

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**  
**по курсу «Теорія і технологія перспективних**  
**композиційних матеріалів»**

**Лекцій –**  
**Лаборат. –**

**Література, що рекомендується**

1. Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Вишняков Л.Р. Новые композиционные материалы. Киев, «Вища школа», 1977. – 312 с.
2. Композиционные материалы в машиностроении // Ю.Л.Пилиповский, Т.В.Грудина, А.Б.Сапожникова. –Киев, Техника, 1990. – 141 с.
3. Слоистые металлические композиции. Учебное пособие. Потапов И.Н., Лебедев В.Н., Кобелев А.Г. и др. М.: Металлургия, 1986. –216 с.

**Додаткова**

4. Композиционные материалы: Справочник/ В.В.Васильев, АВ.Д.Протасов, В.В.Болотин. Под ред. В.В.Васильева, Ю.М.Тернопольского. –М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
5. Справочник по композиционным материалам: В 2-х томах. Пер. с англ. Под ред. Дж.Любина. –М.: Машиностроение, 1988.
6. Тучинский Л.И. Композиционные материалы, полученные методом пропитки. М.: Металлургия, 1986. –208 с.
7. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы. Под ред. В.Шатта. Пер. с нем. М.:Металлургия, 1983. –520 с.
8. Структура и свойства композиционных материалов /К.И.Портной, С.Е.Салибеков, И.Л.Светлов и др. –М.: Машиностроение, 1979. –255 с.
9. Портной К.И., Бабич Б.Н., Светлов И.Л. Композиционные материалы на никелевой основе. –М.: Металлургия, 1979. –264 с.
10. Портной К.И., Бабич Б.Н. Дисперсно-упрочненные материалы. – М.:Металлургия, 1974. –200 с.
11. Современные композиционные материалы. Под ред. Л.Браутмана и Р.Крока. Пер с англ «Мир» М.: 1970. – 672 с.

**Введення**

**Тема 1**

**Завдання курсу** – ознайомлення з теоретичними основами створення сучасних і перспективних композиційних матеріалів із заздалегідь заданими в них підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Подальший розвиток техніки на сучасному етапі, розробка нових технологічних процесів неможливі без застосування нових матеріалів. Серед напрямів науково-технічного прогресу, що визначають перспективи розвитку економіки, можна виділити завдання створення і виробництва синтетичних матеріалів із заздалегідь заданими властивостями.

Ракетна техніка, космонавтика, авіабудування, ядерна енергетика, хімічне машинобудування, автотранспорт, суднобудування, електроніка і багато інших галузей промисловості гостро потребують матеріалів, цінних властивостей, що володіють комплексом, таких як висока міцність, корозійна

стійкість, жаростійкість, жароміцність, зносостійкість, регульовані в широких межах показники тепло- і електропровідності, хороший опір розповсюдженню тріщин, спеціальні оптичні і магнітні характеристики і ін. Багато з існуючих промислових матеріалів, тобто окремі метали і сплави, вже не можуть задовольняти ці запити, не можуть забезпечити необхідну гамму властивостей.

Основними шляхами підвищення міцності традиційних металів, по А.А.Бочвару, є:

- а) механічна деформація на холоді – **нагартовка**;
- б) сплав з компонентами, що входять в твердий розчин на базі грат основного металу, – легування;
- в) **отримання** високодисперсної суміші фаз шляхом **гарту** сплаву на пересичений твердий розчин з **подальшим** зміцнюючим **відпуском** або старінням – дисперсійне тверднення при **мартенситном** старінні **сталей**;
- г) **введення** в сплав компонентів, створюючих в процесі кристалізації нову, твердішу фазу у вигляді сітки по **межах** зерен основної фази або скелетовидного каркаса в **дендритній** структурі.

Додаткове зміцнення в кожному з вказаних випадків (за винятком ливарних сплавів, невіддатливих деформації) може бути досягнуте застосуванням термомеханической обробки, що формує стійку субструктуру.

**Проте**, одночасна дія всіх вказаних **чинників** зміцнення реалізується при температурах,  $T_{пл}$ , що не перевищують (0,3-0,4). При підвищенні температури до (0,5-0,6)  $T_{пл}$ . різко слабшає зміцнююча дія від утворення твердих розчинів. Зміцнення за допомогою дисперсних виділень зберігається в **кращому разі** до (0,6-0,7)  $T_{пл}$ .

Успіхи в комплексному легуванні у поєднанні з оптимальною термічною обробкою дозволили, наприклад, підняти рівень робочих температур нікелевих сплавів 1000-1050 °С.

Таким чином, абсолютно очевидно, що резерви подальшого підвищення жароміцності шляхом додаткового легування на сьогоднішній день себе практично вичерпали (□ 95%). Більш того, введення великої кількості легуючих елементів викликає негативні наслідки: знижується температура солидуса сплавів, утворюються скупчення крихких фаз, опори, що призводять до зниження, руйнуванню, в результаті зниження пластичності багато жароміцних сплавів стають нетехнологічними.

Крім того, робочі параметри багатьох об'єктів нової техніки такі (2000 °С і вище), що звичайні сплави їм вже не відповідають. (*Графік підвищення робочих температур*).

Усунення розриву між вимогами сучасної техніки до конструкційних матеріалів і можливостями класичних сплавів досягається шляхом створення і застосування композиційних матеріалів, в яких зібрані воедино кращі якості вхідних в них компонентів.

Так що ж таке композиційні матеріали, які ще 20-30 років тому називалися матеріалами майбутнього і вже стали матеріалами сьогоднішнього дня?

У широкому сенсі поняття «Композиційний матеріал» включає будь-який матеріал з гетерогенною, тобто що складається з двох і більш за фази, структурою. Таке визначення дозволяє віднести до композиційних переважно більшість вживаних в техніці матеріалів. Дійсно, майже всі металеві сплави містять декілька фаз, які або створюються навмисно (для додання матеріалу заданих технологічних і експлуатаційних властивостей), або утворюються в

результаті наявності в метали шкідливих домішок. Так, наприклад, звичайну сталь можна розглядати як композиційний матеріал (композит), що складається з двох фаз – фериту і цементита, полімерні матеріали, окрім основного компоненту (смоли), зазвичай містять різних наповнювачів, фарбники, мастила і т.п.; те ж можна сказати про багато керамічних матеріалів.

Першим творцем КМ. була сама природа. Безліч природних конструкцій (стовбури дерев, кістки тварин, скелети комах, зуби людей) мають характерну волокнусту структуру. Вона складається з порівняно пластичної матричної речовини і твердіших і міцніших речовин, що мають форму волокон.

Наприклад, деревина – це композиція, що складається з пучків високоміцних целюлозних волокон трубчастої будови, зв'язаних між собою матрицею з органічної речовини (лігніну), що додає деревині поперечну жорсткість. Зуби людей і тварин складаються з твердого в'язкого поверхневого шару (емалі) і м'якшої серцевини (дентину). І емаль, і дентин містять неорганічні кристали речовини (гідроксилапатит), що мають голчану форму, поширені в м'якій органічній матриці. Відмінність у властивостях емалі і дентина зв'язана, в основному, з різним співвідношенням органічною і неорганічною складових: у емалі кристали гідроксилапатита займають близько 90% об'єму, а в дентині 79%. Подібну структуру має і слонова кість.

Прикладами КМ. можуть бути і такі природні утворення, як мінерали. Нефрит, наприклад, складається з щільно упакованих голчаних кристалів, зв'язаних один з одним на поверхнях розділу. Така структура забезпечує високу в'язкість нефриту, і тому його використовували різні племена як матеріал для виготовлення сокир.

Людство ще на зорі свого існування застосовувало принцип КМ. в своїх цілях. Споруджуючи житла, наші далекі предки в глину для цегли додавали соломку і отримували типовий армований матеріал підвищеної міцності. Вони знали, що лук з декількох шарів дерева міцніший за лук, що не має в своїй конструкції меж розділу. Таких матеріалів можна привести багато, проте це все були хоч і вдалі, але випадкові знахідки.

Наука про КМ. зародилася зовсім недавно. Першим прикладом наукового підходу до створення штучних КМ. можна рахувати появу залізобетону і склопластиків. Як відомо, бетон відмінно чинить опір стискуванню і дуже погано витримує розтягуючі навантаження. Композиція з бетону і сталевий арматури, високою міцністю, що володіє, на розтягування, об'єднує в одному матеріалі позитивні властивості обох компонентів. Залізобетон можна віднести до перших зразків армованих композиційних матеріалів.

Перший патент на полімерний композиційний матеріал був виданий в 1909 р. Він передбачав зміцнення синтетичних смол природними волокнами. Армували перші полімерні КМ. рубаним природним волокном, целюлозним папером, бавовняними або льняними тканинами.

У 1935 р. були запатентовані склопластики. Це були перші полімерні матеріали, в яких, як упрочнитель використовувалися неорганічні волокна. Промисловий випуск склопластиків був налагоджений після другої світової війни і з тих пір їх інтенсивно використовують в техніці.

У 50-х роках ХХ століття виявили, що багато матеріалів у вигляді тонких монокристалів голчаної форми володіють фантастично високою міцністю, порядку 1000 кгс/мм<sup>2</sup> і більш, тобто приближаються до теоретично можливою. Був здобутий новий вигляд неорганічних поликристаллических

волокон – вуглецеві, борові з міцністю 300-350 кгс/мм<sup>2</sup> і модулем пружності 30-50 тис. кгс/мм<sup>2</sup>. Виникла ідея використовувати всі ці надміцні волокнисті матеріали для армування різних матриць, і насамперед металів.

В даний час широко використовуються тверді сплави для ріжучого інструменту, в яких об'єднані висока твердість дисперсних часток карбідів і в'язкість металевої зв'язки, а також магнітні КМ., які складаються з окремих часток феромагнетика, зв'язаних мінімумом матричного матеріалу, і володіють надзвичайно високою коерцитивної силою. Сучасні зубні цементы складаються з дисперсних часток твердого алюмофторсилікатного скла, розподілених у в'язкій матриці з поліакрилової кислоти, і отримують високою твердістю, в'язкістю, стійкістю до агресивної середовища.

Сучасне матеріалознавство пішло по шляху вивчення можливостей, закладених в КМ., і добилося відчутних успіхів. За рахунок вибору компонентів, їх концентрації, розмірів, форми, орієнтації і міцності з'єднання один з одним фізико-механические властивості композитів можна регулювати в найширших межах.

Застосування КМ. дозволяє різко понизити масу ракет, літаків, автомобілів, судів, підвищити їх дальність дії, збільшити потужність двигунів, створити нові конструкції, працездатність яких раніше обмежувалася відсутністю необхідних матеріалів.

В даний час найбільш широке застосування знаходять композити на основі полімерних матриць. Вони достатньо повно вивчені і дозволяють по порівняно простій технології виготовляти великогабаритні деталі і конструкції складної форми.

Серед цієї групи перше місце за об'ємом використання (95%) займають склопластики. Обсяг їх виробництва в США близько 1 млн. тонн в рік, в країнах СНД – 150 тис. тонн в рік. Їх застосовують не лише в складних і відповідальних конструкціях, але і у виробках широкого споживання; у суднобудуванні, будівництві, електротехніці і ін. Вони володіють високими прочностними характеристиками, у декілька разів більшою в порівнянні з металами стійкістю до втомної напруги і тріщинообразованию, опором до корозійної дії при значному зниженні маси деталей.

Вуглепластики і боропластики, металеві композиції типу А1-бор, А1-графіт, володіючи всіма позитивними властивостями склопластиків мають в 1,5 разу меншу питому масу, в 3-4 рази велику жорсткість і вищу міцність. Але у зв'язку з набагато вищою вартістю (□ у 50 разів вище за склопластики) вони в даний час використовуються в умовах дії високих навантажень, коли первинну роль грає надійність конструкції, її маса, а питання вартості відступають на другий план – в надзвукових літаках, ракетах, космічній апаратурі, батискафах.

Те ж саме відноситься до матеріалів типа С-С, які в даний час застосовуються тільки в аерокосмічній техніці, де використовується їх механічна міцність при високих температурах у поєднанні з низькою масою, а також в медицині для протезування опорно-рухового апарату у зв'язку з їх міцністю, жорсткістю, хорошою біологічною сумісністю. При подальшому зниженні вартості вони знайдуть широке застосування в машинобудуванні, приладобудуванні, автомобілебудуванні і так далі

З КМ. на основі металевих матриць в даний час знаходять застосування алюміній, армований борними або вуглецевими волокнами, евтектичні композити на основі нікелевих сплавів. Дослідження в області металевих композиційних матеріалів останнім часом по темпах значно випереджають

аналогічні роботи по полімерних композитах. То ж відноситься до композитів на основі кераміки, при їх використанні перспективним є їх застосування при високих температурах, що дає можливість підвищити робочі температури рухових установок і тим самим різко підвищити їх економічність.

Поки не все нові композити знайшли широке застосування в промисловості. Деякі з них поки проходять лабораторні дослідження. Але за композитами – майбутнє. Пройде зовсім трохи часу і КМ. широко використовуватимуться в людській практиці.

← \* →

Інтерес до композитів провідних країн добре ілюструється динамікою фінансування Міністерством оборони США робіт по дослідженню цих матеріалів, їх впровадженню в різних галузях діяльності:

1958 р. - 400 тис. доларів

1967 р. - 14 млн. доларів.

Дані по фактичному і прогнозованому споживанню нових углепластиків і органопластиків в США підтверджують підвищений інтерес до них (див. таблицю)

(У тис. тонн )

Матеріал	1987	1992	2000
<b>Всього композитів</b>	10,9	22,2	94,4
зокрема:			
- для авіації і ракетобудування	7,6	15,8	38,8
- для автомобілів	0,088	0,19	0,52
- товари для спорту і відпочинку	2,09	4,1	9,5
<b>Виробництво зміцнюючих волокон</b>	4,4	8,8	21,5
зокрема:			
- вуглецевих	2,2	4,9	12,9
- армидних	2,1	3,9	8,5
-			

Слід визнати той факт, що як в колишньому СРСР, так і в нинішніх країнах СНД об'єми застосування композитів значно нижчі, ніж в провідних країнах світу. Тому одному з важливих завдань економічної політики держав, у тому числі і України, має бути розробка і фінансування спеціальних програм, плануючих ліквідацію відставання в цій області.

### Перспективи виробництва композитів в Україні

На сьогоднішній день в світовій практиці найбільше розповсюдження здобули полімерні композити. (ПКМ)

У 1990 р. промисловістю США було використано близько 1 млн. 200 тис. тонн полімерних композитів, зокрема:

45% - транспортно- і суднобудування;

18% - будівництво;

13% - коррозійнестійке устаткування;

6,5% - побутові вироби;

17% - авіакосмічна, військова техніка, електроніка, електроніка, приладобудування.

Перспективи потреби промисловості США в полімерних композитах в 2000 році оцінювалися:

1,9 млн. т. виробів з склопластика;

340 тис. т. виробів з **углеорганопластиків**.

Прогнозована потреба промисловості України в полімерних композитах на 2000 рік склала близько 120 тис. т. в рік. При цьому **передбачалося**, що **армідні** волокна і тканини в основному будуть використані в авіакосмічних виробках. Високомодульні вуглецеві матеріали необхідні як наповнювачі в авіакосмічних виробках, для спортивного інвентаря, наземного транспорту.

Стеклонаполнітелі з епоксидними і такими, що феноловими **пов'язують** широко використовуються у всіх галузях народного господарства.

КБ «Південне» (м. Дніпропетровськ), НВО «Досвід» (м. Запоріжжя), ППМ (м. Київ) і іншими науково-дослідними і проектно-конструкторськими організаціями України розроблені **ряд** технологій і **устаткування** для виготовлення широкої номенклатури композиційних (ПКМ і МКМ) деталей з високими питомими показниками міцності для авіакосмічної техніки (**корпуси**, лопатки, кільця, труби, сопла, різні профілі). Вважається за доцільне використовувати цей **досвід** і технології в таких галузях, як автомобільна, **суднобудівельна**, верстатобудівна, металургія, с/х машинобудування і ін. Це дає **можливість** замінити дефіцитні матеріали, **понижити** масу виробів, підвищити їх надійність і ресурс, поліпшити інші експлуатаційні показники.

За роки існування СРСР склалася ситуація, коли головні підприємства по виготовленню наповнювачів і що **пов'язують** для виробництва ПКМ конструкційного призначення виявилися **розташованими** на території Росії. Це ж відноситься і до постачань сировини і спеціальних клеїв при виготовленні полімерних композитів.

Тому вважається за доцільне **після** ретельного **опрацювання** ТЕО розмістити випуск епоксидних і таких, що фенолових **пов'язують** на підприємствах Донбасу, включаючи досвідне виробництво Укрніпластмас і підприємствах м. Дніпропетровська і м. Шостка, а також відновити виробництво **низькомодульних** вуглецевих матеріалів на БЗПМ. **Окрім** цього, необхідно реконструювати і модернізувати виробництво **алюмоборосилікатних** скловолокнистих матеріалів в Северодонецьке, Меріфе і Бердянську.

