерним сполучним. Проте текстильна переробка помітно знижує міцність та жорсткість матеріалу.

1.2. Властивості композитів, їх переваги та недоліки

Інтерес до композиційних матеріалів обумовлений тим, що комплекс їх властивостей суттєво відрізняється від традиційних конструкційних матеріалів. Це, насамперед, висока міцність та низька щільність, а також можливість керування механічними та фізичними характеристиками при створенні матеріалу конструкції. Властивості композитів залежать насамперед від властивостей вихідних компонентів: армуючих елементів та матриці. Крім того, їх з'єднання дає ефект синергізму, пов'язаний з появою у композиції властивостей, не характерних для ізольованих вихідних компонентів.

Композити відрізняються широким спектром корисних, а в деяких відносинах, і унікальних властивостей. Їх раціональне поєднання дозволяє отримувати ефективні конструкції з високим ступенем вагової досконалості та заданою анізотропією фізико-механічних характеристик матеріалу. Питання реалізації властивостей пов'язується з управлінням характеристиками композитів у процесі виготовлення конструкції шляхом зміни орієнтації волокон та поєднання шарів із різних матеріалів. Це дозволяє отримувати матеріали з необхідними властивостями та характеристиками.

У принципі для кожної конструкції може бути розроблений матеріал, найповніше відповідний її призначенню, полю діючих навантажень і умовам експлуатації. У цьому плані композити аналогічні природним матеріалам, у яких раціональне поєднання якостей сформувалося у процесі тривалої еволюції.

Спрямований характер властивостей композитів одночасно означає, що поряд з високими характеристиками в одних напрямках вони мають низькі в інших. Тому зробити яку завгодно погану конструкцію з будь-якого гарного композиту набагато простіше, ніж зробити її з металу.

Однак вірний облік особливостей композитів дозволяє отримувати конструкції, що мають високий рівень вагової досконалості, не досяжної при використанні традиційних матеріалів.

Як показують експериментальні дані, конструкції з композитів не мають складних проблем із забезпеченням тривалого ресурсу за умов витривалості.

Існуючий досвід створення конструкцій з полімерних композиційних матеріалів вказує на досить широкий діапазон їх жорсткості та міцності, джерелом якого є нестабільність вихідних компонентів, відхилення у виконанні технологічних процесів, недостатня культура виробництва та ін. Цей факт враховується введенням додаткового коефіцієнта безпеки щодо розрахункового навантаження, величина якого залежить від коефіцієнта варіації механічних властивостей композиту.

Проблема міцності сполук є однією з основних при використанні композиційних полімерних матеріалів у складних складових конструкціях. Тут застосовують клейові та механічні сполуки, проте перспективними є клейові та клеє-механічні сполуки як більш відповідні щодо будови та структури композиту. Високоміцні механічні з'єднання композитних деталей можуть бути отримані при використанні голкових сполук, що містять велику кількість металевих кріпильних елементів малого діаметра. Збільшення площі зрізу та зминання дозволяє отримувати з'єднання, міцність яких становить 80...90% міцності матеріалу в регулярній зоні.

До інших недоліків композиційних матеріалів слід віднести гігроскопічність (тобто схильність вбирати вологу) і токсичність. Крім того, композиційні матеріали мають низьку експлуатаційну технологічність, низьку ремонтпридатність і високу вартість експлуатації. Це пов'язано з необхідністю застосування спеціальних трудомістких методів, спеціальних інструментів для доопрацювання та ремонту виробів із композитів. Часто такі об'єкти взагалі не підлягають будь-якій доробки та ремонту.

1.3. Предмет та завдання курсу

«Композиційні матеріали» - це один з основних розділів сучасного матеріалознавства. Предметом курсу є, по-перше, розробка моделей та методів для визначення властивостей композиту за відомими властивостями його компонентів з метою проектування найкращого для поставленого завдання, по-друге, дослідження процесів деформування та руйнування виробів з композиційних матеріалів і розробка методів розрахунку та оптимального проектування таких виробів. Ці два напрями тісно пов'язані між собою, тим більше, що, як правило, композиційний матеріал проектується та створюється одночасно з виробом.

Значне місце у дослідженні композиційних матеріалів належить технологічним завданням. На відміну від властивостей традиційних матеріалів, технологія яких добре відпрацьована і стійка, властивості композитів досить чутливі до малих змін технологічного режиму, а самі технологічні прийоми відрізняються великою різноманітністю. Проектування матеріалу, виробу та технологічного процесу має становити одне ціле.

При цьому, задачі розрізняються за рівнями опису, які визначаються характерним масштабом довжини. Нижній (мікроскопічний) рівень - це рівень структурної неоднорідності. Його масштаб h дорівнює характерному розміру частинки включення, діаметру волокон або товщині армуючого шару. Типовими задачами, що виникають на цьому рівні, є визначення концентрації напруг на межі двох компонентів, задачі локального руйнування тощо.

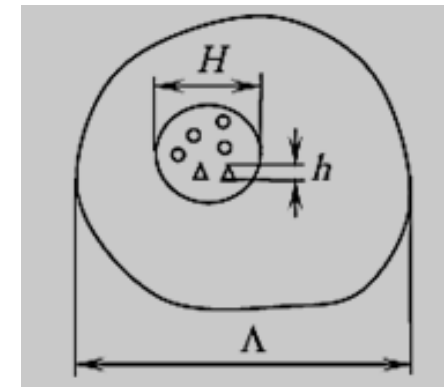


Рис. 1.1 - До опису задач композиційних матеріалів

Наступним рівнем розгляду є той, на якому стає можливим заміна гетерогенного (неоднорідного) матеріалу еквівалентним йому, у певному сенсі, гомогенним (однорідним) матеріалом. Відповідний масштаб позначимо через H (Рис. 1.1). Він характеризує розмір так званого «представницького» обсягу, тобто такого обсягу, у якому всі усереднені за обсягом компоненти тензорів напруг і деформацій дорівнюють відповідним величинам, обчисленим для композиту в цілому. Таким чином, під представницьким обсягом розуміють область композиту, найменший розмір якої набагато більше характерних розмірів включень.

Одна з центральних задач механіки композитів - обчислення ефективних (макроскопічних) характеристик композиту за заданими характеристиками компонентів - пов'язана з переходом з рівня опису h на рівень опису H .

Зрештою, найвищий рівень – це той, масштаб якого Λ дорівнює характерному розміру виробу або відстані, на якому напруги та деформації змінюються помітно (Рис. 1.1).

Для досить великих виробів, за відсутності занадто гострих концентраторів, можна прийняти $h \ll H \ll \Lambda$. У цьому випадку розрахунок виробу може бути проведений в наступному порядку. На першому етапі (рівень h) вирішується задача для суттєво гетерогенного матеріалу.

Потім обчислюють ефективні показники композиту, тобто. здійснюється перехід з рівня h на рівень H . Наступний етап - вирішення задачі для тіла із знайденими ефективними характеристиками (рівень Λ). Якщо мета полягає у визначенні згладжених полів напруг, деформацій і переміщень, то на цьому етапі вирішення задачі закінчується.

Якщо необхідно знайти структурні напруги і деформації, слід повернутися до рівня Λ .

Застосування композиційних матеріалів, багато в чому, пов'язане з проектуванням багатошарових конструкцій. Композити, що широко застосовуються на практиці, мають шарувату структуру, причому шари часто суттєво відрізняються за жорсткістю. Прикладом можуть бути вироби з волокнистих композитів, що утворені поздовжньо-поперечною намоткою.

Метою курсу є вивчення властивостей композиційних матеріалів, формування базових теоретичних знань механіки композитів, основ технологічних процесів виробництва та галузей їх застосування.

2. КОНСТРУКЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Вивчаючи напружений та деформований стан анізотропних тіл під час дії зовнішнього навантаження, необхідно знати їх узагальнені конструктивні властивості.

Механічні характеристики композита визначаються співвідношенням властивостей армуючих елементів і матриці, а також міцністю зв'язків між ними. Ефективність і працездатність такого матеріалу залежать від правильного вибору вихідних компонентів і технологій їх суміщення. Ці фактори повинні забезпечити міцний зв'язок між зазначеними компонентами зі збереженням їх початкових характеристик.

У результаті поєднання високоміцних волокон і матриці утворюється комплекс властивостей композита, який відображає не тільки початкові характеристики, а й додатково включає властивості, яких окремо взяті компоненти не мають.

Наявність поверхонь розділу між армуючими елементами істотно підвищує тріщиностійкість композиційних матеріалів. На відміну від металів, підвищення статичної міцності не призводить до зниження характеристик в'язкості руйнування композиційних матеріалів, а, як правило, підвищує їх.

У цьому розділі розглянуті основні властивості армуючих елементів, матеріалів матриць і композитів, створених на їх основі.

2.1. Армуючі елементи (волокна)

У сучасних композитах використовуються тонкі $(5 - 200) \cdot 10^{-6}$ м неперервні й короткі волокна, які є армуючими елементами і служать основою для виготовлення ниток, джгутів, стрічок і тканин із різними типами плетіння. Волокна повинні задовольняти комплексу експлуатаційних і технологічних вимог. До перших належать умови міцності, жорсткості й стабільності під час експлуатації. Технологічність волокон визначається можливістю створення високопродуктивних процесів виготовлення виробів на їх основі. Розглянемо типи волокон.

2.1.1. Скляні волокна. Неперервні скляні волокна утворюються з розплавленої скломаси шляхом витягування струменя на виході із філь'єр до діаметра $(5 - 20) \cdot 10^{-6}$ м і швидкого охолодження. Границя міцності отриманих після витягування скляних волокон становить 2 – 6 ГПа і визначається, насамперед, складом скломаси, технологією її витяжки і подальшої обробки. Модуль пружності волокна становить 50 – 130 ГПа (сталь – 200 ГПа), густина 2500 – 2600 кг/м³.

Скляні волокна із непошкодженою поверхнею мають граничну міцність 5 – 6 ГПа. Температура істотно впливає на міцність скляних волокон. Наприклад, границя міцності промислових алюмоборосилікатних волокон при зниженні температури до -196°C зростає у півтора-два рази, а з підвищенням температури знижується, причому найбільш інтенсивно після 300°C . Модуль пружності скляних волокон із підвищенням температури знижується неістотно.

Саме зі скляними волокнами англійський вчений А. Гріфітс у 1920 році провів експерименти, поклавши початок механіці крихкого руйнування. Ці експерименти теоретично й експериментально обґрунтували основну властивість тонких волокон, а саме – високу міцність у порівнянні із міцністю монолітного матеріалу.

Як відомо, теоретична міцність матеріалу, передбачувана фізикою твердого тіла, значно (на декілька порядків) перевищує міцність реальних матеріалів, що спостерігається експериментально.

Загалом теоретична границя міцності скла, за оцінкою Гріфітса, становить приблизно 14 ГПа, а для скляних стержнів діаметром 10^{-3}м майже у 100 разів менша – 0,14 ГПа. Така різниця викликана, перш за все, впливом поверхневих дефектів – тріщинами, які істотно знижують міцність реальних матеріалів.

При зменшенні діаметрів скляних волокон починаючи від $3 \cdot 10^{-5}$ м границя міцності різко збільшується, наближаючись до теоретичного значення. Таким чином, використання тонких волокон, як армуючих елементів, пов'язане з їх високою міцністю. У зв'язку з цим, як характеристика волокон і взагалі матеріалів, використовується так звана питома міцність $k_{\sigma} = \frac{\sigma_B}{\gamma}$, де σ_B – границя міцності матеріалу, а γ – його питома вага. Питома міцність вимірюється в одиницях довжини і має просте фізичне значення, вона дорівнює довжині волокна, що руйнується під дією власної ваги. Сталевий дріт, який має таку саму міцність, як і скляне волокно, за питомою міцністю поступається йому більше ніж утричі. За аналогією із питомою міцністю вводиться питомий модуль пружності $k_E = \frac{E}{\gamma}$.

2.1.2. Вуглецеві волокна. Процес виготовлення вуглецевих волокон полягає в послідовному температурному та механічному впливі на вихідні органічні волокна, що призводить до їх карбонізації, графітизації і вдосконалення структури.

На першому етапі нагрівання вихідних розтягнутих волокон відбувається до температури близько 220°C , що призводить до утворення поперечних хімічних зв'язків між макромолекулами полімеру.

Другий етап – нагрівання до 1000°C – дозволяє отримати карбонізовані на 80 – 95 % волокна, що складаються із елементарного вуглецю і мають достатньо високу міцність.

На третьому етапі обробки при температурі 1500 – 2500°C виходить кінцевий продукт – графітізоване вуглецеве волокно із кристалічною структурою, близькою до структури графіту. Залежно від технологій отримання модуль пружності вуглецевих волокон знаходиться в межах 220 – 700 ГПа, границя міцності 2 – 3,5 ГПа. Високомодульні вуглецеві волокна отримують унаслідок розтягування такого волокна при температурі 2700°C.

2.1.3. Борні волокна. Ці волокна одержують осадженням бору на розігріту вольфрамову нитку діаметром $(12 - 16) \cdot 10^{-6}$ м. При такому процесі навколо нитки формується борна оболонка, що частково прореагувала із матеріалом нитки. Промисловість випускає волокна діаметром $(100 - 200) \cdot 10^{-6}$ м, що мають границю міцності при розтягуванні 2– 4 ГПа, модуль пружності 370 – 430 ГПа і густину 2500 – 2700 кг/м³. Борні волокна добре поєднуються як і з полімерною, так і з кристалічною матрицею. Їх основною перевагою є висока жорсткість, міцність при стисканні. До недоліків можна віднести високу вартість, низький рівень технологічності, крихкість. Крім того, борні волокна мають високу чуттєвість до концентраторів напружень.

2.1.4. Високомодульні органічні волокна. Прогрес у галузі створення синтетичних матеріалів дозволив отримати армуючі волокна, здатні конкурувати з неорганічними волокнами. Високомодульні органічні волокна одержують із полімерів концентрованих розчинів шляхом формуванням крізь фільтри. Далі волокна пропускають крізь ванни осадження, де видаляється основна частина розчинника, після чого здійснюють орієнтаційну витяжку і фіксацію структури волокон. Залежно від складу полімера і методу формування одержують органічні волокна, що мають густину 1400 – 1450 кг/м³, границя міцності при розтягуванні 1,8 – 3,0 ГПа і модуль пружності 70 – 130 ГПа. Волокно зберігає вихідні характеристики до 180°C, а при підвищенні температури, не плавлячись, карбонізується. Криогенні температури не викликають крихкості волокна. При достатньо високому модулі пружності й великому граничному подовженні (до 2%) органічні волокна мають високу ударну в'язкість і малу чуттєвість до пошкодження. За питомою міцністю та жорсткістю вони переважають скляні волокна і заміняють їх при створенні балонів високого тиску і в інших елементах, матеріал яких працює на розтягання. При стисканні композити на основі органічних волокон значно поступаються склопластику.

Характеристики волокон, що найбільш застосовуються в наш час, наведені у табл. 2.1. Можна відмітити, що за питомою жорсткістю високомодульні вуглецеві волокна, перевершують всі інші. При цьому найбільшу питому міцність мають високоміцні вуглецеві волокна й органічні волокна. Борні та вуглецеві волокна мають високу питому міцність і високий питомий модуль пружності.

Найбільш перспективними на сьогодні вважаються вуглецеві волокна.

Таблиця 2.1 – Фізико-механічні характеристики волокон

Параметри	Скляні	Вуглецеві		Борні	Органічні	Сталеві
		високо-модульні	високоміцні			
Густина·10 ⁻³ , кг/м ³	2,5	1,95	1,76	2,5	1,45	7,8
Модуль пружності, ГПа	89	400	260	400	120	210
Границя міцності, ГПа (розтягання)	3,5	2,1	3,3	3,5	2,8	2,9
Питома жорсткість·10 ⁶ , м	3,6	20,3	14,7	16	8,3	2,7
Питома міцність·10 ³ , м	140	108	187	140	193	37

2.2. Матриці

У композиційних матеріалах армуючі елементи з'єднані ізотропною полімерною або металевою матрицею, яка забезпечує монолітність матеріалу, фіксує форму виробу, сприяє спільній роботі волокон і перерозподіляє навантаження при руйнуванні частини волокон. Раціональна конструкція композита (його мікроструктура) вимагає цілком визначених співвідношень між жорсткістю волокон і деформаціями у матриці.

У сучасних композиціях ці умови виконуються не повністю. Основним змістом технологічних і експлуатаційних показників є суміщення армуючих волокон із матрицею і кінцеве формоутворення виробу.

2.2.1. Термореактивні полімерні матриці. В'язучі матеріали цього типу утворюються зі смоли, отверджувача і розчинника, який інколи вводять для зниження в'язкості й поліпшення процесу просочення системи армуючих елементів. У початковому стані в'язуча композиція – це в'язка рідина, яка в результаті полімеризації при нормальній або підвищеній температурі затвердіває і переходить у нерозчинну і неплавку матрицю.

У виробництві конструкцій із композиційних матеріалів найбільш широке застосування отримали: полімерні, фенолформальдегідні, епоксидні, кремнійорганічні, поліамідні в'язучі.

П о л і м е р н і в'язучі твердіють при нормальній і підвищеній температурі, мають підвищену стійкість до води, мінеральних масел, неорганічних кислот, багатьох органічних розчинників, гарні діелектричні властивості. До переваг можна віднести малу в'язкість полімерів, що забезпечує простоту зв'язку з волокнами, здатність твердіти в широкому температурному інтервалі без застосування високого тиску.

Ф е н о л ф о р м а л ь д е г і д н і в'язучі твердіють при температурах 160 – 200°C і тиску порядку 30 – 40 МПа. Одержані при цьому полімери стабільні при довгому (декілька діб) нагріванні до 200 – 250°C. До недоліків можна віднести їх крихкість і велику об'ємну усадку під час твердіння.

Е п о к с и д н і в'язучі мають комплекс сприятливих властивостей, що визначили їх широке застосування у виробництві конструкцій з композитів. До позитивних властивостей можна віднести високі механічні адгезійні характеристики, технологічність. Твердіння смоли можна здійснити у широкому інтервалі температур, яке відбувається без виділення летких речовин і з малою об'ємною усадкою 1 – 5 %. Отверділі епоксидні в'язучі можуть експлуатуватися при температурі до 150°C.

Кремнійорганічні в'язучі характеризуються працездатністю у широкому інтервалі температур (від -200°C до $+350^{\circ}\text{C}$), стійкістю до дії органічних розчинників, мінеральних кислот. Недоліки: відносно низькі механічні властивості у порівнянні з іншими в'язучими, необхідність створення тисків при формуванні виробу.

Поліамідні в'язучі охолоджуються при високих температурах $300 - 350^{\circ}\text{C}$. Переваги: висока теплостійкість, високі механічні характеристики, стійкість до дії механічних засобів.

Для виготовлення конструкцій із композиційних матеріалів застосовуються такі технологічні процеси: метод укладки, вакуумне й автоклавне формування, метод намотки.

