



Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет

Дегула А. І., Харченко Н. А.

## **СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ В МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ**

Конспект лекцій

Суми  
Сумський державний університет  
2024

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет

## СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ В МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ

Конспект лекцій  
для аспірантів спеціальності  
*G8 Матеріалознавство*  
*(132 Матеріалознавство)*  
усіх форм здобуття вищої освіти

Затверджено  
на засіданні кафедри  
прикладного матеріалознавства і  
ТКМ  
як конспект лекцій із дисципліни  
«Сучасні тенденції в  
матеріалознавстві».  
Протокол № 4 від 11.11.2024.

Суми  
Сумський державний університет  
2024

Сучасні тенденції в матеріалознавстві : конспект лекцій / укладачі:  
А. І. Дегула, Н. А. Харченко. – Суми : Сумський державний університет, 2024.  
– 137 с.

Кафедра прикладного матеріалознавства і ТКМ

## ЗМІСТ

Вступ.....	С. 5
Лекція 1. Загальні відомості про роль матеріалів у розвитку науки та техніки.....	6
Лекція 2. Історія розвитку матеріалознавства як науки ..	9
Лекція 3. Сучасні тенденції розвитку матеріалознавства.	14
Лекція 4. Чорні та кольорові метали та сплави.....	24
Лекція 5. Метали та сплави зі спеціальними властивостями.....	40
Лекція 6. Тверді сплави. Мінералокераміка.....	51
Лекція 7. Металокомпозити.....	63
Лекція 8. Пластмаси. Термо- та реактопласти.....	68
Лекція 9. Еластоміри. Лакофарбові покриття.....	72
Лекція 10. Методи отримання високоякісних сплавів.....	80
Лекція 11. Захисні покриття.....	92
Лекція 12. Наноматеріали та нанотехнології.....	103
Лекція 13. Наноконструкційні матеріали.....	115
Лекція 14. Матеріали майбутнього.....	125
Лекція 15. Підсумкове заняття.....	133
Список використаної літератури.....	135

## ВСТУП

Матеріалознавство належить до основних дисциплін машинобудівних спеціальностей. Це пов'язано з тим, що одержання, розроблення нових матеріалів, способи їх оброблення є основою сучасного виробництва й багато в чому визначають як рівень свого розвитку науково-технічний і економічний потенціал країни.

Проектування раціональних, конкурентоспроможних виробів, організація їх виробництва неможливі без достатнього рівня знань у галузі матеріалознавства.

Матеріалознавство – це прикладна наука, що вивчає будову й властивості матеріалів, а також встановлює зв'язок між їх складом, будовою і властивостями, залежність будови і властивостей від методів виробництва та оброблення металів, а також зміна їх під впливом зовнішніх чинників – силових, теплових, радіаційних тощо.

Конструкційними називають матеріали, з яких виготовляють деталі машин, пристосування, елементи різних конструкцій, а також матеріали здатні витримувати значні механічні навантаження.

Інструментальними є матеріали, основне призначення яких – оснащення робочої частини інструментів.

За природою матеріали поділяють на металеві, неметалеві та композиційні.

За умовами експлуатації матеріали можуть бути надтверді, зносостійкі, фрикційні, антифрикційні, корозійностійкі, жаростійкі, жароміцні тощо.

Сфера застосування кожного матеріалу з урахуванням економічних вимог визначається його експлуатаційними характеристиками, які залежать від фізико-хімічних властивостей.

# ЛЕКЦІЯ 1

## Загальні відомості про роль матеріалів у розвитку науки та техніки

### *Роль матеріалознавства в освітньому процесі*

Освіта – це інструмент стратегічного розвитку особистості, а також країни та її економіки загалом.

Певні галузі економіки виникають завдяки наявності достатньої кількості унікальних фахівців та продовжують існувати внаслідок поповнення молодими спеціалістами. Останніх цінують, зважаючи на їх дипломи.

Аналіз рейтингів ЗВО, що формуються як результат постійних (щорічних) досліджень, які проводять по всьому світу спеціалізовані дослідницькі компанії, показує, що інженерне матеріалознавство є однією з актуальних та провідних галузей спеціальностей по всьому світу та особливо у розвинутих країнах.

Інженерів матеріалознавства готують майже в усіх найкращих університетах світу незалежно від форми власності, року заснування, географічного положення. Серед них особливо виділяють ЗВО із країн Південно-Східної Азії.

Сингапур та Китай невідворотно входять до категорії розвинутих країн і займають лідируючі позиції у виробництві та експорті високотехнологічних товарів та й просто товарів широкого вжитку.

Тобто є зв'язок між тим, що ці прогресивні країни роблять більшу ставку на матеріалознавство як ключову галузь, і тим, як швидко відбувається розвиток економіки в них.

### *Матеріалознавство і суспільство*

Матеріалознавство – це й наука, і галузь людської діяльності.

За визначенням в Енциклопедії Британіка – це наука, що вивчає властивості твердих матеріалів і те, як ці властивості визначаються складом та структурою матеріалу.

Ця наука «виросла» як сплав фізики твердого тіла, металургії та хімії, оскільки значна багатоманітність властивостей матеріалів не можуть бути зрозумілі в межах будь-якої окремої класичної науки.

Із фундаментальним розумінням причинності властивостей матеріалів можна розробляти та вибирати їх для широкого кола застосувань, від будівництва до мікроелектроніки, від дослідження та освоєння космосу до медицини.

Матеріалознавство, таким чином, важливе для інженерної діяльності в таких галузях, як: електроніка, транспорт, авіація та космонавтика, телекомунікації, обробка інформації, ядерна енергетика, енергозбереження та медицина.

Інженерне матеріалознавство, за визначенням Concise Encyclopedia of Engineering (V видання, 2005 р., ISBN 0-07-142957-3), – це міждисциплінарна галузь із продукування та використання знань, що стосуються складу, структури, створення та оброблення матеріалів, а також їх властивостей та застосування.

Галузь охоплює повний спектр дисциплін – від фундаментального матеріалознавства до прикладних розробок та застосування матеріалів.

Матеріалознавство вибудовує міст між фундаментальними науками та різноманітними інженерними дисциплінами.

Матеріалознавство не є ізольованою наукою – воно дуже тісно пов'язане з тими науками, з яких воно походить (наприклад, класичні фізика, хімія), та з тими, задля яких вона працює (наприклад, металургія, машинобудування, електроніка).

Але водночас матеріалознавство відокремилось, щоб бути незалежним у формулюванні проблем, виборі підходів до їх вирішення та визначенні цілей наукових досліджень.

Завдяки цьому в матеріалознавстві можливе продукування одночасно декількох результатів: розв'язання прикладних інженерно-технологічних задач та вирішення певних фундаментальних наукових проблем.

### *Роль матеріалознавства в науково-технічному прогресі*

Матеріалознавство – відкрита наука, тобто спроби формалізувати та жорстко визначити її межі чи то взагалі віднести повністю до іншої якоїсь галузі є контрпродуктивними та згубними для її ефективності.

Те, що в одному разі – в одній проблемній сфері – є негативним явищем, в іншому може бути використане як ефективний та незамінний спосіб досягнення необхідного результату.

Коли медики чи біологи вивчають будову тканин – вони можуть використати ці знання для оздоровлення людини. Коли матеріалознавці, співпрацюючи з медиками та біологами, вивчають будову тканин та органів, – вони можуть принести нові матеріали чи ідеї, наприклад, у машинобудування та цивільне будівництво.

Це двобічний рух – матеріалознавці використовують наявні матеріали та знання з хімії чи машинобудування для розроблення біоматеріалів та біоімплантів для медицини.

Тобто матеріалознавство – це те середовище, де знання з дуже різних галузей науки і техніки, не пов'язаних між собою дисциплін, що належать до різних класичних наук та видів діяльності, поєднуються з метою створити щось дуже потрібне нове, будь то матеріал чи метод дослідження або технології.

Економічний розвиток та технічний прогрес неодмінно пов'язані з розвитком матеріалознавства та прогресом у створенні нових штучних унікальних матеріалів на потребу інших галузей економіки.

Країни з розвинутими економіками відрізняються від бідніших країн не тим, що в них виробляється більше сталі, чавуну чи бетону в перерахунку на душу населення, а тим, що в них більша частка виготовлення високотехнологічних матеріалів: від спеціальних сталей та сплавів до специфічних керамік, різноманітних полімерних та композитних матеріалів, зокрема з тих, що не мають аналогів у світі.



Матеріалознавство – це механізм синергії дотичних високотехнологічних та наукоємних галузей економіки.

Упровадження досягнень матеріалознавства надає значні економічні переваги технологіям, що розробляються та використовуються, та забезпечує конкурентоспроможність – здатність виробляти більше товарів із одночасним зростанням реального доходу.

## ЛЕКЦІЯ 2

### Історія розвитку матеріалознавства як науки

#### *Етапи розвитку матеріалознавства*

Людство зацікавилася дослідженням властивостей матеріалів, мабуть, ще у прадавні часи. Практика виявляла проблеми, а наука завжди намагалася знайти рішення. Саме тому матеріалознавство – чи не найдавніша міждисциплінарна наука, що охоплює знання з математики, фізики, хімії.

Історію матеріалознавства умовно можна поділити на три етапи, не однакові за проміжком часу.

Перший етап: від найдавніших часів – початкових природничо-технологічних знань та навичок до ранньозалізного віку. Можна стверджувати, що наука про матеріали зародилася з появою виробів із обпаленої глини та самородної міді. Тобто кераміку отримували із глини свідомо, висушували, нагрівали та випалювали. Для поліпшення якості виробу спершу підбирали сировину, а потім намагалися удосконалити температурний режим її обробки. Археологи виявили залишки розвинутих центрів гончарства у Месопотамії, Північній Африці, Східній Європі.

З плином часу, окрім каменю, людство почало досліджувати самородні, а згодом і рудні метали. Самородна мідь була витіснена міддю, виплавленою з руд, що були більш поширені у природі. У III тисячолітті до н. е. навчилися виготовляти та використовувати бронзу як сплав міді з оловом. Залишки цієї технології представлені в районі Західної Грузії, у Карпатах та Альпах. Через деякий час бронзове століття

змінилося на залізне, через доступність руд останнього.

Необхідно зазначити, що перші відомості про плавлення міді передують знахідкам керамічних виробів, тому гончарні печі не слід вважати прямим прототипом і необхідною умовою виникнення перших металургійних горнів. Можливо, вони існували одночасно.

У I тисячолітті до н. е. вже переважало залізо, яке навчилися поєднувати з вуглецем під час термічного оброблення за присутності деревного вугілля. Існують відомості, що у IX та VIII ст. до н. е. жителі території сучасного Західного Ірану використовували сталь у побуті та озброєнні. Свідоме створення виробів з глини та металу було обумовлено певним прогресом виробництва.

Зросла потреба у глибшому розумінні властивостей матеріалів. У III ст. до н. е. винайдено новий будівельний матеріал «римський бетон» – дрібні камені зливали розчином вапна й піску.

Давньогрецький учений Аристотель установив 18 якостей у матеріалів: плавкість – неплавкість, в'язкість – крихкість, горючість – негорючість і т. п. Три відомих стани речовини (тверде, рідке та газоподібне) виражалися Аристотелем чотирма елементами: землею, водою, повітрям і вогнем, що з позицій фізики було певним досягненням. Римський філософ Тіт Лукрецій Кар у поемі «Про природу речей» викладав свої судження про природу властивостей матеріалів. Так, у порядку речей найтвердішим він вважав алмаз, далі – твердий кремій й залізо, після них – стійку мідь, що дзвеніла під час ударів. Попри публікації стародавніх авторів щодо фізичних характеристик матеріалів, для давнього періоду не характерним є поділ матеріалів на окремі види. Теорія будувалася на здогадах, інтуїції.

Для доби Середньовіччя характерною ознакою досліджень матеріалів стала алхімія. У цей період швейцарський лікар Парацельс замінює чотири елементи Аристотеля на три свої – сіль, сірку та ртуть та дає їм фізичні й хімічні характеристики. У

1556 р. надруковано книгу Г. Агріколи «De Re Metallica Libri XII», що описувала результати 20-річних спостережень автора щодо технології гірничої справи та металургії. Зазначимо, що дослідження, пов'язані з вивченням внутрішньої структури матеріалів, розвивалися повільніше, ніж у філософів античного періоду, але ж тут необхідно згадати про вплив церкви, яка унеможлиблювала будь-які відкриті наукові дослідження.

Промислова революція стала початком другого умовного періоду розвитку матеріалознавства. Саме у цей період спостерігаються перші наукові дослідження щодо будови матеріалів. Перші досліди з травленням заліза здійснив Р. Реомюр. У 1774 р. шведський хімік С. Рінман виокремив субстанцію у сталі, яку пізніше було названо карбоном. Л. Рінман у 1865 р. здійснив подальші експерименти з вуглецем і установив, що за різних температурних режимів оброблення за однакового хімічного складу можна отримати різні властивості кінцевого матеріалу. Ці дослідження завершилися отриманням нового матеріалу – ковкого чавуну.

Дослідженнями зв'язків між будовою сталі та її властивостями займався П. П. Аносов. Він розпочав планомірне дослідження впливу на сталь різних елементів і першим довів, що фізико-хімічні та механічні властивості сталі можуть бути значно змінені й поліпшені додаванням деяких легувальних елементів. Наукові підвалини матеріалознавства були закладені Д. К. Черновим, який дослідив поліморфічні перетворення у сталі, а також розробив фазову діаграму залізо-вуглець.

У номенклатурі матеріалів, окрім тих, що застосовувалися у попередні часи – каменю, глини, гіпсу, міді, бронзи, скла, кераміки, заліза, у цей час з'явилися нові види цементу, зокрема портландцемент, отриманий у 1840 р.

Л. Віка. Наприкінці XIX ст. розвивається технологія виготовлення залізобетону. 1867 р. патент на цей винахід отримав Ж. Монье.

Водночас науковці експериментують з щойно відкритими хімічними елементами – кобальтом, вольфрамом, нікелем, магнієм, титаном.

З'являється швидкорізальна сталь Р. Мушета. Нікелева сталь Дж. Рілея.

Відкриття у 1897 р. Дж. Дж. Томсоном електрона та запропонована Е. Резерфордом у 1911 р. модель атома привели до нових досліджень у галузі матеріалознавства. З цими дослідженнями розпочався третій умовний період розвитку цієї науки. Виробництво сталі та чавуну досягло промислових масштабів. Окрім того, налагоджується виробництво алюмінію – нового конструкційного матеріалу.

Використання рентгенівського аналізу на початку ХХ ст. дозволило встановити кристалічну будову металів та сплавів. Ці дослідження виконали такі науковці, як М. Лауе, П. Дебай, Г. В. Вульф, У. Г. Брегг та його син – У. Л. Брегг. Наукові дослідження О. М. Бутлерова з хімічної будови органічних з'єднань створили основу для виробництва синтетичних полімерних матеріалів. С. В. Лебедев запропонував механізм промислового виробництва синтетичного каучуку. Дослідженням полімерних матеріалів займалися: В. О. Каргін, який розробив методику виробництва поліетилену зі спеціальними властивостями, зокрема для використання у радіолокаційній техніці; К. Циглер разом із Д. Натта винайшли металоорганічний каталізатор для контрольованої полімеризації вуглеводнів.

Починаючи з кінця 1920-х рр. здійснюється чимало досліджень з вивчення теорії фазових перетворень у сплавах, що дозволило розробити термічне оброблення залізовуглецевих, алюмінієвих, феросплавів та низки інших. Це роботи С. С. Штейнберга, Г. В. Курдюмова, А. А. Бочвара, В. Д. Садовського.

У повоєнні часи американець Д. Стукі винайшов склокераміку, що нині широко використовується у комп'ютерних та інформаційних технологіях, а також у побуті. У 1960-ті рр.

після відкриття лазера з'являється новий тип скляних волокон – оптичне волокно. Його було розроблено для передавання великого обсягу інформації. У 1991 р. винайшли фотонне кристалічне волокно, яке могло передавати більше енергії ніж звичайне волокно.

Таким чином, у ХХ ст. були досягнуті значні успіхи у теорії та практиці матеріалознавства, зокрема створені надміцні матеріали для інструментів, розроблені композитні матеріали, досліджені властивості напівпровідників, удосконалені способи зміцнення деталей термічним та хіміко-термічним обробленням.

### ***Значення матеріалознавства як науки***

Значення матеріалознавства як науки можна оцінити крізь призму наукових відкриттів, які були оцінені як найвищі наукові досягнення світу.

Нобелівських премій «з матеріалознавства» не існує, але значна кількість премій була присуджена або за матеріалознавчі розробки, або за відкриття, надзвичайно важливі – ключові – для матеріалознавчої науки.

Значна кількість премій з фізики, як ми бачимо, присуджується за розроблення методів дослідження та розшифрування структури матеріалів.

Застосовуючи дифракційні методи дослідження структури, науковці розшифрували будову нуклеїнових кислот та механізм їх дії. За це їм була присуджена премія з фізіології та медицини в 1962 році, пізніше, у 1968-му, ще одна – за розшифрування генетичного коду в ДНК, а в 1982-му – за розроблення методів розшифрування дифракційних результатів присуджена премія з хімії.

Велике значення отримали електричні й магнітні властивості матеріалів та матеріали: напівпровідники, надпровідники, оптоволокно, фотоелементи, феромагнетики тощо.

У 1956 році премія з фізики була присуджена за дослідження напівпровідників та відкриття транзисторного ефекту – явища, використання якого зумовили безпрецедентний

стан поширення та застосування електронних приладів, гаджетів, комп'ютерів, наявних сьогодні.

До того ж такі премії присуджувалися в 1973, 2000 та 2009 роках. Створення нового матеріалу – графену – на слуху з 2010 року.

До галузі матеріалознавства можна віднести відкриття, за які були присуджені премії з фізики більше 20 разів та з хімії – більше десяти, зокрема:

- за вуглецевий радіоізотопний метод визначення віку в археології, геології та інших галузях науки;
- за фулерени;
- за відкриття квазікристалів;
- за метод кристалографічної електронної мікроскопії та розшифрування комплексу білок – нуклеїнова кислота;
- за МРТ – розвиток методології ядерної магнітної резонансної спектроскопії.

Понад третина з усіх названих премій – це безпосередньо винайдення нових матеріалів чи відкриття нових властивостей певних матеріалів.

### ЛЕКЦІЯ 3

#### Сучасні тенденції розвитку матеріалознавства

Сьогодні в умовах науково-технічного прогресу матеріалознавство, як і будь-яка природнича наука і навчальна дисципліна, безперервно розвивається.

Сучасні тенденції в розвитку матеріалознавства характеризуються накопиченням значного обсягу кількісної інформації про структуру і властивості як традиційних матеріалів, так і нових, отриманих наукою і промисловістю: органічних і неорганічних полімерних матеріалів, керамік і композиційних матеріалів на їх основі тощо.

Традиційно в матеріалознавстві як основний найважливіший тип матеріалів розглядають метали. Проте вимоги до набору необхідних сьогодні властивостей, які ставить сучасна промисловість до матеріалів, постійно підвищуються.

На початку минулого століття наука надала для матеріалознавців як об'єкт дослідження і застосування якісно новий вид матеріалів – органічні синтетичні полімери (полібутадиєн, фенолоформальдегідні смоли тощо) і композиційні системи на їх основі.

Однак, за даними багатьох науковців, сьогодні настає ера не тільки полімерних, а й керамічних матеріалів.

Це можна пояснити наявністю практично невичерпної сировинної бази для отримання керамічних матеріалів, меншою енергоємністю їх виробництва й унікальністю властивостей (від жаростійких і надтвердих до еластичних, електро- і надпровідних), а також різноманітністю галузей практичного застосування цих матеріалів.

Отже, вищезазначене дає можливість зробити висновок про перспективність і необхідність розвитку керамічного матеріалознавства.

Сьогодні доцільно говорити про комплексне використання різних матеріалів без їх протиставлення один одному, оскільки кожен із них (метал, полімер, кераміка тощо) має свої традиційні сфери застосування.

До того ж нові досягнення матеріалознавчої науки привели до створення таких матеріалів нового покоління (композиційних і наноматеріалів, керамічних і полімерних провідників і надпровідників, металевого скла тощо), які мають властивості або їх комплекс, не притаманні традиційним матеріалам.

Актуальним на сьогоднішній день є вироблення єдиних універсальних підходів до наукового прогнозування і конструювання структури і властивостей матеріалів будь-якої природи (метал, кераміка, полімер тощо).

Це необхідно для раціонального вирішення прикладних завдань з подальшим визначенням галузей їх раціонального практичного використання, а також методів і технологій оброблення та перероблення матеріалів у конкретні вироби і конструкції з комплексом заданих властивостей.

Основними завданнями, які ставить перед матеріалознавством сучасна техніка та промисловість, є конструювання і створення матеріалів нового покоління з комплексом властивостей, що відповідають всезростаючим вимогам за фізико-хімічними, механічними, експлуатаційними та екологічними характеристиками.

Особливе значення в сучасному матеріалознавстві має вироблення практичних рекомендацій щодо застосування конкретних матеріалів у різних виробках і конструкціях, технологій їх оброблення, перероблення у вироби і подальшого ремонту останніх.

Обсяг сучасного матеріалознавства надзвичайно великий і охоплює всі галузі техніки і виробництва.

Будь-яка технологія починається з вирішення низки матеріалознавчих задач: установлення критеріїв вибору матеріалів із урахуванням призначення виробу і реальних умов його виробництва, визначення допустимих параметрів і режимів оброблення матеріалів. Тільки на основі глибоких і всебічних знань будови і властивостей матеріалів можна розробити сучасну технологію, виготовляти вироби високої якості.