Слід особливо підкреслити важливість організації масового (10-20 тис. т. в рік) виробництва безперервних базальтових волокон, технологія виготовлення яких розроблена ППМ України. Використання цих волокон дозволить здобути широкий спектр нових виробів, які не корродують, не горять, не піддаються біокорозії. Висока температура їх роботи (до 900°C) дає можливість практично повсюдно замінити концентроопасний азбест. На відміну від скловолокна, базальт не сорбував вологу, на його основі закінчується розробка алюмобазальтових композитів.

Графітові, вуглецеві і **вуглець-вуглецеві** композити (ВВКМ) широко використовуються в металургії, хімічній промисловості, при виготовленні напівпровідників, особливо чистих металів, монокристалів і так далі У Україні діє Дніпровський електродний завод (ДЕЗ, м. Запоріжжя), один з 8-ми в СРСР. ДЕЗ **проводить** також вуглецеві волокна і тканини на основі віскози. Сировина поки купується в країнах СНД. Експериментальна діє база Національного наукового центру Харківського фізико-технічного інституту (ННЦ ХФТІ), що діє, має виробничі потужності 80 тонн в рік; вона **проводить** високоякісні УУКМ для ракетно-космічної техніки.

ННЦ ХФТІ доручено провести науково-дослідні розробки по отриманню нових електродних матеріалів, **силицизованих** графіту і УУКМ для виготовлення **нагрівачів**, тиглів, а також **радіаційностійких** графіту і УУКМ для атомних і термоядерних реакторів. Сировиною для таких матеріалів буде використаний природний графіт Завалловського родовища (Кіровоградська обл.).

У ППМ освоєно дослідне виробництво **вуглецьметалевих** композитів, в якому використовується технологія просочення пористого графітового каркаса сплавами алюмінію і скандію. Матеріал має високі характеристики і може бути використаний в різних галузях техніки (особливо в **двигунобудуванні**).

Актуальним для України є **подальший** розвиток робіт в області порошкових металевих композитів, армованих волокнами і частинками карбїду кремнію, які **проводяться** на дослідному виробництві ППМ і в концерні «Запорожабразів». Виробництво таких матеріалів може бути налагоджене на БЗПМ.

Металеві композити, армовані вуглецевими волокнами, які розроблені і **упроваджені** у виробництво такими організаціями, як АТ «Мотор-січ», НВО «Досвід», ЗМБ «Прогрес», КБ «південне» знайшли значний попит в аерокосмічній промисловості. Потужності цих виробництв дозволяють **проводити металокомпозити** в загальному об'ємі до 25-30 тонн в рік, що дозволить **повністю** задовольнити потребу машинобудування України, підняти його на новий якісний рівень.

Таким чином, на найближчих 5-10 років основними **завданнями** розвитку виробництва і використання композиційних матеріалів можна **вважати наступне**:

- організувати, а також відновити виробництво **високо- і низькомодульних** вуглецевих матеріалів (волокон, стрічок, тканин і ін.);
- створити виробництво органічних високомодульних волокон і виробів з них (стрічки, тканини);
- організувати випуск тих, що епоксидних і фенолових **пов'язують**;
- організувати випуск кремнеземних, скляних і базальтових волокон і виробів з них;
- розробити технології і **устаткування** для виготовлення виробів широкого **споживання** з композиційних матеріалів.

## ТЕМА №2

### 1. Класифікація композиційних матеріалів

Розширення робіт із створення і дослідження композиційних матеріалів вимагає виділення основних, **істотних** ознак таких матеріалів, а також впорядкування і удосконалення термінології і основних визначень, що стосуються даної проблеми. Вирішення цих **завдань** пов'язане з розробкою класифікації матеріалів, яку потрібно починати з основних визначень.

На сьогодні загальноприйнято, що всі використовувані композити, що розробляються, володіють наступною сукупністю **відмітних ознак**:

- 1) склад форма і розподіл компонентів матеріалу «запроектвані» **заздалегідь**;
- 2) матеріал не зустрічається в природі, а є **створенням** людини;

- 3) матеріал складається з двох або більш за компоненти, що розрізняються по своєму хімічному складу і розділених в матеріалі **вираженою межею**;
- 4) властивості матеріалу визначаються кожним з його компонентів, які у зв'язку з цим мають бути присутніми в матеріалі в **достатньо** великих кількостях (більше деякого критичного **змісту**);
- 5) матеріал володіє такими службовими властивостями, яких не мають його компоненти, узяті **окремо**;
- 6) матеріал **є** неоднорідним в мікромасштабі і однорідним в макромасштабі.

Такі ознаки композиційних матеріалів обумовлені необхідністю **додати** матеріалам спеціальні вищі властивості, ніж **у** традиційно вживаних. КМ., широко вживані **в даний час**, володіють високими міцністю, жорсткістю, підвищеною опірністю втомному руйнуванню, малою чутливістю до концентраторів **напруги**. Крім того, КМ. мають високі зносостійкість, жароміцність і інші властивості, які **роблять** їх ефективними при **застосуванні** в різних областях техніки, особливо спеціального призначення. Тому до композиційних матеріалів **разом із загальними** вимогами пред'являється **ряд** спеціальних:

- 1) високі **міцнісні** властивості при **щодо** низької щільності;
- 2) висока пластичність при малому відносному **подовженні** при розтягуванні;
- 3) підвищена опірність динамічним і термічним навантаженням;
- 4) **можливість** регулювання властивостей в широких межах зміни їх структури.

**Застосування** композитів, відповідних вказаним вимогам для виготовлення деталей машин і механізмів дозволяє **понижити** їх матеріаломісткість, підвищити міцність і експлуатаційні характеристики.

Виходячи з вищесказаного ясно, що КМ. **є** синтетичними матеріалами, що **конструюються** з метою реалізації заданих властивостей стосовно функціонального призначення деталі або конструкції. Як правило, матеріал формується в процесі виготовлення деталі.

Важливо відзначити, що композиційні матеріали характеризуються геометрією, що «повторюється», або **рівномірним розподілом компонентів по** відношенню один до одного (виходить з 6-ої ознаки).

Компоненти композитів за геометричною ознакою можна розділити на дві групи:

- 1) компонент, безперервний у всьому об'ємі КМ., називається матрицею;
- 2) переривистий компонент, роз'єднаний в об'ємі композиційного матеріалу, називається **арматурою** або армуючим елементом. Під терміном що «армує» слід розуміти «введений в матеріал з метою зміни його властивостей», а не тільки що «зміцнює».

Композити можна класифікувати по різних ознаках. На основі **виду структурних елементів** їх ділять на:

- а) волокнисті, такі, що складаються з волокон в матриці;
- б) **дисперснозміцнені** матеріали, що складаються з матриці, наповненої **частинками**;
- в) шаруваті (окремий випадок – біметали), такі, що складаються з шарів матеріалів;



г) псевдосплави – порошкові, матрицю, що є, або каркас, наповнений більш **легкоплавким** матеріалом;

д) евтектичні, **отримувані** шляхом **направленої** кристалізації евтектичних сплавів.

Слід звернути увагу на те, що поняття матриці і арматури непридатні до шаруватих композитів, що складаються з шарів металів або сплавів, що чергуються, і до псевдосплавів, що мають каркасну **будову** (ці матеріали **отримують** просоченням пористої **заготівки** більш **легкоплавкими** компонентами, їх структурою є два взаємно **проникаючих** безперервних каркаса.

Композиційні матеріали класифікують по наступних основних ознаках:

- за матеріалом матриці і армуючих елементів;
- по геометричних ознаках компонентів;
- по структурі і розташуванню компонентів;
- по місцю **отримання**;
- за призначенням.

**Повна** характеристика композиту повинна **містити** всі вказані ознаки, **проте** на практиці **завичай** обмежуються одним з них.

Якщо покласти в основу класифікації матеріал матриці, то **в цілому** можна виділити **трьох типів** композитів:

- 1) металевий композиційний матеріал – МКМ
- 2) полімерний композиційний матеріал – ПКМ
- 3) керамічний композиційний матеріал – ККМ.

Композити, що містять два або більш різних по складу або природі матричних матеріалу, – називається полиматричним.

Серед цих типів композитів **тільки** полімерні мають **загальновизнані** назви, об'єднуючі **типу** армуючих **волокон** з типом матриці. Вони складаються з двох **часток** – в першій **вказується** матеріал волокна, другий є слово «пластик» або «**волокнит**»: вуглепластики, склопластики (**стекловолокниты**), **боропластики**, металопластики, **асбопластики** і так далі

Для композитів з металевою і керамічною матрицею поки немає чітко **встановленої** номенклатури. Частіше за інших використовується подвійне позначення: спочатку пишуть матеріал матриці, потім – матеріал волокна.

Наприклад: МКМ (**Cu-W**) – композит з мідною матрицею і вольфрамовим

волокном.

ККМ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Mo) – композит на основі Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> з арматурою Mo.

Проте в літературі і інші позначення: складне слово, в першій частці якого вказується матеріал волокна, а в другій – матриці (боралюмінія, углеалюмінія і так далі).

Композити, що містять два або більш різних по складу або природі типа армуючих елементів називається поліармированными. Поліармированние композити розділяються на прості, якщо армуючі елементи мають різну природу, але однакову геометрію (наприклад, склопластик – полімер, армований скляним і вуглецевим волокном) і комбіновані, якщо армуючі елементи мають і різну природу, і геометрію (наприклад, КМ., що складається з Al матриці, борних волокон і прошарків з титанової фольги).

За ознакою геометрії армуючих елементів (пороша або гранули, волокна, пластини) композити діляться на три групи:

- 1) порошкове (гранульовані) або композити з нуль-мерними компонентами що мають всі три розміри одного і того ж порядку.

**Прикладами** композицій цієї групи є **дисперснозміцнені** матеріали, метали і сплави, армовані **частками**, керамічні матеріали, що **містять** в своєму складі короткі ниткоподібні кристали;

- 2) волокнисті або композити з одновимірними компонентами, один з розмірів яких значно перевищує два інших.

**Прикладами** цієї групи є волокнисті КМ. на основі металів, полімерів і **тому подібне**, армовані скловолокном, **боровим**, вуглецевим, керамічним і іншими волокнами:

- 3) пластинчасті або композити з двовимірними компонентами, два розміри яких значно перевищують третій.

**Прикладами** матеріалів цієї групи є шаруваті матеріали, наприклад, композиції, що складаються з шарів титана, що чергуються, і алюмінію.

Мінімальний розмір дискретних волокон і пластин в матеріалах другої і третьої груп має бути більше розмірів елементарного зразка композиту – такого мінімального об'єму матеріалу, який характеризується всім комплексом визначальних його ознак.

Відповідно до класифікації КМ. за структурою і розташуванням компонентів композити діляться на групи з:

- каркасною
- матричною
- шаруватою і
- комбінованою структурою.

До композитів з каркасною структурою відносяться псевдосплави, отримувані методом просочення;

з матричною – дисперсноупрочненні і армовані матеріали;

з шаруватої композиції, отримувані з набору листів матеріалів різної природи і складу, що чергуються;

з комбінованою – матеріали, що містять комбінації перших трьох груп (наприклад, псевдосплави, каркас яких зміцнений дисперсними включеннями, відносяться до матеріалів, що поєднують каркасну і матричну структури.

Відповідно до класифікації за методами отримання композити діляться:

- 1) **отримувані** **рідкофазним поєднанням** компонентів;
- 2) **отримувані** **твердофазними** методами;
- 3) здобуті методами осадження – напилення;
- 4) здобуті комбінованими методами.

До жидкофазним методів відноситься просочення (наприклад, просочення арматури полімерними або розплавленими металами), а також направлена кристалізація сплавів.

До твердофазним методів відносяться: пресування, плющення, екструзія, кування, штампування, ущільнення вибухом, дифузійна зварка, волочіння і тому подібне Для композитів, здобутих твердофазними методами, характерне використання матриці у вигляді порошку або тонких листів.

Армовані композити, матриця яких в **початковому стані** є тонкими листами, а вся **заготівка** – набір шарів матриці і армуючих елементів, укладених в заданій послідовності, що чергуються, в літературі називають «композиції типу **сэндвич**».

При отриманні композитів методами осадження-напилення матриця наноситься на волокна з розчинів солей або інших з'єднань методом електролізу, з парогазової фази, з плазми і тому подібне

Комбіновані методи полягають в послідовному або паралельному застосуванні декількох методів. Наприклад, плазмове напилення використовується як попередня операція, а як остаточна застосовується плющення або дифузійна зварка.

Композити можна класифікувати за призначенням. В цьому випадку їх ділять на конструкційних, корозіонностойкіє, антифрикційні, п'єзоелектричні, теплозахисні і тому подібне

У літературі досить часто зустрічається класифікація композитів за галузями застосування: для аерокосмічної промисловості, суднобудування, автомобілебудування, електроніки, стоматології, ортопедії і ін.

**Проте** класифікація композитів за призначенням умовна, оскільки ця ознака не є **істотною**. Композиційні матеріали, як правило, багатфункціональні, тобто один і той же матеріал може володіти комплексом властивостей, що **обумовлюють можливість** його різного **застосування**, з іншого боку питання про призначення того або іншого матеріалу носить **кон'юнктурний характер** і часто взагалі може бути вирішений нераціонально.

## **2. Особливості структури композиційних матеріалів**

К.М. мають орієнтовану структуру і за своєю природою є гетерогенними. По структурних ознаках вони можуть бути розділені на дві основні групи:

- а) волокнисті і шаруваті;
- б) **дисперснозміцнені**.

Волокнисті композиції складаються з матриці, що містить зміцнюючі одновимірні елементи у формі волокон, дроту, ниткоподібних кристалів і ін.

Шаруватими композиціями називаються системи, що складаються з набору двовірних армуючих компонентів, що чергуються, у вигляді листових, пластинчастих і фольгових матеріалів, жорстко зв'язаних між собою по всій поверхні.

До іншої групи по структурних ознаках відносяться дисперсноупрочненні матеріали, розподілені в об'ємі матриці, що містять рівномірно, ультрадисперсні нуль-мерные частки, що не взаємодіють активно з матрицею і що не розчиняються в ній.

Розділення композитів по структурних ознаках на дві групи дозволяє виявити їх принципові відмінності:

1) у волокнистих і шаруватих матеріалів несучим елементом є армуюче волокно, дріт, фольга (фаза-**зміцнювач**). Армуючі елементи за своєю природою мають високу міцність, високий модуль пружності, і, як правило, порівняно низьку щільність;

2) у **дисперснозміцнених** матеріалах, навпаки, несучим елементом є матриця, в якій за допомогою безлічі ультрадисперсних **часток** і однорідної структури дислокації, що практично не розчиняються, створюється ефективне гальмування дислокацій аж до температури **почала** плавлення.

У волокнистих композиціях матриця скріплює волокна або інші зміцнюючі елементи в єдиний моноліт, захищаючи їх від пошкоджень. Матриця є середою, що передає навантаження на волокна, а в разі руйнування окремих волокон перерозподіляє напругу.

Практично у всіх композиційних матеріалах, за винятком евтектичних, структурні елементи композицій – матрицю і армуючий компонент вибирають готовими, а остаточна структура формується штучно при виготовленні виробу або напівфабрикату.

Особливість волокнистої композиційної структури полягає в рівномірному розподілі, з геометрією, що повторюється, високоміцних і високомодульних волокон в пластичній матриці, зміст яких може коливатися від 15 до ~ 75% про.%.

В той же час в **дисперснозміцнених** матеріалах за оптимальний **зміст** дисперсної фази вважається 2-3 про.%, крім того, ультрадисперсні **частки** у вказаних матеріалах, на відміну від безперервних і дискретних волокон у волокнистих композиціях, створюють **тільки** «непряме» зміцнення, тобто завдяки їх присутності стабілізується структура, що формується при деформаційній термічній обробці.

Поверхня розділу у волокнистих і шаруватих композиційних матеріалах можна розглядувати як самостійний елемент структури. Точніше, слід говорити не про геометричну поверхню розділу, а про прилеглу до поверхні розділу область, в якій протікають процеси розчинення, освіти і зростання нових фаз, перерозподіли домішок і так далі У перехідному шарі формується зв'язок між зміцнюючими волокнами і матрицею, через яку передається напруга. Від досконалості вказаного зв'язку залежать умови гальмування тріщин; іншими словами, перехідною шар визначає рівень властивостей волокнистих і шаруватих композиційних матеріалів.

У **дисперснозміцнених** матеріалах, призначених головним чином для роботи при високих температурах, компоненти вибирають з позиції їх мінімальної взаємодії.

У волокнистих і шаруватих КМ., компоненти яких вибирають **з урахуванням** оптимальної взаємодії, структура формується штучно при виготовленні матеріалу в процесі намотування, укладання волокон або деформації.