Деякі характеристики розглянутих в'язучих (матриць) наведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Фізико-механічні характеристики матриці

Параметри	Полі- мерні	Фенол- фор- маль- дегідні	Епо- ксидні	Кремній- органічні	<u>Полі- амідні</u>
Границя міцності, МПа: розтягання – стискання –	30-70 80-150	40-70 100-125	35-100 90-160	25-50 60-100	90-95 250- 280
Модуль пружності, ГПа	2,8-3,8	7-11	2,4-4,2	6,8-10	3,2-5,0
Густина · 10 ⁻³ , кг/м ³	1,2-1,35	1,2-1,3	1,2-1,3	1,35-1,4	1,4- 1,43
Теплостійкість, °С	50-80	140-180	130-150	250-280	250- 320
Відносне подовження, %	1-5	0,4-0,5	2-9	0,3-0,5	1-2,5
Загальна усадка, %	5-10	15-25	1-5	15-20	3-20

2.2.2. Термопластичні полімерні матриці. Застосовуються термопластичні матеріали, які при нагріванні розплавляються і під час подальшого процесу охолодження твердіють. Як термопластичні матриці застосовуються нейлон-6, поліфеніленсульфід, співполімер етилену, полісульфон, поліефір термопластичний.

2.2.3. Вуглецеві матриці. Композити на основі вуглецевої матриці одержують у результаті спеціальної обробки (карбонізації) систем, утворених із вуглецевих волокон і фенольних смол.

Затверділу смолу піддають піролізу в інертному середовищі або у вакуумі. Піроліз, як правило, супроводжується осіданням і збільшенням пористості, що викликає подальше ущільнення матриці. Процес здійснюють при відносно високій температурі, порядку 1000 – 1500°C. Основні переваги композитів із вуглецевою матрицею полягають у високій теплостійкості, стійкості до теплового удару й опромінення, інертності. Ці матеріали мають високі механічні характеристики. До недоліків відносяться складність технологічного процесу виробництва.

2.2.4. Металеві матриці. Останні роки суттєве поширення мають металеві композиційні матеріали, що утворюються високомодульними борними або вуглецевими волокнами і пластичною металевою матрицею. Ці матеріали жорсткіші й міцніші порівняно з композитами, які виготовляють на основі полімерних матриць.

Для утворення металевої матриці широко використовують сплави на основі алюмінію, що має густину 2700 кг/м³, модуль пружності 70 ГПа і температуру плавлення 700°C. До основних недоліків металевої матриці можна віднести складність технологічного процесу виробництва елементів конструкцій на її основі.

2.3. Структурні особливості й механічні властивості композитів

До типових структур композитів, утворених у результаті суміщення армуючих елементів і матриць, можна віднести: орієнтовані матеріали, армовані прямолінійними волокнами (рис. 2.1 а); композити, армовані тканинами (рис. 2.1 б); матеріали, хаотично армовані неперервними (рис. 2.1 в) або хаотично розміщеними волокнами (рис. 2.1 г); просторово армовані системи (рис. 2.1 д).

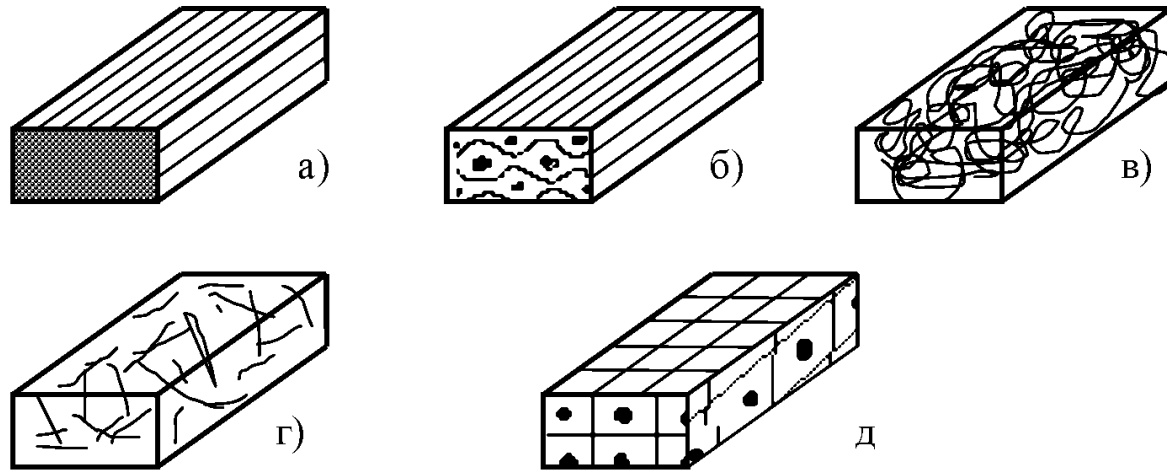


Рис. 2.1 – Структура армованих матеріалів

У конструкції перелічені композити мають два рівні неоднорідності:

- мікронеоднорідність, що пов'язана із наявністю двох фаз (волокно і матриця);
- макронеднорідність, що пов'язана із наявністю у матеріалі різним чином орієнтованих мікронеоднорідних шарів.

Під час проектування конструкції із композиційних матеріалів зазвичай враховують другий рівень неоднорідності матеріалу, тобто вважається, що він складається із сукупності квазіоднорідних шарів, властивості яких відомі.

Аналіз залежності цих властивостей від характеристик вихідних компонентів у композиції є предметом мікромеханіки композитів, основним завданням якої є визначення ефективних модулів пружності, тобто коефіцієнтів, що зв'язують усереднені за об'ємом напруження і деформації. До цього моменту розроблено велику кількість мікромоделей композитів, армованих прямолінійними волокнами, які можна розбити на такі групи:

1-ша група – моделі, що враховують тільки пружні властивості та об'ємний зміст компонентів;

2-га група – самоспряжені моделі, де композит подається у вигляді одного волокна, оточеного нескінченним середовищем, що володіє властивостями композита;

3-тя група – модель, що враховує форму і передбачуване регулярне розміщення волокон. Ці моделі базуються на спрощених гіпотезах напруженого стану матриці, точних розв'язках задач теорії пружності для ізотропного простору (матриці) з періодично розташованою системою пружних включень (волокон);

4-та група – енергетичні моделі, що базуються на апроксимації розподілення напружень і переміщень у матриці й використанні варіаційних принципів, які дозволяють отримати верхню і нижню границю для ефективних пружних сталей;

5-та група – статистичні моделі, що ґрунтуються на припущенні випадкового розподілення волокон і розв'язанні задач теорії пружності мікронеоднорідних середовищ, структура яких описується кореляційними функціями різних порядків.

Існують моделі для композитів, армованих конструкційними тканинами, де додатково враховується викривлення волокон, пов'язане із переплетенням ниток основи й утку.

У зв'язку з цим співвідношення мікромеханіки загалом отримані для ідеалізованих моделей, що приблизно відображають реальну структуру матеріалу, і тому вони в основному призначені для орієнтовних оцінок і якісного аналізу впливу мікроструктурних параметрів на властивості композитів.

Для задач розрахунку конструкцій із композиційних матеріалів є більш виправданим експериментально теоретичний підхід, згідно з яким механічні характеристики (пружні сталі, границі міцності) композитів із типовою структурою визначають за допомогою відповідних випробувань спеціальних зразків.

Розглянемо особливості структури і властивості композитів із типовими схемами армування.

2.3.1. Орієнтовані матеріали, армовані неперервними волокнами.

Переваги і високі механічні характеристики композитів найбільш істотно реалізуються в орієнтованих матеріалах, армованих паралельними волокнами, тобто в так званих односпрямованих шарах, або моношарах (рис. 2.2 а). Шляхом укладання таких шарів у різних напрямках утворюються шаруваті композити (рис. 2.2 б).

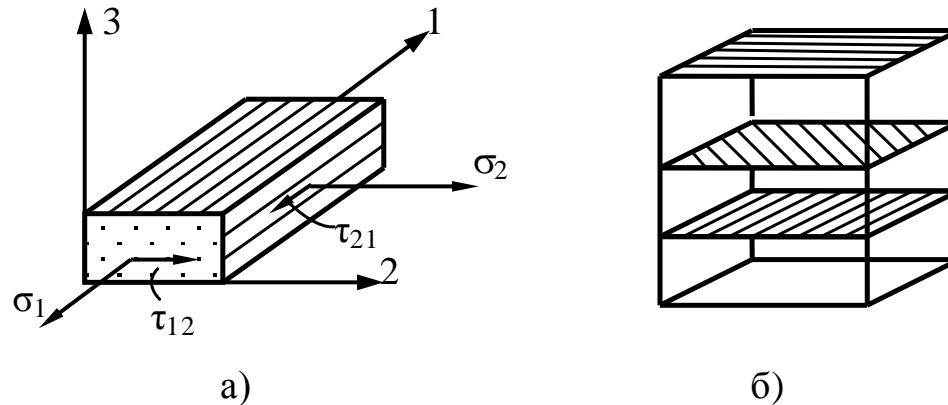


Рис. 2.2 – Багатошаровий композит із односпрямованих шарів

Незважаючи на велику різноманітність структур багатошарових композитів, що визначаються кількістю шарів, товщиною шару і їх взаємною орієнтацією, властивості таких композитів в основному визначаються властивостями односпрямованого шару. Орієнтовні характеристики властивостей односпрямованих композитів наведено у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Фізико-механічні характеристики односпрямованих шарів

Параметри	Скло-пластик	Вугле-пластик	Органо-пластик	Боро-пластик	Вуглець-вуглець	Вуглець-алюміній	Боро-алюміній
Густина $\cdot 10^{-3}$, кг/м ³	2,1	1,5	1,38	2,0	1,9	2,2	2,64
Границя міцності, ГПа: при розтяганні вздовж волокон	1,75	1,1	1,8	1,6	1,34	1,1	1,4
при розтяганні впоперек волокон	0,034	0,03	0,03	0,065	0,007	0,045	0,14
при стисканні вздовж волокон	0,65	0,45	0,28	2,4	–	0,6	2,0
при зсуві	0,048	0,03	0,04	0,1	0,03	0,045	0,08
Питома міцність при розтяганні вздовж волокон $\cdot 10^{-3}$, м.	83	73	130	80	18	50	53
Модуль пружності, ГПа: вздовж волокон	57	180	72	210	170	200	230
впоперек волокон	9	6,2	4,9	19	19	–	140
Модуль зсуву, ГПа	5,2	5	2	6,2	9	–	63
Питома жорсткість $\cdot 10^{-6}$, м	2,7	12	5,3	10,5	8,9	9,1	8,8

Із табл. 2.3 випливає, що за поздовжніми характеристиками композити значно перевершують металеві сплави, а за поперечними – істотно їм поступаються. При поперечному стисканні, особливо у площині армування, можуть спостерігатися нелінійні залежності між напруженнями і деформаціями. Ця властивість є винятком, оскільки діаграми деформації односпрямованих матеріалів при розтяганні й стисканні вздовж волокон у першому наближенні можна вважати лінійними практично до руйнування. Однак жорсткості у поперечному напрямі й при зсуві таких матеріалів значно менші за поздовжню і тому відмічена нелінійність у шаруватому пакеті, як правило, має незначний вплив. Таким чином, волокнисті композити задовільно описуються моделлю пружного тіла.

Міцність односпрямованого шару (рис. 2а) визначається границями міцності при розтяганні й стисканні вздовж і впоперек волокон відповідно, границею міцності при зсуві у площині шару.

Причина вичерпання несучої здатності матеріалу при розтяганні в поздовжньому напрямі полягає в розриві волокон, а при стисканні – у втраті стійкості волокон й утворенні тріщин паралельно волокнам.

Руйнування при розтяганні поперек волокон і при зсуві пов'язане, як правило, із руйнуванням матриці (порушення когезійної міцності) або із відшаруванням матриці від волокна (порушення адгезійної міцності). Руйнування при стисканні поперек волокон відбувається внаслідок сколу матеріалу під кутом до напрямку руйнування.

Руйнування композитів, навіть у випадках простих видів навантаження, є достатньо складним процесом, теоретичний опис якого пов'язаний із великими труднощами, тому визначення границь міцності здійснюється за допомогою експериментальних методів. Для зазначених вище випробувань застосовуються, як правило, плоскі зразки, зразки кільцевої форми і трубчасті профілі.

Якщо в точці композиційного матеріалу спостерігається складний напружений стан, необхідно застосувати найбільш прийнятний критерій міцності з метою оцінки ймовірності руйнування матеріалу в цій точці. Існуючі критерії міцності носять, як правило, феноменологічний характер, тобто є аналітичною апроксимацією експериментальних результатів. У зв'язку з тим, що така апроксимація може здійснюватися неоднозначно, а ступінь її відповідності експериментальним результатам може мати значний діапазон, мають місце багато таких критеріїв, які будуть розглянуті в подальшому.

2.3.2. Матеріали, армовані тканиною. Перевагою таких матеріалів є висока технологічність, особливо під час виготовлення великих виробів.

2.3.3. Композити із хаотичним армуванням. Утворюються із хаотично розміщених неорієнтованих, неперервних або коротких волокон, з'єднаних за допомогою полімерної матриці. Виготовлення виробів здійснюється методом пресування, напилювання. Вироби різного роду: панелі, корпуси човнів, предмети побуту.

2.3.4. Композити із просторовим армуванням. Використовуються багат шарові тканини просторового плетіння із полімерною матрицею. Використання таких композитів дозволяє суттєво (у 2-2,5 рази) підвищити міцність виробу на зсув і поперечне розтягання або стискання порівняно із багат шаровими армованими матеріалами.

2.4. Гібридні композити

Одним з найбільш перспективних напрямків у розвитку композиційних матеріалів є створення гібридних КМ. Так називають матеріали, які містять три чи більше компонентів. Поліматричними (гетеро-матричними) називають матеріали, що складаються з двох або більше матричних композитів, відокремлених один від одного поверхнями розподілу, причому армуючі волокна можуть зберігати свою неперервність на межі розподілу матриць.

Поліармовані КМ складаються з одного матричного матеріалу з розподіленими в ньому армуючими компонентами різної геометрії або природи. З урахуванням геометрії та природи наповнювачів можливі гібридні КМ з різноманітними сполученнями армуючих компонентів, наприклад, КМ типу 0+0, 0+1, 1+1, 0+2, 1+2, 0+1+2 і т.д. (де 0,1,2 - позначення геометричної розмірності наповнювача: нульмірні, одномірні, двохмірні). Найбільше застосування в наш час знаходять гібридні КМ типу 0+1, 1+1 та 1+2. Ці матеріали дозволяють вирішити ряд проблем, які не можуть бути вирішені при використанні моноармованих композитів. Тому для регулювання механічних властивостей КМ, а також для оптимізації конструкції виробу доцільно використовувати принцип поліармування, сполучаючи в матеріалі волокна різної природи, волокна з фольгами, стрічками та дисперсними частинками.

Гібридні КМ типу 0+1. За взаємним розміщенням наповнювачів цей тип гібридних КМ можна поділити на дві групи: з однорідним розподілом наповнювачів і з неоднорідним.

Гібриди з однорідним розподілом волокон і дисперсних частинок використовують звичайно, якщо необхідно дещо підвищити міцність матричного матеріалу, покращити його технологічні властивості та знизити вартість. Не менш важливе значення мають неоднорідні гібридні КМ типу 0+1, в яких армуючі волокна розміщені у зовнішніх шарах матеріалу, а внутрішні шари містять нульмірні наповнювачі, наприклад, порожнисті мікросфери. В цьому випадку зовнішні шари з більш високими пружно-міцнісними характеристиками сприймають основне навантаження, а менш навантажені внутрішні шари забезпечують зниження маси при збереженні жорсткості конструкції.

Гібридні КМ типу 1+1. Цей тип армування (поліволокнисті КМ) дає змогу в найбільшій мірі спроектувати КМ з оптимальним комплексом механічних характеристик. В цьому випадку можна знайти сполучення характеристик, яке не може бути забезпечене у моноармованих КМ.

Поліволокнисті КМ розділяють на три групи за схемою армування:

- з одновісною схемою армування (волокна розміщені в матриці паралельними рядами) (рис. 2.3, 2.4);

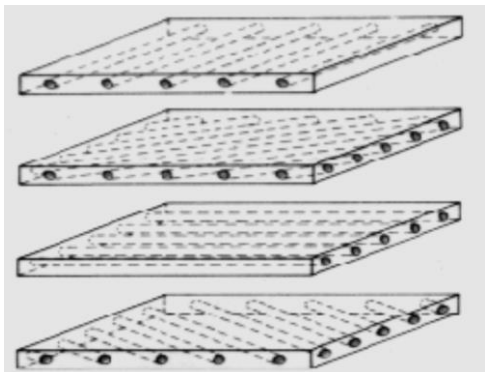


Рис. 2.3 - Неперервні волокна

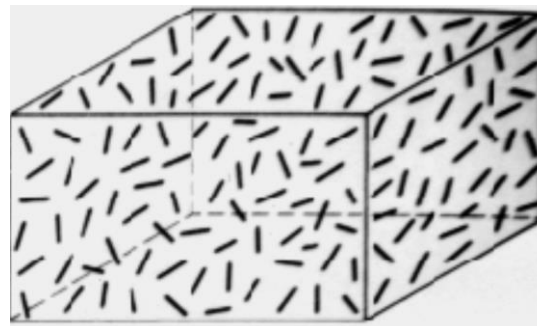


Рис.2.4 - Короткі волокна

- з площинною схемою армування (волокна утворюють у матриці паралельні шари) (Рис. 2.5, 2.6);

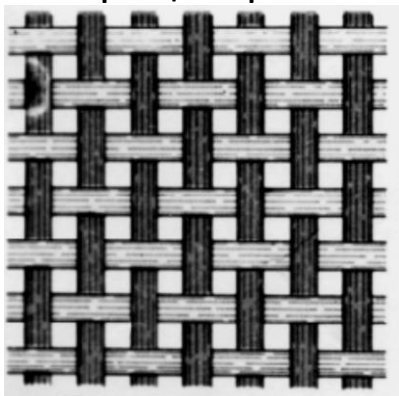


Рис. 2.5 – Двохвісна тканина основа

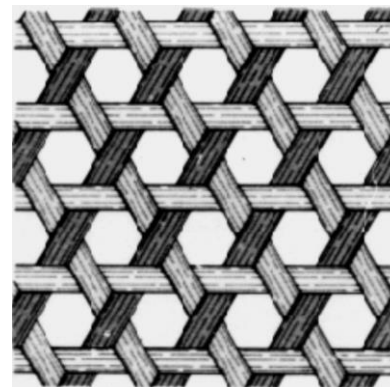


Рис 2.6 -Трьохвісна тканина основа

- з об'ємною схемою армування (рис. 2,7, 2.8).