Успіхи в розвитку хімії, фізики, математики та інших фундаментальних наук, створення сучасних і високоточних засобів вимірювальної техніки істотно збагачують матеріалознавство і створюють умови для постійного розвитку цієї прикладної науки. Використовуючи сучасні засоби аналізу структури і вимірювання властивостей, матеріалознавці розширюють свої пізнання про матеріали, відкривають нові їх якісні властивості, надають обґрунтовані рекомендації щодо раціонального використання наявних матеріалів і розробляють нові матеріали з поліпшеними властивостями.

Отже, нині матеріалознавство являє собою науково-технологічну галузь, що швидко розвивається. У багатьох напрямках досягнуто значного прогресу завдяки поглибленню та розвитку фізичних уявлень про природу матеріалів. Механічні, теплові, електричні, магнітні, надпровідні, напівпровідникові,



корозійні та інші необхідні для техніки властивості матеріалів удосконалюються на основі розроблення нових технологій.

Нині найбільш перспективними напрямками в галузі матеріалознавства є: організація промислового випуску конкурентоспроможних на сучасному світовому ринку матеріалів та виробів із них; створення та розвиток промислових технологій перероблення й утилізації відходів та виробництва матеріалів із вторинної сировини; створення й організація виробництва наноструктурних компонентів альтернативної енергетики; розроблення новітніх матеріалів та методу захисту деталей і вузлів від зношення та корозії в екстремальних умовах експлуатації.

### ***Сучасні методи виробництва матеріалів***

Головний акцент сьогодні робиться на «зеленому виробництві сталі». Це дозволить галузі вистояти перед обличчям екологічних проблем і тиском з боку регулювальних органів.

Зростаючий попит на високоякісні марки сталі потребує особливої уваги до обладнання як на нових, так і на модернізованих підприємствах, а диджиталізація буде невід'ємною частиною всіх етапів виробничої діяльності.

Якщо говорити загалом, то майбутнє виробництва металів буде стійким, безвуглецевим, безпечним, інтелектуальним, модернізованим і, ймовірно, приведе до створення матеріалів із такими властивостями, у які сьогодні важко повірити.

Водень проти вуглецю.

Уже не потрібно нікому доводити необхідність переходу на «зелене виробництво сталі», що покликане зробити процес виробництва більш екологічним. Щодо цього є кілька напрямів. Перший із них сьогодні вважають найбільш перспективним – це відмова від вуглецю на користь водню. Вуглецевий відновник різними способами замінюється воднем.

Рішення для прямого відновлення, засноване на водні, дозволяє безпосередньо використовувати будь-які види залізної руди, може практично виключити вуглецевий слід під час виробництва заліза. Викиди вуглекислого газу будуть близькими

до нуля. Побічні продукти будуть перероблені, а процеси виконуватимуться з максимальною енергоефективністю.

Активно розвивати цю технологію вже почали такі металургійні гіганти, як ArcelorMittal, voestAlpine, SSAB, Dillinger та низка інших виробників. Японський Nippon Steel заявляв про свої наміри до 2025 року відмовитися від технології використання вуглецю на користь водню.

Пряме відновлення заліза.

Другий «зелений» напрям, який вже давно застосовують у металургії, – це бездоменне отримання напівпродукту для подальшого виготовлення сталі шляхом прямого відновлення заліза з високозалізистої сировини спеціальними технологіями (Midrex, Arex, Hyl і т. д.). На виході утворюється так звана металізована сировина – гаряче брикетоване залізо (HBI), металізовані окатиші DRI (Direct Reduced Iron), губчасте залізо. Це металевий продукт із високим вмістом заліза, до 99 %, який може відразу ж використовуватися в сталеплавильному переділі для отримання сталі. На сьогоднішній день таке залізо прямого відновлення є основним під час виробництва електросталі, як заміщення брухту та інших залізовмісних інгредієнтів. Ця технологія розвивається вже понад 30 років. Тією чи іншою мірою її ефективність доведена, але така технологія вимагає або первісно високочистого рудного матеріалу – залізорудної сировини з високим вмістом заліза та низьким вмістом домішок, або наявності великих енергетичних потужностей.

Саме тому такі лінії розміщують в Бразилії та Австралії в районі гірничодобувних підприємств, де є в наявності дуже гарна руда, а також на Близькому Сході, де в надлишку – дешевий газ, що використовують для відновлення заліза з залізовмісної сировини.

Сьогодні технологія прямого відновлення вже досягла свого піку та є однією з найбільш передових і широко використовуваних.

Суміщені процеси виплавки та прокатки металу.

Говорячи про виплавку металу, варто відзначити, що все більшого поширення набувають суміщені процеси виплавки та прокатки.

В одному цеху встановлюють плавильний агрегат – конвертер або електропіч, відбувається безперервне розливання на МБЛЗ (машині безперервного лиття заготовок), з якої тільки-но застигли гарячі сляби, блюми або заготовки надходять відразу ж до прокатки. Ці агрегати називають ливарно-прокатними модулями, або ливарно-прокатними агрегатами.

Сьогодні у всьому світі більшість нових технологічних ліній намагаються будувати в тому чи іншому модульному вигляді. Це дозволяє економити площі, скорочує логістичні витрати і час на виконання замовлення.

Особливістю такої технології є наявність дуже високої культури виробництва та висококваліфікованого персоналу. В іншому разі ризик отримання браку кінцевої продукції є високим (тут не вийде «перехопити» брак на якомусь певному етапі виробництва, а лише в фіналі). Усі агрегати повинні працювати злагоджено, і персонал повинен бути максимально компетентним, щоб мінімізувати ризики отримання браку в готовій продукції.

Нині існують такі модулі, які поєднують не тільки плавлення, розливання і гарячу прокатку, а ще й холодну прокатку рулонів або довгомірного прокату, витягування дроту та ін. Тобто на виході з цеху отримуємо не тільки гарячекатаний прокат, а й продукцію більш високих переділів.

Окремим напрямом суміщеного виробництва під час виготовлення рулонів є так звана валкова прокатка, за якої сталь зі сталеплавильного агрегату розливається не на машині безперервного лиття, а через невеликий кристалізатор на спеціальні водоохолоджувані валки, і застигає безпосередньо на них. Потім сталь змикається в смугу та йде в гарячу прокатку. Такі технології більш розвинені в кольоровій металургії, особливо в алюмінієвому виробництві смуги та рулонів.

У чорній металургії найпопулярніший агрегат цього типу знаходиться в США, на заводі компанії Nucor, і дозволяє отримувати унікальні структури, які неможливо отримати будь-якими альтернативними способами. Переважно таку продукцію використовують в автомобільній і аерокосмічній галузі.

Зміцнені марки сталі.

Важливою тенденцією в металургії на сьогоднішній день є перехід від рядових марок сталі до високоміцних (термомеханічно зміцнених, загартованих, двофазних, зміцнюваних під час сушіння покриття та ін.). Особливо це помітно в автомобілебудуванні, де постійно зростають норми безпеки та економії палива й змушують виробників розробляти більш легкі, екологічні та надійні машини. Звичайні високоміцні (HSS) та прогресивні високоміцні (AHSS) сталі протягом останніх десяти років все більшою мірою замінюють м'які аналоги в кузовах автомобілів. Типовий сучасний автомобіль містить близько 30 % HSS та 30 % AHSS із подальшою тенденцією до зниження частки «м'яких» низьковуглецевих низьколегованих сталей. Розвиток сталевого прокату для автомобілебудування здійснюється під егідою Міжнародного інституту чавуну і сталі та інших профільних асоціацій.

Цифровізація – це ще один важливий аспект сучасної металургії. Він спрямований на повну автоматизацію підприємств із застосуванням роботів у небезпечних робочих зонах, що приведе до підвищення безпеки працівників. Системи моніторингу обладнання та ефективні інструменти збільшать прозорість процесів та сприятимуть оптимізації всіх робочих процедур.

Цифровізація також полегшить перевірку поверхонь та деталей у режимі реального часу для визначення якості готового продукту та систематизації несправностей.

Отже, як бачимо, інновації – це набагато більше, ніж просто геніальні ідеї. Потрібні також продумана стратегія та далекосяжне планування з урахуванням можливих труднощів.

Отже, стратегія металургійної промисловості продовжуватиме розвиватися за такими напрямками:

- задоволення попиту на нову продукцію, стимулюючи інновації, для вирішення нових соціальних та економічних проблем;
- постійне поліпшення характеристик матеріалів та продуктивності;
- оптимізація процесів дослідження, виробництва, оброблення та перероблення;
- розширення можливостей сучасних технологій та інфраструктури.

У найближчому майбутньому прогрес у матеріалознавстві та металургії дасть можливість вдосконалити традиційну металургію з урахуванням її ключових проблем в економіці, енергетиці, навколишньому середовищі та соціальних аспектах, використовуючи оновлені поточні та абсолютно нові процеси. Ці події матимуть великий вплив на світову економіку, а також на соціальний імідж суспільства.

### ***Сучасні методи дослідження матеріалів***

Металознавці все частіше використовують сучасні методи дослідження для пояснення взаємозв'язків «технологія – структура, будова – властивості». Здебільшого ці методи використовують комплексно, щоб відповісти на запитання, чому технологічний процес повинен бути побудований саме таким чином, для забезпечення необхідних властивостей або параметрів будови і структури, необхідних для отримання цих властивостей.

Для правильного розуміння та оцінки результатів сучасних методів досліджень, які часто спостерігаються в спеціальній літературі, присвяченій металознавству (матеріалознавству), потрібно знати основні принципи, можливості та межі застосування відповідних методів дослідження.

*Макроструктурний аналіз* передбачає вивчення макроструктури металу, тобто будови металу, яку можна спостерігати без збільшення або за невеликого збільшення за

допомогою лупи (від 2 до 30 разів). Він дозволяє встановити розміри та форму кристалів, знаходити дефекти литва та термооброблення (раковини, шлакові вclusions, тріщини тощо). Макроструктуру досліджують безпосередньо на поверхні деталі, у зламі або на спеціальному зразку (темплеті) після шліфування і травлення відповідним розчином. Протравлювач по-різному розчиняє різні структурні складники та розтравлює дефекти, що видно на поверхні темплету.

*Мікроскопічний аналіз* застосовують для вивчення будови металу у разі збільшення від 50 до 2000 разів за допомогою спеціального металографічного мікроскопа. Мікроскопічний аналіз використовують для визначення форми та розмірів кристалічних зерен, із яких складається сплав; змін внутрішньої будови металу під впливом різних видів оброблення (термічного та хіміко-термічного), а також після зовнішньої механічної дії на сплав; хімічного складу деяких структурних складових; для виявлення мікротріщин та неметалевих включень.

Мікроструктурні дослідження мають велике значення, оскільки механічні властивості металу певною мірою залежать від структури. Для дослідження мікрошліфів застосовують оптичні металографічні мікроскопи.

Дослідження структури металів і сплавів за допомогою електронного мікроскопа називають *електронною мікроскопією*. В електронному мікроскопі джерело світла замінено джерелом електронів, які виходять з електронної гармати, а скляні лінзи замінені електромагнітними лінзами. Електронна гармата являє собою вольфрамову спіраль, нагріту до високої температури (катод). За анод беруть пластинку з отвором посередині. Між спіраллю й анодом, що знаходяться на невеликій відстані, створюється потужне електричне поле, необхідне для прискорення руху електронів. Прискорені електрони проходять крізь отвір анода і прямують до об'єкта.

Залежно від методу дослідження виділяють кілька конструкцій електронних мікроскопів:

- просвітлювальні, у яких потік електронів проходить через об'єкт (зображення є наслідком різного розсіювання електронів на об'єкті);
- відбивальні, коли зображення утворюється відбитими від поверхні об'єкта електронами;
- емісійні, у яких зображення утворюється від поверхні, що світиться, під дією електронів;
- растрові, де зображення утворюється за рахунок емісії електронів, що випромінюються з поверхні, на яку падає і безперервно переміщується потік первинних електронів.

Найпоширенішими є просвітлювальні електронні мікроскопи, у яких об'єкт досліджують в електронних променях. З огляду на це предмет дослідження має бути дуже тонким. Під час дослідження звичайних мікрошліфів на електронному мікроскопі застосовують переважно метод реплік (оксидних, лакових, кварцових, вугільних), що відтворюють рельєф поверхні мікрошліфа і пропускають електронні промені. Крізь різні ділянки об'єкта проходить різна кількість електронів (менша від грубих і щільних ділянок і більша від тонких і нещільних). Це спричиняє контрастність зображення, тобто відображення будови предмета, що досліджується. Просвітлювальні електронні мікроскопи дають збільшення в 400 тисяч разів.

*Метод радіоактивних ізотопів.* Ізотопами називають атоми з тотожними хімічними властивостями, проте різною атомною масою. Метод радіоактивних ізотопів полягає в тому, що атоми введених у метал радіоактивних ізотопів зазнають радіоактивного перетворення, яке супроводжується радіоактивним випромінюванням, яке легко виявити. Атоми радіоактивних ізотопів виділяються з безлічі атомів, тобто вони наче мічені, тому цей метод ще називають методом мічених атомів. Він дає змогу контролювати процеси, що відбуваються в металах під час їх виготовлення й оброблення, наприклад розподіл атомів під час кристалізації металу.

Для вивчення процесу розміщення елементів у сплав вводять радіоактивний ізотоп елемента, розподіл якого у сплаві

досліджують. З готового сплаву виготовляють мікрошліф і приводять його у контакт з емульсією фотопластинки (фотоплівки). Випромінювання ізотопу діє на фотопластинку, як і світло. Так отримують мікрорадіограму, яку розглядають під мікроскопом.

*Рентгеноструктурний аналіз.* Рентгеноструктурний аналіз застосовують для дослідження внутрішньої будови кристалів, їх орієнтування і визначення внутрішніх напружень (викривлення ґратки). Рентгенівські промені – це електромагнітні хвилі дуже малої довжини. Порівняно з довжиною світлових хвиль рентгенівські хвилі у 10 тисяч разів коротші.

Рентгенівський аналіз заснований на відбиванні рентгенівських променів від атомів кристалічної ґратки і на інтерференції рентгенівських променів, тобто здатності їх підсилювати, послаблювати або взагалі гасити один одного. Для дослідження монокристалів використовують рентгенівські трубки, які дають пучок променів із різною довжиною хвиль, так зване біле рентгенівське випромінювання. Полікристалічні метали і сплави досліджують у променях із певною довжиною хвилі – монохроматичних променях. Тому аноди електронних трубок виготовляють із хрому, заліза, міді, молібдену або кобальту.

## ЛЕКЦІЯ 4

### Чорні й кольорові метали та сплави

Із 107 відомих у цей час елементів періодичної системи Д. І. Менделєєва близько 80 мають більш-менш яскраво виражені металеві властивості. Загальними ознаками металевого стану є: металевий блиск і непрозорість, висока електро- і теплопровідність, висока пластичність (ковкість), кристалічна структура, сірий колір із відтінками від світло-сірого до темно-сірого (виняток становлять тільки два метали – червона мідь і жовте золото).

Характерною ознакою для металевого стану є їх кристалічна структура. Більшість металів кристалізується в трьох



типах кристалічних ґраток: кубічній об'ємноцентрованій, кубічній гранецентрованій і гексагональній щільній.

Цим типам ґраток властиві компактність і висока щільність упакування.

Важливу роль у виробництві й споживанні металів відіграє їх хімічна активність, яку можна охарактеризувати положенням металів в електрохімічному ряді напружень.

У ряді напружень кожний більш електронегативний метал здатний витіснити із з'єднань електропозитивні метали. Метали з негативними електродними потенціалами відрізняються більшою хімічною активністю і легше схильні до окиснення, ніж більш електропозитивні. Навпаки, у міру збільшення електродного потенціалу стійкість металу зростає.

Більшість металів добре сплавляються один із одним у будь-яких співвідношеннях, утворюючи двокомпонентні й багатоконпонентні сплави.

Металевий компонент, що вводиться в основний метал у невеликих кількостях, називають легувальним.

Можливості взаємної сплавки металів дозволяють у винятково широких межах змінювати фізико-механічні й фізико-хімічні властивості металевих матеріалів у заданому напрямку.

Практично необмежені можливості створення сплавів різних складів дозволяють надавати їм легкоплавкості або тугоплавкості, підвищеної механічної міцності й твердості або, навпаки, пластичності, високої корозійної стійкості й жаростійкості, високої магнітної сприйнятливості та багато інших, специфічних або поліпшених якостей, не властивих чистим металам.

Згідно із промисловою класифікацією всі метали поділяють на дві групи: чорні й кольорові.

До чорних металів відносять залізо і його сплави, марганець і хром, виробництво яких тісно пов'язане з металургією чавуну й сталі. Усі інші метали належать до кольорових. Назва «кольорові метали» досить умовна, оскільки фактично тільки золото й мідь мають яскраво виражене

забарвлення. Усі інші метали, включаючи чорні, мають сірий колір із різними відтінками – від світло-сірого до темно-сірого.

Кольорові метали умовно поділяють на п'ять груп:

1. Основні важкі метали: мідь, нікель, свинець, цинк і олово.
2. Малі важкі метали: вісмут, миш'як, сурма, кадмій, ртуть і кобальт. Вони є природними супутниками основних важких металів. Зазвичай їх одержують попутно, але виробляють у значно менших кількостях.
3. Легкі метали: алюміній, магній, титан, натрій, калій, барій, кальцій, стронцій. Метали цієї групи мають найнижчу серед інших металів щільність.
4. Благородні метали: золото, срібло, платина. Ці метали мають високу стійкість до впливу навколишнього середовища й агресивних середовищ.
5. Рідкісні метали. За промисловою класифікацією рідкісні метали поділяють на такі підгрупи:
  - а) тугоплавкі метали: вольфрам, молібден, тантал, ніобій, цирконій і ванадій;
  - б) легкі рідкісні метали: літій, берилій, рубідій і цезій;
  - в) розсіювані метали: галій, індій, талій, германій, гафній, реній, селеній і телур;
  - г) рідкісноземельні метали: скандій, ітрій, лантан і лантаноїди;
  - д) радіоактивні метали: радій, уран, торій, актиній і трансуранові елементи.

### ***Залізо та сплави на його основі***

*Залізо* – Fe, хімічний елемент VIII групи періодичної системи елементів, атомний номер 26, атомна маса 55,847. Блискучий сріблясто-сірий, пластичний метал. Утворює поліморфні модифікації.

Залізо може мати три поліморфні модифікації ( $\alpha$ -,  $\delta$ - і  $\gamma$ -Fe), кожна з яких існує в певному температурному інтервалі.

$\alpha$ -Fe має температурний інтервал практично від абсолютного нуля до 911 °С.  $\alpha$ -Fe має об'ємноцентровану кубічну ґратку. Густина  $\alpha$ -Fe-7860 кг/м<sup>3</sup>.

До температури 768 °С (крапка Кюрі) ця модифікація має феромагнітні властивості, вище за цю температуру – парамагнітні.

$\gamma$ -Fe-парамагнетик, існує від 911 до 1392 °С, має ґранецентровану ґратку. Його густина – 8000–8100 кг/м<sup>3</sup>.

Високотемпературна модифікація  $\delta$ -Fe існує в інтервалі від 1392 до 1539 °С.  $\delta$ -Fe має об'ємноцентровану кубічну ґратку й так само, як  $\alpha$ -Fe після 768 °С, має парамагнітні властивості.

Сплави, у яких сумарний вміст домішок менше 0,1 % та вуглецю менше 0,02 %, називають технічно чистим залізом, а за вмісту менше 0,04 % С – технічним залізом (армко-залізом).

Технічне залізо має високу магнітну проникність ( $\mu = 4500$  Гн/м) та є електротехнічним магнітно-м'яким матеріалом, що застосовується для серцевиків, полюсних наконечників, електромагнітів, пластин акумуляторів.

Залізо – найважливіший метал сучасної техніки: на частку сплавів заліза з вуглецем та іншими елементами (залізовуглецеві сплави) припадає близько 95 % усієї металевої продукції (чавун, сталь, феросплави).

Розрізняють чисті залізовуглецеві сплави (зі слідами домішок), одержувані в невеликих кількостях для дослідницьких цілей, і технічні залізовуглецеві сплави, що містять домішки, легувальні елементи та спеціальні добавки.

*Сталь* – сплав заліза (основа) з вуглецем (до 2,14 %) та іншими елементами.

Мікроструктура сталі та її властивості залежать від вмісту в ній вуглецю і легувальних елементів.

Класифікацію сталей і сплавів проводять за хімічним складом, якістю (за способом виробництва і вмістом шкідливих домішок), а також за призначенням.

За хімічним складом сталі класифікують на вуглецеві й леговані.

Вуглецеві сталі залежно від вмісту вуглецю ділять на такі групи:

- маловуглецеві – менше 0,25 % С;
- середньовуглецеві – 0,25–0,6 % С;
- високовуглецеві – більше 0,6 % С.

Леговані сталі залежно від безпечних елементів поділяють на: хромисті, марганцеві, хромонікелеві, марганцеві та ін. Їх класифікація за хімічним складом визначається сумарним відсотком вмісту легувальних елементів:

- низьколеговані – менше 2,5 %;
- середньолеговані – 2,5–10 %;
- високолеговані – більше 10 %.

Леговані сталі й сплави поділяють також на класи за структурним складом:

- у відпаленому стані – доевтектоїдний, заевтектоїдний, ледебуритний (карбідний), феритний, аустенітний;
- у нормалізованому стані – перлітний, мартенситний та аустенітний класи.

До перлітного класу відносять вуглецеві й леговані сталі з низьким вмістом легувальних елементів, до мартенситного класу – із їх більш високим вмістом, а до аустенітного – із високим вмістом легувальних елементів.