У евтектичних композитах (інколи їх називають природними композитами) зміцнююча фаза кристалізується з розплаву у вигляді голок (ниткоподібних кристалів), стрижнів або пластинок. По вигляду структура цих матеріалів мало відрізняється від структури волокнистих композицій, здобутих шляхом штучного поєднання матриці і упрочнителя. Крім того, упрочнителі в евтектичних матеріалах мають унікально високі механічні властивості (монокристали). Особливістю структури евтектичних КМ. є виключно хороше сполучення матриці з упрочнителем, а також висока структурна стабільність.

Волокнисті, шаруваті і **дисперснозміцнені** матеріали прийнято відносити до т/д нерівноважним системам. **Тільки** евтектичні композиції через специфічні умови кристалізації є т/д рівноважними.

У волокнистих композиційних матеріалах правильно вибрана технологічна схема і дотримання режимів їх отримання роблять істотний вплив на формування структури і властивостей. При цьому слід виконати три умови:

- а) технологічний процес повинен забезпечити рівномірний розподіл волокон при заданому їх об'ємному **змісті**: вони мають бути ізольовані між собою шаром матриці;
- б) механічне **пошкодження** волокон має бути мінімальним;
- в) взаємодія волокон **з** навколишнім середовищем і **з** матрицею в процесі їх **поєднання** і зниження при цьому міцності волокон має бути мінімальним.

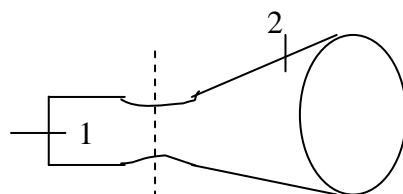
Наприклад, при використанні крихких волокон (**борових**, вуглецевих, **SiC**) при **отриманні** матеріалу (вироби) доцільно застосовувати методи осадження матриці з рідкого або газоподібного **стану**. Пластичний **зміцнювач** (дроту) допускають методи деформаційного ущільнення (плющення, **екструзія**), вибухового пресування.

При оптимальних режимах виготовлення композиційного матеріалу реалізується і оптимальний **ступінь фізико-хімічної** взаємодії компонентів; механізм руйнування здобутої композиції визначається в основному міцністю самих армуючих волокон, причому **унаслідок збільшеної** міцності зв'язку матриці з волокнами розрив окремих волокон не **здійснюється** відшаруванням їх від матриці, так що розірвані волокна продовжують нести навантаження (за винятком ділянок поблизу **обриву**), тобто здійснюється локалізація розривів волокон.

Прийнята в техніці традиційна схема:

сировина > матеріал > напівфабрикат > виріб      далеко не оптимальна в разі використання композиційних матеріалів. Операції виготовлення напівфабрикату і навіть особливо матеріалу по можливості слід виключити. Оптимальною слід визнати ту технологію, яка дозволяє максимально наблизити форму отриманого матеріалу або напівфабрикату до форми готової деталі або, краще, до цілісних вузлів конструкція, зводячи до мінімуму операції з'єднання і обробку. \*) При виготовленні деталей складної форми, а також вузлів конструкцій, вживаний автоматизований процес повинен забезпечити оптимальну схему армування, розраховану відповідно до напруги, що діє на деталь.

\*) **Приклад:** виготовлення сопла реактивного двигуна, що має форму:



1 – підстава.  
2 – робоча частка

Можна готувати по класичній схемі:

сировина (матриця, **зміцнювач**) > матеріал (**лист**) > напівфабрикат (конус, циліндр) > виріб.

Переважно по схемі:

сировина > виріб (методом намотування арматури і **подальшого** нанесення матриці).

### ТЕМА № 3

#### Теоретичні основи **отримання** композиційних матеріалів

##### 1. Термодинамічна і кінетична сумісність компонентів композитів

Практично всі КМ. є термодинамічно нерівноважними системами. По образному вираженню акад. І.В.Тананаєва композиції відносяться до систем, що «**живуть**», тобто до таких, в яких безперервно протікають процеси їх

подальшого розвитку, що приводять до більш т/д стабільному стану. Композити характеризуються наявністю розвиненої мережі внутрішніх меж розділу і градієнтів хімічних потенціалів компонентів матриці і армуючих елементів. Градієнти хімічних потенціалів, що виникають на поверхні розділу між армуючою складовою і матрицею, є рушійною силою процесів дифузії і хімічних реакцій. Термодинамічна нестабільність більшості композиційних матеріалів приводить до міжфазної взаємодії компонентів як в процесі виготовлення, так і в умовах експлуатації. Деяка взаємодія на поверхнях розділу в КМ. необхідна, оскільки через нього здійснюється зв'язок між складовими композиції і додання їй оптимальних властивостей.

Проте інтенсивна взаємодія приводить до взаємного розчинення компонентів, виникнення проміжних фаз, які у багатьох випадках утворюють крихкі зони прискорюючі появу тріщин у волокні і такі, що роблять вплив на рівень механічних властивостей композиційного матеріалу.

Хімічна взаємодія між компонентами стає особливо помітною при високотемпературній експлуатації композиту. Інтенсивна міжфазна взаємодія – головна перешкода на шляху створення жароміцних КМ.

Для того, щоб КМ. володів стабільними властивостями при підвищених температурах, його компоненти мають бути хімічно сумісні. Поняття про хімічну сумісність включає термодинамічну сумісність і кінетичну сумісність.

Термодинамічна сумісність – здатність матриці і армуючих елементів знаходитися в стані термодинамічної рівноваги необмежений час при температурах отримання і експлуатації. Термодинамічна сумісність компонентів визначається їх діаграмами рівноваги. Термодинамічно сумісні в ізотермічних умовах обмежене число композиційних матеріалів, що складаються з компонентів, практично нерозчинних один в одному в широкому інтервалі температур (приклад: компонент Cu – W). Більшість композитів складаються з термодинамічно несумісних компонентів, для яких з діаграм стану можна визначити тільки можливі фазові рівноваги, тип або спрямованість реакцій.

Відсутність термодинамічної сумісності зовсім не виключає можливість використання даної комбінації складових для отримання композиту, оскільки, варіюючи параметри отримання матеріалу, можна добитися прийнятної кінетичної сумісності компонентів.

Кінетична сумісність - здатність компонентів КМ. знаходитися в стані метастабільної рівноваги, контрольованої такими процесами, що термічно активуються, як дифузія, швидкість хімічних реакцій, швидкість розчинення або утворення нової фази. Термодинамічно несумісні складові композитів в певних температурно-тимчасових інтервалах можуть бути сумісні кінетично і достатньо надійно працювати в конструкціях.

Разом з хімічною сумісністю важливо забезпечити також фізичну (механічну) сумісність компонентів композиту, тобто відповідність їх пружних постійних, коефіцієнтів температурного розширення, показників пластичності, яке дозволить досягти міцності зв'язку, необхідного для ефективного передачі напруги через поверхню оброблю

## 2. Види міжфазної взаємодії в композитах

По вигляду взаємодії між волокнами і матрицею металеві композиційні матеріали можна розділити на 3 класи.

Таблиця. Класифікація КМ. за видами міжфазної взаємодії

І клас	II клас	III клас
Al – нерж. сталь *	Направлені евтектики Nb-W Ni-C Ni-W (вище 1233 До)	Al-C (вище 973 До)
Ag-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *		Al-SiO <sub>2</sub>
Al-B *		Ti-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Al-B/BN *		Ti-B
Al-SiC *		Ti-SiC
Al-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
Cu-W		
Mg-B		

B/BN – волокна бору, покриті нитридом бору

- - системи псевдопершого класу

До I класу відносяться композити, у яких армуючі елементи і матриця взаємно нерозчинимі і не утворюють хімічних сполук.

До II класу відносяться композити, у яких армуючі елементи і матриця утворюють один з одним тверді розчини, але не утворюють хімічних сполук.

До III класу відносяться композитів, у яких армуючі елементи і матриця здатні утворювати один з одним хімічні сполуки.

Таке ділення композитів засноване на термодинамічній сумісності або несумісності КМ., що становлять

Слід відмітити деяку умовність такого ділення, оскільки композити, що містять волокна і матрицю на основі одних і тих же компонентів, можуть відноситися до різних класів залежно від концентрації легуючих елементів, умов отримання і експлуатації матеріалу. Наприклад, композит з матрицею з чистої міді, армованої вольфрамовими волокнами (МКМ CU-W), відноситься до I класу. Проте, якщо мідь легувати невеликою кількістю титану, то цей же композит слід віднести до II класу, оскільки в даній системі вже з'являється взаємна розчинність. При підвищенні концентрації титану на поверхні розділу з'являється інтерметаліческие з'єднання і КМ. слід віднести до III класу.

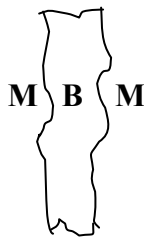
У таблиці приведені системи псевдопершого класу (позначимо \*). Це системи, що складаються з кінетично сумісних компонентів, в яких принципово можливе утворення нових хімічних сполук на поверхні (тобто ці системи винні були б віднесені до III класу). Проте оптимальна технологія отримання матеріалу дозволяє уникнути появи хімічних сполук в ході технологічного циклу, а експлуатація виробів здійснюється при достатньо низьких температурах, що унеможливають протікання хімічної реакції. Наприклад, композит МКМ Al-в, здобутий просоченням борних волокон алюмінієм, відноситься до III класу, оскільки при виготовленні композиції на межі розділу «волокно-матриця» утворюється шар бориду алюмінію. Проте цей же композит, здобутий за оптимальною технологією дифузійної зварки, слід віднести до композитів псевдопершого класу, оскільки реакція утворення бориду при такій технології не встигає пройти.

З геометричної точки зору поверхня розділу нескінченно тонка. Проте з фізико-хімічної точки зору вона має кінцеву товщину і представляє деяку

область, в якій відбуваються складні процеси адсорбції, сегрегації домішок, розчинення і зростання нових фаз. У зв'язку з цим, визначаючи поверхню розділу в металевих композиційних матеріалах, слід мати на увазі, що вона є зоною кінцевої товщини з істотно зміненим хімічним складом. У цій області формується зв'язок між матрицею і зміцнюючими волокнами, яка необхідна для передачі напруги між складовими композиційного матеріалу. З цього визначення безпосередньо виходить, що зв'язок між складовими композиційного матеріалу необхідний для передачі напруги через поверхню розділу, тому стан останньою багато в чому визначає механічні властивості композицій.

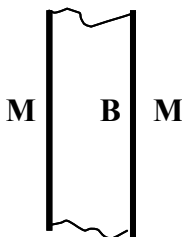
### 3. Типи зв'язків між компонентами композиту

Характеристика поверхні розділу буде повнішою, якщо розгледіти природу сил зв'язку між волокном і матрицею. Розрізняють шість типів зв'язку між волокном і матрицею в металевих композиційних матеріалах.



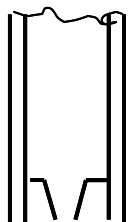
а) механічний зв'язок утворюється в результаті механічного зчеплення між матрицею і волокнами, що мають шорстку поверхню, або за рахунок сил тертя, обумовлених більшою радіальною усадкою матриці із-за різниці коефіцієнтів лінійного розширення. Композиції з чисто механічним типом зв'язку володіють низькою міцністю при поперечному розтягуванні і подовжньому стискуванні. Механічний зв'язок утворюється в системах з невзаємодіючими компонентами, хоча, звичайно, її дія виявляється практично у всіх композиційних матеріалах;

б) зв'язок при змочуванні і розчиненні реалізується завдяки силам



поверхневого натягнення. Якщо кут на поверхні розділу «волокно-матриця»  $\theta < 90^\circ$ , то розплавлена матриця змочує волокно. При цьому, як правило, відбувається незначне розчинення волокна без утворення яких-небудь хімічних сполук. У таких композиційних матеріалах виникає зв'язок шляхом змочування і розчинення. Передбачається, що такий зв'язок утворюється в композиціях на Al-ой і Ni-ой основах, армованих вуглецевими волокнами. Слід мати на увазі, що розплавлений Al не змочує вуглецеві волокна до тих пір, поки поверхня їх не буде оброблена спеціальним складом;

в) реакційний зв'язок - найбільш поширений тип зв'язку в композиціях III класу, що виникає в результаті хімічної реакції між волокном і матрицею з утворенням продуктів взаємодії.



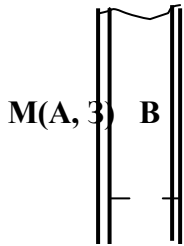
Прикладом може служити взаємодей-



**М В М**

ствие в системі «титан - борне волокно», при якому утворюється диборид титана  $TiB_2$ . Як правило, утворення цього типу зв'язку контролюється процесами ре активній дифузії.

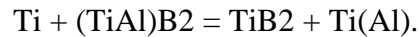
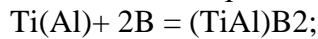
**Мвх**



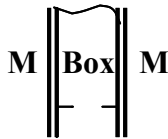
**М(А, З)**

г) обмінно-реакційний зв'язок – різновид реакційний зв'язку, обумовлена **обмінні** хімічні ре може бути **представлена** послідовністю декількох реакцій, одна з яких буде **контролю-** вати швидкість утворення зв'язку. При обмінних реакціях один з елементів легової матриці або волокна обмінюється місцями з елементом, що входить до складу продукту реакції.

Подібний зв'язок встановлюється при взаємодії борного волокна з титановою матрицею, леговою алюмінієм. При цьому відбувається обмін місцями між титаном матриці і алюмінієм в дибориде титана:



Спочатку твердий розчин Al в титані реагує з бором з утворенням складного диборида  $(TiAl)B_2$ , який потім реагує з титаном, утворюючи диборид титана і твердий розчин Al в металі;



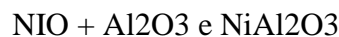
**Мох**

**(Мхвуоз)**

д) оксидний зв'язок також може розглядуватися як різновид реакційного зв'язку. Відомо, що розплавлені метали не змочують більшість оксидів. Тим часом існує великий клас композитів, в яких зміцнення здійснюється волокнами або частками оксидів.

У формуванні оксидного зв'язку в таких композитах важлива роль належить домішкам, що адсорбуються на поверхні розділу. Деякі домішки можуть знижувати поверхневу енергію, забезпечуючи сприятливі умови для змочування. Вони можуть також вступати в самостійні хімічні реакції з оксидами, утворюючи з'єднання.

Обидва ці обставини сприяють встановленню зв'язку між оксидами і матрицею. У металевих композиціях, армованих волокнами або ниткоподібними кристалами оксидів, зв'язок може встановлюватися за рахунок утворення шпинелей за умови надлишку кисню в матриці. Наприклад, між нікелем і ниткоподібними кристалами окислу алюмінію може протікати реакція з освітою шпинели:



е) змішаний тип зв'язку виникає в композиційних матеріалах псевдопершого класу після руйнування оксидних плівок і початку хімічної або дифузійної взаємодії. Він реалізується, наприклад, при пластичному переході систем псевдопершого класу в системи II і III класів.

#### 4. Кінетика дифузійної взаємодії компонентів

Питання високотемпературної взаємодії між матрицею і армуючими елементами тісно пов'язані з вибором способу **отримання** Км. **Щоб** правильно

розробити технологічний процес, потрібно знати закономірності дії окремих чинників і ступінь їх впливу на властивості композиції.

Аналіз міжфазної взаємодії в композитах, компоненти якої утворюють між собою тверді розчини або з'єднання пов'язаний з вирішенням двох типів завдань.

I тип - розрахунок розподілу концентрацій компонентів в дифузійній зоні по відомому коефіцієнту дифузії.

II тип – визначення коефіцієнтів дифузії або констант швидкості росту дифузійних зон по відомому розподілу концентрацій в цих шарах.

Завдання I типу вирішуються звичайно на основі рівнянь Фіка, що описують закономірності перенесення речовини.

### Закони Фіка

Рівняння першого закону Фіка для одновимірної дифузії у напрямі «**x**» записується у вигляді:

$$j_x = -D(\dots)$$

де  $j_x$  – щільність потоку речовини у напрямі “x”.

Знак “мінус” означає, що потоку направлений з області з більшою концентрацією в область з меншою.

Для тривимірної дифузії рівняння першого закону Фіка набуває вигляд:

$$j = -D \text{grad } C$$

D – коефіцієнт дифузії.

Другий закон Фіка для одновимірної дифузії виражається рівнянням:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}.$$

Для тривимірної дифузії другого рівняння Фіка набуває вигляд:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}.$$

В разі залежності коефіцієнта дифузії D від концентрації З рівняння слід записати в такій формі:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial c}{\partial z} \right).$$

Розглянемо випадок дифузії через плоску поверхню. Випадок, що ідеалізується, – дифузія з нескінченно тонкого шару в необмежений зразок, який вважається за нескінченну середу ( $-8 < x < 8$ ).