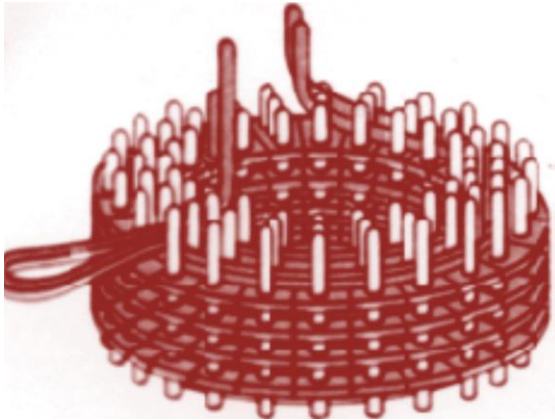


Рис. 2.7 - Трьохмірна циліндрична конструкція

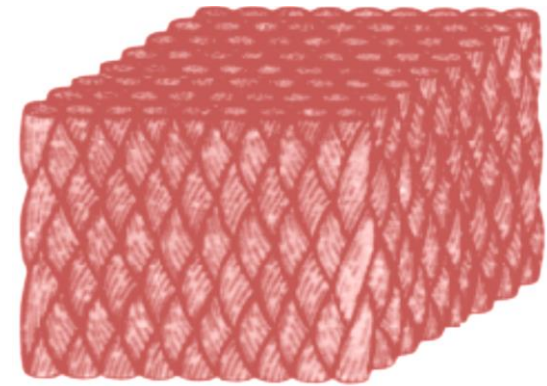


Рис. 2.8 - Трьохмірне плетіння

Гібридні КМ 1+2. Найбільш типовими прикладами такого типу матеріалів є високоміцні волокнисті КМ, додатково армовані металічними фольгами. Таке армування забезпечує підвищену корозійну та ерозійну стійкість, підвищення пружно-міцнісних властивостей у поперечному напрямку, покращення тепло- та електропровідність, зокрема, забезпечує захист виробу від поразки блискавкою.

2.5. Нанокompозити

Нанокompозити можна визначити як гетерогенні, зазвичай тверді матеріали, в яких розмір часток хоча б однієї з фаз або розмір прошарку між частками менше 100 нанометрів.

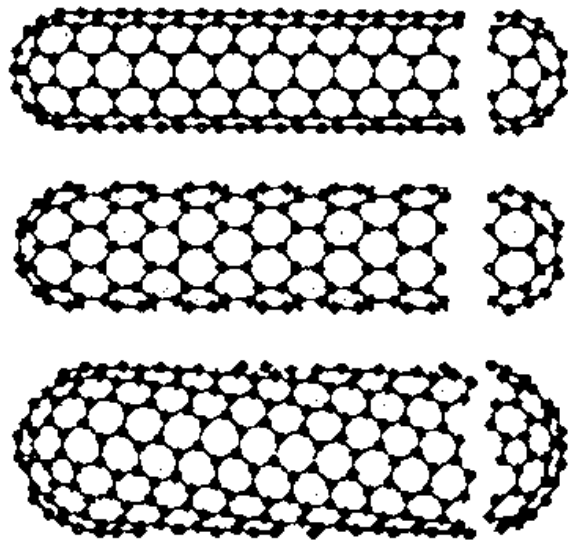
У широкому сенсі в нанокompозити можуть бути включені пористі тіла, колоїди, гелі та сополімери, але частіше нанокompозити - гетерогенне тверде тіло, що складається з об'ємної матриці і нанорозмірної дисперсної фази, яка відрізняється від об'ємної фази за своїми властивостями. Ця відмінність у властивостях є наслідком відмінності фаз в їх структурі і хімічному складі.

Композити, в яких матрицею служить полімерний матеріал, є одним з найбільш численних і різноманітних видів матеріалів. У таких композитах (перехід від мікророзмірних наповнювачів до нанорозмірних істотно змінює цілу низку експлуатаційних і технологічних властивостей, пов'язаних з локальними хімічними взаємодіями, включаючи: швидкість затвердіння, мобільність полімерних ланцюгів, деформованість полімерних ланцюгів, упорядкованість структури (ступінь кристалізації полімерної матриці).

Застосування нанокомпозитів у різних областях дає значний економічний ефект. Наприклад, їх використання при виробництві космічної та авіаційної техніки дозволяє заощадити від 5 до 30% ваги літального апарату. А зниження ваги, наприклад, штучного супутника на навколоземній орбіті на 1 кг призводить до економії 1000\$.

2.5.1. Наповнювачі для нанокомпозитів

Найбільш широко використовуються наступні види нанорозмірних наповнювачів:



- вуглецеві нанотрубки і нановолокна, включаючи прості, подвійні і багатостінкові нанотрубки; прості і графітізовані нановолокна і віскерси, нанотрубки з прищепленими шарами і функціональними групами (рис. 2.9.);

Рис. 2.9 - Вуглецеві нанотрубки

- неорганічні нанотрубки складу: B_4C , BN , LaF_3 , SiC , TiS_2 , MoS_2 , ZrS_2 . Їх довжина від 3 до 30 мкм, зовнішній діаметр 25-100 нм, внутрішній діаметр 10-80 нм (рис. 2.10);

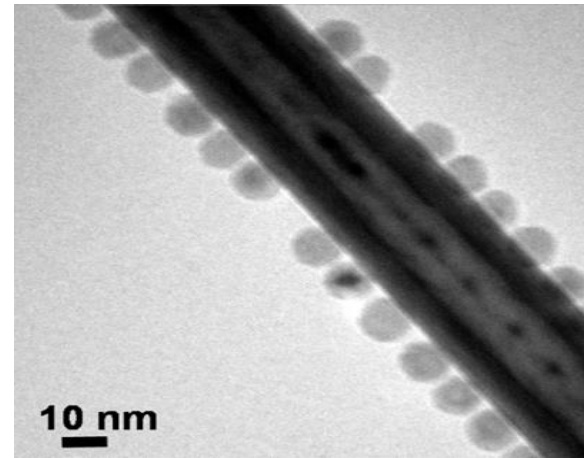


Рис. 2.10 - Неорганічні нанотрубки

- короткі нановолокна і наностержні - металеві (Ag , Bi , In , Si), напівпровідникові (GaP , InP), нітрідні (Si_3N_4) і оксидні (TiO_2 , ZnO) (рис. 2.11);

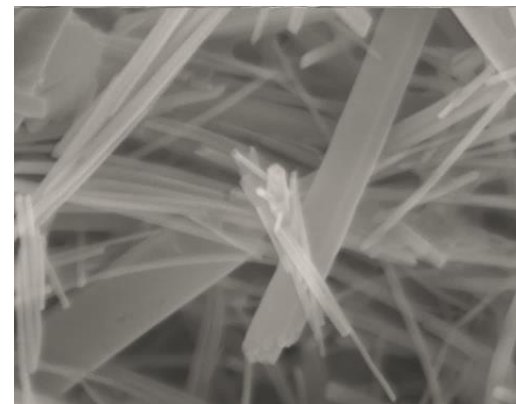


Рис. 2.11 - Наностержні оксида цинка

- наночастинки сферичної або нерегулярної форми. Частиці металів і сплавів (Ag, Au, Pt, Pd, Al, Cr, Cu, W, Mo, Ni, Fe, Cu-Zn, Fe-Ni, W-Cu, W-Mn-Al, W-Ni-Cu, W-Ni-Fe), неметалів (B, Si), частки наноалмазів і графіта (C), нітриду (AlN, BN, CrN, Si₃N₄, TiN, ZrN), карбідів (B₄C, Mo₂C, SiC, TiC), боридов (TiB₂, NbB₂), різних простих і складних оксидів. Розмір часток варіюється в межах від 5-30 до 400-600 нм (рис. 2.12);

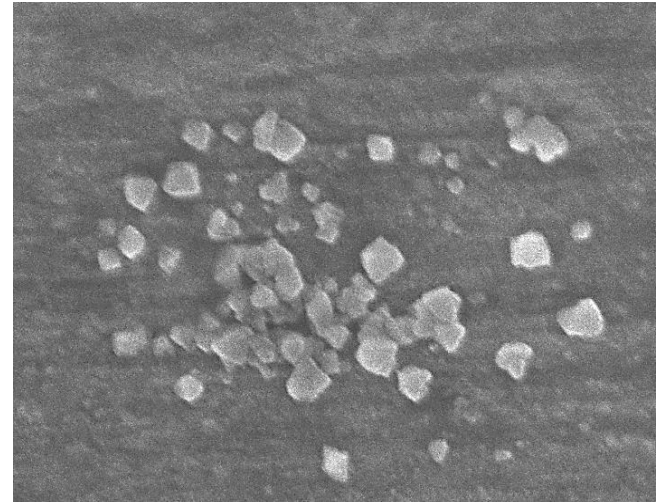


Рис. 2.12 - Наночастинки оксида цинка

- шаруваті сполуки (глини, гідроксиди).

2.5.2. Нанокompозити в стоматології

Основою органічної матриці є мономер, молекули яких містять фрагменти епоксидної смоли і дві метакрилатні групи. Метакрилова кислота та її похідні легко вступають в реакції полімеризації (наприклад, з утворенням поліметилметакрилата). Перший мономер такого типу був запатентований ще в 1959 році (мономер Bis-GMA) і з тих пір Bis-GMA і його похідні входять до складу практично всіх сучасних стоматологічних композитів і адгезивів (рис. 2.13). Для нього характерна полімеризаційна усадка близько 6%.

Наповнювачі - аморфний кремнезем, кварц, барієве скло, стронцієве скло, силікат цирконію, силікат титану, оксиди і солі інших металів, полімерні частинки.

Від розміру частинок наповнювача залежать стійкість до стирання, стабільність кольору, ступінь наповнення композиту, міцність, ступінь теплового розширення і полімеризаційної усадки.



Рис. 2.13 – Стоматологічний композит

2.5.3. Вогнестійкі полімерні нанокомпозити

На горючість наповнених полімерних матеріалів впливає не тільки хімічна природа наповнювача, але і його дисперсність, тому з розвитком нанотехнології широке застосування знайшли наноструктуровані антипірени і сповільнювачі горіння для полімерних матеріалів.

Матриця - будь який горючий полімерний матеріал (поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид, епоксидні смоли і т.п).

Наповнювач (антипірен) – наноструктуровані з'єднання металів:

- наноогліни, в тому числі органоогліни і синтетичні глини, метали та оксиди та гідроксиди металів;
- вуглецеві нанотрубки та інші вуглецеві матеріали, наночастинки карбонату кальцію;
- шаруваті гідроксиди.

2.5.4. Бетон, що самоочищується

Застосування фотокаталітичних композиційних покриттів з використанням наночастинок TiO_2 для створення поверхонь, що самоочищуються, дозволяє підтримувати естетичний вигляд побудованих об'єктів незмінним протягом тривалого часу (рис 2.14).



Рис. 2.14 – Храм Dives in Misericordia у Римі.

Фотокаталізатори на основі TiO_2 в цементних матеріалах здатні знижувати рівень міських забруднень. Серед забруднювачів, які можуть бути знешкоджені можна виділити NH_3 , CO , вуглеводні, наприклад, бензол і толуол, альдегіди і хлорвміщуючі ароматичні з'єднання.

Наприклад, оксиди азоту розкладаються до азотної кислоти, яка в свою чергу реагує з бетоном утворюючи нітрат кальцію, який може бути вимитий водою в ґрунт і використаний рослинами.

3. ВЛАСТИВОСТІ ВОЛОКНИСТИХ КОМПОЗИТІВ

Композиційні матеріали, як правило, анізотропні, що визначає особливу форму зв'язку напружень та деформацій. Для тонкостінних багат шарових конструкцій типовими є плоский напружений стан та згин. Тому практично важливим є перехід від загальних співвідношень для лінійно пружного анізотропного тіла до конкретних форм їх запису для цих напружених станів.

3.1. Ефективні модулі пружності односпрямованого матеріалу

3.1.1. Визначення властивостей композитів методами мікромеханіки

Найбільш ефективними композитами щодо питомих характеристик є орієнтовані матеріали, утворені з безперервних волокон та полімерної або металевої матриці. Такі композити мають два рівні неоднорідності: мікронеоднорідність, пов'язану з наявністю в матеріалі двох фаз (волокон і матриці), і макронеоднорідність, пов'язану з наявністю односпрямованих шарів (або моношарів).

При розрахунку проектування конструкцій зазвичай враховується лише другий рівень неоднорідності матеріалу, тобто. вважається, що він складається з сукупності квазіоднорідних елементарних шарів, властивості яких відомі. Визначення цих властивостей є предметом мікромеханіки композитів. Основне завдання полягає у обчисленні ефективних модулів пружності, 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 в матеріалі.

Розглянемо односпрямований матеріал (Рис. 3.1) та введемо систему координат (1,2). Індекси 1 і 2 надалі будуть визначати величини, що відносяться до навантаження уздовж та поперек волокон відповідно.

Припустимо, що на виділений елемент шару діють деякі середні рівномірно розподілені з його бокових граней напруги, σ_{11} , σ_{22} та σ_{12} які викликають середні деформації ε_{11} , ε_{22} та γ_{12} . Тоді закон Гука для даного плосконапруженого стану, що зв'язує середні деформації та напруги, можна записати у вигляді:

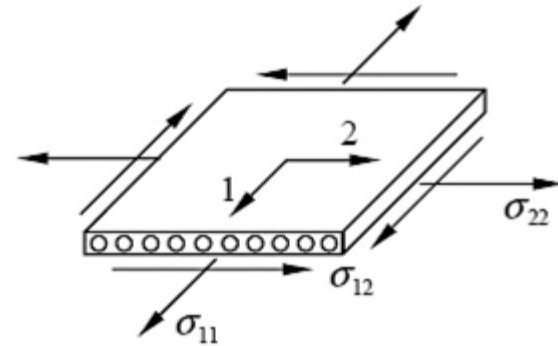


Рис. 3.1—Односпрямований матеріал

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E_1} - \mu_{21} \frac{\sigma_{22}}{E_2}; \varepsilon_{22} = \frac{\sigma_{22}}{E_2} - \mu_{12} \frac{\sigma_{11}}{E_1}; \gamma_{12} = \frac{\sigma_{12}}{G_{12}}, \quad (3.1)$$

де E_1 , E_2 - ефективні (осереднені) модулі пружності уздовж і поперек волокон відповідно; G_{12} – ефективний модуль зсуву у площині шару; μ_{12} , μ_{21} – ефективні коефіцієнти Пуасона (перший індекс вказує на напрямок діючого навантаження, а другий – напрямок виникаючої при цьому поперечної деформації).

Матеріал, для якого закон Гука має таку форму, називається ортотропним або трансерсально-ізотропним. У формули входять п'ять величин $E_1, E_2, \mu_{12}, \mu_{21}, G_{12}$, що характеризують пружні властивості матеріалу. Однак в силу симетрії властивостей:

$$\mu_{21}E_1 = \mu_{12}E_2. \quad (3.2)$$

Всього є чотири незалежні постійні шари, наприклад, $E_1, E_2, G_{12}, \mu_{12}$. Задача мікромеханіки полягає в тому, щоб зв'язати їх із властивостями волокна та матриці.

3.1.2. Найпростіша мікромодель кополиту

Основною характеристикою односпрямованого композиту є відносний об'ємний вміст (або частка) волокон ψ . Цю величину називають також коефіцієнтом армування. Він являє собою відношення об'єму, зайнятого волокнами, до обсягу матеріалу і теоретично може змінюватися від 0 (чисте сполучення) до 0,9 (найбільш щільна упаковка круглих волокон). Відносний об'ємний вміст матриці, очевидно, дорівнює $1 - \psi$.

Розглянута нижче модель враховує тільки об'ємний вміст компонентів, ігнорує форму і розташування волокон. Вона складається з двох смуг, що мають властивості волокна і матриці (Рис. 3.2). При цьому об'ємна частка волокон у модельному матеріалі дорівнює їх об'ємній частині у реальному композиті. Вважатимемо, що волокна і матриця лінійно пружні, а їх зв'язок ідеальний.

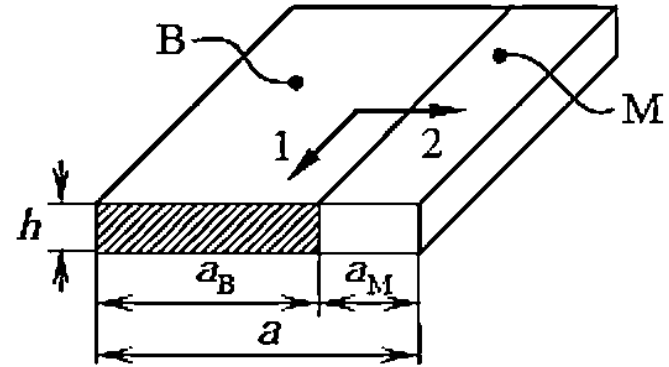


Рис. 3.2 – Найпростіша мікромодель

Для цієї моделі:

$$\psi = \frac{a_B}{a}; 1 - \psi = \frac{a_M}{a}.$$

Нехтуючи для простоти ефектом Пуассона в волокнах і матриці, розглянемо розтяг вздовж волокон. При цьому середні напруження σ_{11} складаються з напружень в волокнах σ_B і матриці σ_M :

$$\sigma_{11} ah = \sigma_B a_B h + \sigma_M a_M h.$$

Або після ділення на ah

$$\sigma_{11} = \sigma_B \psi + \sigma_M (1 - \psi). \quad (3.3)$$

Напруження у волокнах і матриці пов'язані з деформаціями законом Гука:

$$\sigma_B = E_B \varepsilon_B; \sigma_M = E_M \varepsilon_M.$$

Причому, при розтязі вздовж волокон:

$$\varepsilon_B = \varepsilon_M = \varepsilon_{11}.$$

Таким чином, з (3.3) маємо:

$$\sigma_{11} = (E_B \psi + E_M (1 - \psi)) \varepsilon_{11}.$$

Порівнюючи це співвідношення з першим рівнянням (3.1) при $\mu_{21} = 0$, отримаємо:

$$E_1 = E_B \psi + E_M (1 - \psi). \quad (3.4)$$

Ця формула визначає поздовжній модуль пружності композиту і відповідає закону механічної суміші, згідно з яким вклад компонента пропорційний його об'ємній частці. Оскільки $E_B \gg E_M$, то:

$$E_1 \approx E_B \psi,$$

тобто поздовжній модуль пружності композиційного матеріалу визначається модулем пружності волокон та їх відносним вмістом у матеріалі.

Тепер розглянемо розтяг поперек волокон середніми напруженнями σ_{22} (трансверсальне розтягування). При цьому деформація у поперечному напрямку складається з деформацій волокон і матриці:

$$\varepsilon_{22}a = \varepsilon_B a_B + \varepsilon_M a_M.$$

Звідси:

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_B \psi + \varepsilon_M (1 - \psi).$$

Окремо для волокон і матриці можна записати:

$$\varepsilon_B = \frac{\sigma_B}{E_B} \quad \text{та} \quad \varepsilon_M = \frac{\sigma_M}{E_M}.$$

Згідно очевидній умові рівноваги:

$$\sigma_B = \sigma_M = \sigma_{22}.$$

Тоді :

$$\varepsilon_{22} = \left(\frac{\psi}{E_B} + \frac{1 - \psi}{E_M} \right) \sigma_{22}.$$

Порівнюючи цю формулу з другою рівністю (3.1) при $\mu_{12} = 0$, знаходимо:

$$\frac{1}{E_2} = \frac{\psi}{E_B} + \frac{1 - \psi}{E_M} \quad \text{або} \quad E_2 = \frac{E_B E_M}{\psi E_M + (1 - \psi) E_B}. \quad (3.5)$$

Оскільки $E_B \gg E_M$, першим доданком можна знехтувати, тобто:

$$E_2 \approx \frac{E_M}{1 - \psi}.$$

Таким чином, поперечний модуль пружності матеріалу більше модуля пружності матриці.