За якістю, тобто за умовами виробництва (за способом виробництва і вмістом шкідливих домішок), сталі й сплави поділяють на такі групи:

	Сірка, %	Фосфор, %
• звичайної якості	до 0,050	до 0,040
• якісні	до 0,040	до 0,035
• високоякісні	до 0,025	до 0,025
• особливо високоякісні	до 0,015	до 0,025

За призначенням сталі й сплави класифікують на конструкційні, інструментальні сталі й сталі з особливими фізичними та хімічними властивостями.

*Чавун* – сплав Fe (основа) з C (зазвичай 2–4 %), що містить постійні домішки (Si, Mn, S, P), а іноді й легувальні елементи (Cr, Ni, V, Al та ін.); зазвичай крихкий.

Вуглець у чавуні може міститися у вигляді цементиту, графіту або одночасно у вигляді цементиту і графіту. Утворення стабільної фази – графіту в чавуні може відбуватися в результаті безпосереднього виділення його з рідкого (твердого) розчину або внаслідок розпаду попередньо утвореного цементиту (у разі уповільненого охолодження розплавленого чавуну цементит може розкладатися  $Fe_3C \rightarrow Fe + 3C$  з утворенням фериту й графіту). Процес утворення в чавуні (сталі) графіту називають графітизацією.

Механічні властивості чавуну обумовлені переважно кількістю і структурними особливостями графітної складової. Вплив графітних включень на механічні властивості чавуну можна оцінити кількісно. Чим менше графітних включень, чим вони дрібніші і чим більший ступінь їх ізольованості, тим вище міцність чавуну за однієї й тієї самої металевої основи.

Найбільш високу міцність забезпечує куляста форма графітної складової, а для пластівчастої складової характерні високі пластичні властивості. Чавун із пластинчастим графітом можна розглядати як сталь, у якій графіт відіграє роль надрізів, що послаблюють металеву основу.

### ***Кольорові метали та сплави***

*Титан* – Ti, хімічний елемент VI групи періодичної системи елементів, атомний номер 22, атомна маса 47,90.

Сріблясто-білий метал; легкий, тугоплавкий, міцний, пластичний; густина  $4500 \text{ кг/м}^3$ ;  $t_{пл} = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$ .

У титану є дві алотропічні модифікації:

- низькотемпературна до  $882 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $\alpha$ -титан із гексагональною ґраткою, густина  $4505 \text{ кг/м}^3$ ;
- високотемпературна – ( $\beta$ -титан із об'ємноцентрованою кубічною ґраткою, густина за  $900 \text{ }^\circ\text{C}$   $4320 \text{ кг/м}^3$ ).

Постійні домішки – азот, вуглець, кисень і водень – збільшують твердість і міцність титану, але знижують пластичність, погіршують зварюваність і знижують опір корозії.

Марки технічного титану – VT1-00 (99,53 % Ti), VT1-0 (99,45 % Ti).

Усі легувальні елементи за впливом на поліморфізм титану можна розділити на три групи:

1. Перша група представлена  $\alpha$ -стабілізаторами – елементами, що підвищують температуру поліморфного перетворення титану. З металів до  $\alpha$ -стабілізаторів відносять алюміній, галій та індій, з неметалів – вуглець, азот і кисень.
2. До другої групи належать  $\beta$ -стабілізатори – елементи, що знижують температуру поліморфного перетворення титану.  $\beta$ -стабілізатори можна поділити на три підгрупи:
  - а) евтектоїдотворювальні стабілізатори, забезпечують евтектоїдний розпад  $\beta$ -фази за досить низької температури (хром, марганець, залізо, мідь, нікель, кобальт);
  - б) ізоморфні стабілізатори, утворюють безперервні розчини з  $\beta$ -титаном (ванадій, молібден, ніобій, тантал). До цієї ж підгрупи слід віднести і вольфрам у системі з титаном, який утворює безперервні розчини  $\beta$ -Ti і W, при цьому  $\alpha$ -фаза за всіх температур перебуває в рівновазі з  $\beta$ -фазою;
  - в) ізоморфні квазі- $\beta$ -стабілізатори, що стабілізують  $\beta$ -фазу, але без утворення  $\beta$ -твердих розчинів (рений, рутеній, родій, осмій, іридій).
3. Елементи третьої групи мало впливають на поліморфне перетворення. Ці елементи називають нейтральними зміцнювачами (олово, цирконій, германій, гафній і торій).

Найкращого поєднання властивостей досягають у ( $\alpha + \beta$ )-сплавах. Сплави з двофазною мікроструктурою ( $\alpha + \beta$ ) у рівноважному стані зазнають термічного оброблення – загартування й старіння.

Основним легувальним елементом у промислових титанових сплавах є алюміній. Двома наступними за значущістю легувальними елементами є ванадій і молібден.

Для титанових сплавів застосована така класифікація: за способом виробництва, за структурою, за механічними властивостями і за можливістю зміцнення термічним обробленим.

За способом виробництва титанові сплави ділять на деформівні та ливарні сплави. Найбільш поширені ливарні сплави VT1Л, VT5Л6 VT9Л.

Сплав VT1Л має найбільшу хімічну стійкість, його застосовують для деталей, що працюють в агресивних середовищах. Проте він має низькі механічні властивості. Сплав VT5Л застосовують для деталей, що працюють за температур від  $-235...+350$  °С. Сплав VT9Л найбільш високоміцний і призначений для виготовлення навантажених деталей, що працюють за температури до 500 °С.

За механічними властивостями титанові сплави ділять на сплави нормальної міцності, високоміцні, жароміцні та підвищеної пластичності.

За здатністю зміцнюватись термічним обробленням розрізняють зміцнювальні та незміцнювальні титанові сплави.

Промислові титанові сплави – найважливіші конструкційні матеріали.

Сплави VT-5, VT5-1, OT4 ( $\alpha$ -сплави); VT6, VT14, VT8 ( $\alpha + \beta$ -сплави) застосовують:

- у хімічній промисловості (теплообмінники, компресори та ін.);
- у машинобудуванні (клапани, золотники, пружини, колінчасті вали та ін.);
- у виробництві конструкційних елементів (диски, лопатки компресорів, обшивка ракет та ін.).

Незважаючи на високу вартість виробництва й оброблення виробів із титанових сплавів, застосування їх виявляється

вигідним завдяки їх корозійній стійкості, довговічності та економії маси.

Однак через дефіцитність титану використання титанових сплавів дуже обмежене. Нині застосовують вторинні титанові сплави (ВТВ1, ВТВ2, ВТВ3, ВТВ4), основу шихти яких складають відходи технологічного виробництва, а також злитки із цих відходів.

*Мідь* – Cu, хімічний елемент I групи періодичної системи елементів, атомний номер 29, атомна маса 63,546. Мідь має гранецентровану кубічну ґратку. Це метал червоного (у зламі рожевого) кольору, ковкий і м'який; густина  $8960 \text{ кг/м}^3$ ,  $t_{пл} = 1083 \text{ }^\circ\text{C}$ . Хімічно він малоактивний.

Серед властивостей міді найбільш істотне значення для сучасної промисловості набув її низький електричний опір –  $0,0175 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ . Цю величину беруть в електротехніці за еталонне значення – 100 %.

Усі домішки, особливо ті, що входять до твердого розчину, знижують електропровідність, а також теплопровідність міді. Найбільш сильно зменшують електропровідність домішки P, As, Al і Sn.

Механічні властивості міді порівняно незначні й суттєво залежать від умов виготовлення мідних виробів.

Серед технологічних властивостей у міді слід зазначити гарну оброблюваність тиском і можливість паяння. До недоліків міді відносять усадку під час лиття, невисоку оброблюваність різанням і дуже погану зварюваність.

Мідь виготовляють за чистотою таких марок М00к (не менше 99,99 % Cu), М0К (99,97 % Cu), М1К (99,95 % Cu), М2К (99,93 % Cu). У позначенні марки після літери М (мідь) зазначають умовний номер чистоти, а потім літерою – спосіб і умови отримання міді: к – катодна мідь; б – безкиснева мідь; р – розкиснена мідь; ф – мідь, що розкиснена фосфором. У позначенні міді марок М1 і М1р, що призначена для електротехнічної промисловості й підлягає випробуванням на електропровідність, додатково використовують літеру Е.



Головне застосування міді – виробництво електричних проводів. Домішки знижують електропровідність міді, тому в електротехніці використовують сорти з сумарним вмістом домішок менше 0,1 %, зокрема М00, М0, М1. Мідь є основним матеріалом для виробництва телеграфних і телефонних проводів.

Мідь застосовують для виготовлення конструкційних виробів у теплотехніці (нагрівачі, радіатори, теплообмінники, холодильники та ін.) та вакуумній техніці.

Більше 30 % міді йде на виробництво сплавів.

Перевагами мідних сплавів є: гарна електропровідність; низький коефіцієнт тертя; висока пластичність; велика міцність (300–1200 МПа); корозійна стійкість у деяких агресивних середовищах; можливість термомеханічного оброблення.

Найбільш поширені легувальні елементи в міді – цинк, алюміній, олово, залізо, кремній, марганець, берилій, нікель. Вони підвищують міцнісні властивості міді; найбільшу зміцнювальну дію мають кремній і алюміній (за вмісту більше 3 % за масою). Цинк і марганець мало впливають на пластичність міді. Пластичність міді підвищується під час легування до певних концентрацій алюмінієм, кремнієм, залізом. Олово займає проміжне місце між цими двома групами легувальних елементів.

За способом виготовлення деталей мідні сплави поділяють на деформівні та ливарні. З мідних сплавів, що деформуються, виготовляють листи, стрічки, труби, напівфабрикати різного профілю. З ливарних сплавів методом лиття у форми отримують фасонні деталі й художні вироби.

Зміцнення мідних сплавів шляхом термічного оброблення можливо тільки тоді, коли легувальні елементи розчиняються в міді обмежено. При цьому розчинність їх зменшується зі зниженням температури; крім того, якщо ці легувальні елементи утворюють з міддю або між собою зміцнювальні фази ( $\text{Cu}_3\text{Be}$ ,  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{NiBe}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Al}$  та ін.).

Твердість і міцність мідних сплавів можуть бути підвищені в 1,5–3 рази за рахунок наклепу, який за необхідності може бути знятий частково або повністю відпалом (600–700 °С).

Мідні сплави поділяють на латуні, бронзи і мідно-нікелеві сплави.

*Латунями* називають подвійні та багатокомпонентні сплави на основі міді, у яких головною домішкою є цинк, причому вміст цинку може змінюватися до 49 %.

За хімічним складом латуні поділяють на подвійні (прості) і багатокомпонентні (спеціальні), а за структурою – на одно- і багатозфазні.

Прості латуні легують тільки одним компонентом – цинком.

Мідь із цинком утворює твердий розчин із граничною концентрацією цинку 39 %.

Вміст у латунях цинку багато в чому визначає величину їх механічних властивостей. Поки латунь має структуру  $\alpha$ -твердого розчину, збільшення вмісту цинку викликає підвищення її міцності й пластичності. Поява (30 % Zn)  $\beta$ -фази супроводжується різким зниженням пластичності, але міцність продовжує підвищуватися до збільшення вмісту Zn до 45 %, доки латунь перебуває у двофазному стані ( $\alpha + \beta$ ). Перехід латуні в однофазний стан (більше 45 % Zn) зі структурою  $\beta$ -фази викликає різке зниження міцності.

Прості латуні маркують літерою «Л», наступна за нею цифра означає вміст міді. Легувальні елементи позначають літерами. У марці багатокомпонентної латуні після літер йдуть цифри через дефіс. Перша цифра показує середній вміст міді, решта – вміст відповідних легувальних елементів у тому самому порядку, що й літери, які їх позначають. Вміст цинку в найменуванні марки латуні не зазначають, а визначають за різницею.

Наприклад, у латуні ЛА85-1,5 – 85% Cu і 1,5% Al, решта – цинк.

Багатокомпонентні латуні (ЛАЖ60-1-1, ЛЖМц59-1-1, Л062-1, Л070-1, ЛС59-1, ЛЦ40С, ЛЦ40МцЗЖ, ЛЦ30АЗ та ін.) можуть легувати різними елементами та їх комплексами. Так,

алюміній, кремній, нікель і марганець підвищують механічні властивості латуней і збільшують їх корозійну стійкість.

Олово підвищує корозійну стійкість латуні в морській воді. Свинець (1–3 %) покращує оброблюваність латуней різанням (латуні зі свинцем є автоматними сплавами, їх використовують для виготовлення деталей у годинниковій та автотракторній промисловостях).

До однофазних ( $\alpha$ -латуні) відносять латуні, що містять менше 32 % Zn. Ці латуні дуже пластичні, добре паяються, зварюються і обробляються тиском у гарячому й холодному станах. Латуні, що містять до 10 % Zn, називають томпаком (Л96, Л90), 10–20 % Zn – напівтомпаком, 20–30 % Zn – патронною (Л80, Л85, Л70). Зі збільшенням вмісту цинку колір латуні змінюється від червоного до світло-жовтого, підвищуються межа міцності від 270 до 320 МПа і твердість від 470 до 500 НВ.

*Бронзами* називають сплави міді з різними елементами, серед яких олово, алюміній, кремній, берилій, свинець та ін. Конкретне найменування бронзи отримують за основними легувальними елементами системи, що утворює сплав, так, наприклад, олов'яні бронзи. Цинк і нікель можуть вводитися в бронзи як додаткові легувальні елементи.

Фазовий склад бронз описують діаграмами стану двох основних елементів, наприклад, для олов'яних бронз – діаграмою Cu–Sn. Структура і властивості бронз змінюються залежно від швидкості охолодження сплавів, що кристалізуються, виду термічного оброблення і характеру оброблення тиском.

Домішки сурми, миш'яку, вісмуту, сірки, цинку і фосфору негативно впливають на всі види бронз, знижуючи їх механічні та технологічні властивості.

Бронзи немагнітні, корозійностійкі, мають високі коефіцієнти тепло- і електропровідності, мають антифрикційні властивості. Для поліпшення властивостей їх піддають термічній обробці: відпалу, гартуванню та відпуску або пластичній деформації з метою наклепу. Відпал проводять для зняття напружень, усунення наклепу, отримання однорідної структури;

гартування від 700–750 °С без відпуску – для підвищення пластичності, а з відпустком – для підвищення твердості й міцності бронзи.

Більшість бронз (за винятком алюмінієвих) добре піддаються зварюванню та паянню твердими й м'якими припаями.

Бронзи маркують літерами Бр, далі йде літерне й цифрове позначення елементів, що в них містяться (позначення міді не зазначають, а вміст визначають за різницею). У марці оброблюваних тиском бронз після Бр зазначене літерне позначення легувальних елементів у порядку зменшення їх концентрацій, а в кінці в тій самій послідовності через дефіс зазначають концентрації відповідних елементів. Наприклад, БрОФ10-1 – бронза олов'яно-фосфорна, що містить 10 % Sn і 1 % Р. У ливарних бронзах після кожного літерного позначення легувального елемента зазначають його вміст.

*Алюміній* – хімічний елемент III групи періодичної системи, атомний номер 13, атомна маса 26,98154. Сріблясто-білий метал із гранецентрованою кубічною ґраткою,  $t_{пл} = 660$  °С. Густина 2 700 кг/м<sup>3</sup>.

Механічні властивості відпаленого алюмінію високої чистоти характеризуються невисокими міцністю та твердістю за дуже високої пластичності.

Міцність технічного алюмінію вище. Холодна пластична деформація підвищує межу міцності алюмінію, але відносно подовження знижується.

Алюміній характеризується високими електро- і теплопровідністю, має високу корозійну стійкість до дії різних типів природних вод, азотної та органічних кислот. Чим чистіше алюміній, тим вище його корозійна стійкість. На повітрі алюміній покривається тонкою міцною плівкою, яка захищає метал від подальшого окиснення і корозії.

Серед технологічних властивостей алюмінію слід відзначити гарні оброблюваність тиском, зварюваність (зварюється не всіма видами зварювання), полірованість

(відбивна здатність до 90 %) і порівняно погану оброблюваність різанням.

Маркування алюмінію: особливої чистоти – А999 (99,999% Al); високої чистоти – А995 (99,995% Al), А99 (99,99% Al), А97 (99,97% Al), А95 (99,95% Al) і технічної чистоти – А85, А8, А7, А6, А5, А0 (99,0% Al). Як домішки в алюмінії є Fe, Si, Cu, Mn, Zn. Технічний алюміній, що деформується, маркують АД0 і АД1.

Технічний алюміній виготовляють у вигляді листів, профілів, прутків, дроту та інших напівфабрикатів.

За обсягом виробництва алюміній та сплави на його основі посідають перше місце серед незалізних металевих матеріалів. Алюміній застосовують для виготовлення елементів конструкцій і деталей, що не несуть навантаження, наприклад, трубопроводів, палубних надбудов; у машино- та авіабудуванні; він замінює мідь під час виробництва масивних провідників (кабелів, шин, конденсаторів та ін.); у металургії як легувальну домішку використовують у сплавах Cu, Mg, Ti, Ni, Zn, Fe та ін.; у харчовій та хімічній промисловостях використовують як матеріал для зберігання і транспортування харчових продуктів, води та ін., а також для виготовлення предметів домашнього вжитку.

Чистий і надчистий алюміній застосовують у напівпровідниковій техніці, а також для отримання різноманітних дзеркал.

*Алюмінієві сплави.* Завдяки більш високим технологічним і споживчим властивостям такі сплави ширше застосовують у промисловості, ніж чистий або технічний алюміній. Перевагами алюмінієвих сплавів є високі міцність ( $\sigma_b$  до 600 МПа), корозійна стійкість, тепло- і електропровідність. Алюмінієві сплави входять до групи легких сплавів (за однакової міцності вироби з алюмінієвих сплавів у три рази легші від сталевих).

Однак вони поступаються сплавам на залізній основі за величиною модуля пружності майже в три рази, мало придатні для зміцнення поверхневого шару способами хіміко-термічного оброблення, а їх твердість і зносостійкість нижчі, ніж у сталі.

Найбільше застосування для легування алюмінієвих сплавів знаходять елементи, що формують зміцнювальні фази (Cu, Si, Mg, Mn, Zn Fe; рідше – Li, Ni, Ti). Марганець одночасно підвищує корозійну стійкість, а кремній бере участь в утворенні евтектики в ливарних сплавах. Літій у сплавах сприяє зростанню модуля пружності. Однак магній і марганець знижують тепло- і електропровідність алюмінію, а залізо – його корозійну стійкість.

Характерною особливістю структури алюмінієвих сплавів є їх фазовий склад, що вміщує твердий розчин та інтерметалідні фази (CuAl<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>CuMg, Al<sub>3</sub>Mo та ін.).

Алюмінієві сплави класифікують за складом і основними властивостями, за способом виробництва і по можливості за здатністю зміцнення термічного оброблення.

Алюмінієві сплави за складом і властивостями ділять на такі групи:

- сплави високої міцності ( $\sigma_b = 400\text{--}500$  МПа у більшості сплавів і до 600 МПа у сплавів В95). Вони мають непростий хімічний склад; головними легувальними елементами є мідь і магній, а у сплаві В95 – цинк;
- жароміцні сплави. Їх використовують за температур експлуатації до 300–350 °С (що нижче, ніж у жароміцних сталей і титанових сплавів). Ці сплави за меншого вмісту міді додатково легуються нікелем;
- сплави підвищеної пластичності. Вміст міді в них обмежується 0,5 %, і внаслідок цього міцність сплавів нижче 250 МПа, а пластичність вище, ніж у дуралюмініу;
- сплави підвищеної пластичності, зварюваності та стійкості проти корозії. Вони майже не містять міді й додатково легуються магнієм (рідше марганцем);
- антифрикційні сплави, що являють собою сплави алюмінію з оловом, нікелем, міддю та іншими елементами.

За способом виробництва алюмінієві сплави поділяють на ливарні сплави і сплави, що деформуються (прокаткою, пресуванням, штампуванням).

Переважає більшість ливарних сплавів є доевтектичними; заевтектичні сплави через окрихчувальний вплив інтерметалідів не використовують. Кращі ливарні властивості мають евтектичні або близькі до них за складом сплави. Тому значного поширення набули сплави алюмінію з елементами, які утворюють з ним легкоплавкі евтектики (Al-Si, Al-Cu, Al-Mg, Al-Cu-Mn, Al-CuMn-Mg та ін.).

Ливарні сплави, що поєднують високу міцність і пластичність, знаходяться за складом дещо лівіше від точки граничної розчинності за евтектичної температури.

Ливарні алюмінієві сплави, що не зміцнюються термічним обробленням, класифікують як сплави низької міцності (АЛ2) і антифрикційні (АСМ, А020-1, А09-2) сплави, а ті, що зміцнюються термічним обробленням – як сплави нормальної міцності, високоміцні (АЛ27, АЛ32) і жароміцні (АЛ 19) сплави.

Заміна чавуну і сталі ливарними алюмінієвими сплавами дозволяє отримувати значний техніко-економічний ефект за рахунок: зниження маси (металоємності) конструкцій; підвищення експлуатаційної надійності та довговічності; зменшення трудомісткості завдяки застосуванню більш точних литих заготовок, а також більш легкої оброблюваності різанням.

Для сплавів, що деформуються, характерна структура твердого розчину з невеликою часткою евтектики. Такі сплави добре піддаються пресуванню, згинанню, вальцюванню і використовуються для виготовлення напівфабрикатів (профілі, листи, дріт та ін.) зі злитків.

Не зміцнювані термічним обробленням алюмінієві сплави, що деформуються, визначають як сплави підвищеної пластичності (АМц, АМг).