У крапці **X<sub>0</sub>** знаходиться нескінченно тонкий шар дифундируючого речовини (миттєве джерело потужністю **Q<sub>n</sub>**). У всіх інших точках зразка в початковий момент концентрація цієї речовини дорівнює нулю. У момент часу t розподіл концентрації дифундируючого речовини описується вираженням :

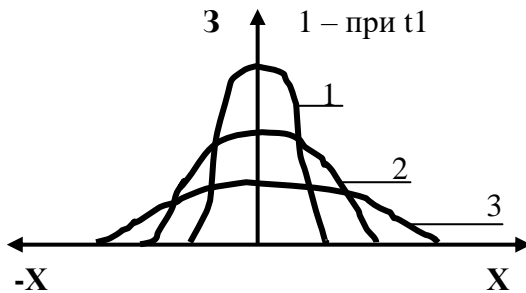
$$C_{x,t} = \frac{1}{2} \left( \frac{\theta_n}{\sqrt{\pi D t}} \right) \exp \left( - \frac{(x - x_0)^2}{4 D t} \right).$$

У окремому випадку при **X<sub>0</sub> = 0**

$$C_{x,t} = \frac{1}{2} \left( \frac{\theta_n}{\sqrt{\pi D t}} \right) \exp \left( - \frac{x^2}{4 D t} \right).$$

Максимального значення в цьому випадку концентрація досягає при **X = 0**.

Розподіл речовини, що має в початковий момент часу характер Гауссиани (Гаусесово розподіл) з часом змінюється:



2 – при t2  
3 – при t3      t3 > t2 > t1

Максимум кривою розподілу відповідає:

$$C_{\max} = \frac{1}{2} * \frac{\theta_u}{\sqrt{\pi Dt}}$$

Розподіл концентрації **Z** речовини, диффундируючого з шару кінцевої товщини, в середі з сферичною симетрією і в середі з циліндровою симетрією описується достатньо складними рівняннями, вивчення яких вимагає володіння складним математичним апаратом і в нашому курсі не розглядається.

Форма включень істотно впливає на їх кінетичну стійкість в матриці: циліндрові включення менш стійкі, чим включення у вигляді пластин, сферичні менш стійкі, чим циліндрові.

Тепер розгледимо температурну залежність коефіцієнта дифузії. Вона виражається рівнянням Арреніуса:

$$D = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right),$$

де **D<sub>o</sub>** – передекспоненціальний множник, см<sup>2</sup>/с;

**E<sub>a</sub>** – енергія активації, дж/моль;

**R** – універсальна газова постійна;

**T** – абсолютна температура, До.

Знання величин, що входять в приведені вище рівняння, дозволяє прогнозувати **ступінь** дифузійної взаємодії матриці і армуючих елементів для конкретних температурно-тимчасових умов експлуатації Км.

Значення величин **E<sub>a</sub>** і **D<sub>o</sub>** визначають для кожної системи “матриця-арматура” експериментально, аналізуючи мікроструктуру перехідної зони, рентгенівського або мікрорентгеноспектрального методами металографії. Сумісне використання цих методів у поєднанні з вимірами мікротвердості дифузійних зон дозволяє не лише визначити величину зони взаємодії, але і встановити характер розподілу хімічних елементів, що входять в композит, наявність і розміри проміжних з’єднань, що утворилися в результаті дифузії в граничній області “«матриця-арматура»”

### 5. Фізико-хімічні процеси на поверхні розділу компонентів

Основна фізико-хімічна вимога до поверхонь розділу полягає в тому, щоб в процесі роботи композиційного матеріалу вони зберігали свою

стабільність. Стабільність поверхонь розділу може бути порушена в результаті протікання хімічних реакцій, процесів сфероїдизації або агломерація. Розрізняють декілька видів фізико-хімічної нестабільності поверхонь розділу в металевих композиційних матеріалах:

а) унаслідок процесів розчинення одного з компонентів і повторного виділення його при ізотермічному або циклічному відпалі, поверхні розділу в евтектичних композиціях, зміцнених монокарбідами тугоплавких металів (**Ta**, **Hf**, **Nb**), втрачають свою стабільність. Спочатку гладкі бічні поверхні таких вусів після термоциклірування перетворюються на зазублені. Природно, така зміна морфології ниткоподібних кристалів насамперед відбивається на механічних властивостях композиту;

б) нестабільність поверхонь розділу іншого роду може бути пов'язана з розчиненням зміцнюючої фази в процесі отримання композиції або при високотемпературній експлуатації. Наприклад, жароміцні композиції на основі нікелю або ніобію, армовані вольфрамовим дротом, отримують вакуумним просоченням розплавом. Вже при заливці **W-ая** арматура частково розчиняється і тим самим зменшується її об'ємна частка. Додаткове зниження об'ємного змісту вольфрамового дроту відбувається в результаті розчинення в твердій фазі при високотемпературній експлуатації. Проте утворення більш легovanого твердого розчину **Nb-W** і **Ni-W**, що володіє більшою міцністю, чим початкова матриця, компенсує до деякої міри зниження міцності, обумовлене пониженням об'ємної частки арматури і її рекристалізацією.

в) найчастіше порушення стабільності поверхні розділу відбувається в результаті хімічних реакцій між волокном і матрицею, при яких утворюються побічні продукти взаємодії. Оскільки міцність шару продуктів реакції менше міцності армуючого волокна, то при навантаженні композиційного матеріалу розтріскування цього шару ініціюватиме руйнування волокон і, отже, всій композиції.

Реакція між волокном і матрицею може протікати або на поверхні розділу «матриця-продукт» взаємодіючи, або на поверхні розділу «продукт взаємодії – волокно». У першому випадку транспортування матеріалу здійснюється дифузією атомів матеріалу волокна через з'єднання, в другому – атомів матриці через з'єднання. В деяких випадках обидва ці процесу протікають одночасно, і при нескомпенсованості зустрічних дифузійних потоків можливе утворення пір по механізму Киркендала.

Як вже наголошувалося, кінетична сумісність волокон і матриці визначається процесами дифузії, швидкостями хімічних реакцій між ними, а також швидкостями розчинення ними зростання нових фаз. Дослідження кінетики взаємодії в металевих композиційних матеріалах необхідне для раціонального вибору комбінації «матриця-волокно», визначення оптимальних параметрів отримання композицій і оцінки їх часу експлуатації.

Як правило, швидкість росту зони взаємодії між двома твердими фазами контролюється не швидкістю реакції, а дифузією, як найбільш повільним процесом. В цьому випадку, залежність товщини зони взаємодії **X** від часу **t** описується простий параболическою формулою:

$$X = K\sqrt{t},$$

де **Do** – константа швидкості росту;

**t** – час дифузійного відпалу.

Температурна залежність константи «**K**» описується формулою Арреніуса

$$K = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right),$$

де  $E$  – енергія активації процесу, величина якої в два рази менше енергії активації дифузії.

Для систем псевдопершого класу (**AL-B, MG-B і ін.**) величина зони взаємодії складає близько 2 мкм. Точні виміри величини цієї зони зв'язані з великими труднощами, що пояснює відмінності літературних відомостей.

Стан межі розділу і її фізичні, і механічні характеристики істотно впливають на механічні властивості і характер руйнування композиту. Якщо сдвигова міцність поверхонь розділу вище за міцність на зрушення матриці, то руйнування композицій починається або в матриці, або у волокнах. Така ситуація реалізується в КМ. з «прочностними поверхнями розділу». Механічні властивості таких композитів не залежать від стану поверхні розділу.

У іншому граничному випадку, коли зв'язок між компонентами є слабкою ланкою, руйнування композиції починається з поверхонь розділу. Найчастіше композиції із слабкими поверхнями розділу відносяться до третьої і псевдопершої груп. У композиціях із слабкими поверхнями розділу можливі чотири типи руйнування:

- 1) руйнування під дією нормальної розтягуючої напруги, обумовленої **пуассоновською** взаємодією між компонентами;
- 2) руйнування від дотичної **напруги**, що виникає при розриві волокон і перерозподілі **напруги** через поверхню розділу;
- 3) руйнування від розтягуючої напруги зони продуктів взаємодії;
- 4) руйнування волокон **в результаті** їх розміцнення з-за реакції взаємодії.

Таким чином, хімічна взаємодія між волокнами і матрицею МКМ **істотно** впливає на поведінку композиції під навантаженням. Для **отримання** композиції з оптимальним комплексом механічних властивостей слід **допустити** деяку міру хімічної взаємодії. **Стан** поверхні розділу, міцність зв'язку між компонентами безпосередньо впливають на міцність в поперечному **напрямі**, в'язкість руйнування, втомні властивості і міцність при **стискуванні**. У меншій мірі міцність зв'язку впливає на міцність композиту при навантаженні в подовжньому **напрямі** і тривалу міцність **одновісноармованих** волокнистих композицій.

## **6. Міжфазна взаємодія і вплив методів виготовлення на властивості композитів**

КМ. є гетерогенними системами, які складаються з декількох фаз різної природи. Термодинамічна нестабільність більшості КМ. **приводить** до міжфазної взаємодії компонентів, як в процесі виготовлення, так і в умовах експлуатації. Деяка взаємодія на поверхнях розділу в композитах необхідна, оскільки через них здійснюється зв'язок між складовими композиції і передача **напруги**. **Проте** інтенсивна взаємодія **приводить** до взаємного розчинення компонентів, виникнення проміжних фаз, які у багатьох випадках утворюють крихкі зони, що прискорюють появу тріщин у волокні і роблять вплив на рівень механічних властивостей Км. Це **викликає** необхідність детального вивчення питань, пов'язаних з взаємодією матриці і волокон при підвищених температурах.

При отриманні і експлуатації композитів має місце втрата міцності волокон і всього матеріалу в цілому.

За деякими даними ця втрата міцності може досягати 30%. Наприклад, міцність волокон **SiC** в титановій матриці при виготовленні композиту знижується від 320 до 210 кгс/мм<sup>2</sup>.

Найбільш істотними причинами вказаного зниження властивостей є хімічна взаємодія на межах розділу «**матриця-волокно**» і «волокно-підкладка (**W-ая нитка**)». Причому перше має превалююче значення, тобто найбільш істотне зниження властивостей спостерігається в результаті розчинення, утворення нових фаз, окрихчування і інших процесів, що протікають на межі розділу матриці з волокном.

Одним з шляхів зменшення взаємодії є спеціальне легування матриць і армуючих засобів елементами, що знижують інтенсивність міжфазної взаємодії. Проте вибір таких легуючих елементів чисто емпіричним (дослідним) шляхом є завданням вельми трудомісткою в силу багатоваріантності систем. Тому створення розрахункових методів прогнозування вибору оптимальних легуючих елементів, що забезпечують сумісність матриць з упрочнителями, а також прогнозування терміну служби КМ. в різних умовах експлуатації, є одному з найважливіших завдань в розвитку проблеми композиційних матеріалів.

Прикладом емпіричного підходу до вирішення проблеми сумісності компонентів може бути створення жароміцних композитів на **Ni-ой** основі. Система **NI-W** при температурі 1000-1200°C володіє обмеженою розчинністю при максимальному змісті **W** в **Ni** рівному 32-35%. Вольфрамові волокна розчиняються в **Ni-ой** матриці із-за градієнта концентрацій вольфраму у волокні і матриці. Чим менше ця різниця, тим менше потік **W** з волокна в матрицю і тим стабільніше поводить себе система при підвищених температурах. Таким чином, збільшення стабільності композиту може бути досягнуте зменшенням відмінності в хімічних потенціалах матеріалу волокна в самому волокні і в матриці. На практиці нікелеву матрицю легують вольфрамом. При цьому спостерігається зменшення частки волокна, розчиненого в матриці, а досягши граничного насичення нікелю вольфрамом (до 35%) розчинення арматури в матриці можна виключити взагалі.

Термодинамічно стабільну систему можна створити **не лише** на основі бінарного твердого **матричного** розчину, але і за рахунок заміщення **частки** вольфраму третім компонентом, наприклад, хромом. При цьому склад матриці також повинен відповідати складу гранично насиченого твердого розчину.

Легуванням матриці можна підвищити високотемпературну стабільність композиту лише у тому випадку, коли матриця і арматура утворюють обмежені тверді розчини без утворення інтерметалевих **з'єднань**.

Дослідженнями багатьох систем показана принципова **можливість істотного** зменшення взаємодії компонентів шляхом легування матриці.

У разі, коли при високотемпературній взаємодії утворюються хімічні сполуки іншим способом підвищення стабільності міжфазної межі є створення протицифузійних бар'єрних шарів, тобто покриттів на волокнах. Матеріали таких покриттів при температурах експлуатації не повинні розчинятися в матриці і у волокнах і розчиняти їх в собі. У покриттів має бути достатній запас міцності і пластичності, щоб введення їх не викликало разупрочнення і окрихчування композиту в цілому. Повністю задовольнити всім вимогам частенько не вдається, проте можна підібрати такі покриття, швидкість взаємодії яких з компонентами композиту на декілька порядків менше, ніж

швидкість взаємодії матриці і незахищеного упрочнителя. Міжфазна стабільність таких композитів виявляється достатньою для їх надійної експлуатації при високих температурах протягом сотень або тисяч годинників.

Як матеріали протидифузійних покриттів рекомендують:

оксиди торія, алюмінію, цирконію;

карбід гафнію;

**нитрид** титану

для **Ni-Mo-** матриці і **W армат**.

Для матриць на основі Ti (до 800oC) рекомендується покриття SiC, ZrC, TiC; для матриць на основі Cr – Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Товщина таких покриттів лежить в межах 5-10 мкм.

При рішенні питання про вибір матриці і волокна в композиті, технології його отримання і умов експлуатації необхідно також враховувати механічну сумісність, тобто відповідність температурних коефіцієнтів лінійного розширення матриці і волокна, які повинні мати близькі значення. Інакше після термоциклірування матеріалу залишкова напруга може привести до руйнування поверхні розділу або волокна.

Для збереження стабільності матеріалу дуже важливо вибрати метод отримання композиту. Зменшення взаємодії матриці з упрочнителем можна добитися розробкою високошвидкісних і низькотемпературних методів виготовлення КМ. До таких методів виготовлення композицій, при яких не встигають проходити дифузійні процеси і взаємодію такою мірою, щоб не викликати зниження властивостей, відносяться вибухове пресування шаруватих і волокнистих композицій, гідродинамічне гаряче пресування і інші методи твердофазного виготовлення. Одним з найбільш прогресивних методів виготовлення композитів з металевими волокнами є динамічне гаряче пресування (ДГП), при якому ущільнення матеріалу відбувається під дією ударного навантаження протягом доль секунди.

Легкі КМ. з Ф1-ой матрицею, армованою борними волокнами, **отримують** головним чином методом дифузійного **з'єднання**.

Таким чином, аналіз взаємодії між компонентами і впливу технологічних **чинників** на структуру і властивості КМ. дозволяє намітити **шляхи** вирішення проблеми стабілізації міжфазної **межі**:

- 1) легування матриці для максимально можливого зменшення взаємодії і розчинності в ній армуючих волокон;
- 2) **створення** бар'єрних шарів на волокнах для запобігання сильній взаємодії останніх з матрицею;
- 3) розробка низькотемпературних і швидкісних методів виготовлення деталей з композиційних матеріалів, при яких має місце необхідний рівень взаємодії, що забезпечує досягнення розрахункового значення властивостей;
- 4) **створення** методів розрахунку, які дозволяли б прогнозувати склади матриць зміцнювачів, що забезпечують **збереження** заданого рівня властивостей при тривалій експлуатації.

Корисне комплексне використання прийомів стабілізації міжфазної **межі**, наприклад, легування матриці з одночасним нанесенням бар'єрного шару на армуюче волокно.

## Тема № 4

### ПРИНЦИПИ КОНСТРУЮВАННЯ КОМПОЗИЦІОННИХ МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ З НИХ

#### 1. Прогнозування властивостей композитів

У зв'язку з тим, що в композитах **поєднуються** два компоненти або більш, можливе прогнозування їх властивостей на основі властивостей компонентів, їх об'ємної **частки**, взаємного розташування і геометричних розмірів фаз. Методики розрахунків властивостей добре **представлені** в літературі. Ми **зупинимось** лише на основних **положеннях** підходу до прогнозування властивостей композитів.

Потенційні **можливості** використання фізичних властивостей КМ. величезні, хоча до цих пір вони широко не використовуються. Ці властивості можна об'єднати в **наступні** групи:

- а) властивості-суми;
- б) властивості-твори;
- в) властивості, засновані на структурних параметрах, таких як анізотропія, періодичність фаз, а також вплив розмірів фаз і **меж** розділу.

Фізичні властивості матеріалів можна визначити за допомогою X-Y – ефекту, в якому X, – вхідний, а Y – вихідний параметри. Тоді поведінка матеріалу задається величиною A властивість, наприклад, термічне розширення, діелектрична, магнітна проникність, **електро-** і теплопровідність.

**Властивості-суми** - це такі властивості, в яких X-Y – ефект КМ. є результатом комбінації X-Y ефектів його компонентів.

Для **прикладу** візьмемо композит, що складається з 2-х фаз. Якщо ми можемо нехтувати впливом **меж** розділу на властивість A, то величина властивості КМ. визначається об'ємними долями компонентів за правилом аддитивності, або за правилом сумішей:

$$A = A_m \cdot v_m + A_v \cdot v_v$$

де  $A_m$ ,  $A_v$  – властивості матриці і що армує елемента;

$v_m$ ,  $v_v$  – об'ємна частка компонентів.