Аналогічна залежність має місце і для середнього модуля зсуву:

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{\psi}{G_B} + \frac{1-\psi}{G_M} \quad \text{або} \quad G_{12} = \frac{G_B G_M}{\psi G_M + (1-\psi) G_B}, \quad (3.6)$$

де G_B і G_M – модулі зсуву волокон і матриці.

Більш повний аналіз розглянутої моделі з урахуванням коефіцієнтів Пуасона для волокон і матриці (μ_B, μ_M) дозволяє знайти μ_{12} :

$$\mu_{12} = \mu_B \psi + \mu_M (1 - \psi) \quad (3.7)$$

та уточнити вираз для E_2 :

$$\frac{1}{E_2} = \frac{\psi}{E_B} + \frac{1 - \psi}{E_M} + \frac{(\mu_B \psi + \mu_M (1 - \psi))^2}{E_B \psi + E_M (1 - \psi)}.$$

Відзначимо, що μ_{21} визначається з умов симетрії:

$$\mu_{21} = \mu_{12} \frac{E_2}{E_1}.$$

Для більшості односпрямованих матеріалів $E_1 \gg E_2$, тому, як правило, $\mu_{21} \ll \mu_{12}$.

3.2. Коефіцієнти лінійного температурного розширення

Більшість матеріалів змінюють свої лінійні розміри при нагріванні та охолодженні. Цю зміну можна оцінити за допомогою так званого лінійного коефіцієнта теплового розширення (ЛКТР), який дорівнює відносному подовженню тіла при зміні температури на один градус.

Лінійні коефіцієнти теплового розширення композиційного матеріалу є дуже важливими характеристиками через наявність волокон з позитивним або негативним ЛКТР та матричних матеріалів лише з позитивним ЛКТР. Цей факт призводить до додаткових деформацій і в деяких випадках до додаткових напружень.

Для аналізу температурної деформації зазвичай використовується припущення про ізотропне ЛКТР волоконного та матричного матеріалів.

Розглянемо деформацію елемента композиційного матеріалу при його нагріванні на ΔT градусів.

Якщо зв'язку між волокном і матрицею немає (відбувається так звана вільна деформація), компоненти деформуються вільно вздовж осі 1 на $\alpha_B\Delta T$ і $\alpha_M\Delta T$.

Але волокно та матриця деформуються разом на $\alpha_1\Delta T$. Це призводить до самоврівноваженого температурного стану в елементі композитного матеріалу (рис. 3.3). Ці напруження можна визначити за формулами:

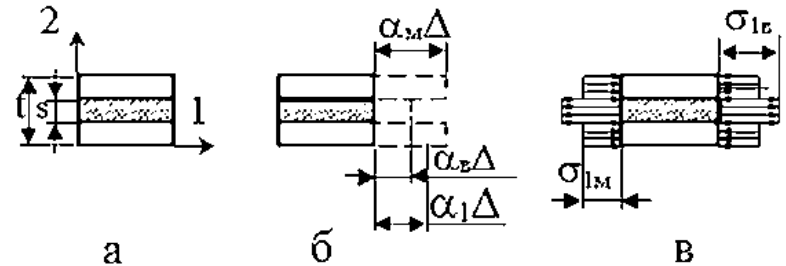


Рис. 3.3

$$\begin{aligned} \sigma_{1B} &= E_B\Delta T(\alpha_1 - \alpha_B), \\ \sigma_{1M} &= E_M\Delta T(\alpha_1 - \alpha_M), \end{aligned} \tag{3.8}$$

де α – коефіцієнт лінійного температурного розширення.

Рівняння рівноваги в проекції на вісь 1 має наступний вигляд за відсутністю зовнішніх сил:

$$\sigma_{1B}\psi + \sigma_{1M}(1 - \psi) = 0. \quad (3.9)$$

З урахуванням (3.8) та перетворень можна знайти:

$$\alpha_1 = \frac{E_B\alpha_B\psi + E_M\alpha_M(1 - \psi)}{E_B\psi + E_M(1 - \psi)}. \quad (3.10)$$

Температурне подовження складових компонентів та композиту вздовж осі 2 дорівнює:

$$\Delta_B = \alpha_B\Delta T \cdot S; \Delta_M = \alpha_M\Delta T(t - s); \Delta_2 = \Delta T[\alpha_B S + \alpha_M(t - s)].$$

Температурна деформація вздовж осі 2 визначається за формулою:

$$\varepsilon_2^* = \frac{\Delta_2}{t} = \Delta T[(\alpha_B\psi + \alpha_M(1 - \psi))].$$

Крім цієї деформації волокна та матриця отримують додаткову деформацію Пуасона від напруги σ_{1B} і σ_{1M} (рис. 3.3), що призводять до наступної сумарної деформації:

$$\varepsilon_2^{**} = -\mu_B\Delta T(\alpha_1 - \alpha_B)\psi - \mu_M\Delta T(\alpha_1 - \alpha_M)(1 - \psi).$$

Тоді повна деформація вздовж осі 2 дорівнюватиме:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_2^* + \varepsilon_2^{**} = \Delta T[\alpha_B \psi - \alpha_M(1 - \psi)] - \Delta T[\mu_B \psi(\alpha_1 - \alpha_B) + \mu_M(1 - \psi)(\alpha_1 - \alpha_M)].$$

Враховуючи (3.10) та що $\varepsilon_2 = \alpha_2 \Delta T$, отримаємо:

$$\alpha_2 = \frac{1}{E_B \psi + E_M(1 - \psi)} [(\alpha_B \psi + \alpha_M(1 - \psi))(E_B \psi + E_M(1 - \psi)) + \psi(1 - \psi)(\alpha_M - \alpha_B)(E_B \mu_M - E_M \mu_B)]. \quad (3.11)$$

Отримані формули дозволяють досить точно визначати значення ЛКТР на етапі вибору композиційного матеріалу.

3.3. Приклади визначення фізико-механічних властивостей односпрямованих шарів композиційного матеріалу

В прикладах нумерація формул відповідає нумерації, наведеної вище.

Приклад 1. Для односпрямованого композиційного матеріалу заданої структури (матеріал волокна – скло, $E_B = 90000$ МПа, $\mu_B = 0,28$; матеріал матриці – епоксидна смола, $E_M = 4000$ МПа, $\mu_M = 0,3$, $\alpha_C = 6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$, $\alpha_M = 60 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$, визначити його фізико-механічні характеристики. Об'ємна місткість волокон $\psi = 0,62$.

Розв'язання

$$\text{Модуль пружності вздовж волокон: } E_1 = E_B \psi + E_M (1 - \psi). \quad (3.4)$$

$$E_{1c} = 90000 \cdot 0,62 + 4000(1 - 0,62) = 57320 \text{ МПа.}$$

$$\text{Модуль пружності поперек волокон: } E_2 = \frac{E_B \cdot E_M}{\psi \cdot E_M + (1 - \psi) \cdot E_B}. \quad (3.5)$$

$$E_{2c} = \frac{90000 \cdot 4000}{4000 \cdot 0,62 + 90000(1 - 0,62)} = 9814,6 \text{ МПа.}$$

$$\text{Модуль зсуву склопластику: } G_{12} = \frac{G_B \cdot G_M}{\psi \cdot G_M + (1 - \psi) \cdot G_B}, \quad (3.6)$$

Модулі зсуву для волокна та матриці: $G_B = \frac{E_B}{2 \cdot (1 + \mu_B)}$, $G_M = \frac{E_M}{2 \cdot (1 + \mu_M)}$.

$$G_C = \frac{90000}{2 \cdot (1 + 0,28)} = 35156 \text{ МПа}, G_M = \frac{4000}{2 \cdot (1 + 0,3)} = 1538 \text{ МПа}.$$

$$G_{12} = \frac{35156 \cdot 1538}{1538 \cdot 0,62 + 35156(1 - 0,62)} = 3778,8 \text{ МПа}.$$

Коефіцієнт Пуасона при навантаженні вздовж осі 1:

$$\mu_{12} = \mu_B \cdot \psi + \mu_M(1 - \psi). \quad (3.7)$$

$$\mu_{12C} = 0,28 \cdot 0,62 + 0,3(1 - 0,62) = 0,288.$$

Коефіцієнт Пуасона при навантаженні вздовж осі 2:

$$\mu_{21} = \frac{E_B E_M (\mu_B \psi + \mu_M (1 - \psi))}{E_B \cdot \psi + E_M (1 - \psi) (E_M \psi + E_B (1 - \psi))}.$$

$$\mu_{21C} = \frac{90000 \cdot 4000 (0,28 \cdot 0,62 + 0,3(1 - 0,62))}{90000 \cdot 0,62 + 4000(1 - 0,62)(4000 \cdot 0,62 + 90000(1 - 0,62))} = 0,0492.$$

Перевіряємо виконання рівняння пружного потенціалу:

$$\mu_{21}E_1 = \mu_{12}E_2 .$$

$$9814,6 \cdot 0,288 = 57320 \cdot 0,0493, \quad 2822,7 \approx 2822,7.$$

Коефіцієнт лінійного температурного розширення вздовж волокон:

$$\alpha_1 = \frac{E_B \cdot \alpha_B \psi + E_M \cdot \alpha_M (1 - \psi)}{E_B \psi + E_M (1 - \psi)} . \quad (3.10)$$

$$\alpha_{1C} = \frac{6 \cdot 90000 \cdot 0,62 + 60 \cdot 4000(1 - 0,62)}{90000 \cdot 0,62 + 4000(1 - 0,62)} \cdot 10^{-6} = 7,43 \cdot 10^{-6} K^{-1}.$$

Коефіцієнт лінійного температурного розширення поперек волокон (нехтуючи другим доданком у (3.11)):

$$\alpha_2 = \alpha_B \psi + \alpha_M (1 - \psi).$$

$$\alpha_{2C} = (6 \cdot 0,62 + 60(1 - 0,62)) \cdot 10^{-6} = 26,5 \cdot 10^{-6} K^{-1} .$$

Приклад 2.

Для односпрямованого композиційного матеріалу заданої структури (матеріал волокна – вуглець, $E_B = 3 \cdot 10^5$ МПа, $\mu_B = 0,28$; матеріал матриці – епоксидна смола, $E_M = 4000$ МПа, $\mu_M = 0,22$, $\alpha_B = -3 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $\alpha_M = 60 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$), визначити його фізико-механічні характеристики. Об'ємна місткість волокон $\psi = 0,62$. Порівняти результати з характеристиками, отриманими у прикладі 1.

Розв'язання

Модуль пружності вздовж волокон: $E_1 = E_B \psi + E_M(1 - \psi)$. (3.4)

$$E_{1B} = 300000 \cdot 0,62 + 4000(1 - 0,62) = 187520 \text{ МПа.}$$

Модуль пружності поперек волокон: $E_2 = \frac{E_B \cdot E_M}{\psi \cdot E_M + (1 - \psi) \cdot E_B}$. (3.5)

$$E_{2B} = \frac{300000 \cdot 4000}{4000 \cdot 0,62 + 300000(1 - 0,62)} = 10302,2 \text{ МПа.}$$

Модуль зсуву вуглепластику: $G_{12} = \frac{G_B \cdot G_M}{\psi \cdot G_M + (1 - \psi) \cdot G_B}$, (3.6)

Модулі зсуву для волокна та матриці: $G_B = \frac{E_B}{2 \cdot (1 + \mu_B)}$, $G_M = \frac{E_M}{2 \cdot (1 + \mu_M)}$.

$$G_B = \frac{300000}{2 \cdot (1 + 0,22)} = 122951 \text{ МПа}, G_M = \frac{4000}{2 \cdot (1 + 0,3)} = 1538 \text{ МПа}.$$

$$G_{12} = \frac{122951 \cdot 1538}{1538 \cdot 0,62 + 122951(1 - 0,62)} = 3966 \text{ МПа}.$$

Коефіцієнт Пуасона при навантаженні вздовж осі 1:

$$\mu_{12} = \mu_B \cdot \psi + \mu_M(1 - \psi). \quad (3.7)$$

$$\mu_{12B} = 0,22 \cdot 0,62 + 0,3(1 - 0,62) = 0,25.$$

Коефіцієнт Пуасона при навантаженні вздовж осі 2:

$$\mu_{21} = \frac{E_B E_M (\mu_B \psi + \mu_M (1 - \psi))}{E_B \cdot \psi + E_M (1 - \psi) (E_M \psi + E_B (1 - \psi))}.$$

$$\mu_{21B} = \frac{300000 \cdot 4000(0,22 \cdot 0,62 + 0,3(1 - 0,62))}{300000 \cdot 0,62 + 4000(1 - 0,62)(4000 \cdot 0,62 + 300000(1 - 0,62))} = 0,0137.$$

Перевіряємо виконання рівняння пружного потенціалу:

$$\mu_{21}E_1 = \mu_{12}E_2.$$

$$10302 \cdot 0,25 = 187520 \cdot 0,0137, \quad 2576 \approx 2569.$$

Коефіцієнт лінійного температурного розширення вздовж волокон:

$$\alpha_1 = \frac{E_B \cdot \alpha_B \psi + E_M \cdot \alpha_M (1 - \psi)}{E_B \psi + E_M (1 - \psi)}. \quad (3.10)$$

$$\alpha_{1B} = \frac{-3 \cdot 300000 \cdot 0,62 + 60 \cdot 4000(1 - 0,62)}{300000 \cdot 0,62 + 4000(1 - 0,62)} \cdot 10^{-6} = -2,49 \cdot 10^{-6} K^{-1}.$$

Коефіцієнт лінійного температурного розширення поперек волокон (нехтуючи другим доданком у (3.11)):

$$\alpha_2 = \alpha_B \psi + \alpha_M (1 - \psi).$$

$$\alpha_{2B} = [-3 \cdot 0,62 + 60(1 - 0,62)] \cdot 10^{-6} = 20,9 \cdot 10^{-6} K^{-1}.$$

3.4. Міцнісні властивості односпрямованого композиційного матеріалу

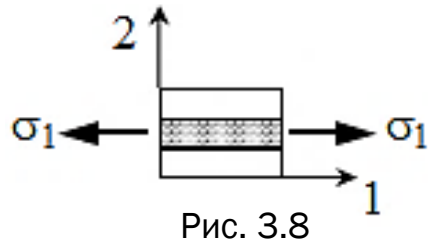
Прогнозування граничної міцності композиційного матеріалу за відомими фізико-механічними характеристиками його компонентів є досить складною проблемою. Це стосується різної та одночасної дії великої кількості факторів. Одним з найбільш важливих з них є наявність дефектів волокна та матриці, розривів на фазових межах, поганого просочення, забрудненості поверхні волокна тощо. Крім вищезгаданих припущень приймаються такі:

- діаграми деформації волокна та матриці $\sigma - \varepsilon$ та $\tau - \gamma$ мають лінійний характер до руйнування;
- міцність КМ вважається вичерпаною, якщо міцність хоча б одного композитного компонента втрачається.

Останнє припущення є дуже умовним через неможливість оцінити залишкову міцність композиту після руйнування одного з компонентів, тобто того, яке навантаження може витримати незруйнований компонент (волокно або матриця).

3.4.1. Межа міцності композиційного матеріалу при розтягуванні (стисканні) вздовж волокон

Розглянемо елемент композиційного матеріалу (рис. 3.8) при розтягуванні вздовж осі 1. Необхідно визначити граничне значення напруги F_{1p} , при якому матеріал руйнується. Індекс "p" відповідає розтягуванню.



Для визначення початкового моменту руйнування матеріалу потрібна наявність діаграм розтягування (стискання) волокна та матриці.

Якщо $\varepsilon_B < \varepsilon_M$, деформація руйнування композитного матеріалу є деформацією руйнування волокна, тобто

$$\varepsilon_{1 \text{ limit}} = \varepsilon_B = \frac{F_{BP}}{E_B} = \frac{F_{1P}}{E_1}, \quad (3.12)$$

де F_{BP} - межа міцності волокна; E_B - модуль пружності волокна; F_{1P} - межа міцності КМ; E_1 - модуль пружності КМ вздовж волокон.

$$\text{Отже, } F_{1P} = \frac{F_{BP}}{E_B} [E_B \psi + E_M (1 - \psi)]. \quad (3.13)$$

$$\text{Якщо } \varepsilon_B > \varepsilon_M, \text{ тоді } \varepsilon_{1limit} = \varepsilon_M = \frac{F_{MP}}{E_M} = \frac{F_{1P}}{E_1},$$

$$\text{звідки } F_{1P} = \frac{F_{MP}}{E_M} [E_B \psi + E_M (1 - \psi)]. \quad (3.14)$$

Межа міцності КМ при стисканні визначається аналогічним чином, але слід мати на увазі, що межа міцності волокон і матриць може бути різною при розтягуванні та стисканні.

$$\text{Якщо } \varepsilon_B < \varepsilon_M, \text{ з (3.13) при } \psi = 0 \text{ впливає: } F_{1P} = F_{BP} \cdot \frac{E_M}{E_B},$$

а не $F_{1P} = F_{1M}$, як має бути.

Цей факт можна пояснити, розглядаючи поняття «межа міцності» для композитного матеріалу, коли розрив невеликої кількості волокон дорівнює руйнації всього матеріалу. Щоб усунути це протиріччя, розглянемо матрицю з отворами без волокон (це справедливо для розірваних волокон). У такому випадку:

$$F_{1P}^* = F_{MP} (1 - \psi). \quad (3.15)$$

Якщо $\varepsilon_B > \varepsilon_M$, з (3.14) при $\psi = 1$ маємо: $F_{1P} = F_{MP} \cdot \frac{E_B}{E_M}$,

а не $F_{1P} = F_{1B}$, як має бути.

Пояснення цього факту аналогічне до попереднього випадку. Розрив малої величини матриці дорівнює розриву всієї матриці при $\psi \rightarrow 1$. Визначимо межу міцності матеріалу, що складається лише з волокон. Значення цієї остаточної сили може бути виражене співвідношенням:

$$F_{1P}^* = F_{BP}\psi. \quad (3.16)$$

Враховуючи (3.14) та (3.16), можна записати наступний вираз для граничної міцності реального композиційного матеріалу:

$$F_{1P} = \max \left\{ \frac{F_{MP}}{E_M} [E_B\psi + E_M(1 - \psi)]; F_{BP}\psi \right\}. \quad (3.17)$$

При проектуванні конструкції з композитів застосовуються наступні два підходи:

- міцність КМ вичерпана при руйнуванні двох компонентів;
- міцність КМ не вичерпана при руйнуванні лише одного з композитних компонентів, а гранична міцність всього композиту зменшується недостатньо.

Межу міцності односпрямованого композиту при стисканні вздовж волокна можна визначити аналогічним чином.

3.4.2. Межа міцності композиційного матеріалу при розтягуванні (стисканні) впоперек волокон

Модель КМ як послідовно з'єднаних складових компонентів (волокон та матриці) була використана для визначення модуля пружності КМ впоперек волокон. Тоді несуча здатність вищезгаданої системи складових компонентів при розтягуванні або стисканні визначається найбільш слабкою складовою - матрицею, волокном або їх адгезійною сполукою. Проте, експериментальні випробування це не підтверджують, а показують, що міцність КМ поперек волокон істотно залежить від об'ємної частки його компонентів.