Сплави, що деформуються, зміцнювані термічним обробленням, класифікують за сплавами нормальної міцності (Д1, ..., Д19), високоміцними (В95, ВАД23) сплавами, сплавами підвищеної пластичності за кімнатної (Д18) та підвищених (АК40) температур і корозійностійкими (АД31, АД33) сплавами.

## ЛЕКЦІЯ 5

### Метали та сплави зі спеціальними властивостями

#### *Сплави високого опору*

Сплавами високого опору називають провідникові матеріали, у яких значення питомого опору  $R$  за нормальних умов становлять не менше  $0,3 \text{ мкОм} \times \text{м}$ .

Їх застосовують під час виготовлення електровимірювальних приладів, еталонних резисторів, реостатів і електронагрівальних пристроїв.

Провідникові матеріали в електронагрівальних приладах повинні довго працювати на повітрі за температур  $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ .

Серед великої кількості матеріалів для зазначених цілей найбільш поширеними на практиці є сплави на мідній основі – манганін і константан, а також хромонікелеві й залізохромоалюмінієві сплави.

*Манганін* – основний сплав на мідній основі для електровимірювальних приладів і еталонних резисторів.

Манганін відрізняється жовтуватим відтінком, добре витягується в тонкий дріт до діаметра  $0,02\text{ мм}$ . З манганіну виготовляють також стрічку товщиною  $0,01\text{--}1\text{ мм}$  і шириною  $10\text{--}300\text{ мм}$ .

Для високої стабільності опору в часі манганін підлягає спеціальному термічному обробленню – відпалу за  $350\text{--}550\text{ }^\circ\text{C}$  у вакуумі з подальшим повільним охолодженням і додатковою тривалою витримкою за кімнатної температури.

*Константан* – сплав міді (основний компонент) із нікелем (40 %), марганцем (1,5 %) і домішками деяких інших елементів. Сплав має високий питомий опір, високу термоЕРС, характеризується сталістю електричного опору у разі зміни температури.

Константан добре оброблюється; його можна протягувати у дріт і прокатувати в стрічку тих самих розмірів, що і з манганіну.



Константан застосовують для виготовлення реостатів і електронагрівальних елементів у тому разі, коли робоча температура не перевищує 400–450 °С.

Під час нагрівання до високої температури на поверхні константану утворюється плівка оксиду, що має електроізоляційні властивості (оксидна ізоляція). Покритий такою ізоляцією константановий дріт можна намотувати щільно, виток до витка, без особливої ізоляції між витками, якщо тільки напруга між сусідніми витками не перевищує 1 В.

Для окиснення потрібно швидко (не більш 3 с) нагріти дріт до температури 900°С із подальшим охолодженням на повітрі.

*Хромонікелеві сплави (ніхромі).* Використовують для виготовлення нагрівальних елементів електричних печей, плиток, паяльників тощо.

Із цих сплавів виготовляють дріт діаметром 0,02 мм і більше, стрічку перерізом 0,1x1,0 мм і більше.

Високу жаростійкість ніхрому можна пояснити значною стійкістю цього сплаву до прогресуючого окиснення на повітрі за високих температур.

Стійкість хромонікелевих сплавів за високої температури на повітрі пояснюється близькими значеннями температурних коефіцієнтів лінійного розширення сплавів і їх оксидних плівок. Тому останні не розтріскуються і не відокремлюються від дроту у разі його нагрівання й розширення.

Температурні коефіцієнти розширення сплаву й оксидів хрому та нікелю близькі, але не тотожні. З огляду на це за різних змін температури може відбуватися розтріскування шару оксидів, за подальшого нагрівання кисень проникає в тріщини і робить додаткове окиснення сплаву.

Отже, за багаторазового короткочасного включення електронагрівальний елемент із хромонікелевого сплаву може перегоріти швидше, ніж у разі безупинного режиму нагрівання (температура нагрівання однакова в обох порівнюваних випадках, а термін використання може відрізнятись в 20–30 разів).

Термін використання нагрівальних елементів можна збільшити, якщо закрити спіралі у тверде інертне середовище типу глини-шамоту, що захищає їх від механічних дій і доступу кисню.

### *Сплави для термопар*

Хоча багато неметалічних матеріалів (передусім напівпровідники) мають великі потенційні можливості для успішного застосування в термоелектричній термометрії, технологія їх виготовлення є недостатньо досконалою. Тому переважна більшість термопар виготовляється з металічних компонентів.

Найчастіше застосовують такі сплави:

- 1) копель (56 % Cu і 44 % Ni);
- 2) алюмель (95 % Ni, інші – Al, Si і Mn);
- 3) хромель (90 % Ni і 10 % Cr);
- 4) платинородій (90 % Pt і 10 % Rh).

Невеликі зміни складу сплаву можуть призвести до значних змін термоЕРС, однак це не лімітує точності вимірів, якщо тільки термопара не використовується без попереднього градування.

Термопари можна застосовувати для вимірювання таких температур:

- платинородій – платина до 1 600°C;
- мідь – константан і мідь – копель до 350 °C;
- залізо – константан, залізо – копель, хромель – копель до 600 °C;
- хромель – алюмель до 900–1 000 °C.

Із застосовуваних на практиці термопар найбільшу термоЕРС за визначеної різниці температур має термопара хромель – копель.

Більшість термопар стійко працює лише в окисному середовищі. У процесі тривалої експлуатації може спостерігатися поступова зміна питомої термоЕРС. Причинами нестабільності є забруднення домішками з навколишньої атмосфери, летючість

компонентів, окиснення дротів, різкі перегини й деформації, що вносять внутрішні напруги і створюють фізичну неоднорідність.

Найбільш високі точність, стабільність і відтворюваність мають платинородієві термопари, незважаючи на малу питому термоЕРС. Ці якості пояснюються хімічною інертністю матеріалу й можливістю одержувати його з високим ступенем чистоти.

### ***Тугоплавкі метали***

До тугоплавких відносять метали з температурою плавлення, що перевищує 1 700 °С. Зазвичай вони хімічно стійкі за низьких температур, але стають активними за підвищених.

Експлуатація їх за високих температур може бути забезпечена в атмосфері інертних газів чи у вакуумі.

У щільному вигляді ці метали найчастіше одержують методами порошкової металургії – пресуванням і спіканням порошків. В електронній техніці застосовують методи електровакуумної технології виробництва чистих тугоплавких металів: плавка електронним чи лазерним променем, зонне очищення, плазмове оброблення та ін.

Механічне оброблення цих матеріалів важке і часто вимагає їх підігріву. Основними тугоплавкими металами є вольфрам, молібден, тантал, ніобій, хром, ванадій, титан, цирконій і реній.

Усі тугоплавкі метали, за винятком платини, під час нагрівання на повітрі до високих температур інтенсивно окиснюються з утворенням летких сполук. Тому їх можна застосовувати для виготовлення лише тих нагрівальних елементів, що працюють у вакуумі чи захисному середовищі.

*Вольфрам* – дуже важкий, твердий метал сірого кольору.

З усіх металів вольфрам має найвищу температуру плавлення 3 680 К.

У природі може бути тільки у вигляді сполук. Зважаючи на високу температуру плавлення одержання вольфраму у вигляді компактного злитка пов'язане зі значними труднощами.

Вихідною сировиною для одержання вольфраму є його власні мінерали – вольфраміт ( $\text{FeWO}_4 + \text{MnWO}_4$ ) і шесліт ( $\text{CaWO}_4$ ).

Кінцевим продуктом збагачення вольфрамових руд є чистий триоксиген  $\text{WO}_3$ , із якого відновленням воднем під час нагрівання до  $900\text{ }^\circ\text{C}$  одержують металевий вольфрам у вигляді дрібного порошку.

З цього порошку за тиску до 200 МПа відпресовують стрижні, що надалі підлягають складному термічному обробленню в атмосфері водню (щоб уникнути окиснення), куванню й волочінню у дріт діаметром до 0,01 мм, прокатці в листи тощо.

Характерною властивістю вольфраму, що відрізняє його від інших металів, є висока внутрішньокристалічна міцність за дуже слабкого зчеплення між окремими зернами. Тому спечені вироби, що мають дрібнозернисту будову, крихкі і легко ламаються. У результаті механічного оброблення куванням і волочінням вольфрам набуває волокнистої структури, і зламати його дуже важко. Цим пояснюється гнучкість тонких вольфрамових ниток.

Крім того, у разі зменшення товщини вольфрамового дроту сильно зростає його межа міцності під час розтягування (від 500–600 МПа для кованих стрижнів діаметром 5 мм до 3 000–4 000 МПа для тонких ниток; останні мають відносне видовження у разі розриву близько 4 %).

Вольфрам є одним із найважливіших матеріалів електровакуумної техніки. З нього виготовляють електроди, підігрівники, пружини, гачки в електронних лампах, рентгенівських трубках тощо.

У електровакуумному виробництві застосовують вольфрам марок ВА (із кремній-алюмінієвою присадкою) і ВТ (із присадкою оксиду торію). Домішка оксиду торію не тільки підвищує механічну міцність вольфраму, а й поліпшує емісійні властивості катодів за рахунок зниження роботи виходу електронів.

Вольфрам має найменший температурний коефіцієнт лінійного розширення серед усіх чистих металів. Ця його властивість виявляється необхідною під час виготовлення термічно погоджених спаїв вольфраму з тугоплавким склом, що теж має низький температурний коефіцієнт лінійного розширення.

*Молибден* – метал, що за зовнішнім виглядом, а також за технологією оброблення близький до вольфраму. Найважливішою промисловою рудою молибдену є молибденіт  $\text{MoS}_2$ .

Мікроструктура спеченого, кованого і тягнутого молибдену подібна до структури аналогічно оброблених зразків вольфраму. Однак волокниста структура тягнутого молибдену виражена менш чітко.

Нерекристалізований молибден за механічними властивостями близький до вольфраму, але в рекристалізованому стані між ними виявляється істотне розходження. Таке розходження полягає в тому, що рекристалізований вольфрам за кімнатної температури завжди крихкий, тоді як відпалений дрібнозернистий молибден характеризується високою пластичністю.

Механічне оброблення заготовок із молибдену у разі одержання різних деталей не викликає особливих труднощів.

Поліпшенню структури й підвищенню механічної міцності молибдену сприяє введення спеціальних присадок, таких як оксид кремнію, оксид торію та ін.

За кімнатної температури молибден – хімічно відносно інертний метал, але більш активний, ніж вольфрам.

На повітрі він починає окиснюватися за  $300\text{ }^\circ\text{C}$  з утворенням нижчих оксидів, а за температури вище  $600\text{ }^\circ\text{C}$  утворюється триоксид  $\text{MoO}_3$ , що швидко випаровується за  $700\text{ }^\circ\text{C}$ . Тому деталі, що нагріваються, повинні працювати у вакуумі чи відновному середовищі.

Серед усіх тугоплавких металів молибден володіє найменшим питомим опором. Висока міцність молибдену в

поєднанні з гарною пластичністю роблять його одним із кращих провідникових матеріалів для виготовлення деталей складної конфігурації, що працюють за високих температур.

З молібдену виготовляють сітки й електроди електронних ламп, рентгенівських трубок і різні допоміжні деталі електровacuумних приладів із напруженим тепловим режимом.

Дуже важливим є застосування молібдену для виготовлення вакуумнощільних, термічно погоджених ввідів у балони з тугоплавкого скла. Молібден використовують також у нагрівальних елементах електричних печей.

Такі елементи в захисній атмосфері можуть стійко працювати за температурі 700 °С, за яких ще слабо виражені процеси рекристалізації у молібдені.

В електровacuумній техніці найбільш поширені марки молібдену МЧ (молібден чистий) і МК (молібден із присадкою окису кремнію). Останній має підвищену механічну міцність за високих температур.

*Тантал* одержують з малопоширеної руди – танталіту  $\text{Fe}(\text{TaO}_3)_2$  методами порошкової металургії подібно до вольфраму й молібдену.

Основна його відмінність полягає лише в тому, що процес спікання пресованих штабиків здійснюють у вакуумних печах. Це викликано тим, що тантал схильний до поглинання газів, у результаті чого він стає крихким.

Механічні операції кування й протягування, на відміну від вольфраму й молібдену, виконують за кімнатної температури. Тантал виготовляють у вигляді дроту, прутів, листів, стрічок і фольги товщиною до 10 мкм. У виробництві використовують матеріал Т (тантал підвищеної чистоти), ТЧ (тантал високої чистоти) і сплави танталу з ніобієм, що маркують ТН.

Тантал характеризується високою пластичністю навіть за кімнатної температури. Межа міцності на розтяг може змінюватися залежно від механічного й термічного оброблення від 350 до 1 250 МПа.

Під час нагрівання на повітрі та за анодного окиснення на поверхні танталу утворюється щільна плівка оксиду  $Ta_2O_5$ , що не розкладається до температури  $1500^\circ C$ . На противагу вольфраму й молібдену тантал не стає крихким під час нагрівання у вакуумі до дуже високих температур.

Особливого значення тантал набуває під час виробництва конденсаторів.

Широке застосування одержали електролітичні та тонкоплівкові конденсатори, одержувані анодуванням. Тантал являє собою приклад металу, що утворює однорідні плівки оксиду у водяних розчинах майже будь-якого електроліту. Завдяки підвищеній діелектричній проникності п'ятиоксиду  $Ta_2O_5$  такі конденсатори мають велику питому ємність.

*Ніобій* – метал, що за своїми властивостями близький до танталу і міститься зазвичай у тих самих рудах, що й тантал. Одержують його також методами порошкової металургії.

Метал, що містить 99,4% Nb, високопластичний і випускається у вигляді прутів, листів, стрічки, фольги і дроту.

Ніобій має високу газопоглинальну здатність в інтервалі температур  $400\text{--}900^\circ C$ . Тому в електровакуумних приладах конструктивні деталі з ніобію одночасно виконують функції гетера, що не розпилюється.

Серед тугоплавких металів ніобій має найменшу роботу виходу електронів. Тому його застосовують як нагрівні катоди у потужних генераторних лампах.

Серед усіх елементарних речовин ніобій характеризується найбільш високою критичною температурою переходу в стан надпровідності. Однак критичні напруженості магнітного поля у ніобію недостатні для його широкого застосування.

*Хром* – поширений у земній корі елемент, що характеризується високою стійкістю до окиснення, а тому використовується для захисних покриттів виробів, зокрема експлуатованих за підвищених температур.

Хромування проводять електролітично чи за допомогою насичення хромом поверхневих шарів сталевих виробів дифузією

із зовнішнього середовища. З тонких плівок хрому виготовляють резистори й адгезійні підшари для контактних площадок і струмопровідних з'єднань в інтегральних мікросхемах, а також світлонепроникні шари фотошаблонів.

Електричні властивості хромових плівок дуже чутливі до умов нанесення з огляду на поглинання залишкових газів у процесі осадження. Однак хром має гарну адгезію до скляних, ситалових і керамічних підкладок.

Хром входить до складу великої кількості сплавів для нагрівальних приладів, термопар, конструкційних нержавіючих, жароміцних сталей і магнітних матеріалів.

*Реній* – один із дуже важких металів, що має температуру плавлення, близьку до температури плавлення вольфраму.

Одержують реній методами порошкової металургії. Він відрізняється рідкісним поєднанням властивостей, що задовольняють більшість вимог електровакуумної техніки. В атмосфері водню й у вологому середовищі він випаровується менше, ніж вольфрам.

Реній і його сплави з вольфрамом застосовують у виробництві електроламп і електровакуумних приладів замість вольфраму. Це забезпечує більш тривалий термін придатності в умовах динамічних навантажень.

Реній і його сплави з вольфрамом дозволяють створювати термопари для вимірювання температур до 2 500–2 800 °С у вакуумі, водні чи інертному середовищі.

У радіоелектроніці реній застосовують для захисту від корозії й зношення деталей з міді, срібла, вольфраму, молібдену. Тонкі плівки ренію, одержувані шляхом випарювання електронним променем у високому вакуумі, використовують для створення прецизійних резисторів в інтегральних схемах.

### ***Сплави тугоплавких металів***

Крім чистих тугоплавких металів, у електровакуумній техніці для арматури приладів застосовують сплави вольфраму з молібденом, молібдену з ренієм, вольфраму з ренієм, а також танталовольфрамкові сплави.



Зміною вмісту компонентів можна одержати потрібні механічні властивості та пластичність за необхідних електричних і термічних властивостей виробу.

Наприклад, під час сплавлення молібдену і вольфраму, що утворюють неперервний ряд твердих розчинів, трохи знижується тугоплавкість, зберігаючи твердість і збільшуючи питомий опір.

Сплав вольфраму з невеликими домішками ренію характеризується більш високою температурою рекристалізації порівняно з чистим вольфрамом.

### ***Благородні метали***

До благородних металів відносять найбільш хімічно стійкі метали: золото, срібло, платина, паладій. Вони бувають в природі у вигляді самородків і в різних рудах. У результаті металургійного, хімічного й електролітичного перероблення можна одержати метали дуже високої чистоти: золото – 99,998 %; срібло – 99,999 %; платину – 99,9998 %; паладій – 99,94 %.

*Золото* – блискучий метал жовтого кольору, що характеризується високою пластичністю. Межа міцності на розтяг золотого дроту становить 150 МПа, відносне видовження у разі розриву близько 40 %.

В електронній техніці золото використовують як контактний матеріал, матеріал для корозійностійких покриттів резонаторів, внутрішніх поверхонь хвилеводів.

Істотною перевагою золота як контактного матеріалу є його стійкість проти утворення сірчистих і окисних плівок в атмосферних умовах як за кімнатної температури, так і під час нагрівання. Тонкі плівки золота застосовують як напівпрозорі електроди у фоторезисторах і напівпровідникових фотоелементах.

*Срібло* – білий метал, стійкий до окиснення за нормальної температури, від інших металів відрізняється найменшим питомим опором.

Межа міцності на розтяг для срібного дроту становить близько 200 МПа, відносне видовження у разі розриву – близько 50 %.

Срібло застосовують у широкій номенклатурі контактів у апаратурі різних потужностей. Високі значення питомої теплоємності, теплопровідності й електричної провідності срібла забезпечують порівняно з іншими металами найменше нагрівання контактів і швидке відведення тепла від контактних точок.

Срібло застосовують також для безпосереднього нанесення на діелектрики, як електроди, у виробництві керамічних і слюдяних конденсаторів. Для цього застосовують метод спікання чи випаровування у вакуумі. Сріблом покривають внутрішні поверхні хвилеводів для одержання шару високої провідності. З цією ж метою сріблення зазнають провідники високочастотних котушок.

Широке застосування срібла стримується його значним природним дефіцитом.

*Платина* – білий метал, що практично не сполучається з киснем і дуже стійкий до хімічних реагентів. Платина дуже добре підлягає механічному обробленню, витягується в дуже тонкі нитки й стрічки.

На відміну від срібла, платина не утворює сірчистих плівок під час взаємодії з атмосферою, що забезпечує платиновим контактам стабільний перехідний опір. Вона практично не розчиняє водень, пропускаючи його через себе в нагрітому стані. Після відпалу у водні платина зберігає свої властивості. Однак під час прожарювання у вуглецевмісному середовищі платина насичується вуглецем і стає крихкою.

Платину застосовують для виготовлення термопар, розрахованих на робочі температури до 1 600°C (у парі зі сплавом платиновородій).

Унаслідок малої твердості платину рідко використовують для контактів у чистому вигляді, однак вона є основою для деяких контактних сплавів. Найбільш поширеними є сплави платини з іридієм, вони не окиснюються, мають високу твердість, мале механічне зношення, однак дорогі й застосовуються тоді, коли необхідно забезпечити високу надійність контактів.

*Паладій* – метал, що за деякими властивостями близький до платини і часто служить їй заміном, тому що дешевший у 4–5 разів. Використання паладію в електровакуумній техніці обумовлено його здатністю інтенсивно поглинати водень. Останній, на відміну від інших газів, дифундує в паладій за порівняно низьких температур (150–300 °С) і надлишкового тиску 0,015–0,1 МПа, а потім знову виділяється в чистому вигляді під час нагрівання паладію у вакуумі до температур 350–500 °С.

Твердий паладій поглинає більш ніж 850-кратний об'єм водню щодо власного об'єму. Виділенням із паладію чистим воднем наповнюють деякі типи газорозрядних приладів.

Паладій і його сплави зі сріблом і міддю застосовують як контактні матеріали. У відпаленому стані паладій має дуже гарні механічні властивості: межа міцності на розтяг – порядку 200 МПа, відносне подовження у разі розриву – до 40 %.

## ЛЕКЦІЯ 6

### Тверді сплави. Мінералокераміка

#### *Тверді сплави*

На сьогодні тверді сплави є одним із основних інструментальних матеріалів, що забезпечує високопродуктивне оброблення матеріалів різанням. Нині загальна кількість твердосплавного інструменту, який застосовують у механообробному виробництві, становить більше 30 %, причому цим інструментом знімається до 70 % стружки, тому що швидкість різання, яку застосовують під час оброблення цим інструментом, у середньому в 2–5 разів вища, ніж для швидкорізального інструменту.

Основними компонентами сучасних твердих сплавів є карбіди вольфраму WC, карбіди титану TiC, карбіди танталу TaC, карбонітриди титану TiCN та ін., дрібні частки (зерна) яких з'єднані з допомогою порівняно м'яких і менш тугоплавких сполук із кобальту (Co) та нікелю (Ni) у суміші з молібденом (Mo).