Якщо X-Y – ефекти компонентів мають протилежний знак, вони можуть **взаємно компенсувати** один одного. Наприклад, композит може мати незалежний від температури електроопір завдяки тому, що один компонент має позитивний температурний коефіцієнт електроопору, а інший – **негативний**.

Концепція **властивостей-творів** має величезну позитивну цінність при створенні композитів з новими властивостями. Вона заснована на припущенні, що вихід від X-Y-ефекта в компоненті 1 може діяти як вхід для Y-z – ефекту в компоненті 2, що приводить до загального X-z – ефекту:

$$\left(\frac{dZ}{dX}\right)_k = k \left(\frac{dY}{dX}\right)_1 * \left(\frac{dZ}{dY}\right)_2,$$

де  $k$  – коефіцієнт об'єднання.

Властивість-**твір** може бути **абсолютно** новою або **представляти** відоме перетворення з вищим виходом (синергетичний ефект). Механізм об'єднання, що забезпечує **перенесення** величини Y від першого компоненту до другого може бути будь-якої природи, – механічний, електронний, магнітний, тепловий або хімічний.



Прикладом електронного об'єднання може бути рентгенофлюоресцентний КМ., що складається з дрібних ( $\sim 1$  мкм) часток  $\text{PbCl}_2$  в антраценової матриці. Падаючі рентгенівські промені ( $X$  – вхідний параметр для компоненту  $\text{PbCl}_2$ ) вивільняють в ній вторинні електрони (вихідний параметр  $Y$ ). Ці електрони, що мають пробіг в декілька мікрон, велику частку часу проводять в антропоцені, який володіє властивістю ецинциляції (свічення) при опроміненні ( $Z$  – вихідний параметр для другого компоненту).

Даний композит демонструє ефективність перетворення рентгенівських променів  $X$  у видиме світло  $Z$ , що перевищує ефективність антрацену приблизно на **порядок**.

Існують і такі властивості, які можна визначити, знаючи періодичність структури, вплив розміру фаз і міжфазних **меж**. Як **приклад** можна привести електропровідність матеріалу, що складається з ізолюючої матриці і **однонаправлених** металевих проволікав. Електропровідність у напрямі осей проволікав буде в десятки разів вище, ніж в поперечному **напрямі**.

Якщо навіть переважають властивості **меж** розділу, картина може змінитися корінним чином. Наприклад, тепло- і електропровідність композитів можуть бути нижче, ніж **у** складових його фаз **унаслідок** теплового або електричного контактного опору між фазами.

## **2. Ізотропні і анізотропні матеріали**

По орієнтації і типові арматури всі композити можна розбити на **дві групи**: ізотропні і анізотропні.

**Ізотропними** називаються матеріали, що мають однакові властивості на всіх напрямках. До них відносяться дисперсноупрочненні композити, псевдосплави і хаотично армовані матеріали. У дисперсноупрочнених матеріалах зміцнюючі елементи мають приблизно равноосную форму, в хаотично армованих зміцнення здійснюється короткими (дискретними) частками голчаної форми, хаотично орієнтованими в просторі. Як такі частки використовуються відрізки волокон або ниткоподібні кристали (вуса); при цьому композити виходять квазіізотропними, але ізотропними в об'ємі всього виробу.

**Анізотропними** називаються матеріали, властивості яких залежать від напрямку. До таких КМ. відносяться матеріали, волокна яких орієнтовані в певних напрямках – однонаправлені, шаруваті і трохмерноармированні.

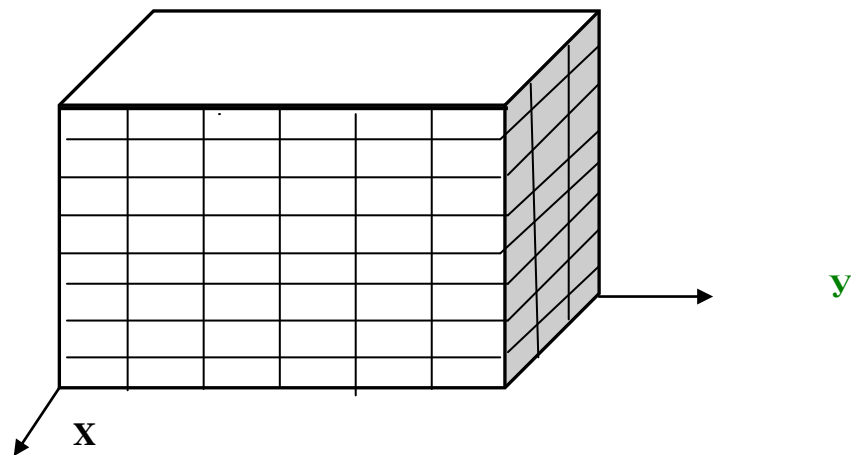
Анізотропія композитів **конструкційна**; її спеціально **закладають** в КМ. для виготовлення конструкцій, де вона найбільш бажана. На відміну від такої анізотропії існує технологічна анізотропія, що виникає при пластичній деформації ізотропних матеріалів, і фізична анізотропія, властива кристалам у зв'язку з особливостями **будови** їх ґрат.

У техніці **зазвичай** використовують анізотропні композити з певною симетрією властивостей. При вивченні їх **фізико-механичних** характеристик реальний, як правило неоднорідний, матеріал **представляють** як деяку суцільну **середу**, що ідеалізується, з симетрією **будови** і властивостей. Найбільш **частки** практично **важливі** орієнтовані КМ. вдається **представити** як **ортотропні**.

**Ортотропними** (або ортогонально анізотропними) називаються матеріали, що характеризуються наявністю в кожному елементарному об'ємі три взаємно перпендикулярної площини симетрії властивостей. З достатнім

ступенем точності до таких матеріалів можна віднести КМ., армовані волокнами з подовжньо-поперечним укладанням (див. мал.), а також шаруваті композити з правильним чергуванням шарів.

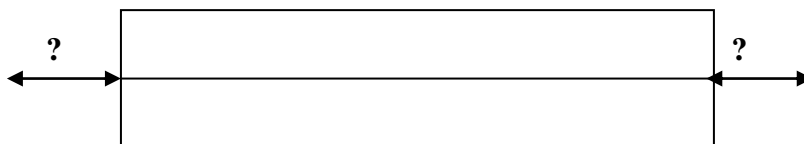
Розглянемо поведінку анізотропних тіл при навантаженні.



Мал. Схема КМ. з подовжньо-поперечним укладанням волокон

### 3. Закон Гука для ізотропних матеріалів

Закон Гука встановлює зв'язок між пружною напругою  $\sigma$ , що діють на тіло, і деформаціями  $\epsilon$ , викликаними цією напругою.



Для одноосного розтягування або стискування ізотропного тіла, на яке діє тільки одна сила, закон Гука записується у вигляді:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

де  $\sigma$  – напруга, що діє;

$\epsilon$  – деформація тіла.

Коефіцієнт пропорційності  $E$  називається модулем пружності при одноосному розтягуванні або модулем нормальної пружності, або модулем Юнга.

$\epsilon = 1$  при  $\sigma = E$ .

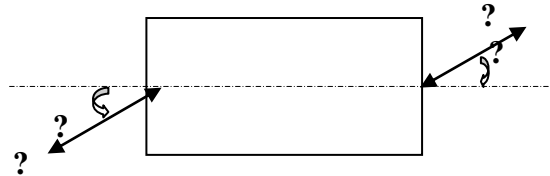
Тобто модуль Юнга чисельно дорівнює величині напруги, що викликає одиничну деформацію тіла.

Модуль Юнга – це константа ізотропного матеріалу, жорсткість, що характеризує його.

При одноосному розтягуванні матеріалу разом із збільшенням його довжини у напрямі дії сили (наприклад, по осі **X**) зменшуються поперечні розміри уздовж інших осей (**Y** і **Z**). Відношення відносних деформацій зразка в поперечному і подовжньому напрямках називається коефіцієнтом Пуассона ?:

$$\nu = -\frac{\xi_y}{\xi_x} \quad (2)$$

По аналогії з розтягуванням зв'язок між дотичною напругою  $t$  і відповідними пружними сдвиговими деформаціями можна записати



співвідношенням:

$$t = G$$

де  $t$  – величина дотичної напруги, прикладеної під кутом  $\alpha$  до осі тіла;

$G$  – величина сдвигових деформацій тіла.

$G$  – модуль пружності при зрушенні або модуль зрушення.

$$G = t \text{ при } \alpha = 1$$

тобто модуль **зрушення** чисельно дорівнює величині дотичної **напруги**, що **викликає** **одиничну зсувну** деформацію.

При гідростатичному стискуванні ізотропних тіл закон Гука встановлює пряму пропорційність між гідростатичним тиском  $P$  і зміна об'єму  $\Delta V/V$ :

$$P = -K$$

де  $K$  – модуль об'ємної деформації.

Закон Гука справедливий **тільки** при порівняно малих величинах **напруги** і **деформацій**, коли ще немає **необоротних** пластичних деформацій і матеріал поводить себе як **абсолютно** пружне тіло.

Співвідношення (1) і (3) характеризують зв'язок між **напругою** і деформацією в одному і тому ж **напрямі**. **Але** до тіла може бути прикладені **напруга** в двох або три взаємно перпендикулярних **напрямах**. В результаті мають **справу** відповідно з **плоским** і з **об'ємним** напруженими **станом** матеріалу.

Проте навіть під дією одноосного розтягування або стискування тіло деформується в трьох взаємно перпендикулярних напрямках **X**, **Y** і **Z**, тобто одноосний (лінійне) напружений стан приводить до виникнення тривісного, або об'ємного, деформованого стану.

У **загальному** випадку зв'язок між **напругою** і деформаціями для ізотропного тіла встановлює узагальнений закон Гука, який в технічних позначеннях має **вигляд**:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = \\ \sigma_y = \end{array} \right.$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (5)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{1}{G} \tau_{xz}$$

де  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – нормальна напруга в трьох взаємно перпендикулярних напрямках **X, Y і Z**;

“ $\epsilon_x$ ”, “ $\epsilon_y$ ”, “ $\epsilon_z$ ”, - відносні деформації у напрямках відповідних осей координат (осьові деформації);

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ , - дотична напруга;

$\epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{xz}$ , - кутові (сдвигові) деформації.

Пружні константи **E, G** ? і **D** зв'язані між собою співвідношеннями:

$$\begin{cases} E = 2G(1 + \nu) \\ E = 3K(1 - 2\nu) \end{cases} \quad (6)$$

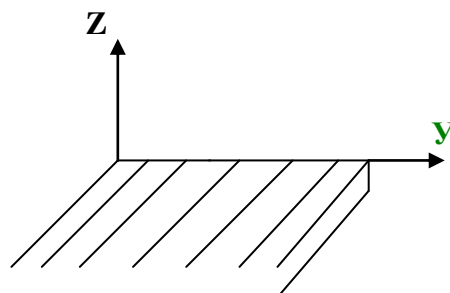
Тільки дві з чотирьох констант незалежні; дві інші можна обчислити із співвідношення (6) по цих двом відомим.

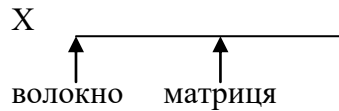
Так, щоб здобути повну інформацію про співвідношення між напруженим і деформованим станом пружного ізотропного тіла, достатньо знати його пружні константи.

#### 4. Модулі пружності однонаправлених армованих композитів

Розглянемо, як розрахувати модулі пружності армованих КМ. по відомих пружних характеристиках і об'ємних концентраціях його компонентів.

Зупинимось на простому випадку КМ. – системі з паралельно укладених в одному напрямку армуючих елементів, зв'язаних між собою матричними прошарками (мал. 1).





Мал. 1. Схематичне зображення структури однонаправленого КМ.

Пластини (моношари) таких матеріалів – основа для **отримання** різних шаруватих КМ., а по відомих характеристиках **однонаправлених** матеріалів можна розраховувати властивості композицій з різною орієнтацією волокон в суміжних шарах. Тому надалі основна увага приділятиметься властивостям **однонаправлених** композицій.

**Введемо** допущення: волокно і матриця – ізотропні пружні матеріали, які при навантаженні композиції деформуються спільно, що забезпечується наявністю між ними жорсткому зв'язку.

### Модуль нормальної пружності $E_{XK}$ (У напрямі осей волокон)

Навантажимо дану пластину силоміць  $P_X$ . При цьому відносна деформація  $e_{XK}$  композиції у напрямі осі  $X$  через сумісність деформацій і волокон дорівнюватиме деформації матриці  $e_{XM}$  і волокон  $e_{XV}$  :

$$e_{XK} = e_{XM} = e_{XV} \quad (7)$$

Сума сил, що діють на матрицю  $P_{XM}$  і на волокно  $P_{XV}$ , дорівнює загальній силі  $P_{XK}$ :

$$P_{XK} = P_{XM} + P_{XV} \quad (8)$$

Скористаємося тим, що силу можна представити як твір напруги на площу поперечного перетину: ( $P = s * F$ )

$$s_{XK} * F_K = s_{XM} * F_M + s_{XV} * F_V \quad (9)$$

де:  $s_{XM}$ ,  $s_{XV}$  і  $s_{XK}$  - розтягуюча напруга відповідно в матриці, волокні і композиції у напрямі осі  $X$ .

$F_M$ ,  $F_V$  і  $F_K$  – поперечні перетини матриці, волокна і композиції відповідно.

Розділимо обидві частки рівності (9) на  $F_K$  і здобудемо:

$$s_{XK} = s_{XM} * V_M + s_{XV} * V_V \quad (10)$$

де  $V_M$  і  $V_V$  – об'ємна частка відповідно матриці і волокна в КМ.:

$$V_M = \frac{F_M}{F_K}; \quad V_V = \frac{F_V}{F_K}; \quad V_M + V_V = 1.$$

Закон Гука для одноосного напруженого **стану** дозволяє записати **наступне**:

$$\begin{aligned} s_{XM} &= e_{XM} * E_{XM} \\ s_{XV} &= e_{XV} * E_{XV} \\ s_{XK} &= e_{XK} * E_{XK} \end{aligned} \quad (11)$$

Тут  $E_{XM}$ ,  $E_{XV}$  і  $E_{XK}$  – модулі Юнга відповідно матриці, волокна і композиції у напрямі  $X$ .

З урахуванням ізотропної волокон і матриці, індекс « $X$ » у їх характеристиках можна опустити.

У рівнянні (10) замість **напруги** підставимо їх вирази з (11) і врахуємо умову (7):

$$E_{XK} = E_V * v_V + E_M * v_M$$

$$\text{або } \boxed{E_{\text{ХК}} = E_{\text{В}} * v_{\text{В}} + \dot{I}_{\text{М}}(1 - V_{\text{В}})} \quad (12)$$

Виразення (12) дозволяє оцінити величину модуля нормальної пружності **однаправленого** КМ. у напрямі армування по відомих концентраціях і модулях пружності матриці і **волокон**.

### Модуль пружності $E_{\text{УК}}$

(У напрямі, перпендикулярному до осі волокон)

Розгледимо поведінку моделі (рис.1) при навантаженні її силою  $P_{\text{У}}$ , перпендикулярною до осі волокон. В цьому випадку напруга в кожному з компонентів композиту буде однаковими:

$$s_{\text{УВ}} = s_{\text{УМ}} + s_{\text{УК}} \quad (13)$$

а абсолютна деформація  $s_{\text{УК}}$  всієї композиції дорівнюватиме сумі абсолютних деформацій матриці  $s_{\text{УМ}}$  і волокон  $s_{\text{УВ}}$  (14)

Абсолютна деформація  $s$  пов'язана з відносною  $e$  співвідношенням:

$$s = l * e \quad (15)$$

де  $l$  – довжина елемента, що деформується.

Підставимо рівняння (15) в рівняння (14):

$$e_{\text{УК}} * l_{\text{УК}} = e_{\text{УМ}} * l_{\text{УМ}} + e_{\text{УВ}} * l_{\text{УВ}} \quad (16)$$

де  $e_{\text{УК}}$ ,  $e_{\text{УМ}}$ ,  $e_{\text{УВ}}$  - відносні деформації відповідно композиції, матриці і волокон у напрямі осі «У»;

$l_{\text{УК}}$ ,  $l_{\text{УМ}}$ ,  $l_{\text{УВ}}$  – відповідно довжина даного елемента КМ., сумарна довжина матричних прошарків і волокон у напрямі «У».