Методи визначення межі міцності композитного матеріалу впоперек волокон описані у науковій літературі. Нижче наведено один із варіантів відповідних формул (без висновків), який досить добре узгоджується з результатами експериментів і використовується при практичних розрахунках.

Міцність на розтягування поперек волокон:

$$E_{2P} = \sigma_{MP} E_2 \left[\frac{2R}{t} \left(\frac{1}{E_B} - \frac{1}{E_M} \right) + \frac{1}{E_M} \right], \text{ де } \frac{2R}{t} = \frac{2\psi}{0,45\pi}. \quad (3.18)$$

Міцність на стискання поперек волокон: $F_{2c} = F_{2P} \cdot \frac{\sigma_{MC}}{\sigma_{MP}}. \quad (3.19)$

3.4.3. Межа міцності композиційного матеріалу при зсуві

Щоб отримати залежність межі міцності композиційного матеріалу при зсуві від фізико-механічних властивостей його компонентів, необхідно знати діаграму $\tau - \gamma$, щоб уточнити який із складових компонентів починає руйнуватися раніше. Висновок необхідних залежностей не відрізняється від методу визначення міцності композиту вздовж волокон, тому показані лише остаточні результати:

$$F_{12} = \frac{\tau_M}{G_M} \cdot G_{12}, \text{ при } \frac{\tau_M}{G_M} < \frac{\tau_B}{G_B}; \quad (3.20) \text{ та } F_{12} = \frac{\tau_B}{G_B} \cdot G_{12}, \text{ при } \frac{\tau_M}{G_M} \geq \frac{\tau_B}{G_B}. \quad (3.21)$$

3.4.4. Приклад визначення міцності односпрямованих КМ

Визначити межу міцності односпрямованого склопластика ($E_C = 0,9 \cdot 10^5$ МПа, $\mu_C = 0,28$) й вуглепластика ($E_B = 3 \cdot 10^5$ МПа, $\mu_B = 0,22$); матеріал матриці – епоксидна смола ($E_M = 4000$ МПа, $\mu_M = 0,3$). Об'ємний вміст волокон $\psi = 0,62$. Межа міцності: матриці $\sigma_{MP} = 60$ МПа, $\sigma_{MC} = 140$ МПа, $\tau_M = 30$ МПа; скла $\sigma_{CP} = 1800$ МПа, $\sigma_{CC} = 1300$ МПа, $\tau_C = 650$ МПа; вуглецю $\sigma_{BP} = 3000$ МПа, $\sigma_{BC} = 2500$ МПа, $\tau_B = 1250$ МПа.

Розв'язання

Міцність КМ на розтягування вздовж волокон:

$$F_{1P} = \frac{F_{MP}}{E_M} [E_B \psi + E_M (1 - \psi)] \quad (3.14) \quad \text{якщо } \frac{\sigma_{MP}}{E_M} < \frac{\sigma_{BP}}{E_B}, \text{ де } F_{MP} = \sigma_{MP}.$$

$$F_{1P} = \frac{F_{BP}}{E_B} [E_B \psi + E_M (1 - \psi)] \quad \text{якщо } \frac{\sigma_{MP}}{E_M} \geq \frac{\sigma_{BP}}{E_B}, \text{ де } F_{BP} = \sigma_{BP}.$$

$$\frac{\sigma_{MP}}{E_M} = \frac{60}{4000} = 0,015; \quad \frac{\sigma_{CP}}{E_C} = \frac{1800}{90000} = 0,02.$$

Тоді для склопластика:

$$F_{1CP} = 0,015 \cdot 57320 = 860 \text{ МПа,}$$

для вуглепластика:

$$\frac{\sigma_{BP}}{E_B} = \frac{3000}{300000} = 0,01.$$

$$F_{1BP} = 0,01 \cdot 187520 = 1875 \text{ МПа.}$$

Міцність КМ вздовж волокон при стисканні:

$$F_{1C} = \frac{\sigma_{MC}}{E_M} [E_B \psi + E_M(1 - \psi)], \text{ при } \frac{\sigma_{MC}}{E_M} < \frac{\sigma_{BC}}{E_{Bi}}.$$

$$F_{1C} = \frac{\sigma_{BC}}{E_B} [E_B \psi + E_M(1 - \psi)], \text{ при } \frac{\sigma_{MC}}{E_M} \geq \frac{\sigma_{BC}}{E_{Bi}}.$$

$$\frac{\sigma_{MC}}{E_M} = \frac{140}{4000} = 0,035; \quad \frac{\sigma_{CC}}{E_C} = \frac{1300}{90000} = 0,014; \quad \frac{\sigma_{BC}}{E_B} = \frac{2500}{300000} = 0,008.$$

Тоді для склопластика: $F_{1CC} = 0,014 \cdot 57320 = 802$ МПа,

для вуглепластика: $F_{1BC} = 0,008 \cdot 187520 = 1562$ МПа.

Міцність КМ на розтягування поперек волокон:

$$F_{2P} = \sigma_{MP} E_2 \left[\frac{2R}{t} \left(\frac{1}{E_B} - \frac{1}{E_M} \right) + \frac{1}{E_M} \right] \quad (3.18), \quad \text{де } \frac{2R}{t} = \frac{2\psi}{0,45\pi}.$$

для склопластика: $F_{2CP} = 60 \cdot 9815 \left[\frac{0,62}{0,45 \cdot 3,14} \left(\frac{1}{90000} - \frac{1}{4000} \right) + \frac{1}{4000} \right] = 85,5 \text{ МПа},$

для вуглепластика: $F_{2BP} = 60 \cdot 10302 \left[\frac{0,62}{0,45 \cdot 3,14} \left(\frac{1}{300000} - \frac{1}{4000} \right) + \frac{1}{4000} \right] = 87,6 \text{ МПа}.$

Міцність КМ на стиск поперек волокон: $F_{2C} = F_{2P} \cdot \frac{\sigma_{MC}}{\sigma_{MP}}, \quad (3.19)$

для склопластика: $F_{2CC} = \frac{85,5 \cdot 140}{60} = 200 \text{ МПа},$

для вуглепластика: $F_{2BC} = \frac{87,6 \cdot 140}{60} = 204 \text{ МПа}.$

Міцність КМ на зсув:

$$F_{12} = \frac{\tau_M}{G_M} \cdot G_{12} \text{ при } \frac{\tau_M}{G_M} < \frac{\tau_B}{G_B} \quad (3.20), \quad F_{12} = \frac{\tau_B}{G_B} \cdot G_{12} \text{ при } \frac{\tau_M}{G_M} \geq \frac{\tau_B}{G_B}. \quad (3.21)$$

$$\frac{\tau_M}{G_M} = \frac{30}{1538} = 0,0195, \quad \frac{\tau_C}{G_C} = \frac{650}{35156} = 0,0185, \quad \frac{\tau_B}{G_B} = \frac{1250}{122951} = 0,010.$$

для склопластика: $F_{12C} = 0,0185 \cdot 3778 = 69,9$ МПа,

для вуглепластика: $F_{12B} = 0,01 \cdot 3966 = 40,3$ МПа.

3.4.5. Питомі характеристики композиційних матеріалів

Питомими характеристиками композиційних матеріалів називають відношення його межі міцності та модуля пружності E до щільності (густини) або питомої ваги.

Густина КМ:

$\rho = \rho_B \psi + \rho_M (1 - \psi)$, де ρ_B – густина матеріалу волокон, ρ_M – щільність матеріалу матриці.

Питома жорсткість КМ вздовж волокон: $\frac{E_1}{\rho}$,

де E_1 - модуль пружності КМ вздовж волокон.

Питома міцність КМ вздовж волокон: $\frac{F_1}{\rho}$,

де F_1 - межа міцності КМ вздовж волокон.

Аналогічно визначаються питомі характеристики КМ уперек волокон.

3.4.6. Приклад визначення питомих характеристик односпрямованих композиційних матеріалів

Визначити питому жорсткість і питому міцність односпрямованого склопластика і вуглепластика вздовж волокон при розтягуванні. Матеріал матриці – епоксидна смола. Щільність скловолокна $\rho_c = 2580$ кг/м³, щільність вуглеволокна $\rho_B = 1700$ кг/м³.

Модулі пружності та міцність КМ взяти з розрахунків, отриманих у 3.4.4.

Щільність склопластика:

$$\rho_C = 2580 \cdot 0,62 + 1300 \cdot (1 - 0,62) = 2094 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3},$$

вуглепластика:

$$\rho_B = 1700 \cdot 0,62 + 1300 \cdot (1 - 0,62) = 1548 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}.$$

Питома жорсткість і питома міцність

склопластика:

$$\frac{E_{1C}}{\rho_C} = \frac{57320}{2094} \cdot 10^6 = 27,4 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{С}^2}, \quad \frac{F_{1CP}}{\rho_C} = \frac{860}{2094} \cdot 10^6 = 0,41 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{С}^2},$$

- вуглепластика:

$$\frac{E_{1B}}{\rho_B} = \frac{187520}{1548} \cdot 10^6 = 121,1 \cdot 10^6 \frac{\text{M}^2}{\text{c}^2}, \quad \frac{F_{1BP}}{\rho_B} = \frac{1875}{1548} \cdot 10^6 = 1,21 \cdot 10^6 \frac{\text{M}^2}{\text{c}^2}.$$

Для порівняння наведемо аналогічні характеристики для сталі 45, що широко використовується у машинобудуванні:

$$\frac{E}{\rho} = \frac{200000}{7800} = 25,6 \cdot 10^6 \frac{\text{M}^2}{\text{c}^2}, \quad \frac{\sigma_T}{\rho} = \frac{360}{7800} = 0,046 \cdot 10^6 \frac{\text{M}^2}{\text{c}^2}.$$

3.4.7. Визначення залишкових напружень у компонентах односпрямованого композиційного матеріалу

Використовуючи формули для температурних напружень у волокнах і матриці (3.8) і підставивши в них вираз для коефіцієнта лінійного температурного розширення композиту α_1 вздовж волокон (3.10), після перетворень отримаємо:

$$\sigma_{1B}^T = E_B \cdot E_M \Delta T (1 - \psi) \frac{\alpha_M - \alpha_B}{E_B \cdot \psi - E_M (1 - \psi)} = \frac{E_B \cdot E_M \Delta T (1 - \psi) (\alpha_M - \alpha_B)}{E_1}, \quad (3.22)$$

$$\sigma_{1M}^T = E_B \cdot E_M \Delta T \cdot \psi \frac{\alpha_B - \alpha_M}{E_B \cdot \psi + E_M (1 - \psi)} = \frac{E_B \cdot E_M}{E_1} \Delta T \cdot \psi (\alpha_B - \alpha_M), \quad (3.23)$$

де ΔT – перепад температури.

Приклад. Знайти залишкові температурні напруження для склопластика та вуглепластика у волокнах та матриці при зменшенні температури на 150°K . КЛТР скловолокна: $6 \cdot 10^{-6}$ 1/К; вуглеволокна: $-3 \cdot 10^{-6}$ 1/К; матриці (епоксидна смола): $60 \cdot 10^{-6}$ 1/К. Об'ємний вміст волокон $\psi=0,62$. Модулі пружності для волокон та матриці взяти з прикладу 3.4.4.

Розв'язання. Температурні напруження у волокнах (формула (3.22):

- у скловолокнах:

$$\sigma_C^T = 90000 \cdot 4000(-150) \cdot (1 - 0,62) \cdot \frac{(60 - 6) \cdot 10^{-6}}{90000 \cdot 0,62 + 4000(1 - 0,62)} = -19,3 \text{ МПа};$$

19,3 МПа < σ_{CC} , де σ_{CC} – міцність скловолокна при стисканні $\sigma_{CC} = 1300$ МПа;

- у вуглеволокнах:

$$\sigma_B^T = 300000 \cdot 4000(-150) \cdot (1 - 0,62) \cdot \frac{(60 + 3) \cdot 10^{-6}}{300000 \cdot 0,62 + 4000(1 - 0,62)} = -23 \text{ МПа};$$

23 МПа < σ_{BC} , де σ_{BC} – міцність вуглеволокна при стисканні $\sigma_{BC} = 2500$ МПа.

Температурні напруження у матриці (формула (3.23):

- у склопластику:

$$\sigma_{MC}^T = 90000 \cdot 4000(-150) \cdot 0,62 \cdot \frac{(6 - 60) \cdot 10^{-6}}{90000 \cdot 0,62 + 4000(1 - 0,62)} = 31,5 \text{ МПа};$$

31,5 МПа < σ_{MP} , де σ_{MP} – міцність матриці при розтягуванні $\sigma_{MP} = 60$ МПа;

- у вуглепластику:

$$\sigma_{MB}^T = 300000 \cdot 4000(-150) \cdot 0,62 \cdot \frac{(-3 - 60) \cdot 10^{-6}}{300000 \cdot 0,62 + 4000(1 - 0,62)} = 37,5 \text{ МПа},$$

37,5 МПа < 60 МПа.

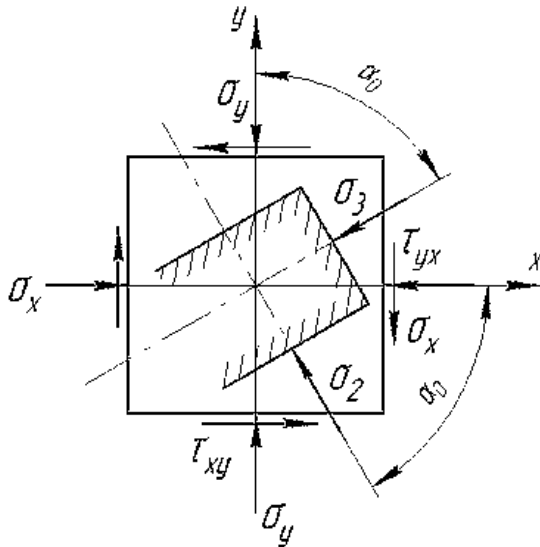
Висновок: композиційні матеріали із заданими параметрами можуть існувати.

3.5. Приклад проектування шаруватого композиційного матеріалу

Завдання. Сформувати чотиришаровий пакет КМ, що включає два шари вуглепластику $[0^\circ, 90^\circ]$ та два шари склопластику $[\pm 30^\circ]$, під навантаженням, що викликає напруження $\sigma_x = -200$ МПа; $\sigma_y = -300$ МПа; $\tau_{yx} = 30$ МПа; Товщина шарів $\delta_1 = 4\delta_0$, $\delta_2 = 3\delta_0$, $\delta_3 = \delta_4 = 6\delta_0$, $\delta_0 = 0,08$ мм; об'ємний вміст волокон $\psi = 0,62$; матеріал матриці – епоксидна смола. Необхідні дані взяти із прикладів наведених вище.

Розв'язання.

Визначимо величини та напрями головних напружень за заданих умов:



$$\sigma_{1,2,3} = \frac{1}{2} \left[\sigma_x + \sigma_y \pm \sqrt{(\sigma_x + \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \right].$$

$$\sigma_{2,3} = \frac{1}{2} \left[-200 \pm 300 \pm \sqrt{(-200 + 300)^2 + 4 \cdot 30^2} \right] =$$

$$(-250 \pm 59) \text{ МПа,}$$

$$\sigma_2 = -191 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_3 = -309 \text{ МПа, } \sigma_1 = 0.$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = -\frac{2\tau_{yx}}{\sigma_x - \sigma_y} = \frac{-2 \cdot 30}{-200 + 300} = -0.6,$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg}(-0.6) \cong -15^\circ.$$

З наведених розрахунків формуємо структуру пакета КМ.

Оскільки основне навантаження прикладено під гострим кутом до осі y , то заданий кут 30° відкладаємо від цієї осі. Тоді кут армування 3-го і 4-го шарів, що відраховується від осі x , дорівнюватиме $\varphi_{3,4} = \pm(90^\circ - 30^\circ) = \pm 60^\circ$.

Загальна товщина 3-го і 4-го шарів $12\delta_0$ - більше половини сумарної товщини пакету, тому, з метою здешевлення матеріалу їх рекомендується виготовляти з більш дешевого склопластику при збереженні міцності пакету.

Щоб раціонально розташувати 1-й та 2-й шари по відношенню до заданого навантаження, проводимо орієнтовний розрахунок міцності КМ за двома варіантами. Розрахункові формули можна отримати, враховуючи лише міцність КМ у напрямку армування:

$$F_x^* = \frac{1}{\delta_\Sigma} \sum_{i=1}^4 \delta_i F_{1i} \cos^2 \varphi_i, \quad F_{1i} = F_{1Pi}, \text{ якщо } \sigma_x > 0.$$

$$F_y^* = \frac{1}{\delta_\Sigma} \sum_{i=1}^4 \delta_i F_{1i} \sin^2 \varphi_i, \quad F_{1i} = F_{1Ci}, \text{ якщо } \sigma_y < 0.$$

Величини F_{1Pi}, F_{1Ci} взято з розрахунків, наведених у прикладі 3.4.4.

Варіант 1: 1-й шар $4\delta_0$ вздовж осі x ; 2-й шар $3\delta_0$ перпендікулярно до осі x :

$$F_{x1}^* = \frac{1}{19\delta_0} (1562 \cdot 4\delta_0 \cdot \cos^2 0^\circ + 1562 \cdot 3\delta_0 \cdot \cos^2 90^\circ + 2 \cdot 802 \cdot 6\delta_0 \cdot \cos^2 60^\circ) = 455 \text{ МПа} > 200 \text{ МПа},$$

$$F_{y1}^* = \frac{1}{19\delta_0} (1562 \cdot 4\delta_0 \cdot \sin^2 0^\circ + 1562 \cdot 3\delta_0 \cdot \sin^2 90^\circ + 2 \cdot 802 \cdot 6\delta_0 \cdot \sin^2 60^\circ) = 627 \text{ МПа} > 300 \text{ МПа}.$$

Варіант 2: 1-й шар $4\delta_0$ вздовж осі y ; 2-й шар $3\delta_0$ перпендікулярно до осі y :

$$F_{x2}^* = \frac{1}{19\delta_0} (1562 \cdot 3\delta_0 \cdot \cos^2 0^\circ + 1562 \cdot 4\delta_0 \cdot \cos^2 90^\circ + 2 \cdot 802 \cdot 6\delta_0 \cdot \cos^2 60^\circ) = 373 \text{ МПа} > 200 \text{ МПа},$$

$$F_{y2}^* = \frac{1}{19\delta_0} (1562 \cdot 3\delta_0 \cdot \sin^2 0^\circ + 1562 \cdot 4\delta_0 \cdot \sin^2 90^\circ + 2 \cdot 802 \cdot 6\delta_0 \cdot \sin^2 60^\circ) = 708 \text{ МПа} > 300 \text{ МПа}.$$

Запас міцності за варіантом 1 складає:

$$n_{x1} = \frac{F_{x1}^*}{\sigma_x} = \frac{455}{200} = 2,28, \quad n_{y1} = \frac{F_{y1}^*}{\sigma_y} = \frac{627}{300} = 2,09.$$

Запас міцності за варіантом 2: $n_{x2} = \frac{F_{x2}^*}{\sigma_x} = \frac{373}{200} = 1,87, \quad n_{y2} = \frac{F_{y2}^*}{\sigma_y} = \frac{708}{300} = 2,36.$

З аналізу отриманих результатів випливає, що КМ за розглянутими варіантами практично однакові.