Сучасні традиційно застосовувані тверді сплави за складом і сферами застосування можна розділити на чотири групи: *вольфрамокобальтові* (WC-Co) – однокарбідні тверді сплави (група ВК); *титановольфрамокобальтові* (WC-TiC-Co) – двокарбідні тверді сплави (група ТК); *титанотанталовольфрамокобальтові* (WC-TiC-TaC-Co) – трикарбідні тверді сплави (група ТТК); безвольфрамові тверді сплави (на основі TiC і TiCN з різними зв'язками). На сьогодні найбільше застосування знаходять марки твердих сплавів, які належать до груп ВК, ТК і ТТК. Усі марки твердих сплавів, що належать до цих груп, обов'язково у своєму складі містять кобальт і карбіди вольфраму. Кобальт як зв'язувальна речовина визначає міцність твердого сплаву і його різальні властивості: чим більше кобальту, тим міцніший твердий сплав, але його різальні властивості (передусім твердість, теплостійкість, зносостійкість) при цьому знижуються, тому що зменшується в ньому вміст карбідів.

Тверді сплави виготовляють методами порошкової металургії. У процесі спікання тверді сплави набувають своїх високих різальних властивостей і ніякого термічного оброблення після цього не потребують.

Фізико-механічні й різальні властивості сплавів, що містять однакову кількість кобальту, значною мірою визначаються середнім розміром зерен карбідів.

### ***Вольфрамокобальтові тверді сплави (ВК)***

Вольфрамокобальтові сплави (група ВК) складаються з карбіду вольфраму (WC) і кобальту. Сплави цієї групи розрізняються за кількістю кобальту, що міститься в них, і розмірами зерен карбіду вольфраму. Для оснащення різального інструменту зазвичай застосовують сплави із вмістом кобальту 3–10 %. В умовній позначці сплаву цифра показує відсотковий вміст кобальтової зв'язки. Наприклад, позначення ВК6 показує, що в ньому міститься 6 % кобальту і 94 % карбідів вольфраму.

У разі збільшення у сплавах вмісту кобальту в діапазоні від 3 до 10 %, межа міцності, ударна в'язкість і пластична

деформація зростають, тоді як твердість і модуль пружності зменшуються.

Зі зростанням вмісту кобальту підвищуються теплопровідність сплавів та їх коефіцієнт термічного розширення. З усіх наявних твердих сплавів сплави групи ВК за однакового вмісту кобальту мають більш високу ударну в'язкість і межу міцності під час вигину, а також кращу тепло- й електропровідність. Однак стійкість цих сплавів до окиснювання і корозії значно нижча. Крім того, вони мають велику схильність до схоплювання зі сталеву стружкою під час оброблення різанням. Фізико-механічні властивості сплавів визначають їх різальну здатність у різних умовах експлуатації: зі збільшенням вмісту кобальту в сплаві його стійкість під час різання знижується, а експлуатаційна міцність зростає.

### ***Титановольфрамкобальтові тверді сплави (ТК)***

Сплави групи ТК складаються із зерен карбіду вольфраму складних титановольфрамкових карбідів  $(Ti, W)C$  та зв'язувальної кобальтової фази, що становить твердий розчин вольфраму і вуглецю в кобальті (склад зв'язки той самий, що й у сплавів групи ВК).

Хімічний склад зерен  $(Ti, W)C$  за їх перерізом неоднорідний: усередині зерна більша концентрація карбіду вольфраму, зовні – карбіду титану. Велика твердість сплавів ТК визначена більшою твердістю зерен  $(Ti, W)C$  порівняно із зернами  $WC$ , однак одночасно сплави ТК є і більш крихкими через підвищену крихкість карбідів  $(Ti, W)C$ . Ця особливість визначає і кращу сферу використання сплавів ТК для оброблення сталевих заготовок, тому що термодинамічно більш стійкі карбіди  $(Ti, W)C$  менш схильні до дифузійного розчинення в залізі (за підвищених швидкості різання та температури), а температура схоплювання карбідів  $(Ti, W)C$  із залізом значно вища (за середньої швидкості різання і температури), ніж у карбідів  $WC$ . Тому під час оброблення сталевих виробів на середній і високій швидкостях різання контактні площадки

інструмента, оснащеного пластинами зі сплаву групи ТК, краще чинять опір адгезійно-втомному і дифузійному видам зношування порівняно з інструментом зі сплаву ВК.

Отже, сплави групи ТК призначені передусім для оснащення інструментів для оброблення різанням сталей в умовах утворення зливної стружки. Порівняно зі сплавами групи ВК вони мають більшу стійкість до окиснення, твердість та жароміцність, але водночас менші теплопровідність і електропровідність, а також модуль пружності. Титановольфрамкові сплави порівняно з вольфрамовими мають здатність більшою мірою чинити опір утворенню «лунки» зношування на передній поверхні під впливом безупинно ковзної зливної стружки і високої температури. Здатність сплавів групи ТК чинити опір зношуванню під впливом ковзної стружки пояснюється також і тим, що температура захоплення зі сталлю у сплавів цього типу вища, ніж у сплавів на основі WC–Co, що дозволяє застосовувати більш високі швидкості різання під час оброблення сталі та істотно підвищувати при цьому стійкість інструмента.

У сплавів на основі WC–TiC–Co (група ТК) так само, як і у сплавів на основі WC–Co (група ВК), ударна в'язкість, межі міцності у разі стискання та вигинання зростають зі збільшенням вмісту кобальту. Вміст кобальту у твердих сплавах групи ТК коливається від 4 до 10 %, карбідів титану – від 5 до 30 %.

Теплопровідність сплавів групи ТК істотно нижча, а коефіцієнт лінійного термічного розширення вищий, ніж у сплавів групи ВК. Відповідно змінюються й різальні властивості сплавів: у разі збільшення вмісту кобальту знижується твердість сплавів і відповідно їх зносостійкість під час різання, а у разі збільшення вмісту карбиду титану знижується експлуатаційна міцність. Тому такі сплави, як T30K4 і T15K6, застосовують для чистового та напівчистового оброблення сталі з більш високою швидкістю різання і відносно невеликими навантаженнями на інструмент. Водночас сплави T5K10 і T5K12, що містять більшу кількість кобальту, призначені для роботи в тяжких умовах із більшими перерізами зрізу,

зокрема і у разі ударних навантажень, зі зниженою швидкістю різання.

### ***Титанотанталовольфрамокобальтові тверді сплави (ТТК)***

Промислові танталовмісні тверді сплави складаються із трьох основних фаз: твердого розчину карбідів титану, вольфраму і танталу ( $TiC-TaC-WC$ ), а також карбіду вольфраму ( $WC$ ) і кобальтової зв'язки.

Легування сплавів ТТК карбідами танталу сприяє формуванню дрібнозернистих структур, а крихкість карбіду ( $Ti, Ta, W$ )C істотно нижча за крихкість карбіду ( $Ti, W$ )C. Таким чином, сплави групи ТТК мають більш високу міцність, краще втримують карбіди зв'язкою. Крім того, сплави ТТК порівняно зі сплавами ТК завдяки наявності в них карбіду танталу мають менший коефіцієнт термічного розширення, дещо більшу теплопровідність, мають знижену схильність до високотемпературної повзучості, що істотно підвищує межу втоми сплавів ТТК у разі циклічного навантаження й термовпливу, а також термостійкість і стійкість до окиснення та корозії за підвищеної температури. Тому інструмент, оснащений різальними пластинами ТТК, особливо ефективний під час переривчастого оброблення, наприклад, під час фрезерування, чорнового оброблення (різання з ударами і нерівномірним припуском, оброблення поковок по кірці й литих заготовок за наявності твердих поверхневих включень тощо) та ін.

Уведення у сплав домішок карбіду танталу поліпшує їх фізико-механічні й експлуатаційні властивості, що виявляється у збільшенні міцності у разі вигинання як за кімнатної температури ( $20\text{ }^{\circ}C$ ), так і за температури  $600\text{--}800\text{ }^{\circ}C$ . Сплав, який містить карбід танталу, має також і більш високу твердість, зокрема і за  $600\text{--}800\text{ }^{\circ}C$ . Таким чином, за високих температур карбід танталу підвищує твердість, термостійкість, а отже, і зносостійкість сплавів, про що свідчать порівняльні випробування стійкості різців під час точіння сталей Г13Л і ЕІ 481.

Отже, збільшення у сплаві вмісту карбиду танталу підвищує його стійкість під час різання, особливо завдяки меншій схильності до лункоутворення та руйнування під дією термоциклічних і втомних навантажень.

Таблиця 6.1 – Склад і характеристики основних фізико-механічних властивостей твердих сплавів

Сплав	Склад сплаву, %				Характеристики фізико-механічних властивостей		
	WC	Ti C	TaC	Co	Межа міцності за вигину $\sigma_z$ , МПа (не менше)	Густина $\rho$ , $\times 10^{-3}$ кг/м <sup>3</sup> (г/см <sup>3</sup> )	HRA (не менш е)
1	2	3	4	5	6	7	8
Однокарбідні тверді сплави на основі WC-Co (група BK)							
BK3	97	-	-	3	1176	15,0-15, 3	89,5
BK6	94	-	-	6	1519	14,6-15, 0	88,5
BK8	92	-	-	8	1666	14,4-14, 8	87,5
BK10	90	-	-	10	1764	14,2-14, 6	87,0
BK15	85	-	-	15	1862	13,9-14, 4	86
Двокарбідні тверді сплави WC-TiC-Co (група TK)							
T30K4	66	30	-	4	980	9,5-9,8	92,0
T15K6	79	15	-	6	1176	11,1- 11,6	90,0
T14K8	78	14	-	8	1274	11,2- 11,6	89,5



Продовження таблиці 6.1

1	2	3	4	5	6	7	8
T5K10	85	6	-	9	1421	12,4- 13,1	88,5
Трикарбідні тверді сплави TiC-WC-TaC-Co (група ТТК)							
ТТ7К12	81	4	3	12	1666	13,0- 13,3	87,0
ТТ8К6	84	8	2	6	1323	12,8- 13,3	90,5
ТТ20К9	67	9,4	14,1	9,5	1470	12,0- 13,0	91,0
T8K7	83	7,5	0,5	7	1519	12,8- 13,1	90,5

### ***Безвольфрамкові тверді сплави (БВТС)***

У зв'язку з дефіцитністю вольфраму і кобальту промисловість випускає безвольфрамкові тверді сплави, які складаються з карбідів, карбонітридів і нітридів титану на основі нікелю з різними домішками, найчастіше молібдену.

За твердістю БВТС знаходяться на рівні вольфрамівмісних сплавів, але за міцнісними характеристиками, й особливо за модулем пружності, їм поступаються. Крім того, вони мають підвищену крихкість. Твердість БВТС за Віккерсом за підвищених температур у діапазоні температур до 800 °С дещо нижча, ніж твердість вольфрамівмісного сплаву T15K6. Найбільша термостійкість у сплаві КНТ16. У сплаві ТН20 вона значно нижча.

Істотною перевагою БВТС є їх підвищена стійкість проти високотемпературної корозії та окиснення. Необхідно також відзначити, що тверда складова БВТС (карбіди, карбонітриди і нітриди титану) має меншу розчинність у залізі й підвищену хімічну інертність порівняно з WC, що забезпечує інструменту із БВТС підвищену зносостійкість, особливо в умовах корозійно-окисного і дифузійного зношування. Щодо цього інструмент не

лише не поступається інструменту з титанофольфрамокобальтового сплаву, а й іноді має переваги. Наприклад, в умовах чистового та напівчистового оброблення деталей зі сталей безвольфрамові тверді сплави, основою яких є карбід або карбонітрид титану, мають значно більшу стійкість, ніж вольфрамовмісні тверді сплави групи ТК, тому що вони взаємодіють зі сталлю менш інтенсивно, ніж складний карбід (Ti,W)C. За дифузійного характеру зношення його швидкість, що обумовлена швидкістю розчинення карбідних зерен у сталі, більшою мірою залежить від хімічних властивостей сплаву, ніж від його твердості, пов'язаної, зокрема, із зернистістю.

Таблиця 6.2 – Склад і характеристики безвольфрамових твердих сплавів

Сплав	Склад, %				HRA (не менше)
	карбід титану	карбонітрид титану	нікель	молібден	
КНТ16	–	74	19,5	6,5	89
ТН20	79	–	15	6,0	90

### ***Мінералокераміка***

Основною особливістю різальної кераміки є відсутність зв'язувальної фази, що значно знижує ступінь її знеміцнення під час нагрівання у процесі зношування, підвищує пластичну міцність, що й визначає можливість застосування високих швидкостей різання. Це набагато перевищує швидкість різання інструментом із твердого сплаву. Якщо граничний рівень швидкостей різання для твердосплавного інструменту під час точіння сталей і чавунів із тонкими зрізами і малими критеріями затуплення не перевищує 500 м/хв, то для інструменту, оснащеного різальною керамікою, цей рівень збільшується до 800–1000 м/хв.

Промисловість випускає чотири групи різальної кераміки:

- оксидна (біла кераміка) – на основі чистого окису алюмінію  $Al_2O_3$  в  $\alpha$ -модифікації, відомій за назвою корунд;

- оксидно-карбідна – на основі композиції  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -TiC (чорна кераміка);
- оксидно-нітридна – на основі  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN (кортиніт);
- нітридна кераміка – на основі  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

Основними перевагами застосування кераміки є не лише підвищення продуктивності та якості оброблення, а й практично необмежені сировинні ресурси щодо дешевого вихідного матеріалу – глинозему і відсутність хімічної спорідненості з більшістю оброблюваних матеріалів. До складу оксидної кераміки не входять дефіцитні матеріали, тому пластинки з керамічного матеріалу набагато дешевші за пластинки із твердого сплаву. Основний недолік цих пластин – відносно невелика міцність, але твердість і теплостійкість їх досить високі.

### ***Оксидна та оксидно-карбідна різальна кераміка***

Найбільш поширена оксидна (чиста, або «біла») кераміка ЦМ 332 («мікроліт»), що складається в основному з оксиду алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і легувальної домішки MgO. Чисту оксидну кераміку одержують методом холодного пресування за кімнатної температури, тобто  $\text{Al}_2\text{O}_3$  пресують за  $20^\circ\text{C}$  у пластини різних форм і потім піддають спіканню. Ця технологія дуже економічна, вона покладена в основу виробництва 90 % усіх різальних пластин із оксидної кераміки. Оксидна кераміка ВО-13 також матеріал на основі оксиду алюмінію з незначними домішками оксиду магнію, належить до I групи керамічних матеріалів. Її виготовляють методами порошкової металургії: холодним пресуванням із подальшим спіканням. Середній розмір зерна ВО-13 – до 4 мкм. Різці з пластинами із кераміки ВО-13 широко застосовують під час точіння нетермооброблених («сирих») сталей, сірих чавунів. Ефективність застосування цієї кераміки визначається її меншою вартістю порівняно з вартістю оксидно-карбідної кераміки.

Оксидно-карбідна (змішана, «металева», «чорна») кераміка (кермети), яка належить до II групи керамічних матеріалів, складається з оксиду алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (до 70 %), TiC (до 40 %) та

інших карбідів тугоплавких металів із деякими легувальними домішками. Пластини з оксидно-карбідної кераміки одержують гарячим пресуванням у графітових прес-формах. Цей процес більш трудомісткий, аніж процес одержання оксидної кераміки. Кермети за своїми експлуатаційними властивостями займають проміжне місце між твердими сплавами та оксидною керамікою. Домішки металевих сполук підвищують в'язкість і теплопровідність мінералокерамічних матеріалів, знижують тріщиноутворення та крихкість, однак при цьому знижується зносостійкість. Пластини з керметів застосовують для оброблення ковких, вибілених чавунів, термopolіпшених, цементованих і загартованих (HRC 30–65) сталей. Найбільш відомими у промисловості марками кераміки цієї групи є ВОК-60 і ВОК-63.

### ***Оксидно-нітридна та нітридна різальна кераміка***

До третьої групи мінералокераміки (оксидно-нітридної) входить кортиніт (ОНТ 20), який складається з  $Al_2O_3 > 70\%$  і TiN до 30 %. Вихідним матеріалом для одержання оксидно-нітридної кераміки є глинозем і нітрид титану.

Такий керамічний матеріал має високу міцність на вигин і низький коефіцієнт термічного розширення, що вигідно відрізняє його від раніше розглянутих керамічних матеріалів. Це дозволяє успішно використовувати нітридтитановий мінералокерамічний інструмент під час чорнового точіння, напівчистового фрезерування чавуну, чистового точіння складнолегованих і термооброблених (до HRC 60) сталей і сплавів.

Паралельно з удосконаленням керамічних матеріалів на основі оксиду створені нові марки різальної кераміки на основі нітриду кремнію  $Si_3N_4$  (IV група). За хімічним складом таку кераміку можна розділити на дві підгрупи.

Матеріали першої підгрупи базуються на застосуванні нітриду кремнію, вміст якого становить до 90–95 %. Для забезпечення високої щільності на остаточному етапі виготовлення цієї мінералокераміки застосовують спеціальні легувальні домішки (оксиди ітрію, цирконію, алюмінію та ін.) у

кількості 5–10 %. Активатори взаємодіють з нітридом кремнію з утворенням голчастих кристалів і простих та змішаних силікатів, відбувається також перерозподіл домішок, що супроводжується збільшенням теплопровідності й міцності. Такий керамічний матеріал має високу міцність на вигин (до  $\sigma_i = 700$  МПа) і низький коефіцієнт термічного розширення. До цієї групи належить силініт-Р, створений у ІІМ НАН України.

Друга підгрупа нітридокремнієвої кераміки, до якої передусім належить РК-30, крім зазначених вище компонентів, додатково містить карбід титану в кількості до 30 %. Такий керамічний матеріал має дещо більшу міцність на вигин, але разом із тим і трохи нижчу твердість.

Кераміку на основі нітриду кремнію одержують методами гарячого пресування. Виготовлення кераміки на основі нітриду кремнію не вимагає застосування дефіцитних матеріалів, а також унікального або нестандартного технологічного обладнання. Як основну вихідну сировину використовують порошок нітриду кремнію  $\beta$ -модифікації із середнім розміром частинок 0,6–1,2 мкм, вироблений серійно в промислових умовах. Гаряче пресування виконують у багатовмісних графітових матрицях.

Мінералокерамічні матеріали особливо важливі для швидкісного оброблення металів, тому що високі температури, які виникають у процесі різання, не чинять помітного впливу на зношування. Завдяки малій спорідненості з багатьма металами під час різання керамічними матеріалами виникають менші сили тертя, метал не «прилипає» до інструмента, якість обробленої поверхні поліпшується. Як уже було зазначено, недоліком мінералокерамічних матеріалів є підвищена крихкість. Межа міцності у разі вигину в мінералокераміки в 3–4 рази менша, ніж у металокерамічних твердих сплавів, і приблизно в 10 разів менша, ніж в інструментальних сталей. Це істотно обмежує сферу їх застосування. Найчастіше їх використовують для чистового та напівчистового оброблення сталі та чавуну.

Останнім часом з'явився новий клас інструментальних матеріалів, віднесених до групи різальної кераміки з

підвищеними показниками за міцністю, в'язкістю, тріщиностійкістю, що дозволяє впевнено говорити про помітне розширення сфери застосування кераміки. За оцінкою фахівців у галузі розроблення й експлуатації керамічного інструменту, використання нових типів різальної кераміки підвищеної міцності дозволить одержати техніко-економічний ефект, що порівнюється з ефектом, отриманим від застосування твердосплавного інструменту порівняно з інструментом, виготовленим зі швидкорізальної сталі.

Найбільш досконалою на сьогодні є оксидна кераміка, армована «ниткоподібними» кристалами SiC, що помітно переважає за фізико-механічними і теплофізичними властивостями білу та чорну кераміку. Як армувальний елемент для різальної кераміки найчастіше використовують ниткоподібні кристали карбіду кремнію SiC, що мають міцність до 4 000 МПа. Наприклад, введення ниткоподібних кристалів SiC в оксидну кераміку підвищує твердість з HV 2000 до HV 2400, міцність у разі вигину з 350 до (600–800) МПа, збільшує коефіцієнт тріщиностійкості з  $K_{Ic}=4,5$  до  $K_{Ic}=6-8$ . Останнє надзвичайно важливе з погляду зниження крихкості кераміки і розширення сфери її застосування. Установлено, що навколо ниткоподібних кристалів SiC формуються великі стискальні напруження, що є ефективним бар'єром для мікротріщин, які формуються та розвиваються у процесі експлуатації кераміки.

Ступінь підвищення міцності та твердості армованого керамічного матеріалу (композиційного типу) визначається низкою чинників. Найбільший вплив чинять об'ємна частка, розміри (відношення довжини до діаметра) і властивості ниткоподібних кристалів. Тому одержання певних властивостей на межі поділу «матриця – волокно» в умовах недостатньо високої стабільності властивостей ниткоподібних кристалів за температур спікання та їх хімічної взаємодії з матрицею визначають складність використовуваних технологій. Різальний інструмент із армованої кераміки на сьогодні є відносно дорогим і його застосування має економічну ефективність лише в певних

галузях, зокрема під час оброблення заготовок із важкооброблюваних матеріалів, наприклад, жароміцних нікелевих сплавів.

## **ЛЕКЦІЯ 7**

### **Металокомпозити**

*Металокомпозитні матеріали* (МКМ) – особливий клас матеріалів, що характеризуються підвищеними експлуатаційними властивостями: жаростійкістю, жорсткістю, питомою міцністю. Фізико-хімічна взаємодія матриці підсилювальних компонентів МКМ відбувається у вигляді дифузії та хімічних реакцій.

Важливою перевагою металокомпозитів є їх здатність працювати за температури понад 1 000 °С.

Основні групи металокомпозитів:

- 1) дисперсно-зміцнені матеріали (зокрема і псевдосплави);
- 2) евтектичні МКМ (сплави із спрямованою кристалізацією евтектичних структур);
- 3) волокнисті матеріали, армовані дискретними складовими.