Якщо для простоти прийняти, що перетини волокон прямокутні, то:

$$\frac{l_{\text{УВ}}}{l_{\text{УК}}} = V_{\text{В}}; \quad \frac{l_{\text{УМ}}}{l_{\text{УК}}} = V_{\text{М}} \quad (17)$$

Розділивши обидві частки рівняння (16) на  $l_{\text{УК}}$  з урахуванням залежностей (17) здобудемо:

$$e_{\text{УК}} = e_{\text{УМ}} * V_{\text{М}} + e_{\text{УВ}} * V_{\text{В}} \quad (18)$$

Виразив за допомогою закону Гука деформації у вираженні (18) через відповідну напругу і модулі пружності:

$$s = E * e \quad e = \frac{\sigma}{E} \quad \text{і взявши до уваги умову (13) прийдемо до}$$

співвідношення, що дозволяє оцінити модуль пружності композиції в напрямі, перпендикулярному до подовжньої осі волокон:

$$\boxed{E_{\text{УК}} = \frac{E_{\text{В}} * E_{\text{М}}}{E_{\text{М}} * V_{\text{В}} + E_{\text{В}}(1 - V_{\text{В}})}} \quad (19)$$

### Коефіцієнт Пуассона

За визначенням коефіцієнт Пуассона композицій

$$\nu_{\text{ХУК}} = e_{\text{УК}} / e_{\text{ХК}} \quad (20)$$

При навантаженні силоміць  $P_{\text{Х}}$  деформацію  $e_{\text{УК}}$  можна розрахувати із співвідношення (18) з урахуванням того, що

$$e_{\text{розум}} = \nu_{\text{М}} e_{\text{ГМ}}(1 - v) + \nu_{\text{В}} e_{\text{ХВВ}} \quad (21)$$

Підставляючи у формулу (20) **віріз** (21) і використовуючи умову (7), **отримуємо** формулу для визначення **коефіцієнта** Пуассона:

$$\nu_{хук} = \nu_{м}(1 - V_{в}) + \nu_{в} V_{в} \quad (22)$$

### Модуль зрушення

При навантаженні даної моделі КМ. насательними напругою  $t_{ху}$  (мал. 2) навантаження сприймається матрицею і волокнами послідовно, через що величини дотичної напруги в матриці  $t_{хум}$  і волокнах  $t_{хув}$  однакові:

$$t_{хук} = t_{хум} = t_{хув} \quad (23)$$

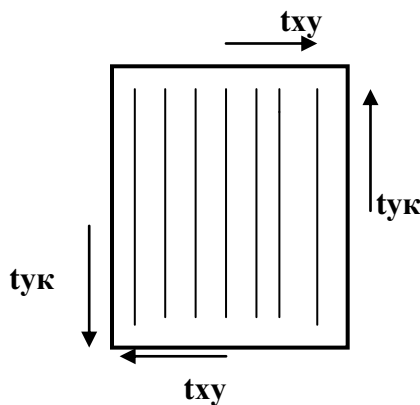


Рис.2

Схема навантаження **однонаправленого** КМ. дотичною напругою

При цьому деформація **зрушення** КМ., по аналогії з **вираженням** (18), **визначається** співвідношенням:

$$\gamma_{хук} = \gamma_{ув} * V_{в} + \gamma_{ум}(1 - V_{в}) \quad (24)$$

Оскільки поведінка всіх компонентів **розглядується** в межах пружних деформацій, можна скористатися **віраженням** закону Гука для **зрушення**

$$\gamma = \frac{\tau}{G}$$

Підставивши його в рівняння (24) з **урахуванням** рівності (23) здобудемо:

$$G_{хук} = \frac{G_{в} G_{м}}{G_{в}(1 - V_{в}) + G_{м} G_{в}} \quad (25)$$

Таким чином, чотири пружні константи ( **$E_{хк}$ ,  $E_{ук}$ ,  $\nu_{хук}$ ,  $G_{хук}$** ) повністю описують пружна поведінка даної моделі однонаправленого армованого матеріалу при плоскому напруженому стані.

Слід зазначити, що здобуті співвідношення (12), (19), (22) і (25) можна **розглядувати тільки** як наближені, оцінні, оскільки модель для їх розрахунку дуже ідеалізується.

Технологічні дефекти, неоднорідності в розподілі волокон за об'ємом, **кривизна** їх перетинів, **разорієнтація** і розкид властивостей компонентів **приводять** до того, що реальні характеристики армованих композицій відрізняються від розрахункових. Тому для паспортизації КМ. **зазвичай** використовують експериментально визначені інші константи.

## **5. Основи проектування композиційних матеріалів і виробів**

Методи проектування конструкцій з КМ. значно відрізняються від тих, які застосовуються при використанні традиційних матеріалів. Загальний цикл проектування складається з трьох етапів.

На початковому етапі розробляються критерії проектування, які можна розділити на дві групи:

а) конструктивні (навантаження, що додаються, геометрія деталі, функціональні вимоги і умови навколишнього середовища);

б) проектні (властивості матеріалу, технологія виготовлення і вартість).

На другому етапі на підставі сформульованих критеріїв проектується початковий композит і конструкція деталі. Далі проводиться аналіз напруги в конструкції і методом послідовних наближень оптимізується склад і структура матеріалу, а також конструкція деталі.

На останньому етапі проектування проводиться споруда прототипних деталей на основі первинного проекту і їх випробування.

На стадії проектування композиту проводиться вибір складу окремих шарів матеріалу і конструкції. Основними даними для проектування композиту є властивості шаруючи, в яких входять тип і орієнтація волокон, вид текстильної структури (стрічка, тканина), товщина окремих шарів, послідовність їх укладання, тип матриці і ін. **Важливо** необхідне розташування волокон і деталі, оскільки основна концепція композиту полягає в тому, **щоб** вся **головна напруга** сприймалася волокнами, а не матрицею. Проектування **початкового** матеріалу ґрунтується на вибраному **головному** проектному критерію (жорсткість, міцність і так далі). На базі цього критерію виходячи з певних властивостей окремого шару розраховуються розміри несучих перетинів композиту, необхідне число його шарів.

Для складних конструкцій потрібний повний аналіз напруги. Метою аналізу напруги в КМ. є перевірка напруги в окремих його шарах. Зазвичай критерієм руйнування служить перевищення проектно-допустимої напруги в будь-якому шарі конструкції.

**Зазвичай** досліджується розрив волокон, розтріскування матриці і міжшарове **зрушення**. Наприклад, руйнування волокна і матриці в окремому шарі оцінюється шляхом порівняння **напруги** в шарі з тими, що допускаються прогнозом **міцнісності** цього окремого шару.

Можна сформулювати основні підходи до конструювання виробів з волокнистих композитів:

- 1) **поверхневий** шар напівфабрикату доцільно орієнтувати так, щоб безперервні спіральні витки охоплювали поверхню перпендикулярно до осі виробу, **обжимаючи** її. Така конструкція сприяє ущільненню композиту, **збереженню** незмінної структури і геометрії в процесі виготовлення і експлуатації виробу, підвищенню жорсткості і міцності, особливо при циклічних знакозмінних навантаженнях, що вигинають;
- 2) для забезпечення стійкості і рівноваги форми виробу з КМ. волокна його не повинні мати розриву в перехідних або **красвих** зонах.



Красві зони переважно виконувати у вигляді суміщених днищ, буртів, фланців, **петельно-гніздових** формувань;

- 3) для забезпечення надійності конструкції **поєднуються** елементи, функціонально дублюючи один одного. Наприклад, конструкція **судини** високого **тиску** повинна складатися з силової і газонепроникної металевих оболонок;
- 4) проектування конструкції з композиту пропонує **поєднання** поля зовнішніх сил з полем реакції елементів конструкції. Це досягається орієнтацією волокон композиту **уздовж** розрахункових силових ліній нормальної або дотичної **напруги**;
- 5) для підвищення жорсткості конструкції рекомендується: використання високомодульних волокон і **додавання** їх в гібридні системи, особливо в зовнішні подовжні шари; зміна **кута** орієнтації шарів або варіювання схемою армування шарів; зміна схеми укладання шарів в композиті;
- 6) для підвищення опору міжшаровому **зрушенню** застосовують те, що **пов'язує** з вищим модулем **зрушення**, для чого в те, що **пов'язує** **вводять коротковолокнисті** і **мелкодисперсні** наповнювачі з метою блокування зсувних деформацій. Найвищою зсувною жорсткістю володіє **тривимірне** армування;
- 7) для запобігання розшарування і викривлень конструкції при **термоупругих напрузі** необхідно виготовляти вироби з однорідних волокон, в **полиармованих** композитах передбачати шари однакової орієнтації з однорідних волокон;
- 8) з метою запобігання повзучості слід застосовувати безперервні нитки з низькою пластичністю, використовувати матеріал з таким розташуванням волокон, **щоб** вони працювали на чисте розтягування, навантажувати конструкції від **законцовок** безпосередньо через **петлеві** утворення безперервних волокон;
- 9) для підвищення опору втомі рекомендується розташовувати волокна так, щоб вони працювали на розтягування, навантажувати армуючі елементи рівномірно, підвищувати якість зв'язку між матрицею і армуючими волокнами, оформляти **красві** зони плоских поверхонь у вигляді хвилястих утворення;
- 10) конструкція виробів повинна передбачати його високу технологічність. Виріб повинен формуватися методами автоматизованого намотування або укладання з **подальшим автоклавним отвердженням**. Ручне укладання допускається **тільки** для **одиничних** або дрібносерійних фасонних деталей. Доцільне об'єднання декількох вузлів і деталей в одну конструкцію **із** зручним формоутворенням;

11) конструкція повинна формуватися так, щоб звести до мінімуму механічну обробку, яка допускається **тільки** для конструктивних баз і **стикуємих** елементів. Крізні отвори слід виконувати при формуванні з такою організацією укладання армуючих волокон, **щоб** вони не **перерізувалися**, а розсувалися, створюючи **підсилюючу** окантовку отворів. Найбільш ефективним є **сухий метод** формування з **подальшим** гарячим **отвердженням**. Великі перспективи має радіаційне пошарове **зтвердження**.

## ТЕМА № 5

### Дісперснозміцнені матеріали (ДЗМ)

Пластична деформація металів і сплавів **відбувається** за рахунок переміщення дислокацій, тому зміцнити матеріал можна або **створенням бездислокаційної** структури, або **введенням** перешкод на **шляху** руху дислокацій.

Опір жароміцних матеріалів повзучості підвищують створюючи структури, що утрудняють рух дислокацій. До таких процесів відносяться: а) легування з освітою твердого розчину, б) механічна деформація, в) зміцнення за рахунок дисперсних виділень, грама) а також отримання дисперсноупрочнених сплавів.

До недавнього часу основним методом підвищення жароміцності було створення дисперсотвердеючих сплавів, які зберігають міцність до 0,6 Т пл. основного металу. Зміцнення в цьому випадку досягається в результаті штучного старіння, заснованого на гомогенізації і гарті з області твердого розчину з подальшим високотемпературним відпуском. В результаті розпаду пересиченого твердого розчину виділяються дисперсні частки, блокуючі переміщення дислокацій. Зміцнення за рахунок дисперсного тверднення спостерігається у сплавів, розчинність одного з компонентів яких зменшується із зниженням температури. Приклади таких матеріалів: дуралалюмин, хромоникелевые стали з добавками Mo, **W, B**; сплави Ti з Si і Al; кераміка MgO\*Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Найбільш високими експлуатаційними властивостями володіють сплави, продуктами розпаду яких є складні хімічні сполуки високої тугоплавкої.

Створення ДУМ, по механізму зміцнення що принципово не відрізняються від класичних старіючих сплавів, - якісно новий і гнучкіший метод. Основна відмінність його полягає в тому, що в ДУМ фазові співвідношення створюють, штучно вводячи зміцнюючі фази в процесі виготовлення матеріалу. Вибір стабільних зміцнюючих фаз і їх об'ємного вмісту в матриці дозволяє у багатьох випадках виключити структурні зміни в процесі експлуатації при високих температурах і зберегти працездатність 0,9 Тпл.

Механізм зміцнення ДУМ і армованих систем різні. Міцність останніх залежить безпосередньо від міцності армуючих волокон; у таких композитах основне навантаження сприймають волокна. У ДУМ міцність самих часток не використовується вони лише служать бар'єром на шляху руху дислокацій в матриці і за рахунок цього зміцнюють її.

Не дивлячись на те, що армування для підвищення міцності перспективніше, дисперсне зміцнення металів легше здійснено технологічно і

дозволяє здобути ряд нових жароміцних матеріалів з високими характеристиками.

## §1 Принципи створення ДУМ

Дісперснозміцнені матеріали – це такі композити, в яких на одній з технологічних операцій штучно вводять високодисперсні рівномірно розподілені на заданій відстані частки, що не взаємодіють активно з матрицею і що не розчиняються в ній помітно аж до температур плавлення фаз.

Надалі розглядуватимемо дисперсне зміцнення металевих матриць, зміцнених частками іншої фази, твердістю, що зазвичай відрізняється, і інертністю по відношенню до основного металу. Такі системи структурно стійкі до повернення і рекристалізації навіть при температурах, близьких до температур плавлення. Одна і та ж зміцнююча фаза залежно від розмірів її включень може викликати різний ступінь гальмування дислокацій, оскільки розміри визначають характер взаємодії фази з матрицею і дислокаціями. Матриця в цих матеріалах виступає основним елементом, що несе навантаження, зміцнююча фаза лише створює структуру дислокації.

Технологія отримання ДУМ полягає: а) у виборі зміцнюючої фази; б) методу її введення; у) визначенні об'ємного змісту; грам) отриманні об'ємного змісту; д) а також розробці раціональних режимів деформації і термічної обробки. Вибираючи зміцнюючу фазу, слід виходити з її термодинамічних властивостей, дифузійної рухливості в матриці і інших параметрів, що враховують умови експлуатації даної композиції.

Об'ємний зміст зміцнюючої фази, що відповідає оптимуму властивостей, значною мірою пов'язаний з технологічними можливостями рівномірного розподілу часток заданої дисперсності.

Спосіб введення зміцнюючої фази в матрицю вибирають на стадії отримання порошкових сумішей. У ДУМ зазвичай існують два типи структур – агрегатна і дисперсна (мал. 1).



Рис.1. Типи структур в ДУМ.

а) – дисперсна.

б) – агрегатна.

У агрегатній структурі частки зміцнюючої фази оточені декількома зернами матриці, що мають різну кристалографічну орієнтацію, в дисперсній же структурі частка зміцнюючої фази повністю оточена однаково орієнтованою матрицею. Вказані структури в реальних сплавах існують. Переважання однієї з них безпосередньо пов'язано з вживаним способом отримання порошкових сумішей, визначаючи надалі поведінку матеріалу при деформаційному зміцненні і стабільність його властивостей.

При виборі способу введення зміцнюючої фази слід прагнути до отримання дисперсної структури, що, проте, не завжди досяжно, особливо в разі зміцнення хімічно активних металів.

При формуванні, спеканні і термічній обробці в здобутій композиції по можливості повинні зберегтися дисперсність і характер розподілу зміцнюючої фази. В деяких випадках за рахунок подрібнення часток при пресуванні вдається істотно поліпшити структурні параметри в порівнянні з параметрами початкових порошкоподібних сумішей.

В цілому процес отримання ДУМ має бути таким, щоб забезпечити створення стабільної структури дислокації, сприяючої багатократному підвищенню міцності і збереженню пластичності.

## **§2. Вибір матриці і зміцнюючої фази**

Вибираючи матрицю, потрібно враховувати наступні властивості матеріалу: технологічність, температурний поріг рекристалізації, пластичність, опір корозії і окисленню, тип кристалічної структури, можливість здобути тонко дисперсні порошки, фізичні і механічні властивості. До теперішнього часу проведені дослідження дисперсного зміцнення практично всіх металів, за винятком Nb, Ta і ін. Найбільш відчутні результати отримані на матрицях з Al, Ag, Cu, Fe, Ni, Co, Cr, W, Mo.

Істотну роль в ДУМ грають властивості упрочнителя, який має бути достатньо тугоплавким ( $T_{пл.} > 1000^{\circ}C$ ), твердим, високодисперсним ( $S_{уд.} > 10 \text{ м}^2/\text{г}$ ), не коалесцировать в процесі отримання і експлуатації, володіти низьким значенням швидкості дифузії в матрицю, відрізнятися малою розчинністю в матриці, не мати поліморфних перетворень і не окислюватися, добре змочуватися металом матриці. Необхідні також високий модуль пружності і чистота початкових компонентів. Як зміцнюючі фази можна застосовувати оксиди ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $ThO_2$ ,  $TiO_2$ ), у яких, як правило, високі в порівнянні з іншими тугоплавкими з'єднаннями значення вільної енергії освіти. Як упрочнителі застосовуються також тугоплавкі метали, карбіди, нітриди, борид і інтерметаллические з'єднання.

Щоб зміцнюючий ефект здобути максимальним, потрібні частки пластичної основи розміром 0,1 – 1,0 мкм, частки зміцнюючої фази – 0,01 – 0,05 мкм і відстань між ними – 0,1 – 0,5 мкм.

Необхідний граничний об'ємний вміст зміцнюючих часток в сплаві визначається формулою

де  $L$  – відстань між центрами часток;

$d$  – діаметр часток;

$f$  – об'ємна частка часток.

Достатньо ефективного зміцнення досягається при 5-10 про. % зміцнюючої фази, тоді як в сучасних жароміцних старіючих сплавах об'ємний вміст зміцнюючих виділень досягає 60%.