Таким чином, розрахунок показує високу працездатність матеріалу при діючих напругах. Структура сформованого пакету матеріалу та фізико-механічні властивості шарів наведена на рис. 3.9 та у таблиці 3.1.

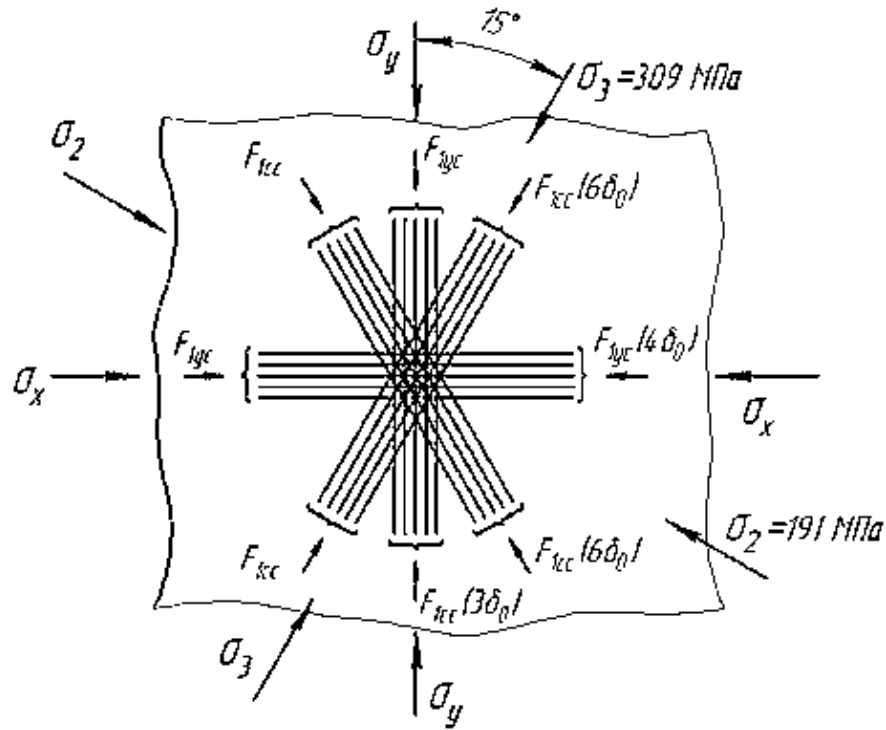


Рис. 3.9 – Структура шаруватого композиційного матеріалу

Табл. 3.1. Фізико-механічні властивості 4-х шарового пакету КМ

Номер шару	1	2	3,4
Кут армування φ_i	0°	90°	$\pm 60^\circ$
Товщина шару, δ_i , мм	0,32	0,24	0,48
Матеріал	В/п	В/п	С/п
E_1 , МПа	187520	187520	57320
E_2 , МПа	10302	10302	9815
G_{12} , МПа	3966	3966	3778
μ_{12}	0,25	0,25	0,288
μ_{21}	0,014	0,014	0,049
$\alpha_1 \cdot 10^{-6}$, K^{-1}	-2,49	-2,49	7,43
$\alpha_2 \cdot 10^{-6}$, K^{-1}	20,9	20,9	26,5
F_{1p} , МПа	1875	1875	8600
F_{1c} , МПа	1562	1562	280
F_{2p} , МПа	87,6	87,6	85,5
F_{2c} , МПа	204	204	200
F_{12} , МПа	40,3	40,3	69,9

4. ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ (ПКМ)

4.1. Вступ

Шляхом різних комбінацій сполучних та наповнювачів отримують ПКМ з необхідними фізико-механічними характеристиками для експлуатації у різних умовах. Це дозволяє значно знизити загальну вартість виробів і, незважаючи на порівняно велику трудомісткість, зробити їх економічно конкурентними зі стандартними промисловими товарами.

Відповідна технологія включає комплекс операцій і процесів, що забезпечує отримання виробів із заданими властивостями. Виготовленню передують проектування раціональної конструкції виробу, розробка рецептури матеріалу, найбільш придатної для умов експлуатації, вибір оптимального методу формування та умов його здійснення. Оптимальний метод формування для кожного конкретного виробу визначається великою кількістю факторів, найважливішими з яких є конструктивні особливості, умови експлуатації, тип сполучного, особливості його властивостей і технологічні можливості, структура наповнювача, а також економічні фактори – вартість обладнання та оснащення, їх продуктивність та термін експлуатації, витрати праці та ін.

Продуктивність методів переробки ПКМ на основі термопластичного сполучного в основному лімітується швидкістю фізичних та фізико-хімічних процесів (плавлення, кристалізації, нагріву та охолодження, релаксації та ін.). Повнота та характер перебігу цих процесів значною мірою визначають якість готового виробу.

Особливість методів виготовлення ПКМ на основі термореактивного сполучного полягає у поєднанні фізичних процесів формування з хімічними реакціями утворення тривимірних полімерів (затвердінням), причому властивості виробів визначаються швидкістю та повнотою затвердіння. Неповне затвердіння обумовлює нестабільність властивостей виробів з реактопластів у часі, а також перебіг деструктивних процесів у готових виробах. Досягнення необхідної повноти затвердіння деяких типів олігомерів, навіть за наявності каталізаторів і підвищених температурах, вимагає значного часу – до кількох годин. Однак, остаточне затвердіння може проводитися поза формуючим оснащенням, так як стійкість форми набувається задовго до завершення процесу.

Наявність при переробці температурних перепадів веде до зростання структурної неоднорідності та появи додаткової напруги, пов'язаної з різницею у швидкостях охолодження, ступенем затвердіння (у разі реактопластів). Це зумовлює неоднорідність властивостей матеріалу у виробі, що є причиною багатьох видів браку (короблення, розтріскування та ін.). Існування внутрішніх напруг обмежує також температурний інтервал експлуатації. Деякого підвищення однорідності структури та зниження внутрішніх напруг вдається досягти у результаті термічної обробки готового виробу, проте ефективніше використання методів спрямованого регулювання структур у процесах переробки.

При формуванні виробів з ПКМ можлива значна зміна структури, а отже, і властивостей полімеру. Тому одержувані на основі однакового полімеру матеріали можуть значно відрізнитися за характеристиками, якщо технології виготовлення в них різні. Найважливішими факторами, що впливають на структуру та властивості ПКМ, є параметри процесу переробки – температура, тиск, режими нагрівання й охолодження та ін. Правильний облік і добір всіх технологічних параметрів дозволяє досягти у готовому виробі однорідної структури, мінімального рівня залишкових напруг (структурних, усадкових, термічних), високого рівня завершеності процесів затвердіння та кристалізації.

4.2. Пресування

Пресування полягає в пластичній деформації матеріалу при одночасному впливі на нього тепла та тиску та і наступній фіксації форми виробу. Проводиться зазвичай у прес-формах, конфігурація порожнини яких відповідає конфігурації виробу (Рис. 4.1).

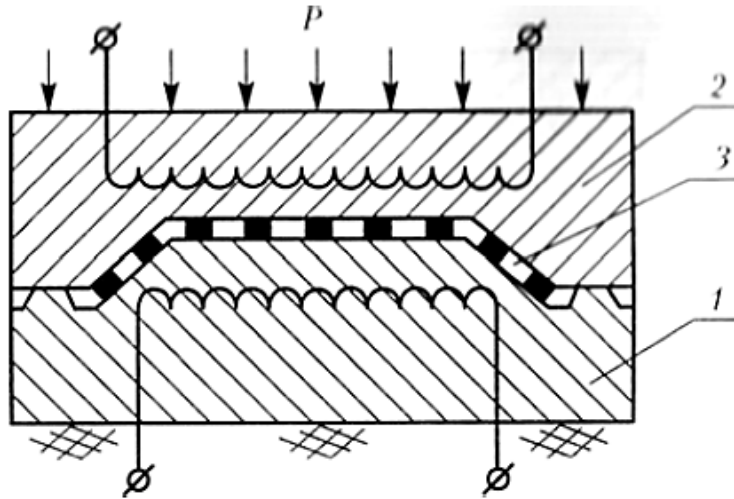


Рис. 4.1 – Формування пресуванням: 1 та 2 - нижня та верхня частини прес форми; 3-листовий формувальний матеріал.

Прес-форми встановлюються на пресах, призначення яких - створення необхідного тиску пресування (Рис. 4.2). Поміщений у прес-форму холодний або попередньо підігрітий матеріал розігрівається і, піддаючись тиску, заповнює порожнину прес-форми та одночасно ущільнюється. Фіксація форми виробу відбувається у результаті затвердіння реактопластів або охолодження термопластів чи охолодження під тиском до температури нижче температури склування полімеру (для термопластів).



Рис. 4.2 – Прес для виготовлення ПКМ

4.3. Лиття під тиском

Матеріал що формується, надходить в інжекційний (пластикаційний) циліндр ливарної машини, де нагрівається. Пластифікований матеріал при поступальному русі шнека або поршня впорскується через мундштук (форсунку) з соплом в литниковий і розвідний канали, а звідти у гнізда прес-форми, де нагрівається. У прес-формі матеріал витримується під тиском для ущільнення, потім прес-форма розмикається і виготовлений виріб з неї виштовхується (Рис. 4.3).

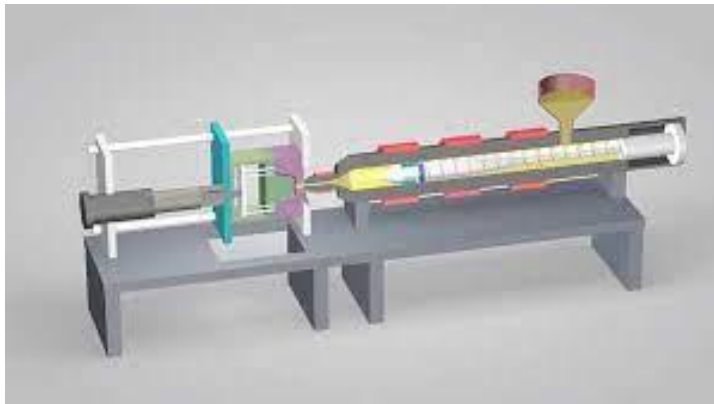


Рис. 4.3 – Машина для лиття під тиском

При автоклавному методі лиття під тиском ПКМ завантажують в автоклав, що обігрівається високо киплячим теплоносієм, нагрівають до температури, що перевищує температуру плавлення полімеру. Нагрітий розплав видавлюють за допомогою азоту у прес-форму.

Застосовується для отримання великогабаритних виробів із ПКМ на основі поліамідів та інших термопластичних матриць.

4.4. Пултрузія

Пултрузія - спосіб безперервного отримання довгомірних профільних виробів постійного перерізу з армованих ПКМ. Пултрузія отримала назву від англійських слів "pull" - тягнути і "through" - крізь/через. Причиною такої назви послужив процес протягування вихідного матеріалу крізь філь'єру, нагріту до температури полімеризації матриці ПКМ. Принципова схема процесу показано на рис. 4.4.

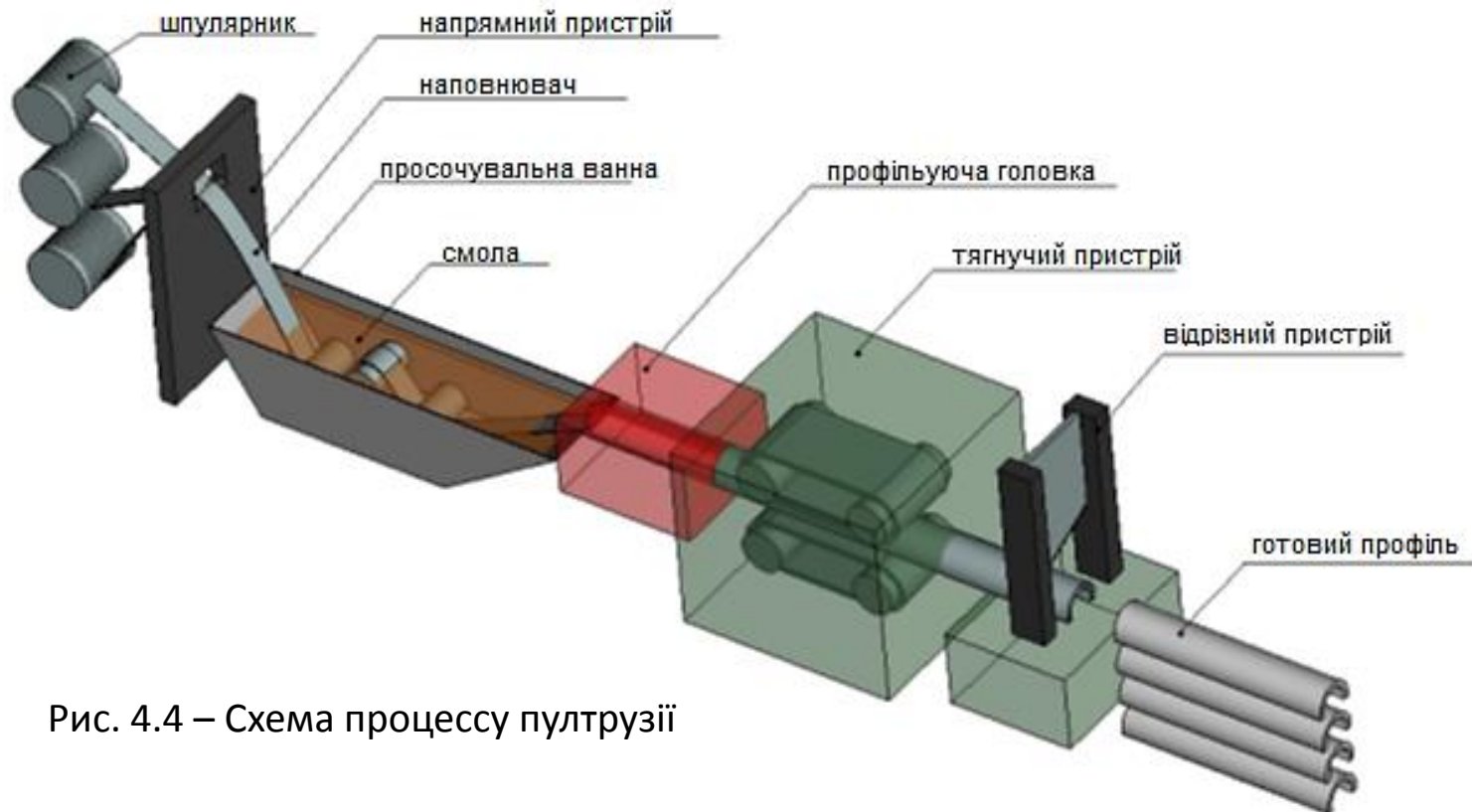


Рис. 4.4 – Схема процесу пултрузії

Технологічний процес пултрузії - безперервний і залежно від процесів, що відбуваються, розділений на наступні стадії. Джгути армуючих волокон, що розмотуються зі шпуль, у сухому стані збираються в пучок і за допомогою напрямних пристроїв подаються у ванну, де змочуються поліефірним, епоксидним або іншим сполучним. Час перебування волокон у просочувальній ванні має забезпечувати повне просочування волокон сполучною. Вміст смоли в джгутах після просочення має становити близько 30%. Для запобігання збільшеному вмісту смоли в джгутах наприкінці ванни встановлюються спеціальні віджимні валки, де волокна звільняються від надлишку смоли та включень повітря. Сполучне повинне мати низьку в'язкість і велику швидкість затвердіння при підвищених температурах. Далі просочений матеріал надходить у нагріту філь'єру, яка формує конфігурацію профілю (рис. 4.5). В результаті на виході виходить профіль, конфігурація якого повторює форму філь'єри.

Цим методом отримують монолітні та порожнисті профілі з різною формою поперечного перерізу – круглою, квадратною, трикутною, прямокутною тощо.

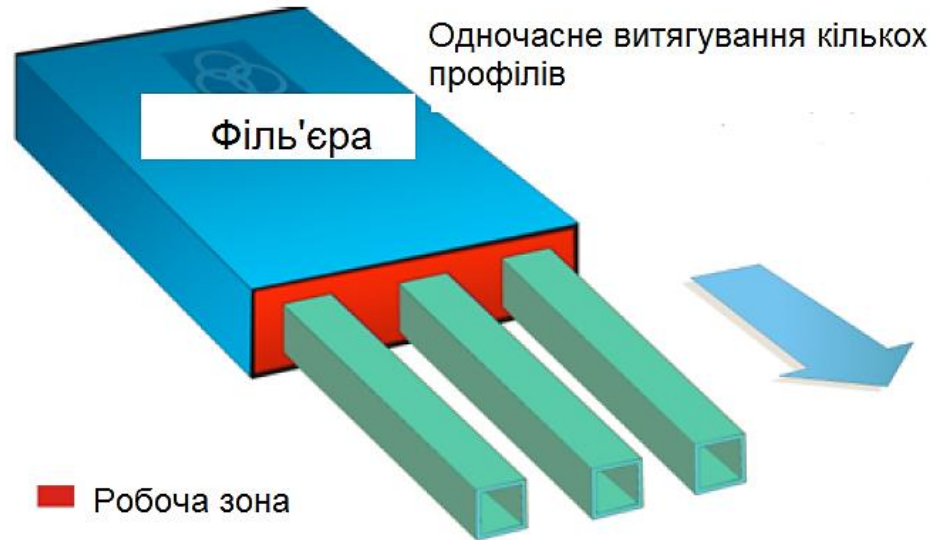


Рис. 4.5 – Філ'єра

Параметри формування значно впливають на цілісність композитного виробу. Правильний вибір швидкості протяжки, температура філь'єри, оптимальний вміст волокна, вибір та сумісність волокон та полімерної матриці, гарна упаковка волокон, кінетичні властивості полімеру та правильне просочення полімером є ключовими факторами, що визначають якість продукту.

4.5. Екструзія (видавлювання, шприцювання, шнекування)

Екструзія – це неперервний метод формування, який полягає у перетисканні розтопу полімеру через профільний отвір відповідної конфігурації (екструзійна головка) з наступною фіксацією форми виробу. Матеріал надходить до зони живлення екструзійного обладнання, де захоплюється черв'яком, що обертається і просувається вздовж корпусу (циліндра), який обігрівается у зони пластикації і дозування. У міру просування матеріалу полімерна матриця плавиться за рахунок тертя та зовнішнього нагріву, розплав ПКМ гомогенізується. Розплавлений ПКМ нагнітається в головку, звідки виходить сформований виріб, який потім охолоджується. Застосовується при виготовленні безперервних виробів (плівок, листів, труб та шлангів), а також об'ємних виробів з ПКМ з термопластичною та термореактивною матрицею.