У металевій матриці даних композитів рівномірно розподілені частинки зміцнювальної фази, що займають 1–15 % матеріалу. Тому матриця сприймає основну частину зовнішніх навантажень, а функція частинок зводиться до створення ефективного опору переміщенню дислокацій в об'ємі кристалічного зерна матриці. Тому металокомпозити характеризуються температурною стабільністю структури, що забезпечує високу міцність до температури 0,7–0,8 Тпл. Такі матеріали переважно отримують методом спікання порошків, що містять дрібнодисперсні частинки оксидів, нітридів, інших тугоплавких сполук, а також інтерметалідів, що за високих температур не розчиняються в матриці.

### *Дисперсно-зміцнені композити на металевій основі*

Номенклатура дисперсно-зміцнених металокомпозитів містить групи матеріалів, що відрізняються матрицями.

*Металокомпозити на Al матриці.* Їх найчастіше армують оксидами, зокрема це металокомпозити марки САП (спечений порошок Al) сформовані із частинок алюмінію, що покриті оксидною плівкою. У процесі термічного оброблення суміші порошку Al і сажі відбувається утворення карбіду  $AlC_3$ . За температур 300–400°C такі МКМ переважають за міцністю всі алюмінієві сплави і мають високі параметри міцності та повзучості.

*Металокомпозити на основі Be* поділяють на природно зміцнені (Be, BeO) та штучно зміцнені карбідами (сплави типу Be-Be<sub>2</sub>C). Вони мають підвищену міцність і стійкість до повзучості за високих температур. Домішками в дисперсно-зміцнених сталях є оксиди: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>. Зміцнення оксидами обумовлено тим, що O<sub>2</sub> значно менше розчиняється в матриці, ніж C або N.

*У металокомпозитах на основі Co* як дисперсні домішки використовують оксид торію і BeO. Застосовуються такі матеріали в ракетній, ядерній, авіаційній техніці.

*Металокомпозити на основі Si*, зміцнені карбідами, оксидами, нітридами, поєднують високу електропровідність та міцність. Із цих матеріалів виготовляють електроди, електроконтакти.

*Металокомпозити на основі Ni* наповнюють оксидом торію (ВДУ-1) і оксидом гафнію (ВДУ-2). Такі матеріали призначені для роботи за температур понад 1 000 °C. Для ВДУ-1  $\sigma_B = 540-570$  МПа.

*Псевдосплави* – дисперсно-зміцнені металокомпозити, що складаються з металевих і металоподібних фаз, які не утворюють хімічних сполук. Технологія їх отримання належить до методів порошкової металургії та передбачає просочення і рідкофазне спікання.



Просочення полягає в заповненні порожнин формовки або спеченої заготовки розплавом легкоплавкого компонента. Макроструктура псевдосплавів – взаємопроникні неперервні каркаси з туго- і легкоплавкої фази. Їх застосовують в триботехніці. Наприклад, сплав W-Cu характеризується  $\sigma_{\text{в}} = 510$  МПа,  $HВ = 1400$  МПа.

### ***Евтектичні металокомпозити***

Це сплави евтектичного або наближеного до нього складу, в яких армувальною фазою є орієнтовані волокнисті або пластинчасті кристали (рис. 7.1), що утворюються в процесі спрямованої кристалізації. Структура формується природно, а не в результаті штучного введення армувальних елементів у матрицю. Щоб утворилася така структура, необхідне виконання двох умов:

- наявність евтектичної точки на діаграмі стану сплаву;
- спрямоване відведення тепла від розплаву.



Рисунок 7.1 – Стрижневі або пластинчасті структури, що виникають у разі спрямованої кристалізації евтектик

Евтектики мають низьку точку плавлення. Їх складники перебувають у рівновазі, тому існують окремо у разі нагрівання до точки плавлення. Сили зв'язку на межі між фазами великі, тому в евтектик мала енергія межі.

У металокомпозитів відсутня хімічна несумісність між матрицею і зміцнювальною фазою внаслідок рівності хімічних потенціалів, рівноважності процесів кристалізації таких систем.

При цьому спочатку вибирають матрицю, що відповідає умовам експлуатації матеріалу за температурою плавлення, щільністю і стійкістю в середовищах, а потім аналізують евтектики, компоненти яких можуть забезпечити вимоги до армувальної фази.

Затвердіння евтектики відбувається на межі поділу рідина – кристал. Ця межа має поверхневу енергію, тому прагне бути найменшою за площею. Під час конденсації атомів на межі виділяється тепло. Тому біля неї є градієнти концентрації та температури. Якщо в рідині є області з нижчою температурою, то там кристали ростимуть швидше, межа викривиться. Якщо в рідині є домішки атомів, що активізують ріст кристалів свинцю, тоді кристали почнуть активно рости, виникнуть деревоподібні структури.

Технологія евтектичних металокомпозитів передбачає операції, суть яких полягає у створенні площинного фронту кристалізації, тобто площинної поверхні розділу між розплавом компонентів та тілом, що кристалізується. Для формування застосовують методи Бріджмена та зонної плавки.

*Метод Бріджмена* полягає у витягуванні розплаву з зони нагрівання з постійною швидкістю. Форма фронту залежить від швидкості й умов теплообміну.

*Зонна плавка* полягає в розплавленні ділянки заготовки, наприклад, за допомогою індукційного або електропроменевого нагрівання і переміщення розплавленої зони по довжині прутка з одночасним обертанням для вирівнювання складу розплаву.

Перевагою є технологічність – вироби формуються за одну операцію.

Недоліки: малий вміст армувальної фази й низька швидкість її росту; підвищені вимоги до чистоти вихідних матеріалів та точності дотримання режимів кристалізації.

Міцність металокомпозитів тим більша, чим міцніші волокна. Їх міцність зростає зі зменшенням діаметра. Тому евтектичні металокомпозити потрібно кристалізувати так, щоб

структурні складники (волокна, пластини) були якомога тоншими.

За номенклатурою евтектичні металокомпозити поділяють на:

- матеріали конструкційного призначення – на основі легких сплавів, жароміцні та на основі тугоплавких металів;
- матеріали з особливими фізичними властивостями – напівпровідникові, феромагнітні тощо.

До першої групи відносять сплави на основі Al, що характеризуються підвищеною міцністю, низьким електроопором, а також на основі Ni і Co, що характеризуються високою жароміцністю.

Другу групу складають сплави, що мають структуру напівпровідникової матриці з антимоніду індію, армованого волокнами сурми NiSb, FeSb, CuSb. Електропровідність таких сплавів вздовж волокон сурми на порядок вища, ніж по нормалі до них.

### ***Волокнисті металокомпозити***

Металокомпозити, армовані волокнами; їх ефективно використовують завдяки високим механічним характеристикам волокон. Можливі такі технології формування волокнистих металокомпозитів:

- формування;
- пресування;
- прокатування;
- одночасне витягування;
- екструзія;
- напилення;
- осадження;
- просочення.

Методом гарячого пресування з нагріванням на повітрі або контрольованій атмосфері виготовляють стрічки, профільні вироби тощо.

Метод одночасного витягування полягає в тому, що в заготовці з матричного металу висвердлюють отвори, куди вставляють армувальні стрижні або дріт. Методом екструзії виготовляють у вигляді прутків або труб. Високошвидкісне зварювання листових металокомпозитів здійснюють за допомогою машин для дифузійного зварювання з валками з тугоплавкого металу із заготовок, що складаються з шарів фольги й волокон.

Номенклатура волокнистих металокомпозитів охоплює матеріали на основі матриць з Al, Mg тощо.

Металокомпозити з Al і високомодульних волокон характеризуються високою питомою міцністю і жорсткістю. Застосовують їх у авіаційній і космічній техніці.

Металокомпозити на основі Mg характеризуються високою термічною стабільністю структури й жорсткістю. Їх армують волокнами бору, вуглецевими волокнами, оксидом алюмінію. Дуже ефективні у високонавантажених вузлах.

Металокомпозити на основі Ti характеризуються високою міцністю на розтяг і ударостійкістю, із них виготовляють лопатки вентиляторів газотурбінних двигунів.

Металокомпозити на основі Cu характеризуються кращим поєднанням міцності та електропровідності, ніж мідні сплави.

Металокомпозити на основі Ni характеризуються високою жароміцністю.

## ЛЕКЦІЯ 8

### Пластмаси. Термо- та реактопласти

*Пластичними масами* (або пластмасами) називають штучно створені матеріали на основі синтетичних або природних полімерів. Їх формують за підвищеної температури, коли вони мають високу пластичність. Сировиною для отримання полімерів є нафта, природний газ, кам'яне вугілля, сланці.

Поширенню пластмас сприяють їх мала густина, що значно зменшує масу деталей, висока корозійна стійкість. Широкий діапазон властивостей. Гарні антифрикційні

характеристики багатьох пластмас дають можливість успішно застосовувати їх для виготовлення підшипників ковзання. Високий коефіцієнт тертя деяких пластмас дозволяє використовувати їх для гальмових пристроїв.

Певні пластмаси мають специфічні властивості: високі електроізоляційні характеристики, велику прозорість та ін.

Важливою перевагою пластмас є можливість їх перероблення у виробі найбільш продуктивними способами з коефіцієнтом використання матеріалу 0,9–0,95 – литтям, видавлюванням тощо. Водночас пластмаси мають і деякі недоліки: невисокі міцність, твердість, жорсткість, велика повзучість, особливо у термопластів. Низька теплостійкість. Низька теплопровідність, здатність старіти (втрачати властивості під впливом теплоти, світла, води та інших чинників). У разі старіння зменшуються еластичність і міцність пластмас, збільшуються їх жорсткість і крихкість.

До складу пластмас входять: полімери, наповнювачі, стабілізатори, пластифікатори, затверджувачі та барвники.

Наповнювачами (зміцнювальними компонентами) можуть бути органічні або неорганічні речовини у вигляді порошків (графіт, деревне або кварцове борошно), волокон (паперових, бавовняних, азбестових, скляних) або листів (тканина, папір, деревний шпон). Наповнювачі підвищують міцність, зносостійкість, теплостійкість тощо. Пластифікатори вводять для підвищення пластичності та еластичності пластмас (гліцерин, касторове або парафінове масло).

Домішками можуть бути:

- стабілізатори – речовини, що уповільнюють старіння (сажа, сірчані сполуки, феноли);
- мастильні матеріали – речовини, що усувають присипання матеріалу до прес-форми, збільшують його текучість, зменшують тертя між частинками композиції (віск, стеарин, олеїнова кислота);
- барвники – речовини, що надають пластмасовим виробам декоративного вигляду (охра, сурик та ін.);

- каталізатори – речовини, що прискорюють тверднення пластмаси (уротропін, оксиди металів);
- антипірени – речовини, що зменшують горючість полімерів (наприклад, сполуки сурми);
- антистатиками – речовини, які перешкоджають виникненню й накопиченню статичного електричного заряду у виробках із полімерних матеріалів;
- пороутворювачі – речовини, що розпадаються під час нагрівання, виділяючи гази, що спінюють смолу, внаслідок чого утворюються поро- та пінопласти з пористою структурою.

Усі пластмаси за способом вторинного перероблення поділяють на термопластичні (термопласти) і термореактивні (реактопласти).

**Термопластичні полімери.** До них відносять: поліетилен, поліаміди, фторопласти, полістирол, полівінілхлорид та органічне скло (акрилопласт). Їх міцність становить 100–1 000 кг/см<sup>2</sup>. До недоліків цих полімерів можна віднести: невисоку теплостійкість, нестабільність властивостей та схильність до повзучості.

Поліетилен – неполярний кристалічний полімер, який працює за температур  $-60 - (+60) ^\circ\text{C}$  та має високі діелектричні властивості за частот від 109 Гц. Застосовують як ізолятор провідів, кабелів, що мають напругу до 10 кВ.

Поліаміди – полярний кристалічний полімер, що працює за температур від  $+45$  до  $+150 ^\circ\text{C}$  (критична температура становить  $180-250 ^\circ\text{C}$ ), мають високі міцність, твердість та в'язкість, мають низький коефіцієнт тертя, тобто антифрикційні властивості та зносостійкість. Мають тільки один недолік – поглинання води. Це, зокрема, капрон, нейлон, перлон, тетарон, неон. Застосовують як антифрикційні матеріали.

Фторопласти – вуглецево-фтористі полімери. Серед них є тверді полімери та каучуки. Найбільш поширеним є фторопласт 4 – неполярний кристалічний полімер із робочою температурою  $-250 - (+250) ^\circ\text{C}$ , не розчиняється в будь-якому розчиннику (не

поступається золоту і платині), непальний, негігроскопічний, діелектрик; має низький коефіцієнт тертя, невелику твердість. Це гарний антифрикційний матеріал. Одним із представників фторопластів є тефлон.

Полістирол – неполярний аморфний полімер із робочою температурою  $-60 - (+60) ^\circ\text{C}$ . Буває технічним або харчовим. Він прозорий та безбарвний. Є гарним високочастотним діелектриком (наприклад, стирофлекс є основою магнітних стрічок).

Полівінілхлорид – полярний аморфний полімер із робочою температурою від 0 до  $+40 ^\circ\text{C}$  у чистому вигляді або з пластифікатором  $-40 - (+60) ^\circ\text{C}$ . Без пластифікатора він називається вініпластом, а з пластифікатором – пластиком. Він непрозорий, дешевий, хімічно стійкий, міцний та зносостійкий; не горить, добре зварюється, має електричну міцність. Це, зокрема, штучна шкіра, ізоляційна стрічка і т. ін.

Органічне скло (поліакрилат) – полярний аморфний полімер із робочою температурою  $-180 - (+80) ^\circ\text{C}$ , безбарвний і прозорий, пропускає ультрафіолетові промені, добре розчиняється в дихлоретані.

Має високі діелектричні властивості, оливо-, бензо-, водостійкий, стійкий проти лугів, солей, але розчиняється у вуглеводнях; набухає у спиртах, малотермостійкий ( $+80 ^\circ\text{C}$ ). Скло для літаків, автомашин і вагонів, оптична і годинникова промисловість, світлотехніка, посуд, люстри, труби, ємності, оглядове скло апаратів.

**Термореактивні полімери.** До термореактивних полімерів відносять: фенолоформальдегідні, епоксидні, поліефірні та кремнійорганічні.

Фенолоформальдегідні полімери бувають резольні та наволачні. Резольні твердіють тільки під час нагрівання, а наволачні – під час нагрівання за наявності затверджувача. Температура твердіння становить  $160-200 ^\circ\text{C}$  за тиску  $130-1\ 300\ \text{кгс/см}^2$ . Випускають їх у вигляді прес-порошків

(наприклад, фенопласт 03-010-02). Вони стабільні за розмірами, хімічно стійкі. До недоліків відносять: крихкість, непрозорість, темний колір. Наповнені реактопласти поділяють на прес-порошки і компаунди, волокніти та шаруваті пластики (бавовняну тканину, просочену фенолоформальдегідною смолою, називають текстолітом; папір, просочений фенолоформальдегідною смолою, називають гетинаксом; азбестову тканину, просочену фенолоформальдегідною смолою, – азботекстолітом).

Епоксидні полімери бувають рідкі та тверді. Найбільш поширеними є рідкі епоксиди марки ЕД-5. Затверджувачами є аміни та луги. Епоксидні полімери й суміші (компаунди) застосовують для герметизації електронної апаратури, заливання ізоляції, покриттів на металах, клеїв.

Поліефірні полімери – рідкі речовини, що затвердівають без тиску за 60 °С; прозорі, гарно зчіплюються зі скловолокном, однак добре горять і мають низьку теплостійкість.

Кремнійорганічні полімери (силікони) виробляють у вигляді розчинів, рідких сумішей і твердих гранул із температурою твердіння 200–250 °С. Застосовують як лаки, клеї, склопластики тощо.

## ЛЕКЦІЯ 9

### Еластоміри. Лакофарбові покриття

*Гумовими матеріалами* називають продукти перероблення натурального каучуку (НК, високомолекулярної хімічної сполуки вуглецю і водню лінійної структури) або штучного синтетичного каучуку (СК, отриманого зі спирту і нафти) із вулканізатором.

Серед конструкційних матеріалів тільки гума відзначається еластичністю, тобто здатністю до великих зворотних деформацій (200–800 %) у широкому інтервалі температур. Гумові вироби, крім еластичності, характеризуються достатньо високою міцністю, корозійною стійкістю та зносостійкістю. Вони газо- і водонепроникні, мають гарні



електроізоляційні властивості й можуть також, залежно від складу, бути електропровідними.

У результаті перероблення вихідних матеріалів між молекулами утворюються поперечні зв'язки, що забезпечують еластичність, міцність та інші властивості. Суміш каучуку з вулканізатором утворює сиру гуму, а після закінчення вулканізації – гуму.

Вулканізаторами є сірка, селен, іноді пероксиди, металевий натрій. У м'яких сортах гуми міститься близько 3 % сірки від ваги каучуку, а у твердих (ебоніт) – 25–32 % сірки. Прискорювачами вулканізації є органічні речовини: каптакс, окис свинцю, або свинцевий глет. Зміцнювальні – дрібнодисперсні порошки сажі, оксиду кремнію або оксиду цинку – додають для підвищення міцності, твердості та стійкості гумових виробів. Для відповідальних виробів (шини, шланги високого тиску, приводні паси та ін.) використовують волокнисті зміцнювальні із синтетичних волокон або металевого дроту, покритого латунню, щоб підвищити зчеплення дроту з полімером. Наповнювачі – крейда, тальк, барій, що знижують вартість гуми.

Пластифікатори (парафін, каніфоль, стеаринова кислота, рослинні олії) сприяють рівномірному розподілу компонентів у суміші, полегшують формування виробів та підвищують їх морозостійкість. Барвники (мінеральні й органічні) надають гумовим виробам бажаного кольору. Використовують в електротехніці як матеріали з гарними діелектричними властивостями.

За призначенням гуми поділяють на гуми загального та спеціального призначення.

До першої групи належать натуральний каучук (НК) та види синтетичних канчуків, що відрізняються речовинами, які додають під час полімеризації: СКБ (синтетичний каучук бутадієновий); СКС (синтетичний каучук бутадієнстирольний) та СКІ (синтетичний каучук ізопреновий).

Гуми загального призначення можуть працювати у середовищі води, повітря, неконцентрованих розчинів кислот і лугів. Інтервал робочих температур становить від мінус 35–50 до плюс 80–130 °С. Із таких гум виготовляють шини, паси, транспортні стрічки, ізоляцію кабелів, різні гумовотехнічні вироби (вібро- та звукоізолятори, ущільнювачі, протиударні та силові деталі тощо).

Гуми спеціального призначення поділяють на маслобензостійкі, теплостійкі, світлоозоностійкі, зносостійкі, електротехнічні, стійкі до гідравлічних рідин тощо. Коротко охарактеризуємо властивості спеціальних гум, не зупиняючись на їх складі та конкретних марках.

Маслобензостійкі та стійкі до гідравлічних рідин, працюють у середовищах палива, мастила, гідравлічних рідин. Вони вібростійкі, не втрачають своєї еластичності до мінус 35–60 °С залежно від марки (наірит, тіокол та ін.). Застосовують для виробництва маслобензостійких виробів – ущільнювальних прокладок, манжет, рукавів; ущільнень для з'єднань гідросистем, насосів, діафрагм.

Тепло- та морозостійкі гуми працюють у дуже широкому інтервалі температур (від мінус 60 до плюс 250 °С), деякі, наприклад СКТФВ, від мінус 100 до плюс 350–400 °С.

Світлоозоностійкі гуми виробляють на основі насиченого каучуку (фторовмісні СКФ та етиленпропіленові СКЕП). Вони стійкі до дії сильних окиснювачів, не руйнуються в атмосфері впродовж кількох років; застосовуються для ущільнювальних виробів, діафрагм, гнучких шлангів.

Зносостійкі гуми отримують на основі поліуретанових каучуків СКУ, що мають високі міцність, еластичність, опір стиранню, маслобензостійкість. Вони стійкі до кисню й озону, їх газопроникність у 10–20 разів вища за натуральні каучуки, робоча температура становить від мінус 30 до 130 °С. Використовують їх для виготовлення автомобільних шин, транспортних стрічок, жолобів для транспортування абразивних матеріалів, взуття тощо.

Електротехнічні гуми поділяють на електроізоляційні (для ізоляції струмопровідних жил проводів і кабелів, спеціальних рукавичок, взуття) та електропровідні (для екранних кабелів).

Вироби з гуми відіграють взагалі важливу роль в усіх галузях техніки, у медицині та побуті.

### ***Класифікація лакофарбових матеріалів***

Лакофарбові покриття є одним із засобів захисту металів і сплавів від корозії. Вони призначені для створення декоративних покриттів на деталях і агрегатах автомобілів.

*Лакофарбове покриття* – це покриття, отримане нанесенням лакофарбового матеріалу на поверхню, що фарбується, з подальшим формуванням плівки. *Лакофарбові матеріали* – це композиції, здатні забезпечити формування покриттів, що мають комплекс таких необхідних властивостей, як адгезія, водостійкість, механічна міцність, захист металу, декоративні ефекти. Плівкоутворювачі (або плівкотвірні речовини) лакофарбових матеріалів є полімерами або олігомерами, або їх композиціями, здатними формувати на поверхні плівки в результаті фізичних, хімічних або фізико-хімічних перетворень. Залежно від типу плівкоутворювача висухла плівка може мати різні властивості.

Розрізняють такі види лакофарбових матеріалів: олійні, емалеві, порошкові фарби, лаки.