Структура ДУМ повинна відповідати основним вимогам, що пред'являються до жароміцних матеріалів:

а) гетерофазного будови;

б) наявністю міцного зв'язку матриці і зміцнювача;

в) стабільністю матриці і зміцнювача у всьому інтервалі робочих температур.

Стабільний стан зміцнюючих фаз (мелкодисперсних часток) визначається умовою мінімуму вільної поверхневої енергії. В області високих температур, коли дифузійна рухливість атомів і пружність пари досягає великих величин, спостерігається прагнення системи до зменшення вільної енергії.

Наявність межі двох фаз, розділених поверхнею великої кривизни, приводить до того, що на зміцнюючу частку діє надлишковий тиск, який можна визначити з умов мінімуму термодинамічного потенціалу системи по формулі Лапласа

$$\Delta P = -\frac{2\sigma}{r}$$

де  $\sigma$  – міжфазна поверхнева енергія;  
 $r$  – радіус частки.

Це надлишковий тиск може змінити параметри кристалічної решітки. І якщо зміцнююча фаза має поліморфні перетворення, то лапласовское тиск чинить вплив на температуру фазового переходу. Встановлено, що пониження температури плавлення для тонкодисперсних часток при спеканні може досягти істотних величин.

Пониження вільної поверхневої енергії системи може статися за рахунок укрупнення часток, яке здійснюється в результаті розчинення в металевій матриці дрібних часток і зростання великих. Характер протікання цих явищ визначається рівноважною концентрацією  $C_r$  розчиненої речовини біля часток з радіусом  $r$ :

$$C_r = C_\infty \left(1 + \frac{\sigma}{2KT} V\right),$$

де  $C_\infty$  - рівноважна концентрація над плоскою поверхнею;  
 $\sigma$  - поверхнєве натягнення на межі з частками;  
 $K$  - постійна Больцмана;  
 $T$  - температура;  
 $V$  - атомний об'єм розчиненої речовини.

Якщо в матриці є частки різних радіусів, то концентрація розчиненої речовини вище біля дрібних і нижче біля крупних часток. За рахунок цієї різниці створюється дифузійний потік речовини від дрібних часток до великих або осадження речовини на поверхні крупних часток.

Укрупнення часток визначається і градієнтом хімічного потенціалу, який залежить від концентраційної неоднорідності вакансій (неоднорідності розташування в матриці атомів речовини другої фази). Окремий випадок такої коалесценції – укрупнення в металевій матриці часток оксидів за рахунок реакцій дисоціації оксиду і дифузійного перенесення атомів металів і кисню від поверхні розчинення до поверхні зростаючих часток.

Коалесцировать дисперсні включення можуть і по растворно-осадительному механізму. Такий характер зростання часток спостерігається, коли речовина дисперсної фази володіє підвищеною швидкістю дифузії в матриці і малою швидкістю конденсації на межах зростаючих часток.

В деяких випадках коалесценція протікає за рахунок зіткнення і злиття часток, рухомих як єдине ціле щодо ґрат матричного металу. Такий дифузійний рух достатній інтенсивно при високих температурах. Воно може протікати і без зовнішніх рушійних сил, в результаті броунівського руху.

Вважається, що в умовах достатньої тривалої витримки при високих температурах основний механізм зростання часток – об'ємна дифузія, значно повільніше протікає дифузія по межах блоків або лініях дислокацій.

Щоб зміцнюючі фази не коалесцировали, вони мають бути термічно стабільними. Значний інтерес в цьому плані представляють оксиди металів. Різними технологічними прийомами, неприйнятними для інших тугоплавких з'єднань, оксиди можна здобути практично будь-якій дисперсності. Хімічну стійкість оксидів у контакті з металами можна оцінити по значеннях ізобарно-ізотермічних потенціалів: чим більше відмінність в теплотах утворення оксиду матричного металу і зміцнюючого оксиду, тим більше стійкий останній у контакті з матрицею. В разі близьких значень теплот освіти не унеможливлено утворення інтерметаллідів.

Е.І.Мозжухин пропонує оцінювати стабільність тугоплавких оксидів в металевих матрицях по температурній залежності

$$\lg N = -\frac{A}{T} + B,$$

де  $N$  - молярна частка оксиду в розчині;

$A, B$  – константи.

Визначена по цій формулі стабільність оксиду цирконію найвища в ряді: **MgO - BeO - ThO<sub>2</sub> - CoO - Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - ZrO<sub>2</sub>**.

Експериментально оцінити стабільність зміцнюючих фаз досить складно. Численні дослідження підтверджують, що найбільш стабільні як упрочнителі – оксиди тугоплавких металів, серед них найбільш ефективний діоксид торія **ThO<sub>2</sub>**. Одним з основних критеріїв стабільності упрочнителя серед з'єднань одного класу залишається вільна енергія освіти.

Максимально можливою температурою експлуатації ДУМ є температура плавлення матриці. До сплавів цієї категорії відносяться поки лише сплави САП, що містять окисел алюмінію, оскільки частки **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** абсолютною стійкі в алюмінієвій матриці.

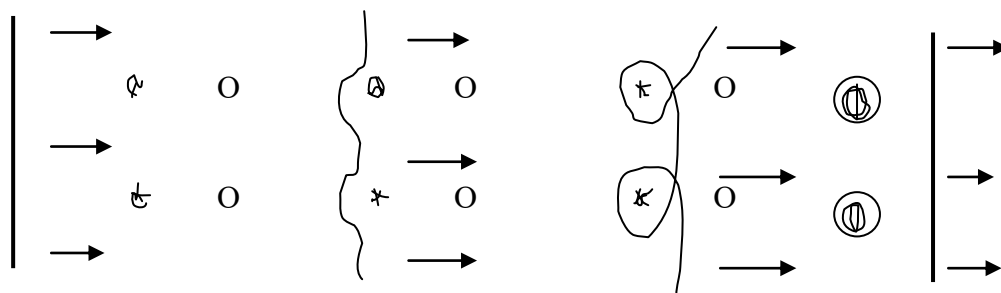
До методів здатних підвищити робочі температури ДУМ, можна віднести наступні:

- 1) зменшення міжфазної поверхневої енергії за рахунок введення в сплав легуючих елементів;
- 2) отримання сплаву методами порошкової металургії з тонких часток, покритих стійкою фазою;
- 3) отримання сплавів з тонких двофазних металевих порошоків, в яких одна фаза утворилася в процесі виробництва порошку і нерозчинна ав твердій матриці, наприклад, мідь в свинці;
- 4) отримання сплаву з суміші тонких порошоків матриці і дисперсної фази. Для збереження максимальної стабільності структури принаймні один з компонентів дисперсної фази повинен абсолютно не розчинятися і не дифундувати в метал матриці;
- 5) легування самої зміцнюючої фази.

### §3. Механізм зміцнення дисперсними частками

Існує декілька теорій зміцнення дисперсними частками. Перша запропонована Е.Орваном. У його моделі розглядається рух дислокацій в м'якій і в'язкій матриці, що містить жорсткі рівноважні частки упрочнителя. Якщо відстань між частками другої фази достатньо велика, дислокація під дією дотичної напруги вигинається між ними (мал. 2), її ділянки зникають за кожною часткою і, залишивши навколо часток петлі, дислокація ковзає в колишньому напрямі. Нова дислокація, проходячи між частками, залишає

навколо кожної з них кільце, тому сумарна довжина дислокацій, а відповідно і енергія їх



Ріс.2. Схема обходу **часток** дислокаціями в **плоскості** ковзання по Е. Орловану

зростає. “Намиста” з кілець дислокацій, що взаємно-відштовхуються, **навколо** дисперсних **часток** створюють поле пружної **напруги**, що утрудняє проштовхування нових дислокацій між **частками**.

С.Анселл і В.Ленел запропонували теорію, що припускає необхідність **руйнування часток**, блокуючих плоскість зрушення. Вони показали, що помітна пластична деформація буде лише тоді, коли під дією дислокацій частка руйнуватиметься. Теорія С.Ансела і В.Ленела дозволяє зробити вивід, що межа текучості матеріалу, зміцненого дисперсною фазою, назад пропорційна кореню квадратному з середньої відстані між частками. Ця закономірність підтверджена експериментальними даними, здобутими на спечених вуглецевих сталях і в сплавах **Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**.

Вплив дисперсної фази на **міцність і твердість** теоретично до теперішнього часу мало обгрунтовано, оскільки механізм руйнування і твердості значно складніший, ніж ковзання на початку пластичної деформації. У одній з гіпотез передбачається, що стійкість проти руйнування частки підвищують, блокуючи виникаючі мікротріщини. Проте зараз з упевненістю можна стверджувати, що кожному руйнуванню металу, і навіть крихкому, передує певний ступінь пластичної деформації. Тому межа міцності пропорційна межі текучості.

Модель Е.Орвана і її модифікації добре **пояснюють** експериментальні залежності, що спостерігаються, від середньої відстані між **частками**. Для **полікристалічних** матеріалів **окрім** прямої взаємодії дислокацій із зміцнюючими **частками**, **мабуть**, необхідно враховувати і **можливість** формування субструктур.

Таким чином, до теперішнього часу **немає ще строгого кількісного опису** для складного комплексу процесів, пов'язаних з розвитком високотемпературної повзучості матеріалів за рахунок генерування, руху, стоків і анігіляції дислокацій, міграції точкових дефектів і переміщення по межах. Врахувати всі ці явища поки не представляється можливим. основна передумова до створення ДУМ і реалізації в них теоретично очікуваного рівня міцності – наявність **міцного адгезионної зв'язку часток з матрицею**, ступінь сумісності яких визначається характером вживаних матеріалів.

#### § 4. Отримання сумішей порошків

Змішування компонентів ДУМ – одна з основних підготовчих операцій, від якої залежить однорідність суміші, її чистота і зрештою фізико-технічні властивості і тип структури. Добитися рівномірного розподілу в математичній матриці ультратонких часток зміцнюючої фази досить складно.

В даний час для отримання сумішей ДУМ використовують наступні технологічні способи:

- 1) механічне змішування порошків металів і дисперсної фази;
- 2) термічне розкладання суміші солей;
- 3) поверхнєве окислення;
- 4) внутрішнє окислення;
- 5) водневе відновлення в розчинах;
- 6) хімічне осадження з розчинів;
- 7) змішування розплавлених сплавів, в основному металі яких є компоненти, створюючі при кристалізації дисперсні інтерметалічні з'єднання.

Агрегатні структури утворюються при механічному змішуванні і поверхневому окисленні.

1. Механічне змішування – один з найбільш простих способів отримання сумішей. При цьому тонка металева пороша матриці в змішувачах або кульових млинах змішується з надтонкою порошею зміцнюючої фази. Це найбільш дешевий і технологічно прийнятний спосіб утворення сумішей, проте у ряді випадків він не забезпечує рівномірний розподіл зміцнюючої фази, що особливо відчутно при великій відмінності в насипних вагах порошків.

Вибираючи устаткування для цієї операції, потрібно виходити з дисперсності, форм часток, ступеня їх чистоти, спорідненості металів до кисню.

Для металів з низькою спорідненістю до кисню поверхнєві оксидні плівки віддаляються при спеканні заготовок у відновній середі, причому невелика кількість оксидів, як правило, активізує процес спекання.

З високоактивних металів видалити оксидні плівки практично неможливо. Тому помел часток таких порошків проводять в жирній середі, вакуумі, в захисних і інертних газах або із застосуванням активних добавок, що віддаляються з шихти при подальшій термічній обробці. Так, змішуючи порошок **Cr** і **ThO<sub>2</sub>** в кульовому млині, помел проводять під тиском галогенидів 6-11 кгс/см<sup>2</sup>. Образувавши галогениди хрому відновлюються при спеканні в середі водню і унеможливають окислення. Інколи інтенсифікований помел проводять у водоохолоджуваних подрібненнях.

2. Термічне розкладання суміші солей забезпечує більш рівномірний розподіл зміцнюючої фази, чим механічне змішування порошків. Розчин солей матричного металу і упрочнителя швидко заморожують, надлишок розчинника видаляють сублимацією у вакуумі. З'єднання, що виділилися з розчину, піддають термічному розкладанню до суміші оксидів, відновлюються які в остроосушеному водні.

3. Поверхнєве окислення застосовують в тих випадках, коли найбільш прийнятним упрочнителем металу виступає його власний оксид.

Щоб приготувати порошу для виробництва сплавів САП, розпиляли рідкий алюміній, а здобуті крупі розмелюють і грудкують в кульових млинах у присутності стеаринової кислоти, яка запобігає холодній зварці часток і сприяє руйнуванню часток.



Промисловість **проводить** порошу:

АПС-1 - 6-9 %  $Al_2O_3$

АПС-2 - 9,1 – 13,0 %  $Al_2O_3$

АПС-3 - 13 – 17 %  $Al_2O_3$

АПС-4 - 17,1 – 23,0 %  $Al_2O_3$

Насипна маса САП близько 1 г/см<sup>3</sup>.

#### 4. Внутрішнє окислення.

Технологія отримання матеріалу металодисперсна фаза способів внутрішнього окислення заснована на окисненні при підвищених температурах слаболегированного сплаву, в якому розчинена фаза менш благородна, чим метал матриці. При нагріві кисень дифундує в сплав і окислює розчинену фазу, яка утворює окремі частки оксидів в основі металу. Як матриця в цьому способі застосовують порівняно легко відновлені метали (**Ag, Cu, Ni, Fe**).

Для внутрішнього окислення необхідні умови:

- 1) матричний метал повинен **хоч би** в невеликих кількостях розчиняти кисень;
- 2) швидкість дифузії кисню має бути **істотно** вище за швидкість дифузії легуючого елемента;
- 3) розчинення кисню в системі має бути нижче за рівноважну пружність дисоціації оксиду для матричного металу при температурі окислення. Інакше процес ускладнюється додатковим **поверхневим** окисленням;
- 4) температура окислення має бути достатньо високою, щоб забезпечити технічно прийнятну швидкість дифузії **O<sub>2</sub>**.

Внутрішнє окислення включає адсорбцію молекул **O<sub>2</sub>** на металевій поверхні, дисоціацію їх на атоми, дифузію атомів кисню в тверду фазу і реакцію його з легуючим елементом. Швидкість процесу визначається дифузією кисню.

Внутрішнє окислення забезпечує рівномірний розподіл зміцнюючої фази. **Проте** цей метод практично не застосовують, оскільки **отримати** дрібнозернистий порошок для малолегованих твердих розчинів важко.

5. Водневе відновлення в розчинах може відбуватися в тому випадку, якщо потенціал реакції іонізації водню вищий за потенціал реакції відновлення. Тому відновлення протікає тим активніше, чим більше парціальний тиск водню і вище за значення рН, тобто нижче концентрація водневих іонів в розчині.

Звичайне відновлення проводять в аміачних розчинах, оскільки з підвищенням концентрації аміаку швидко росте значення рН розчину. Здобутою порошею є двошарові частки. Як упрочнителя застосовують оксиди, карбіди, борид і нітриди тугоплавких металів. Процеси відновлення проводять в автоклавах з пропелерними мішалками при **t = 120—200 °C** і тиску водню до **40 кгс/см<sup>2</sup>**. В такий спосіб отримують порошу **Ni**, зміцнені **ThO<sub>2</sub>**.

#### 6. Хімічне осадження з розчину

Одін з варіантів цього способу заснований на **здатності ряду** металів утворювати покриття на **частках** зміцнюючої фази при **введенні** в розчин **з'єднань** з відновними властивостями.

Наприклад, осадження міді гидразином на частках діоксиду торія здійснюють з розчину, що містить 1400 грама моногідрата ацетату міді в 10 л

води, 100 мл **NH<sub>4</sub>OH** конц. 6 н. і розрахункова кількість **ThO<sub>2</sub>**. Гидразін вводиться у вигляді 50%-ного розчину в кількості 250 мл при 60оС.

По другому, поширенішому, способу суміш продуктів виділяється з рідкого розчину у вигляді гідроксидов, які потім зневоднюються і селективно відновлюються. Селективне відновлення в середі водню при **t = 600-800 °C** дозволяє отримувати тонкодисперсні порошки

**Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** з високою розчинністю розподілу **HfO<sub>2</sub>**.

Певний інтерес представляє метод кислотної конденсації металу і зміцнюючого оксиду, оскільки при цьому є можливість регулювати товщину кожного з шарів в широких межах.

Для отримання деяких композицій застосовують метод гальванічного осадження, при якому зміцнюючі частки у вигляді порошку потрібного ступеня дисперсності утворюють стійку суспензію в електроліті і захоплюються катодним осадом в процесі електролізу.

7. Металургійний метод або змішування розплавлених сплавів використовують відносно рідко і зазвичай тільки в тому випадку, якщо дисперсноупрочненні сплави утворюються безпосередньо в процесі кристалізації евтектичних систем.

Визначальне значення в досягненні заданих властивостей ДУМ має спосіб введення тугоплавкої фази. Кращі результати досягаються при використанні хімічного змішування.