4.6. Контактне формування

Шари препрега або волокнистого наповнювача пошарово викладаються (намотуються) на форму з одночасним просоченням його сполучним (найчастіше холодного затвердіння) і ущільненням роликком або пензлем, яким наноситься сполучна. Потім вони отверджуються без тиску чи спресовуються під тиском. Зняті з форми виробу піддаються механічній обробці. Метод забезпечує чистоту та точні розміри виробу, який безпосередньо контактує з формою у процесі пресування. Застосовується для виготовлення великогабаритних виробів при дрібносерійному виробництві: корпусів човнів, невеликих катерів, кузовів автобусів, фургонів та ін.

4.7. Намотування

На сталеву оправку (дорн), що повторює форму виробу намотується з натягом армуючий наповнювач (волокно, джгути, стрічки, тканини), після чого заготовку просочують сполучною в замкнутій формі під тиском. Типи укладання армування – окружна, спіральна, поздовжня та різні їх поєднання (Рис. 4.6). Намотана заготовка формуються за допомогою компресійного пресування, вакуумного прес-камерного або вакуумно-автоклавного методу.

Застосовується для виготовлення виробів, що мають форму тіл обертання: циліндрів, конусів, сфер, труб, оболонок різних форм.



Рис. 4.6 – Формування ПКМ методом намотування

4.8. Пневматичне формування

Цей метод має два різновиди: негативне формування, коли стиснене повітря виконує роль пуансону, і позитивне формування, коли стиснене повітря виконує роль матриці. У заздалегідь нагріту форму швидко переноситься розігріта заготовка, яка герметично затискається по периметру форми. Потім проводиться формування під дією стисненого повітря, що нагнітається в пневмокамеру, після чого виріб охолоджується і витягується з форми.

Застосовується для виготовлення пустотілих виробів, що використовуються у приладобудуванні, хімічній, верстатобудівній та інших галузях промисловості.

4.9. Спікання

ПКМ (у вигляді порошку, гранул або таблеток на гідравлічному пресі без нагрівання) завантажується у форму, нагріту до температури кипіння полімеру, міститься у піч, де витримується до розплавлення шару необхідної товщини біля внутрішніх стінок форми. Потім форма витягується з печі, нерозплавлений матеріал висипається у бункер, форма із заготівлею вдруге встановлюється у піч для додаткового оплавлення та глянсування внутрішньої поверхні виробу. Форма охолоджується, і, внаслідок усадки, виріб легко витягується з неї. Для здійснення методу спікання не потрібне складне обладнання, він легко автоматизується.

Застосовується для виготовлення безшовних порожніх виробів (контейнери, баки, ванни, човни тощо).

4.10. Штampuвання

Попередньо отримана заготівля ПКМ (у вигляді листа, плівки або тонкостінного напівфабрикату) з термопластичними або термореактивними матрицями нагрівається до високоеластичного стану матриці, закріплюється за допомогою затискної рами по контуру матриці, формується під тиском між пуансоном і матрицею, охолоджується нижче температури склування або плавлення, потім після зниження тиску вилучається зі штамп у вигляді відформованого виробу.

Застосовується для виготовлення тонкостінних та великогабаритних виробів.

4.11. Напилення

Напилення, що полягає у нанесенні порошкоподібних або рідких ПКМ на поверхні деталі або форми (Рис. 4.7), здійснюється під дією сил електричного поля, механічних або пневматичних сил. Розрізняють три групи методів напилення:

- методи, за яких порошок напиляється на виріб, який нагрітий вище температури плавлення полімеру, що наноситься (нанесення покриття в псевдозрідженому шарі, пневматичне, роторне, відцентрове розпилення);
- методи, за яких розплавлені частинки порошкового полімеру напиляються на поверхню нагрітого виробу (газополум'яне, теплопроменеве та екструзійне напилення);
- методи, за яких заряджені частинки порошку напиляються на поверхню виробу, що несе заряд протилежного знаку (електростатичне напилення та нанесення покриття в іонізованому псевдозрідженому шарі).

Застосовується під час виготовлення виробів різного призначення.

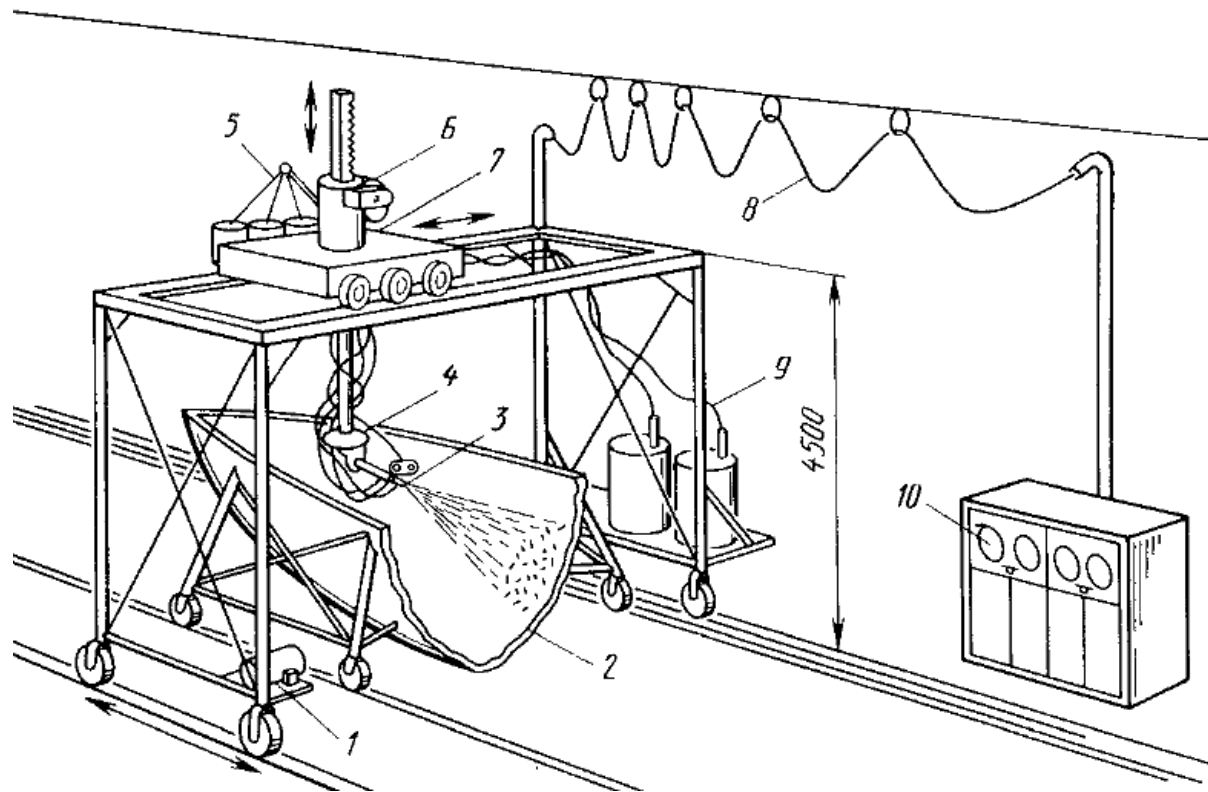


Рис. 4.7 – Трикоординатний автомат для наплення:

1 - привід поздовжнього переміщення; 2 – форма; 3 - розпилювальне сопло; 4 – поворотна головка; 5 - подача скловолокна; 6 - привід вертикального переміщення; 7 - привід поперечного переміщення; 8 - кабель; 9 - подача смоли; 10 - стрічкові програмоносії.

4.12 – Формування за допомогою еластичної герметичної оболонки

Формуванню цим способом передують виготовлення заготовок із заданою орієнтацією наповнювача. На жорстку форму (позитивну або негативну), що повторює форму виробу, методом намотування або пошарової викладки препрега у вигляді стрічки, шпону (для термореактивних матриць), листів, полотен (для термопластичних матриць) наносяться шари матеріалу. На отриману заготовку деталі, слід за дренажним шаром та антиадгезійною плівкою, надягається еластичний гумовий мішок або чохол, який герметично з'єднується з формою. Далі проводиться формування за заданим режимом: методами вакуум-формування, прес-камерним, автоклавним.

Застосовується для виготовлення виробів різної конфігурації та розмірів.

5. ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

5.1. Ракетно-космічні системи

Завдання, пов'язані з удосконаленням авіаційно-ракетної техніки, висунули специфічні вимоги до матеріалів, що для цього використовуються. Основною вимогою є підвищення їх питомих параметрів, що безпосередньо пов'язано зі зниженням маси літального апарату, збільшенням корисного вантажу, швидкості та економічності системи. Наприклад, з того, що корисна маса, виведена на навколоземну орбіту, становить лише кілька відсотків від ваги ракети-носія, відповідно її вартість сягає кількох десятків тисяч доларів США за кілограм. Найбільшою мірою цій вимозі відповідають армовані полімерні композиційні матеріали: скло-, вугле- та органопластики.

Кожен вид ПКМ має певні особливості, які необхідно враховувати при їх використанні. З інженерної точки зору склопластики становлять інтерес через низьку собівартість (0,5-1,5 долара за кілограм), високу питому міцність при розтягуванні, стисканні та згинанні (~ 100 км), відмінну хімічну, тепло- та ударостійкість, хороші діелектричні характеристики. Недоліком ПКМ на основі скляних волокон є відносно низький питомий модуль пружності, що часто обмежує можливості їх застосування у багатьох конструкціях ракетно-космічної техніки.

На противагу склопластикам, ПКМ на основі вуглецевих волокон мають рекордну питому жорсткість (10-20 тис. км), яка в 5-10 разів перевищує цей показник для металів. У 1980-х роках у США та Японії були розроблені суперміцні вуглецеві волокна, в яких руйнівна напруга досягає 5-7 ГПа, при цьому повзучість практично відсутня. Вуглепластики мають унікально низький КЛТР, який можна порівняти з КЛТР кварцу. Вартість волокон від 50 до 1500 доларів США за кілограм.

Для розвитку ракетно-космічної галузі дуже важливим є створення органічних арамідних волокон, що мають низьку щільність (1450 кг/м³). При цьому їх модуль пружності 130-180 ГПа вдвічі більший, ніж у скляних волокон. В останні роки вдалося створити арамідні волокна з міцністю 5-6 ГПа, аналогічною міцності вуглецевих волокон. Таким чином, органопластики мають рекордні характеристики питомої міцності до 400 км. Арамідні волокна мають високі релаксаційні, діелектричні властивості і низький КЛТР. У той же час пластики на їх основі мають низькі характеристики у трансверсальному напрямку, недостатню міцність при стисканні та згинанні. Крім того, вони чутливі до дії вологи.

Усі три види армуючих волокон активно використовуються при створенні ракетно-космічних конструкцій. Сполучні, що застосовуються, - зазвичай модифіковані епоксидні, фенолформальдегідні або поліамідні смоли.

Основними елементами твердопаливних ракетних систем, що виготовляються методом «вологого» намотування волокон, є корпуси ракетних двигунів, транспортно-пускові контейнери, соплові блоки, міжступінчасті відсіки та інші елементи конструкцій стратегічних ракетних комплексів наземного (автомобільного, шахтного, залізничного) базування. Композити активно використовуються також при створенні оперативно-тактичних, ракет та малогабаритної ракетної техніки. Прикладом можуть бути контейнери для зенітних, протитанкових ракетних комплексів, гранатометів та реактивних систем залпового вогню.

Дуже ефективними виявилися сітчасті (фермові) конструкції циліндричної або конічної форми, які використовуються як відсіки космічних носіїв. Їхня вага виявилася в 2 рази меншою за вагу аналогічної монолітної конструкції.

У конструкціях супутників, космічних кораблів та станцій також є багато елементів, виконаних з ПКМ. Це захисні кожухи антен, трубчасті ферми, панелі, бруси, несучі конструкції теплозахисту, каркаси сонячних батарей, перегородки та інші несучі та допоміжні елементи. У космічних човниках «Спейс Шатл» понад 15% ваги становили ПКМ, головним чином вуглепластики, які вважаються «космічним» матеріалом.

5.2. Авіація

Використання ПКМ у конструкціях військових та цивільних літаків викликане схожими причинами, що й для ракетно-космічної техніки, а саме прагненням знизити вагу повітряного корабля. Істотною відмінністю є те, що термін служби літака незрівнянно більший, ніж ракети. Основні навантаження на конструкцію ракети виникають лише у момент старту, протягом не більше 5-15 хв. Літак повинен прослужити десятки тисяч годин, щоб виправдати комерційний проект. Тому для авіаційних систем важливі експлуатаційні характеристики ПКМ: тріщиностійкість, повзучість, втома, вплив температури та атмосферних факторів.

Склопластики через їх високу радіопрозорість використовують для виготовлення обтічників, що оберігають антени корабля від механічних та атмосферних впливів. Органопластики у вигляді легких тришарових конструкцій широко використовують для виготовлення підлог, перегородок, салонів літака. Органопластики дуже стійкі до дії динамічних та вібраційних навантажень, а також механічних та ерозійних ушкоджень. Для зниження зростання втомних тріщин в обшивці літака використовуються металополімерні системи, що складаються з шарів органопластика і дюралюмінію.

Найбільш універсальне застосування в авіації отримали вуглепластики. Завдяки великій жорсткості, міцності, хімічній стійкості вони використовуються для виготовлення таких високонавантажених деталей, як лопатки вентилятора, кілів, елеронів керма, закрилків, обтічників та ін.

Досвід експлуатації полімерних композитів у конструкціях авіаційної техніки показав, що їхнє застосування замість металевих сплавів забезпечує зниження маси конструкції на 30-50%, підвищує ресурс експлуатації в 2-5 разів і знижує трудомісткість на 20-40%.

Застосування композитів у конструкціях важких транспортних та пасажирських літаків становить 10-25%. У двоярусних пасажирських літаках А-380 більш, ніж на 500 місць, частка композитів становить приблизно 25% від ваги лайнера.

Застосування матеріалів у літаку Боїнг 787 (Dreamliner)



Матеріал	Доля матеріала, % ваг
1. Композиційні матеріали	50 (в т.ч. фюзеляж і крила)
2. Алюмінієві сплави	20
3. Титанові сплави	15
4. Сталі	10
5. Інші матеріали	5

5.3. Наземний транспорт

ПКМ знаходять своє застосування у залізничному, міському та автомобільному транспорті. У цих галузях також є необхідність зниження маси дорожніх машин з метою збільшення ефективності силових і гальмівних пристроїв. Крім того, важливою обставиною є безпека, та ударостійкість; необхідно враховувати питання шумо- та теплоізоляції, негорючості, а також практичні експлуатаційні міркування та простоту ремонту. Використання нових матеріалів дозволить знизити вагу транспортних засобів на 30% та більше.

На залізничному транспорті використовують склопластикові контейнери для перевезення вантажів, які виготовлені у вигляді тришарових сендвіч-конструкцій. Такі ж самі елементи використовуються для вагонів-рефрижераторів.

Залізничні цистерни діаметром до 3 м та довжиною 16 м, виготовлені методами намотування, використовуються для перевезення хімічно активних рідин.

Головні обтічники вагонів, виготовлені із вуглепластиків, використовуються в Японії на надшвидкісних поїздах.

Полімерні композиційні матеріали використовують в автомобілебудуванні. Вони є успішною заміною сталі для панелей автомобільного кузова, структурних компонентів під капотом двигуна та ін (Рис. 5.1). Крім істотно нижчої питомої ваги деталі з композитів практично не вимагають зовнішньої обробки (пігмент вводиться до складу сполучного), не проминаються при зіткненнях і легко ремонтуються. Найбільш широко склопластики використовуються для виготовлення кабін вантажних автомобілів та тракторів, часто поєднаних із крилами, сходами та спальним відсіком. Склопластикові панелі кузова (у тому числі трейлера-рефрижератора), контейнери та цистерни, вантажні причепи, будинки-машини для туристичних поїздок є прикладами застосування композитів.



Відомі бампери та ресори, виготовлені зі скло- або вуглепластиків, обтічники для зниження опору повітря. Ще ширше використання композитів має місце під час створення спортивних автомобілів, які змагаються за системою «Формула-1».

Рис. 5.1 – Використання ПКМ у деталях автомобіля

5.4. Суднобудування

У жодній області використання склопластиків не було настільки визначальним, як у будівництві суден невеликих розмірів - прогулянкових човнів, яхт, катерів, у яких ці матеріали практично повністю замінили дерево і алюміній. Гарний опір дії морського середовища, відсутність гниття, корозії та інших форм руйнування, створення безшовних конструкцій складної форми та можливість її багаторазового відтворення, зручність в експлуатації та простота ремонту – основні переваги склопластиків.

Поряд із прогулянковими човнами можна назвати рятувальні шлюпки, катери берегової охорони, рибальські судна, зокрема, траулери розміром до 25 м та ін. У військово-морських силах зі склопластиків виготовляють мінні тральщики та міношукачі, які не мають магнітних властивостей. Склопластики використовуються також для глибоководних апаратів і човнів оскільки склопластик має високу міцність при стисканні. Певною перевагою (або недоліком) цих систем є неможливість їхньої локації, оскільки радіохвиля проходить через них без відображення.

5.5. Електрорадіотехніка

Як природні ізолятори з високою діелектричною міцністю склопластики успішно замінюють дерево і текстоліт. Виготовлені пултрузією та намотуванням, композитні стовпи та траверси ліній електропередач широко використовуються, особливо в районах з підвищеною вологістю. Введення в силові кабелі, крім алюмінієвих жил високоміцних волокон, дозволяє відмовитися від сталевих несучих елементів і знизити вагу кабелю приблизно в 2 рази.

Діелектричні властивості склопластиків використовують також у радіоелектронних пристроях: одно- та багат шарових платах друкованого монтажу, захисних ковпаках радіолокаційних антен, у системах телекомунікаційного зв'язку.

Вуглепластики, навпаки, є електропровідним матеріалом і широко використовуються для виготовлення електронагрівачів, наприклад, у вигляді гнучких плоских листів скловуглепластика. Вуглецеві волокна використовуються також як екрануючі матеріали в тонкостінних конструкціях електроніки, включаючи дорожні комп'ютери і стільникові телефони.

Високоміцні, високомодульні односпрямовані композити використовуються як бандажі роторів електродвигунів постійного струму, а також центрифуг, призначених для поділу ізотопів урану в ядерній промисловості.

Ще одним застосуванням композитів можна назвати використання їх для маховиків - акумуляторів механічної енергії, які можуть бути встановлені як на транспорті, що рухається, так і стаціонарно.

5.6. Будівництво

Зростання масштабів використання ПКМ у будівництві обумовлено властивостями цих матеріалів порівняно з традиційними – міцність не тільки на стиск, а й на розтяг, легкість, атмосферостійкість, технологічність.

Відповідно до основних технологічних методів виготовлення ПКМ можна виділити такі типи будівельних матеріалів:

1. Безперервні, переважно односпрямовані профілі різної форми перерізу - стрижні, труби, пластини, куточки, двотаври. Вони використовуються у ролі каркасів будівель, легких переносних павільйонів, туристичних наметів і тентів. Стрижні зі склопластиків застосовують як опори та підвіски електропередач, великогабаритних колекторів, стійок кріплення у вугледобувних шахтах.

2. Пресовані пластини виготовляються з кількох шарів паперу, бавовняних, скляних тканин та полотен. У зовнішні шари пластин поміщають декоративні елементи. Пластини служать як огорожувальні конструкції, для обробки вертикальних і горизонтальних поверхонь.