Олійні фарби – це суспензії, виготовлені розтиранням мінеральних або органічних пігментів у оліях, які використовують як плівкоутворювальну речовину. Пігменти надають фарбі відповідного кольору. Рослинні олії варять із додаванням пластифікаторів і сикативів. Отриману олію називають оліфою. Речовини, які застосовують для прискорення процесу твердіння плівок, називають сикативами (солі свинцю, кобальту, марганцю, цинку, кальцію та ін.). Для підвищення тривкості та стійкості шару фарби до складу додають наповнювачі (тальк, каолін).

Олієвіск – засіб на основі натуральних олії та воску, який застосовують для фінішного опорядження і водночас захисту дерев'яних поверхонь від вологи й бруду. Віск надає поверхні шовковистості та матовості, підвищує антистатичні та водовідштовхувальні властивості, а також антисептичну дію.

Емалеві фарби – це розчини лаків у органічних розчинниках із додаванням пігментів. Подібно до лаків емалі дають блискучі плівки і можуть утворювати теплостійкі й корозійностійкі покриття. Емалеві фарби дешевші за лаки. Залежно від зв'язувальної речовини розрізняють такі види емалевих фарб: масляні (на масляних лаках), гліфталеві (на гліфталевих лаках) і нітроемалі (на нітроцелюлозних лаках).

Нітроемалі – це матеріали, що швидко висихають та тверднуть вже через кілька хвилин після нанесення на поверхню. Їх недоліки – легка займистість, невисокі теплостійкість і стійкість до дії ультрафіолетових променів.

Порошкові фарби – це тверді порошкоподібні композиції на основі епоксидних, поліефірних та інших смол, які використовують для отримання захисних та декоративних покриттів. Переваги порошкових фарб перед іншими видами лакофарбових матеріалів: стабільність властивостей, екологічна безпека, мала трудомісткість під час нанесення. Такі фарби наносять електростатичним напиленням та сушать за 180–200 °С упродовж 20–30 хв.

Лаки – це розчини природних або синтетичних смол у різних розчинниках. За типом розчинників розрізняють спиртові й масляні лаки. Перші являють собою розчин смоли у спирті (КФ-274, МФ-15, ГФ-13, МА-22), другі – в оліфі (БТ-100, БТ-99, БТ-177 та ін.).

Переваги лаків порівняно з фарбами полягають в утворенні більш блискучих поверхонь та прискоренні процесу сушіння. Плівки лаків, виготовлених на основі штучних смол, витримують високі температури, вплив лугів і кислот. Недолік багатьох лаків – слабка адгезія до металів, крихкість захисної плівки.

Залежно від складу й призначення лакофарбові матеріали (ЛКМ) поділяють на лаки, емалі, ґрунтовки і шпаклівки. Лаками називають розчинники штучних та природних плівкоутворювачів, що не містять пігментів і наповнювачів. Емалями, ґрунтовками і шпаклівками є висококонцентровані суспензії пігментів і наповнювачів. Пігментами є забарвлені речовини, нерозчинні в дисперсійних середовищах і здатні утворювати з плівкоутворювальними основами декоративні або декоративно-захисні покриття. Наповнювачі є природними або синтетичними матеріалами, нерозчинними в дисперсійних середовищах, із низькою покривною і фарбувальною здатністю.

Позначення ЛКМ складається з п'яти груп знаків:

1-ша група – назва матеріалу повним словом (емаль, ґрунт тощо);

2-га група – умовне позначення типу плівкоутворювача. Змішані плівкоутворювачі позначають за основним (що переважає) продуктом;

3-тя група – показує основне призначення матеріалу (атмосферостійкий, консервація, водостійкий, маслобензостійкий);

4-та група – означає порядковий (реєстраційний) номер, наданий цьому матеріалу, з однієї, двох або трьох цифр;

5-та група – показує колір матеріалу (блакитний, синій та ін. ).

Приклад позначення: Емаль НЦ (нітроцелюлозна) - 11 Чорна.

Для водорозчинних, водоемульсійних, порошкових, пластизольних, органозольних ЛКМ, а також без активних розчинників перед другою групою знаків коду ставлять індекс, що визначає різновид матеріалу: Б – без активного розчинника; В – водорозчинні; ОД – органозольні; ПД – пластизольні; П – порошкові; Е – емульсійні.

Наприклад: Емаль Б-ЕП(епоксидна)-123 протикорозійна.

Нанесення лакофарбових матеріалів передбачає підготовчі операції – фарбування та сушіння. Безпосередньо

перед фарбуванням наносять ґрунтувальний шар (15–20 мкм) для поліпшення зчеплення фарби з металевою поверхнею.

Найпоширеніший спосіб нанесення захисних покриттів – це фарбування розпиленням, яке здійснюється через сопло пістолета з використанням стисненого повітря (3–5 атм.). Цей спосіб є продуктивним і використовується для виробів будь-яких габаритів. Після фарбування виріб піддається природному або штучному сушінню.

Рамні конструкції та корпуси різних машин фарбують пентафталевами ПФ-133, алкідно-акриловими АС-182 та фетрифталевими ЗТ-199 емалями. Під час фарбування кабін, крил і лицьових частин машин та агрегатів застосовують нітроемалі НЦ різних марок. Деталі, що зазнають дії високих температур (блоки двигунів, головки, колектори та ін.), покривають лаками з додаванням алюмінієвої пудри.

**Властивості лаків і емалей.** Емалі на відміну від лаків, що складаються з розчину плівкоутворювача в леткій рідині, містять пігменти, наповнювачі, пластифікатори та інші спеціальні компоненти, що забезпечують декоративні й механічні властивості покриттів, а також стійкість їх під час експлуатації. На відміну від фарб емалі містять розчинники і меншу кількість пігментів і наповнювачів. У зв'язку з цим плівки емалей характеризуються кращими декоративними властивостями.

Для лакофарбових покриттів, призначених для захисту металів від корозії в атмосферних умовах, важливою характеристикою є проникність. Проникнення вологи через полімерні матеріали проходить по-різному: у одних є постійні зазори й пори, через які в основному проникають молекули води, в інших же зазори виникають короткочасно в результаті теплового руху макромолекул.

Типовими представниками першого класу полімерів є фенолформальдегідні смоли, похідні полістиролу, поліетилену.

До другого класу належать полімери типу каучуків. Вологопроникність, а також водопоглинання (водонабухання) значно залежать від структури органічних полімерів. Полімери з

тривимірною структурою, наприклад, фенольні смоли, відрізняються дуже розгалуженою структурою, внаслідок чого молекулам водяної пари й води доводиться здійснювати більший шлях. У лінійних полімерах, що відрізняються волокнистою структурою, молекули слабкорозгалужені (наприклад, у нітраті целюлози), тому шлях проникнення молекул набагато коротший, і цей процес проходить без ускладнень.

У протикорозійному захисті металевих виробів із кожним роком набувають усе більшого значення інгібітори корозії, які вводять в лакофарбові матеріали.

Електроізоляційні лаки, емалі, компаунди. Електроізоляційні лаки – колоїдні розчини лакової основи, які утворюють після видалення розчинника плівку, що має електроізоляційні властивості. Лакова основа – смоли, бітуми, спеціальні масла. Розчинники – леткі рідини, що застосовують для розчинення лакових основ, летких у процесі утворення плівки (ароматичні вуглеводні, спирти, складні та прості ефіри, скипидар тощо). Сикативи – речовини, що прискорюють процес висихання масляних лаків (бензин, гас). Пластифікатори – речовини, що надають еластичності та ударної міцності лаковій плівці. Затверджувачі – речовини, що сприяють твердінню плівки лаку. Ініціатори й прискорювачі – речовини, що прискорюють процес утворення полімерів.

Електроізоляційні емалі – це лаки, у складі яких є пігменти (двоокис титану, залізний сурик) – високодисперсні неорганічні речовини, що підвищують твердість і механічну міцність лакової плівки, теплопровідність.

Просочувальні лаки – масляні, олійно-смоляні, смоляні, для просочення обплетення проводів (целюлозні), лакопаперу, лакотканин, обмоток електричних машин і апаратів (масляні), обмоток трансформаторів (олійно-смоляні).

Покривні лаки – для захисту від вологи (целюлозні, олійно-бітумні, кремнійорганічні).

Клеючі лаки – гліфталеві (на основі гліфталевої смоли), олійно-гліфталеві.

Електроізоляційні компаунди – в основному складаються з тих самих речовин, що входять до складу лакової основи електроізоляційних лаків, але, на відміну від лаків, не містять розчинників. У момент застосування за нормальної та підвищеної температури компаунди перебувають в рідкому стані й тверднуть після охолодження або в результаті хімічних процесів, що відбуваються в них. Крім того, до складу компаундів можуть входити активні розчинники, що знижують в'язкість компаунду, пластифікатори, затверджувачі, ініціатори та інгібітори.

До складу компаунду можуть також входити наповнювачі (пилоподібний кварц, тальк, слюдяний пил, азбестове й скляне волокно) для зменшення усадки, поліпшення теплопровідності, зменшення температурного коефіцієнта розширення та зниження вартості. За хімічним складом електроізоляційні компаунди поділяють на компаунди, що виготовляються на основі нафтових бітумів, рослинних масел і каніфолі, і компаунди на основі синтетичних смол. Компаунди на основі синтетичних смол виготовляють на основі поліефірних, епоксидних, епоксидно-поліефірних, кремнійорганічних та інших смол і композицій.

## ЛЕКЦІЯ 10

### Методи отримання високоякісних сплавів

Метою процесів спеціальної електрометалургії є рафінувальний переplав металу поступовим його наплавленням у кристалізатор. У результаті цього забезпечують спрямовану кристалізацію металевого зливка підвищеної якості, у якому відсутні газоусадкові та ліквацийні дефекти. До спеціальних способів електрометалургії відносять електрошлаковий, електродуговий та плазмовий переplави, а також електронно-променеву плавку.

#### *Електрошлаковий переplав*

Процес електрошлакового переplаву (ЕШП) застосовують для очищення сплавів від газів та шкідливих



домішок й одержання однорідної структури в литому металі. Для переплаву сплавів цим способом (рис. 10.1) витратний електрод підключають до джерела електричного струму. Потім торець електрода, що плавиться, занурюють у рідкий рафінувальний шлак, який має визначений електричний опір. Перед плавкою у водоохолоджуваному металевому кристалізаторі готують шлак шляхом розплавлення спеціальної суміші (флюсу). Рафінувальний шлак можна виплавляти в окремій печі та заливати його в рідкому стані у кристалізатор.

Ефективність електрошлакового процесу визначається властивостями розплавленого шлаку (електричним опором, акумулюванням теплоти, рафінувальними можливостями та іншими). У процесі електрошлакового переплаву метал проходить через три рафінувальні зони.

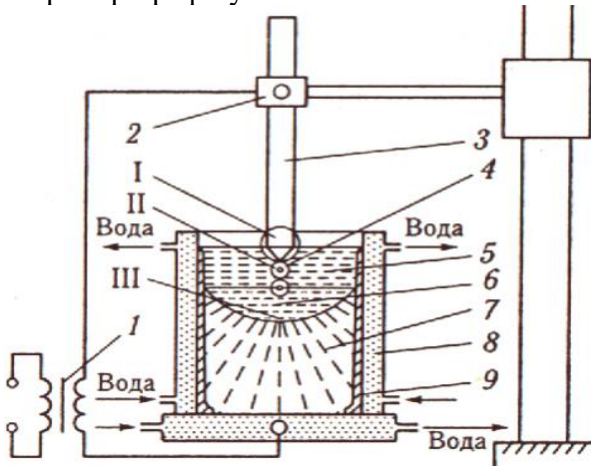


Рисунок 10.1 – Схема процесу ЕШП:

- I – III зони рафінування; 1 – трансформатор; 2 – електродотримач; 3 – електрод; 4 – краплі електродного металу; 5 – шлакова ванна; 6 – рідкий метал; 7 – зливоч; 8 – водоохолоджуваний кристалізатор; 9 – шар твердого шлаку

Перша розташована на нижньому торці електрода, що плавиться. Під час плавлення електрода на його торці утворюються плівки розплаву з домішками, що містить метал,

який переплавають. Ці плівки в першій зоні взаємодіють зі шлаком на великій поверхні контакту. У результаті цього відбувається часткове очищення металу від домішок. У міру плавлення електрода рідкий метал плівок накопичується на його торці й утворює краплі.

У другій зоні відбувається рафінування крапель металу під час їх утворення, а також під час їх переміщення через шлак до рідкометалевої ванни. Особливістю процесу рафінування металевих крапель є короткочасність їх контактування зі шлаком на розвиненій поверхні поділу фаз.

Третя рафінувальна зона розташована на поверхні поділу шлаку з металом. У цій зоні розплав нагрівають до більш високих температур і перемішують.

Електрошлаковим способом можна одержувати круглі, квадратні та прямокутні зливки та заготовки різної маси для прокату. Значний обсяг у виробництві такої металопродукції займають ковальські зливки масою від 10 до 400 т. Із використанням процесу електрошлакового переплаву одержують зливки визначених розмірів у нерухомому кристалізаторі з дном. Напівбезперервні заготовки одержують у наскрізних кристалізаторах, через які переміщується зливоч.

До основних матеріалів, що застосовують у процесі електрошлакового переплаву, належать витратні електроди, флюси, модифікатори, розкиснювачі й лігатури. Допоміжними матеріалами є вода, стиснуте повітря, інертний газ та інші. Витратні електроди для ЕШП виготовляють із прокату або їх відливають. Для витратних електродів використовують також металовідходи, відпрацьовані деталі та вироби, які з'єднують зварюванням.

Застосування шлаків під час електродугового переплаву металів дозволяє істотно зменшити вміст сірки, газів та неметалевих включень у виливках.

## ***Вакуумно-дуговий і вакуумно-індукційний переплав сплавів***

Вакуумно-дугові плавильні агрегати (рис. 10.2) дозволяють виготовляти виливки з високореакційних і тугоплавких металів (Ti, Zr, Nb, Mo, Ta, W) та сплавів спеціального призначення (жароміцні, нержавіючі, підшипникові, корозійностійкі), які використовують у багатьох галузях промисловості.

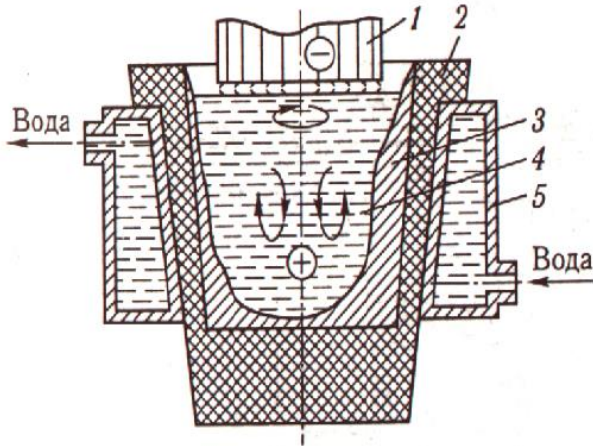


Рисунок 10.2 – Схема вакуумної дугової гарнісажної плавки:

1 – електрод; 2 – тигель; 3 – гарнісаж; 4 – рідкий метал; 5 – кристалізатор

У вакуумно-дугових печах електрична дуга горить в умовах зниженого тиску. Температура в розрядному проміжку між електродом і ванною рідкого металу досягає 3 700 °С. У процесі плавлення металу напруга дуги не перевищує 30 В, а сила струму змінюється в широких межах від 300 А до 1000 А (залежить від потужності джерела живлення). Плавлення металу в таких печах проводять із використанням постійного струму на «прямій полярності», що забезпечує стабільне горіння електродуги. При цьому катодом є електрод, анодом – рідкий метал.

Вакуумно-дугові печі поділяють на два типи: агрегати для одержання напівбезперервних заготовок та для плавлення металу в гарнісажному тиглі. Печі з гарнісажним тиглем дозволяють виплавляти достатньо великі об'єми рідкого металу. Гарнісаж – це шар металу, що затвердів на внутрішніх стінках тигля або кристалізатора. Наявність гарнісажу запобігає взаємодії розплаву з матеріалом тигля в процесі плавки.

Печі бувають різних дій: періодичної, коли весь виплавлений метал зливають в одну форму; напівбезперервної, для одержання заготовки або заливання металом декількох форм, а також безперервної дії, що оснащені шлюзовою камерою, яка дозволяє заливати у форми метал і кристалізувати його без знімання вакууму в плавильному агрегаті. Під час підготовки вакуумно-дугових агрегатів до плавлення проводять допоміжні операції: очищення внутрішніх стінок у тиглі, кристалізаторі та піддоні; розміщення на дні тигля або на піддоні темплету («запалу») заготовки 30–100 мм із металу попередньої плавки; монтаж електрода та кристалізатора; перевірка систем вакуумування; енергопостачання та ін.

У печі перед плавкою створюють розрідження вакуумним насосом до  $\sim 1,33$  Па. Потім електрод переміщують униз до виникнення електричної дуги між ним та запалом. Після цього електрод підіймають і встановлюють необхідну довжину дуги, що відповідає електричній потужності джерела живлення. Період плавки поділяють на три етапи: прогрівання електрода, переплавлення його та перегрів рідкого металу і виведення усадкової раковини у верхню частину зливка.

Перевагами вакуумно-дугових процесів є обмежений контакт металу з повітрям, ефективне рафінування сплавів від газів та неметалевих включень, дисперсність структури у виливках завдяки послідовній їх кристалізації. До недоліків вакуумно-дугової плавки належать неможливість рафінування металу від сірки (відсутність шлаку), складність і висока вартість устаткування, підвищений угар легувальних елементів тощо.

Для виробництва різного типу виливків зі сплавів, що інтенсивно окиснюються під час готування їх у звичайних умовах, використовують вакуумні індукційні печі. Такий процес плавки є універсальним способом одержання високоякісного литого металу. Принцип нагрівання сплавів у цих агрегатах ґрунтується на явищі електромагнітної індукції. Змінний магнітний потік, що створюється індуктором, наводить у металі вихрові струми. Ці струми забезпечують високі швидкості нагрівання та плавлення металу в ущільненому тиглі, що розташований усередині індуктора. Для плавлення сплавів використовують також печі, у яких індуктор і тигель із металом розташовані у вакуумній камері.

Процес вакуумно-індукційної плавки дозволяє: використовувати різні шихтові матеріали (кускові, пустотілі, брикети тощо); одержувати сталі та сплави з регламентованим хімічним складом; рафінувати розплав від газів, неметалевих включень та шкідливих домішок; здійснювати надійний контроль і регулювання температури й складу металу в процесі плавки. До недоліків такої технології належать відносно велика вартість обладнання та забруднення металу включеннями футерівки, із якої виготовляють плавильний тигель.

### ***Процеси плазово-дугової плавки металів***

Плазма (четвертий стан речовини) – це частково або цілком іонізований газ температурою  $10^3$ – $10^8$  °С, у якому кількість позитивних та негативних зарядів однакова. Розрізняють гарячу (високотемпературну –  $10^6$ – $10^8$  °С) і холодну (низькотемпературну –  $10^3$ – $10^5$  °С) плазму.

У металургійних процесах використовують низькотемпературну плазму, яку одержують термічним нагріванням газу або іонізацією його електричним розрядом. Плазму краще створювати за допомогою електричного дугового розряду, що проходить у газовому середовищі між двома електродами. У разі електричного розряду іонізація газу відбувається шляхом зіткнення високотемпературних

нейтральних частинок із зарядженими, що прискорені електричним полем.

Процес формування плазми ендотермічний. У багатоатомних газах перед процесом іонізації атомів відбувається дисоціація молекул.

Для плавильних агрегатів із плазмовим нагріванням вибір робочого газу необхідно проводити з урахуванням його характеристик: термодинамічних (теплоємності, ентальпії, ентропії) та фізичних (енергії іонізації, електро- та теплопровідності, ступеня іонізації тощо). Водночас необхідно враховувати фізико-хімічні властивості газу, що визначають характер взаємодії плазми з рідким металом, а також вартість і дефіцитність газів.

У плазмових технологіях найбільшого застосування набув хімічно чистий аргон, потенціал іонізації якого становить 15,7 В. Аргон забезпечує достатньо високу температуру плазмового струменя за невеликих напруги дуги й потужності, що підводиться до плазмотрону.

Додавання до аргону інших газів, наприклад азоту, дозволяє підвищити ентальпію плазми та ефективність нагрівання металу. Під час використання азоту в робочому газі у плазмових агрегатах можна азотувати сплави у процесі їх плавлення.

У деяких випадках у плазмово-дугових процесах застосовують гелій, який має потенціал іонізації (24,5 В) більший, ніж у аргону. Використання гелію дозволяє підвищити ентальпію плазми, швидкість плавлення металу та коефіцієнт корисної дії технологічного процесу.

Високоентальпійним плазмоутворювальним газом є також водень. Ентальпія водневої плазми становить  $320 \cdot 10^3$  кДж·кг<sup>-1</sup>, що в 20 разів більше від аргонової. Однак у чистому стані водень у плазмових технологіях застосовують обмежено. Це зумовлено тим, що для його іонізації до електричної дуги необхідно підводити енергію, яка за величиною у 2–3 рази вища, ніж за використання аргону в плазмотронах. Тому водень додають у

невеликій кількості ( $\leq 10\%$ ) до інших плазмоутворювальних газів і використовують у відновлювальних процесах.

За температур близько  $4700^\circ\text{C}$  іони, електрони та нейтральні частинки в газах набувають високої кінетичної та внутрішньої енергії.

У результаті цього інтенсифікуються процеси дисоціації газів, що пов'язано зі зростанням ролі ентропійного чинника, підвищуються швидкості хімічних реакцій та взаємодія компонентів у шлакометалевих системах. Тому використання низькотемпературної плазми в металургії дає змогу інтенсифікувати відомі та створювати принципово нові технологічні процеси для одержання якісної металопродукції.