## Тема № 6

### ЕВТЕКТИЧНІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (ЕКМ)

ЕКМ називаються сплави евтектичного або близького до нього складу, в яких армуючою фазою служать орієнтовані волокнисті або пластинчасті кристали, утворені в процесі направленої кристалізації.

Оскільки структура матеріалу в ЕКМ створюється природним чином, а не в результаті введення штучної армуючої фази в матрицю, ЕКМ на відміну від інших композитів називають природними композитами.

#### Переваги ЕКМ:

- 1) мають вищу міцність, обумовлену досконалістю структури армуючої фази, близької по характеристиках до ниткоподібних кристалів;
- 2) мають термічно стабільну структуру, близьку до температури плавлення евтектики;
- 3) для ЕКМ не існує проблеми хімічної несумісності між матрицею і зміцнюючою фазою унаслідок рівноважних умов кристалізації, рівності хімічних потенціалів компонентів і мінімальної поверхневої енергії армуючої фази;
- 4) з ЕКМ можна отримувати матеріали і готові вироби за одну операцію, минувши виготовлення волокон і їх введення в матрицю.

#### Недоліки ЕКМ:

- 1) обмеження у варіюванні об'ємного **змісту** армуючої фази, як правило, вона диктується діаграмою **стану** системи;
- 2) підвищені вимоги до чистоти **початкових** матеріалів;
- 3) невеликі швидкості **направленого** росту кристалів.

### § 1. Умов утворення **направленої** евтектичної структури

У основі вибору ЕКМ лежить аналіз рівноважних діаграм **стану** бінарних, **потрійних** і вищого рангу систем.

При виборі ЕКМ спочатку визначається матрична основа, що задовольняє умовам експлуатації матеріалу по температурі плавлення, щільності, поведінці в різній **середі** і ін. Потім **проводиться** пошук **эвтектик**, які можуть забезпечувати решту вимог до ЕКМ: міцність, фізичні властивості і ін.

ЕКМ відносяться до класу термодинамічних систем, оскільки обидві фази кристалізуються в умовах термодинамічної рівноваги.

Режим кристалізації має бути таким, **щоб направлена** евтектична структура не **містила** первинних фаз **у формі дендритів** або **осередків**. Як правило, утворенню таких дефектів сприяє наявність **домішок**, які, переходячи в евтектику, порушують стаціонарне **зростання фази-зміцнювача**.

Критерієм стійкості плоского фронту кристалізації є співвідношення:

$$\frac{G_m}{V} \geq \frac{m C_{np} \left(1 - \frac{C_{np}}{C_{cp}}\right)}{D_{np} \frac{C_{np}}{C_{cp}}},$$

де **G<sub>m</sub>** – температурний градієнт в рідкій фазі;

**V** - швидкість кристалізації;

**m** - нахил лінії «ликвідус»;

**C<sub>np</sub>** – концентрація домішок на фронті кристалізації;

**C<sub>cp</sub>** – середня концентрація домішок в твердій фазі;

**D<sub>np</sub>** – коефіцієнт дифузії домішки в розплаві.

Якщо це співвідношення виконується, то при кристалізації ЕКМ з **домішками** утворюється **направлена** структура ЕКМ.

Для кожної системи компонентів існує критичне **відношення**, яке необхідно перевищити для **отримання направленої** структури ЕКМ. При мікроструктура, що утворюється, буде **комірчастою** або **дендритною**.

Величина визначається емпірично.

Для **отримання** ЕКМ з орієнтованою структурою потрібні високі температурні градієнти і низькі швидкості кристалізації.

Додаткові умови для придушення **дендритного зростання** – відсутність конвекції (перемішування) в рідині, що кристалізується, тому перетин **відливання** має бути невеликим.

### § 2 Умови утворення **волокнистих і пластинчастих** структур

При **направленій** кристалізації **эвтектик** реалізується структура з найменшою **площею** поверхні розділу фаз або найменшими значеннями питомої енергії даної поверхні. Тому форма фази, що виділяється, – **волокниста** або **пластинчаста** – залежить від її об'ємної **частки** в ЕКМ. Як правило, при об'ємній

частці армуючої фази менше 32% утворюється ЕКМ волокнистої структури, а при більшій її концентрації – пластинчаста. Яка ж з них переважна?

З одного боку, міцність волокон вища, ніж пластин, тому за цією ознакою волокниста будова армуючої фази ЕКМ переважніше.

Проте, об'ємна частка зміцнювача в пластинчастих ЕКМ може перевищувати 32%, досягаючи 50-60%, і тоді їх міцність буде вища за міцність волокнистих ЕКМ.

Швидкість направленої кристалізації ( $V$ ) істотно впливає на дисперсність фаз, що утворюються, зокрема, на міжволокнисту або межпластинчасте відстань  $\lambda$ . Експериментально встановлена наступна залежність:

$$\lambda^2 \cdot V = \text{const.}$$

Для більшості ЕКМ з пластинчастим або волокнистим будовою  $\lambda \propto V^{1/2}$ .

## Тема 7

### Полімерні композиційні матеріали (ПКМ)

Важливою групою композиційних матеріалів є композиційні матеріали з полімерною матрицею, зміцненою волокном. Різноманіття армуючих волокон і що полімерних пов'язують, а також схем армування дозволяє направлено регулювати міцність, жорсткість, рівень робочих температур і інші властивості ПКМ. Ефективним засобом регулювання властивостей є поєднання в одному матеріалі волокон з різними мінісними властивостями (наприклад, бороших і скляних; вуглецевих і органічних), введення ниткоподібних кристалів і дискретних волокон в матрицю. Це визначає одне з найважливіших достоїнства ПКМ – можливість створювати елементи конструкцій із заздалегідь заданими властивостями, що якнайповніше відповідають характеру і умовами їх роботи.

ПКМ широко застосовуються при виготовленні підшипників ковзання, кульок підшипників кочення, поршневих кілець, ковзаючих направляючих елементів кулачкових механізмів, вузлів тертя, що працюють в глибокому вакуумі і агресивній середі, що труться.

Основними вимогами, що пред'являються до ПКМ, є: надійність, довговічність, мінімальні маса, металоємність і собівартість. Вхідні до складу КМ. компоненти мають бути доступними і технологічними.

#### 1. Способи створення КМ.

Фізико-механические і антифрикційні властивості ПКМ, насамперед, визначаються їх структурою що полімерним пов'язує, наповнювачами і різними добавками (модифікаторами, пластифікаторами, стабілізаторами і так далі).

Наповнені полімерні системи можуть бути здобуті таким чином:

1. Наповнювачі змішуються з розплавом полімеру і виріб формується при заданих технологічних режимах. В такий спосіб виготовляються КМ. на основі термопластичних полімерів.
2. Наповнювачі просочуються розчином або суспензією полімеру, віддаляється розчинник, і виріб формується при заданому тиску і температурах в основному методами гарячого пресування. В такий спосіб отримують КМ. на основі термореактивних полімерів.

Як пов'язує в антифрикційних композиційних матеріалах можуть застосовуватися як термопластичні (полиолефіни, поліаміди, полікарбонат,

фторопласти і ін.) так і термоактивні полімери (фенолоформальдегідні, епоксидні, фуранові смоли і ін.). Деякі термопласти можуть входити в систему у вигляді порошкових наповнювачів.

Основними перевагами КМ. на основі термопластів є високі антифрикційні властивості, низька вартість, перерабативаємість у виробі такими високопродуктивними способами, як литво під тиском, екструзія. Композиційні матеріали на основі термопластів можуть перероблятися в плівки і покриття, широко застосовуватися у вузлах тертя, в яких виключений високий локальний нагрів. Із-за схильності до схоплювання при підвищених температурах такі матеріали застосовуються рідко.

Для КМ. на термоактином що пов'язує характерні висока міцність і термостійкість. Фенолформальдегідні смоли працездатні при температурі 373 – 423 К. Повисить термостійкість таких полімерів можна за допомогою модифікації їх меламинами, фурановими, епоксидними смолами, кремнійорганічними полімерами і так далі Застосування кремнійорганічних полімерів як пов'язує дозволяє підвищити термостійкість композиційних матеріалів 573-673 До.

### Основні фізико-механичні характеристики КМ. з різним типом того, що пов'язує

Типа пов'язує	Межа міцності, Мпа		Межа робочих температур, $t_{ок}$	Коефіцієнт тертя
	після стискування	при розтягуванні		
Термопластичні полімери	-	70-80	373-393	0,15-0,40
Термореактивні полімери	80-100	-	523-573	0,1-0,4

Специфічні властивості: високі технологічні властивості, хімічна стійкість, зносостійкість. Підвищена термостійкість, низька собівартість.

При розробці КМ. особлива увага приділяється прогнозуванню необхідних властивостей, а також поліпшенню технологічних або інших експлуатаційних характеристик. Одним з найбільш ефективних способів вирішення цих завдань є підбір необхідних наповнювачів. Як наповнювачі широко застосовується пороша металів і їх сплавів. Так, порошу заліза і його сплавів додають КМ. феромагнітні властивості; пороша: свинцю, кадмію, вольфраму – підвищують їх стійкість до високоенергетичних випромінювань; пороша: мідь, бронза, латунь, кобальту – покращують фрикційні властивості наповнених систем.

Одна з основних функцій металевих порошкових наповнювачів – збільшення теплопровідності, а отже, швидке відведення тепла із зони тертя і підвищення теплостійкості КМ. в цілому.

Означає підвищення міцності і теплопровідності КМ. досягається при використанні як наповнювачі волокон стружки або сітки із сплавів: **Cu, Zn, Sn, Al, Fe**.

### 3. Методи отримання

Відмітна особливість виготовлення деталей ПКМ полягає в тому, що матеріал і виріб в більшості випадків створюються одночасно. При цьому виробу відразу **додаються** задані геометричні розміри, що дозволяє **істотно понизити** його вартість і зробити **конкурентноспособним** з виробами з традиційних ізотропних металів.

Ефективність **застосування** волокнистих ПКМ в конструкції визначається **не лише** правильністю вибору складу і макроструктури матеріалу, але і технологією виготовлення деталей, яка визначає стабільність складу, структури і **пружно-міцнісних** характеристик матеріалу. Технологія виготовлення деталей з волокнистих ПКМ включає **наступні** основні операції: I – підготовка армуючого наповнювача; II – приготування **пов'язує**; III – **поєднання** наповнювача з тим, що **пов'язує**; IV – **отримання** напівфабрикату; V – прибирання і орієнтація шарів армуючого волокнистого наповнювача за формою деталі; VI – ущільнення, **отвердження**, термообробка; VII – механічна обробка **заготівки**; VIII – контроль якості виробів.

Правильний вибір методу виготовлення, **облік** і підбір всіх технологічних параметрів дозволяє **отримувати** високоякісні вироби з ПКМ.

## Тема 8

### ПСЕВДОСПЛАВИ (ПС)

Композиційні матеріали **типа** псевдосплавів – це гетерогенні ізотропні (у **стані**, що не деформується) системи з тих, що не взаємодіють або мало взаємно розчинних в рідкому і твердому **стані** металевих або **металлоподібних** фаз.

Псевдосплави, що **поєднують** в собі структурні складові з різко відмінними **фізико-механичними** характеристиками, володіють **рядом** дуже **важливих** для техніки властивостей: високою стійкістю при дії інтенсивних теплових потоків, **самозмашуваністю** в умовах сухого тертя, високою демпфуючою **здатністю** при **вібраційному** навантаженні, електроерозійному стійкість і **зносоустійкістю** при роботі електроконтактами. У ряді випадків у ПС виявлені унікальні властивості, незаплановані при їх **створенні**.

Залежно від технології виготовлення і природи складових ПС можуть мати каркасну і матричну структуру. ПС з каркасною структурою мають специфічну **будову**, **характерну** для пористих тіл, просочену рідким Ме. Структуру таких металів можна **розглядувати** як два взаємнопроникаючі безперервні каркаси. Їх **отримують** методом просочення.

ПС з матричною структурою **зазвичай** відрізняються від ДКМ великим розміром матричних **включень** (більше 1 **мкм**) і більшою концентрацією цих **включень** ( $V = 0,25? 0,90$ ). Роль зміцнюючої фази – **змінює** напружений **стан**

матриці, деформується в **пластинчастих** композиціях, забезпечує зміцнення в крихких Км.

Межа міцності КМ. Коефіцієнт зміцнення ДКМ ПС Межа міцності матриці 2-15 2-15

## **1. Методи отримання**

Виготовляють ПС методами ПМ: просоченням або **спеканням** у присутності рідкої фази.

Просочення полягає в заповненні пір спеченої або неспеченої **заготівки з** **щодо** тугоплавкого компоненту розплавом **легкоплавкого** компоненту.

Отримання КМ. методом просочення і забезпечення міцного зв'язку між компонентами можливо тільки за умови, що рідка матриця змочує поверхню армуючого елементу в системі «рідина – тверде тіло – газ». Рідина може змочувати поверхню твердого тіла і розтікатися по ній або ж не змочує її. Змочування характеризується краєвим кутом  $T_c$ , утвореним поверхнею рідини на стику з твердою поверхнею (відлік кута  $T_c$  проводиться через рідку фазу).

При  $T_c < 90^\circ$  рідина змочуватиме тверде тіло, при  $T_c > 90^\circ$  – не буде.

Мимовільне протікання просочення супроводиться зменшенням вільної енергії системи і здійснюється за умови  $\cos T_c > 0$ , де  $T_c$  – краєвий кут змочування.

Проопітку **роблять** методами **повного** або часткового занурення пористого каркаса в розплав, або шляхом накладення пропитий. **метала** на пористий каркас. Температура просочення перевищує точку плавлення **легкоплавкої** фази і не досягає точки плавлення тугоплавкої фази.

Швидкість просочення росте при збільшенні початкової пористості каркаса, розміру пір і температури процесу. Про глибину просочення  $l_{пр}$  зазвичай судять по зміні маси  $m$  заготівки, що просочується, торкнулася розплаву поверхнею  $F$ :

$P$  – пористість **заготівки** ? – щільність розплаву.

Взаємна розчинність компонентів **негативно** впливає на властивості Км. Тому за наявності розчинності просочення слід **проводити** протягом мінімального часу, достатнього для заповнення пір. **В разі** невзаємодії систем необхідно **робити витримку** при просоченні для гомогенізації псевдосплавів, що утворилися.

Якщо  $T_c \square 90^\circ$ , то рушійна сила просочення (капілярний тиск) може виявитися недостатньою для її здійснення і необхідне застосування додаткових зусиль (автоклавної тиск, вакуумне всмоктування, накладення електромагнітного поля і ін.).

Атмосфера, в якій ведеться просочення, має бути сумісною з обома складовими ПС і забезпечувати максимальний **ступінь** просочення.

Пористі каркаси під просочення **отримують** шляхом ущільнення порошків (пресування в прес-формі, гідростатичним пресуванням, мундштучним і ін.) і **подальшим спіканням**.

**Легкоплавка** складова для просочення використовується у вигляді литого металу, пресованої стружки або порошку.

## **2. Жідкофазне спікання**

3. Спеканіє у присутності рідкої фази полягає в **спеканії** пресувань порошкової суміші компонентів псевдосплавів при температурах, що перевищують температуру плавлення **легкоплавкої** складової.

Процес **спікання** в рідкій фазі за рахунок більшої швидкості **перенесення в-ва** протікає значно інтенсивніше, ніж в твердій.

Розрізняють три стадії процесу ущільнення, відповідні трьом механізмам **спікання**:

- 1) в'язкий перебіг рідини і перегрупування **часток**
- 2) розчинення осадження
- 3) **спікання в** твердій фазі з утворенням жорсткого скелета.

Переважає того або іншого механізму залежить від природи фаз і їх кількісного співвідношення.

При **рідкофазном спіканні** псевдосплавів ( W –Cu), W-Ag, Mo-Cu і ін.) діє, головним чином, 1-й механізм ущільнення, що **припускає** відсутність взаємної розчинності компонентів. При утворенні рідкої фази і її в'язкій течії в порах **відбувається** перегрупування твердих **часток**, що **приводить** до щільнішої їх упаковки. На цій стадії усадка протікає прискорено. При об'ємній **частці** рідкої фази понад 50% щільність металу **після спікання** близька до теоретичної.

Кінетика **спікання** значною мірою залежить від капілярних властивостей системи: зменшення величини розміру **часток** і щільності витікаючих брикетів, а також підвищення температури **приводить** до **зростання** капілярних сил, відповідно до усадки при **спіканні**.

ПС, здобуті методом **рідкофазного спікання**, – мають матричну структуру – у в **легкоплавкій** матриці **дисперговані частки** тугоплавкої фази.

Метод просочення має **ряд** переваг перед **рідкофазним спіканням**. Це короткочасність процесу, **можливість отримання** практично **беспористих** металів при нижчих температурах і менш тривалих **витримках**, **можливість отримання** псевдосплавів на основі **неспікаємих** металів. Міцність, як правило, вища. Метод просочення – переважно.