Особливим випадком використання шаруватих композиційних матеріалів, що найчастіше застосовується у будівництві, є тришарові панелі, які між листами жорсткого та міцного матеріалу мають відносно м'який прошарок у вигляді пінопласту, паперових або склопластикових стільників.

3. Методи виготовлення ПКМ дозволяють отримувати елементи, що мають жорсткість і міцність за рахунок їх форми. До таких можна віднести оболонкові та гофровані конструкції. Склопластики застосовуються для виготовлення опалубки, вітрових та шумових обтічників, огорож, настилів мостів; препреги на основі епоксидних смол - для обмотки та посилення стійок, колон, покращення сейсмічних властивостей конструкцій.

Досягненням є розробка технології ремонту труб, що корозують. При цьому посилення та закладення пошкодженої частини труби склоепоксидними композиціями може проводитися як зовні, так і всередині труби.

5.7. Хімічна промисловість

Корозія металів завдає колосальної шкоди, яку обчислюють у сотнях мільйонів доларів. До 60% випуску продукції сталеливарної промисловості йде на заміну різних виробів. Тому висока хімічна стійкість композитів є їх важливою перевагою, особливо якщо врахувати легкість конструкцій та практично необмежений термін експлуатації без поточних витрат.

Найбільш широко застосовуються матеріали на основі скляних та базальтових волокон, поліефірних та епоксидних смол. Шари, що стикаються з агресивним середовищем виготовляють з підвищеним вмістом сполучного, що збільшує їх герметичність та хімічну стійкість. Найбільш поширеними елементами, що використовуються для зберігання та транспортування різного роду рідин, є трубопроводи та ємності.

Можна відзначити кілька напрямів їх використання:

- для перекачування агресивних рідин та суспензій, найчастіше кислотного характеру;
- дренажні та стічні труби діаметром до 2,5 м, використовуються також для транспортування «хвостів» породи, будівельних розчинів тощо;

- системи для очищення та підготовки води, в яких використовуються агресивні рідини;
- трубопроводи для видобутку нафти та газу, насамперед - із родовищ під морським дном;
- вентиляційні труби та короби, повітроводи у виробничих та лабораторних приміщеннях. До цього ж розряду можна віднести і вивідні (витяжні) труби висотою до 100 м, що укріплюються у вертикальному положенні за допомогою розтяжок.

На хімічних підприємствах склопластикові ємності часто використовуються як технологічне обладнання: конденсатори, градирні, кристалізатори, повітряні скрубери, випарники. Закриті ємності – цистерни – для зберігання нафтопродуктів, зокрема бензину у підземних сховищах на автозаправних станціях. У сільському господарстві склопластикові ємності використовують для зберігання комбікормів і добрив.

5.8. Військова справа та засоби безпеки

Основні напрями використання композитів в авіаційно-ракетній техніці, у тому числі й військовій, представлені вище. Крім того, відомо їх застосування для обмотки снарядів, торпед, гарматних та рушничних стволів, футлярів гранато- та вогнеметів. Важливим напрямом є створення антенних укриттів на ракетно-гарматних комплексах наземного та морського базування. Укриття є багат шаровими сендвіч-конструкціями складної форми з радіопрозорою стільниковою структурою всередині. Поверхня укриття перфорована з метою поглинання звуку.

З появою високоміцних арамідних волокон типу Кевлар і аналогічних за властивостями, але легших поліетиленових волокон виникла можливість створення одягу, який може захистити людину від кульових та осколкових уражень. Основним елементом цього одягу є бронепакет, що складається з кількох шарів арамідної тканини та прошитий у взаємно перпендикулярних напрямках. Такий пакет є своєрідним композитом, оскільки волокна у ньому пов'язані між собою силою тертя.

Розроблено багато варіантів бронезахисного одягу - жилети, шоломи, щити, які зручні при роботі у різних умовах та забезпечують той чи інший ступінь захисту військовослужбовців. Для підвищення захищеності життєво важливих органів у жилетах є кишені, які містять спеціальні сталеві, керамічні або композитні пластини, здатні погасити вплив індентора, що рухається зі швидкістю до 1000 м/с.

Наразі створено також комплекти для колективного захисту екіпажів транспортних засобів. Розробляються вироби з великою площею захисту, здатні більш ніж 2 рази знизити осколковий потік у бойових відсіках танкової, артилерійської та іншої військової техніки.

5.9. Медицина

Застосування скловолокна у медичній техніці неухильно зростає у зв'язку з використанням волоконної оптики для виготовлення дзеркал, призм, лінз, світловодів, джгутів із безлічі світловодних волокон. Найбільш широкою областю застосування волоконних світловодів у медицині є ендоскопія для передачі світла в оглядовій порожнині та отримання зображення. Використання волоконних світловодів полегшує дослідження, хірургічні втручання та лікувальні процедури.

При цьому відсутнє нагрівання у зоні впливу («холодне світло») і одночасно у кілька разів збільшується її освітленість; можливе створення поля освітлення необхідної конфігурації та розміру за різних форм перерізу світловода; досягається освітлення глибоких та важкодоступних порожнин; через волоконний світловод одним джерелом світла може здійснюватися передача випромінювання різного спектрального складу (інфрачервоного, ультрафіолетового та ін.). Крім того, волоконні світловоди є електробезпечними.

Інструменти з волоконно-оптичними елементами (волоконними світловодами) застосовуються практично у всіх галузях хірургії, і зокрема, в мікро-, нейро- та офтальмохірургії.

Композитний матеріал є найпоширенішим реставраційним та пломбувальним матеріалом на сучасному етапі розвитку стоматології. Він значно перевершує інші матеріали блиском, кольоровою та відтінковою гамою, високою естетичністю, міцністю та невеликою усадкою. Найпоширенішими композитними наповнювачами є стронцієве та барієве скло, силікати титану та цирконію, аморфний кремнезем, солі та оксиди важких металів, кварц, полімерні частинки та ін. Також використовують гетерогенні (звичайні або гібридні композити з добавками частинок полімерного матеріалу).

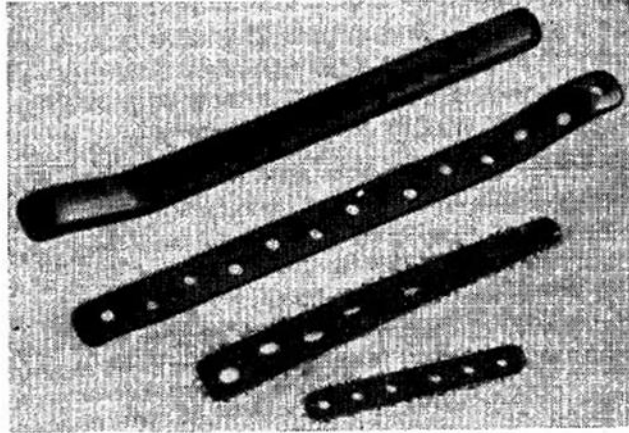
Одним із пріоритетних напрямів розвитку сучасної стоматології є активне впровадження інноваційних технологій, які полягають у створенні легких та надзвичайно міцних матеріалів на основі з'єднання спеціальними речовинами скляних, керамічних, полімерних і вуглецевих волокон.

Дуже широке застосування у медицині знайшли вуглепластики. Вуглець є одним із основних хімічних елементів, що входять до складу живих тканин, і тому вуглецеві матеріали природно використовують як імплантат в організм людини.

Як імплантований матеріал застосовується сполука на основі волокон карбїду кремнію та вуглецевої матриці та вуглець-вуглецевий композит тощо. Ці матеріали використовують головним чином як протези суглобів.

Важлива відмінність вуглецевих композитів полягає у можливості локального відшарування волокон від матриці. Перевага полягає в тому, що при ударах спостерігається руйнування деякої частини волокон, яке не супроводжується катастрофічним руйнуванням всього матеріалу.

Для заміни кістки виникає можливість використання вуглецевих композитів, армованих в одному або кількох напрямках.



Вуглепластики використовуються у пластинах для фіксації переломів великої гомілкової кістки. Для фіксації переломів кісток застосовуються композити на основі поліпропілену та діакрилатної смоли.

Рис. 5.2 – Приклади пластин для фіксації положення при переломі кісток

З композиту на основі високоміцних волокон виробляються протези кісток стегна та гомілки.

Для виготовлення штучних суглобів використовують армований поліетилен.

Останнім часом здійснюється комплексний аналіз результатів використання композиційних матеріалів у медицині, що включає реакцію тканин на матеріал, який імплантується.

6. ТЕСТОВІ ЗАПИТАННЯ

Завдання № 1

Які матеріали не належать до штучних композитів?

1) деревинний брус, 2) фанера, 3) вуглепластик, 4) боропластик.

Завдання № 2

Із яких компонентів складаються композиційні матеріали?

1) матриці, наповнювача та сітки, 2) матриці та наповнювача, 3) наповнювача та сітки, 4) сітки і затверджувача.

Завдання № 3

Які композити належать до деревних?

1) бетон, 2) текстоліт, 3) ДСП, 4) триплекс.

Завдання № 4

Зв'язувальна речовина композиту має назву:

1) зміцнювач, 2) армівний компонент, 3) матриця, 4) армівний наповнювач.

Завдання № 5

Яку роль у композитах виконує армівний наповнювач?

1) забезпечує в'язкість матеріалу, 2) забезпечує міцність матеріалу, 3) забезпечує пластичність матеріалу, 4) забезпечує твердість матеріалу.

Завдання № 6

Який матеріал належать до полімерних пластиків?

1) полікарбонат, 2) ДВП, 3) ДСП, 4) фанера.

Завдання № 7

Композити складаються:

1) з одного компонента, 2) сплаву заліза з карбоном, 3) з двох та більше компонентів, 4) із синтетичних матеріалів.

Завдання № 8

Яке місце у класифікації композиційних матеріалів за природою матриці займають деревинностружкові плити (ДСП)?

1) полімерні, 2) бітумні, 3) цементні 4) керамічні КМ.

Завдання № 9

Захисні каски виготовлені методом трансферного пресування. Дати характеристику орієнтації армуючих елементів у просторі.

1) хаотична, 2) одномірноупорядкована, 3) двумірноупорядкована, 4)тримірноупорядкована.

Завдання № 10

Яке місце в класифікації композиційних матеріалів за природою матриці займає руберойд?

1) полімерні, 2) бітумні, 3) цементні, 4) керамічні КМ.

Завдання № 11

До якого класу полімерних композитів відносять кевларові пулезахисні бронезелети?

1) термопластів, 2) термоеластоластів, 3) реактопластів, 4) інше.

Завдання № 12

До якого класу полімерних композитів відносять армовані гнучкі полімерні шланги?

1) термопластів, 2) реактопластів, 3) термоеластоластів, 4) інше.

Завдання № 13

Які армуючі елементи у поручні ескалатора?

1) волокна, 2) проволока, 3) плівка, 4) фольга.

Завдання №14

Які армуючі елементи у лінолеумі?

1) волокна, 2) плівка, 3) шпон, 4) тканина.

Завдання №15

Які армуючі елементи у фанері?

1) волокна, 2) тканина, 3) шпон, 4) плівка.

Завдання № 16

Яка природа армуючих елементів у пулезахисних бронезелетів?

1) базальтові, 2) вуглецелові, 3) кевларові волокна, 4) скляні волокна.

Завдання № 17

Яке місце в класифікації композитів за природою матриці займає азбошифер?

1) цементний, 2) бітумний, 3) полімерний, 4) керамічний КМ.

Завдання № 18

Поручні ескалатора виконані з:

1) ізотропного, 2) анізотропного, 3) ортотропного композита, 4) трансверсально ізотропного.

Завдання № 19

Лопатки авіаційних турбокомпресорів:

1) ізотропні, 2) анізотропні, 3) ортотропні, 4) трансверсально ізотропний.

Завдання № 20

Автомобільні шини: дати характеристику складності армуючих елементів.

1) моно-, 2) поліармовані, 3) комбіновано поліармовані, 4) неармовані.

Завдання № 21

Автомобільні шини: який тип армування у просторі у зв'язку з формою виробу?

1) плоске, 2) циліндричне, 3) полярне, 4) тороїдальне.

Завдання № 22

Маховик: який тип армування у просторі в зв'язку з формою виробу?

1) плоске, 2) циліндричне, 3) полярне, 4) тороїдальне.

Завдання № 23

Азбошифер: дати характеристику армуючих елементів.

1) дисперсні волокна, 2) дискретні волокна, 3) безперервні волокна, 4) пластинки.

Завдання № 24

Автодорожні світловідбиваючі знаки: дати характеристику геометрії армуючих елементів. 1) дисперсні, 2) дискретні волокна, 3) безперервні волокна, 4) сфери.

Завдання № 25

Гетінакс: яка орієнтація у просторі армуючих елементів?

1) хаотична, 2) одномірноупорядкована, 3) двомірноупорядкована,
4) тримірноупорядкована.

Завдання № 26

Лопатка авіаційного турбокомпресора: яка орієнтація у просторі армуючих елементів?

1) хаотична 2) одномірноупорядкована, 3) двомірноупорядкована,
4) тримірноупорядкована.

Завдання № 27

Деревинностружкові плити: яка орієнтація у просторі армуючих елементів?

- 1) хаотична, 2) одномірноупорядкована, 3) двомірноупорядкована,
- 4) тримірноупорядкована.

Завдання № 28

Гнучкий шланг високого тиску: дати характеристику складності армуючих елементів.

- 1) моноармований, поліармований, 3) комбіновано поліармований, 4) інше.

Завдання № 29

Лінолеум на тканевій основі: дати характеристику орієнтації армуючих елементів у просторі.

- 1) хаотична, 2) одномірноупорядкована, 3) двомірноупорядкована,
- 4) тримірноупорядкована.

Завдання № 30

Багат шарова полімерна оболонка для ковбас: дати характеристику орієнтації армуючих елементів у просторі.

- 1) хаотична, 2) одномірноупорядкована, 3) двомірноупорядкована,
- 4) тримірноупорядкована.

Завдання № 31

Якщо будову композиційного матеріалу записати математичною формулою композит = наповнювач + ?

- 1) матриця, 2) метали, 3) тирса деревини, 4) вуглецеві волокна.

Завдання № 32

Якщо будову композиційного матеріалу записати математичною формулою композит = матриця + ?

1) епоксидна смола, 2) армуючі наповнювачі, 3) бітум, 4) гіпс.

Завдання № 33

Що не відноситься до неорганічних армуючих волокон?

1) скляні АВ, 2) базальтові АВ, 3) боромістки АВ, 4) вуглецеві АВ.

Завдання № 34

Що відноситься до органічних армуючих волокон?

1) базальтові АВ, 2) скляні АВ, 3) рослинні АВ, 4) боромістки АВ.

Завдання № 35

Що відноситься до неорганічних армуючих волокон?

1) вуглецеві АВ, 2) скляні АВ, 3) рослинні АВ, 4) целюлозні АВ.

Завдання № 36

Що відноситься до металевих армуючих елементів?

1) берилієва фольга, 2) скляні АВ, 3) рослинні АВ, 4) вуглецеві АВ.

Завдання № 37

Що не відноситься до дискретних армуючих наповнювачей?

1) щебень у бетоні, 2) пісок, 3) борсик, 4) тальк.

Завдання № 38

Що не відноситься до неорганічних дисперсних армуючих наповнювачів?

1) металеві порошки, 2) мінеральні порошки, 3) каолін, 4) рослинні волокна.

Завдання № 39

В якості матриці у термопластах може використовуватись:

1) епоксидна смола, 2) поліпропілен, 3) кераміка, 4) пластичний метал.

Завдання № 40

В якості матриці в реактопластах може використовуватись:

1) поліпропілен, 2) фенолоформальдегідна смола, 3) кераміка, 4) полістірол.

Завдання № 41

До дисперсних армуючих елементів відноситься:

1) стружка, 2) тальк, 3) волокна целюлози, 4) скловолокно.

Завдання № 42

До полімерних композиційних матеріалів відноситься КМ з матрицею:

1) епоксидною, 2) керамічною, 3) металевою, 4) цементною.

Завдання № 43

Яке місце в класифікації композитів за природою матриці займають автомобільні тормозні диски, які можуть перегріватися до високих температур?

1) полімерні, 2) керамічні, 3) металеві, 4) цементні КМ.

Завдання № 44

Яке місце в класифікації композитів за природою матриці займають тонкі високообертові абразивні круги для шліфувальних машин?

1) полімерні, 2) керамічні, 3) металеві, 4) цементні КМ.

Завдання № 45

До якого класу полімерних композитів відносяться деревинностружкові плити (ДСП)?

1) термопластів, 2) реактопластів, 3) термоеластопластів, 4) інше.

Завдання № 46

До якого класу полімерних композитів відносяться литі подошви для взуття?

1) термопластів, 2) реактопластів, 3) термоеластопластів, 4) інше.

Завдання № 47

До якого класу полімерних композитів відносять багат шарову полімерну оболонку для ковбас?

1) термопластів, 2) реактопластів, 3) термоеластопластів, 4) інше.

Завдання № 48

Що з наведеного відноситься до олігомерів?

1) бетон, 2) фенолформальдегідна смола, 3) кераміка, 4) полістірол.

Завдання № 49

Препреги – це листи тканих або нетканих волокнистих матеріалів, просочених:

1) водою, 2) тільки затверджувачами, 3) затвердженими полімерами,
4) незатвердженими полімерними сполучними.

Завдання № 50

Компаунди – це композиція з:

1) різних олігомерів, 2) металів, 3) металів і кераміки, 4) бетона і заліза.

6. КЛЮЧІ ДО ВІДПОВІДЕЙ

№ завдання	Відповідь	№ завдання	Відповідь	№ завдання	Відповідь
1	1	18	2	35	2
2	2	19	2	36	1
3	3	20	3	37	3
4	3	21	4	38	4
5	2	22	3	39	2
6	1	23	1	40	2
7	3	24	4	41	2
8	1	25	1	42	1
9	1	26	2	43	3
10	2	27	1	44	2
11	1	28	3	45	2
12	3	29	3	46	3
13	2	30	3	47	1
14	4	31	1	48	2
15	3	32	2	49	4
16	3	33	4	50	1
17	1	34	3		

Література

1. Верещака С. М. Механіка композиційних матеріалів : навчальний посібник / С. М. Верещака. – Суми : Сумський державний університет, 2013. – 160 с.
2. Конспект лекцій з дисципліни «Композиційні будівельні матеріали» (для студентів 4 курсу денної і 5 курсу заочної форм навчання напряму 6.092100 (6.060101) «Будівництво» спеціальності «Міське будівництво та господарство») . – О.В. Кондращенко. – Харків: ХНАМГ, 2009. – 68 с.
3. Технологія композиційних матеріалів: Навчальний посібник /Гончаренко В.В., Коваленко І.В. – К.: 2007.-131 с.
4. Композиційні матеріали: Навчальний посібник / Копань В.С – К.: «Пульсари», 2004 – 200 с.
5. Джурка Г.Ф. Полімерні композиційні матеріали - Полтава, 2008 – 58 с.

Навчальне видання

Долгов Олександр Михайлович

КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Навчальний наочний посібник

Редактор Є.М. Ільченко

Електронний ресурс

Підготовлено до виходу в світ

у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка».

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19