Плазмово-дугові печі бувають двох типів: із вогнетривкою футерівкою (рис. 10.3) та з водоохолоджуваним мідним тиглем (рис. 10.4) або кристалізаторами для одержання зливків і напівбезперервних заготовок.

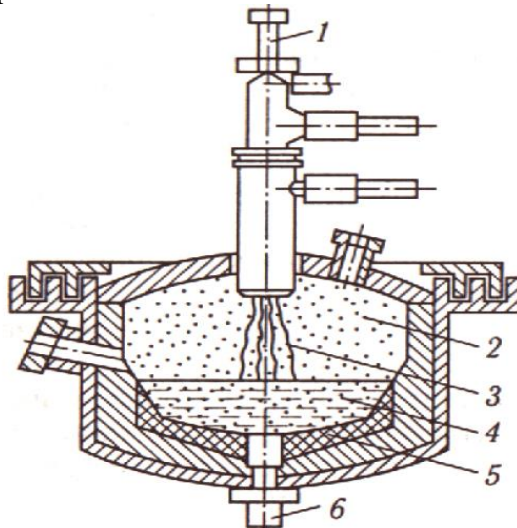


Рисунок 10.3 – Схема плазмово-дугової печі з вогнетривкою футерівкою:

- 1 – плазмотрон; 2 – камера печі; 3 – плазмова дуга; 4 – метал; 5 – днище; 6 – подовий електрод (водоохолоджуваний анод)

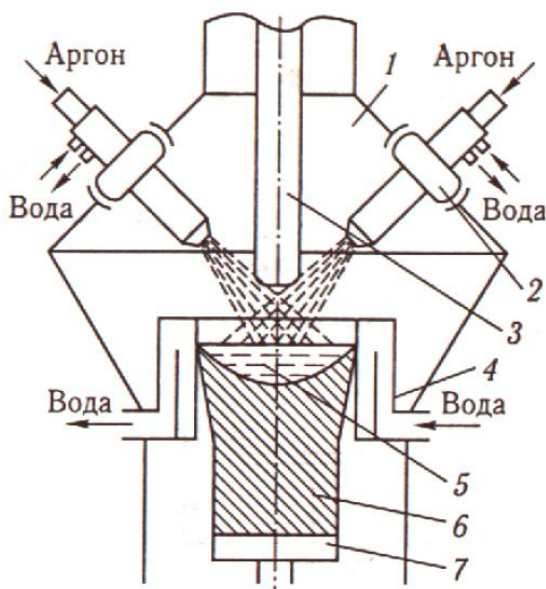


Рисунок 10.4 – Схема плазмово-дугової печі з вертикальною подачею заготовки:

1 – герметизована камера; 2 – плазмотрон; 3 – заготовка; 4 – кристалізатор; 5 – ванна металу; 6 – виливок; 7 – піддон

У печах із вогнетривкою футерівкою водоохолоджуваний анод (подовий електрод), що встановлений врівень із подом, контактує з металом. Плавильну камеру печі заповнюють газом, який звичайно використовують у плазмотроні. Потім подають від джерела живлення напругу на плазмотрон (електрод) і збуджують електричну дугу. На початку процесу плазмова дуга проплавляє в шихті вузький отвір (колодязь), і рідкий метал, який стікає вниз, накопичується на поду печі, а після цього розплавляється вся шихта. До переваг агрегатів із футерованим тиглем належить можливість приготування в них спеціальних сталей та сплавів. Завдяки нейтральній атмосфері в плавильному просторі забезпечується практично повне засвоєння легувальних елементів.



Під час плазово-дугової гарнісажної плавки плазмотронами постійного або змінного струму розплавляють метал у водоохолоджуваному тиглі, який виготовлено з міді. На міжфазній межі метал-тигель утворюється шар закристалізованого сплаву – гарнісаж. Наявність такого гарнісажу унеможлиблює контакт рідкого металу з матеріалом тигля в процесі плавлення сплавів.

У плазових печах із водоохолоджуваним кристалізатором заготовку, яку переміщують зі сталою швидкістю, плавлять одним або кількома плазмотронами. Анодом для цих плазмотронів є поверхня рідкої ванни, яка формується у верхній частині зливка. У зону плавлення заготовку подають із одночасним обертанням її навколо власної осі. За рахунок цього торець заготовки, яку плавлять, має вигляд конусу.

Таким способом переплавляють заготовки, площа перерізу яких не перевищує 0,7–0,8 поперечного перерізу зливка.

Конвективна та радіаційна теплопередача до витратної заготовки здійснюється від плазмотронів безпосередньо, а також випромінюванням від рідкометалевої ванни та плазових струменів. За постійного переміщення заготовки її торець плавиться у стаціонарному режимі.

Рідкий метал у зоні плавлення торця заготовки рафінується від газів, неметалевих включень та шкідливих домішок.

Фізико-хімічні процеси взаємодії металу з газом під час плазово-дугового переплаву відбуваються на міжфазній поверхні, якій передається значна кількість енергії від електричної дуги. Через цю міжфазну межу здійснюється масообмін між рідким металом та атмосферою в печі. У плазово-дугових агрегатах плавильний простір зазвичай заповнений інертним (плазмоутворювальним) газом. Тому в процесі плавлення заготовки шкідливі гази та домішки з рідких сплавів переходять в інертне середовище.

### *Електронно-променева плавка металів та сплавів*

Електронно-променеву плавку застосовують для одержання високоякісних сплавів та виробів із унікальними експлуатаційними характеристиками. Особливістю електронно-променевих технологій, порівняно з іншими способами спеціальної металургії, є найвища ефективність рафінування металів від газів, неметалевих включень та шкідливих домішок. Високий ступінь рафінування сплавів досягається шляхом плавлення їх висококонцентрованим джерелом нагрівання (електронним променем) у глибокому вакуумі. У таких агрегатах сплави плавляться за рахунок енергії, що утворюється в результаті прискорення електронів до великих (60–100000 м/с) швидкостей та їх гальмування при зіткненні з поверхнею металу.

В електронних гарматах відбувається утворення електронів, а також їх фокусування в щільний пучок, який називають електронним променем.

Зміною потужності променя регулюють тепловий режим плавлення металів та сплавів. Для генерації електронних пучків використовують аксіальні гармати з термокатодом або холодним катодом, а також гармати, які формують плоскосиметричні промені (рис. 10.5).

У виробництві для плавки металів найчастіше використовують гармати аксіального типу. Одним із різновидів цього способу є нагрівання та плавлення шихти біля рідкометалевої ванни у зливку додатковою електронною гарматою. Така технологія не завжди забезпечує високий ступінь рафінування сплавів та продуктивність плавки. Тому цей процес застосовують для одержання заготовок із дрібною шихти (гранули, порошок, губка й скрап), які потім спрямовують на повторне рафінувальне переплавлення.

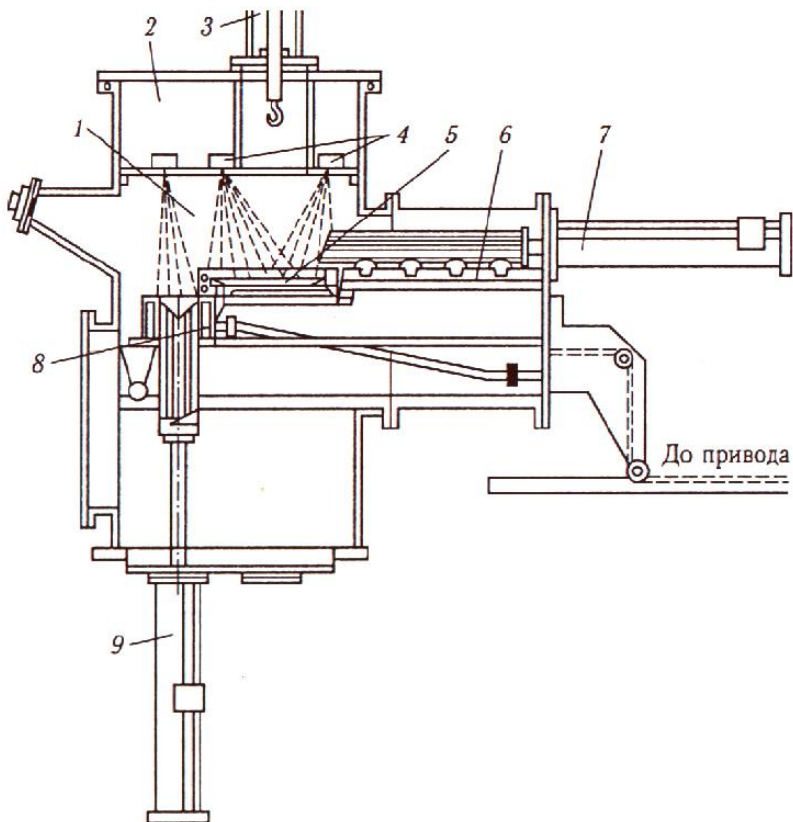


Рисунок 10.5 – Схема електронно-променевої установки:

1 – камера для плавки; 2 – камера для електронно-променевих гармат; 3 – механізм для подавання шихти або заготовки; 4 – електронно-променеві гармати; 5 – проміжна ємність; 6 – рольганг; 7 – механізм горизонтального переміщення заготовки; 8 – кристалізатор; 9 – механізм для витягування виливка

Рідкий метал, що утворюється під час розплавлення заготовки електронним променем, стікає в проміжну ємність і рафінується в ній.

Після цього розплав із проміжної ємності надходить у кристалізатор.

Поверхні рідкого металу в проміжній ємності та в кристалізаторі нагрівають різними гарматами, що розширює можливості керування температурними режимами плавлення сплавів на різних стадіях їх приготування.

Електронно-променева технологія дозволяє одержувати виливки з тугоплавких і високореакційних сплавів на основі титану, цирконію, нікелю, кобальту, заліза, а також із складнолегованих сталей із низьким ( $\leq 0,01\%$ ) умістом газів та домішок. У разі глибокого вакууму в установці під високотемпературною дією електронного променя («тепловий удар») руйнуються нітриди у сплавах. У результаті цього зменшується вміст азоту й неметалевих включень у литих виробках. Під дією променя відбувається також термічне розкладання оксидів тугоплавких металів, що дає змогу значно зменшити концентрацію кисню у сплавах.

## ЛЕКЦІЯ 11

### Захисні покриття

*Покриття* – штучно сформований на поверхні виробу або конструкції шар, що відрізняється від матеріалу основи за складом і фізико-хімічними властивостями.

За характером розташування на поверхні покриття поділяють на нашаровані й дифузійні.

*Нашаровані покриття* – покриття, сформовані на зовнішній поверхні виробу або конструкції, що має чітку межу поділу з основною.

*Дифузійне покриття* – покриття, сформоване за рахунок упровадження в матеріал основи без істотної зміни початкових розмірів виробу.

Можливі покриття, що мають проміжний характер (дифузійно-нашаровані).

Наявні методи нанесення покриттів поділяють на такі основні групи:

- хімічне осадження;
- електрохімічне осадження;

- газотермічне напилення;
- вакуумне напилення;
- дифузійне насичення.

*Хімічне осадження* – отримання покриттів із водних розчинів солей, засноване на реакціях відновлення.

*Електрохімічне осадження* – отримання покриттів на металах із розчинів або розплавів електролітів під дією електричного струму.

*Газотермічне напилення* – отримання покриття з частинок дисперсного матеріалу, нагрітих і прискорених за допомогою високотемпературного газового струменя.

*Вакуумне напилення* – отримання покриття з парогазової фази з використанням контрольованих процесів випаровування, синтезу, конденсації та сорбції речовини покриття у вигляді окремих атомів і молекул у вакуумі.

*Дифузійне насичення* – отримання покриття шляхом легування металами і неметалами поверхневого шару основного матеріалу під час нагрівання в середовищі, що містить елементи, які утворюють покриття.

Незалежно від технології отримання до покриттів ставлять такі вимоги:

- 1) відповідність коефіцієнту термічного розширення основи;
- 2) висока щільність і низька пористість;
- 3) високі адгезійні характеристики покриття, що забезпечують його міцний зв'язок із підкладкою.

За матеріалом покриття поділяють на металеві, неметалеві та комбіновані.

### ***Металеві покриття (металізація)***

*Металізація* – покриття поверхні виробу металами і сплавами для надання їй фізико-хімічних, механічних властивостей, відмінних від властивостей вихідного матеріалу. Металізацію застосовують для захисту виробів від корозії, зношення, як декоративні елементи тощо.

За принципом взаємодії поверхні підкладки з металом, що наноситься, розрізняють металізацію, за якої зчеплення покриття з основою (підкладкою) здійснюється механічно – силами адгезії, і металізація, за якої зчеплення забезпечується силами металевого зв'язку.

За способом нанесення на поверхню виробів металеві покриття поділяють на такі:

### ***1. Хімічні та електрохімічні способи нанесення***

*Хімічне нанесення металопокриття (хімічне осадження)* – утворення покриття на поверхні металевих виробів унаслідок осадження іонів металу з водного розчину хлориду металу без застосування електричного струму від зовнішнього джерела. Використовують для покриття бронзою, латунню, кадмієм, міддю, золотом, нікелем, оловом та іншими металами.

*Електролітичне, або гальванічне, нанесення металопокриття* – осадження металу з утворенням покриття на поверхні виробу у разі пропускання електричного струму в гальванічній ванні між полюсами джерела, одним із яких є метал, що наноситься на виріб, а іншим – оброблюваний виріб, із метою декорування та підвищення зносо- і корозієстійкості виробів. На вироби наносять як чисті метали (кадміювання, хромування, міднення, нікелювання, золочення, сріблення тощо), так і сплави.

### ***2. Фізичні способи нанесення***

*Занурення, або нанесення гарячого металопокриття зануренням*, – утворення покриття шляхом занурення металевого виробу у ванну з розплавленим металом (Zn, Sn, Pb).

*Дифузійне насичення* – це дифузійне насичення поверхневого шару виробу металом або сплавом за високої температури з використанням насичувального складу, основним компонентом якого є метал, сплав або металеве з'єднання в порошкоподібній або пастоподібній формі (цинкування, хромування, сульфідкування), що проводиться з декоративною метою і для підвищення зносостійкості виробів.

*Вакуумне осадження (конденсаційне наплення)* – нанесення шару шляхом осадження атомів або молекул металу

або металевому з'єднанню на поверхню виробу у разі їх сублимації в умовах високого вакууму (залишковий тиск 13,3–1,3 МПа) з декоративною метою (для підвищення оптичних властивостей поверхні виробів, зокрема поліпшення металевих блиску) і для надання виробам певних властивостей.

Покриття формується з потоку частинок, що знаходяться в атомарному, молекулярному або їх іонізованому стані. Для отримання потоку пара (часток) використовують різні джерела енергетичного впливу на матеріал.

Розрізняють формування потоку частинок за допомогою термічного випаровування матеріалу, іонним розпиленням або вибуховим випаровуванням – розпиленням. Відповідно до цього вакуумне конденсаційне напилення поділяють на методи: іонно-плазмового напилення (у разі іонізації потоку напилюваних частинок), вакуумне конденсаційне напилення (у разі введення в потік реактивного газу).

Можливості методів вакуумного осадження дозволяють отримувати високоякісні покриття товщиною від десятків нанометрів до сотень мікрометрів із різних матеріалів.

*Наплавлення* – нанесення шару розплавленого металу на оплавлену металеву поверхню шляхом плавлення присадочного матеріалу теплотою зовнішнього джерела нагрівання: газове полум'я (газове наплавлення), електрична дуга (дугове і плазмове наплавлення), високочастотне нагрівання, промінь лазера тощо.

Добре відпрацьована технологія наплавлення дозволяє отримувати високу якість покриття. Порівняно з іншими способами створення покриттів наплавленням забезпечує високу міцність зчеплення шару з основним металом, оскільки у разі затвердіння розплавленого металу зростання кристалітів у шарі відбувається на базі частково оплавлених зерен основного металу. До недоліків наплавлення слід віднести високу температуру нагрівання виробів.

Крім того, під час наплавлення можливе нанесення шарів в основному з металів товщиною 0,5–10 мм, а одержати тонкошарові наплавлення складно.

### **3. Механічні способи нанесення**

*Плакування* – нанесення на поверхню металевого виробу одного або декількох шарів інших металів або сплавів, що з'єднуються між собою прокаткою, зварюванням вибухом або литтям; у деяких випадках методами екструзії (тобто шляхом видавлювання через отвір) і спікання, останнім часом використовують для з'єднання матеріалів техніку плавлення лазерними і електронними променями, а також енергію поверхневого тертя.

Плакування здебільшого здійснюється в процесі гарячої прокатки або пресування. Плакування може бути одно- і двошаровим.

Застосовується для створення антикорозійного шару і надання певного естетичного вигляду виробу (наприклад, створення срібних плакувань, як альтернатива гальванічному срібленню).

*Газотермічне напилення* – утворення на поверхні виробу покриття з потоку нагрітих до температури плавлення або близького до нього стану дрібнодисперсних частинок або атомів розпорошеного матеріалу (чистого металу або сплаву) для надання йому спеціальних фізико-хімічних, механічних, декоративних властивостей або для відновлення дефектної поверхні. Напилені покриття утримуються на поверхні в основному силами адгезії, унаслідок чого необхідно створювати певну шорсткість на поверхні виробів під час підготовки до нанесення покриття цим способом.

*Газополум'яне напилення* – різновид напилення, за якого матеріал, що наноситься, розплавляється, розпорошується і трансформується полум'ям газу, що спалюється в суміші з киснем у спеціальних газових пальниках. Напилення залежно від стану напилюваного матеріалу може бути трьох типів: дровове, пруткове й порошкове. Крім цього, до газополум'яного методу належить детонаційне напилення, що базується на використанні енергії детонації суміші кисень – горючий газ.



В обох випадках напилюваний матеріал, що має форму прутка або дроту, подають через центральний отвір пальника і розплавляють полум'ям горючої суміші. Розплавлені частинки металу підхоплюються струменем стисненого повітря і в дрібно розпиленому вигляді спрямовуються на поверхню виробу. Дріт подається із заданою швидкістю роликками.

Для напилення зазвичай використовують дріт діаметром не більше 3 мм, проте під час напилення легкоплавкими металами (алюміній, цинк тощо) в інтересах підвищення продуктивності процесу допускається використання дроту діаметром 5–7 мм.

Під час напилення порошком останній надходить у пальник зверху з бункера через отвір, розганяється потоком транспортного газу (суміш кисню з паливним газом, стисненим повітрям) і на виході з сопла потрапляє в полум'я, де відбувається його нагрівання. Захоплювані струменем гарячого газу частинки порошку потрапляють на поверхню, що наплавляється.

За газополум'яного способу напилювання здійснюється в основному тими матеріалами, температура плавлення яких нижча за температуру полум'я.

За газополум'яного напилювання порошком на відстані 60–70 мм від сопла температура полум'я перевищує 2 500 °С; у міру подальшого збільшення відстані вона поступово знижується: на відстані 100 мм температура становить 1 900 °С, на відстані 150 мм – 1400 °С.

Після напилення іноді проводять оплавлення покриття, що дозволяє отримати щільні практично безпористі покриття.

*Детонаційне напилення* – ударною хвилею у разі вибуху.

У камеру водоохолоджуваного стовбура установки подається кисень і ацетилен у певних кількостях; стовбур спрямовується на оброблювану деталь. Потім через спеціальний отвір у камері азотом подається порошок напилюваного матеріалу, наприклад, карбід вольфраму з додаванням невеликої кількості металу, оксид алюмінію тощо. Газову суміш, у якій у підвищеному стані міститься порошок, підпалюють електричною

іскрою. У результаті вибуху суміші відбувається виділення теплоти й утворення ударної хвилі, що розігріває і розганяє частинки порошку в напрямку до поверхні виробу.

Азот і горючий газ виходять зі стовбура установки відразу ж після вибуху, потім стовбур продувається азотом для видалення продуктів горіння.

Процес відрегульований так, що точно повторюється з частотою 3–4 циклу за секунду. За один цикл напилення отримують покриття товщиною 6 мкм.

*Електродугова металізація.* За такого методу напилення джерелом теплової енергії є електрична дуга, температура якої за сили струму 280 А досягає 6 100 К, збуджена між двома дротами, що подаються через два канали в пальнику металізатора, один із яких є матеріалом, що наноситься.

У разі дугового напилення на постійному струмі процес проходить стабільно, забезпечуючи отримання шару покриття з дрібнозернистою структурою за високої продуктивності процесу.

Температура дуги залежить від виду транспортного газу, складу електродного дроту, режимів напилення та інших параметрів. У разі використання металевих електродів і за сили струму дуги 280 А досягається температура понад  $6100 \pm 200$  К. Порівняно з газополум'яним напиленням електрометалізація дозволяє отримати більш міцні покриття, що краще поєднуються з основою.

*Плазмове напилення* – отримання покриття, за якого напилюваний матеріал, нагрітий плазмою (газом, у якому під дією температури, що перевищує 10000 К, значна частина атомів або молекул іонізована, а концентрація електронів і негативних іонів дорівнює концентрації позитивних іонів), розпоршується на поверхні основного матеріалу для утворення покриття.

Зазначеними методами наносять метали (Ni, Zn, Al, Ag, Cr, Cu, Au, Pt та ін.), сплави (сталь, бронзу та ін.), а також можливе нанесення хімічних сполук і неметалів.

Висока температура плазми дозволяє проводити напилення тугоплавких матеріалів.

Можливість регулювання температури й швидкості плазмового струменя шляхом вибору форми та діаметра сопла, режиму напилення розширює діапазон матеріалів, що напилюються (метали, кераміка, органічні матеріали).

*Електроімпульсне нанесення покриття* базується на імпульсному розряді конденсатора через дріт напилюваного металу. При цьому відбуваються вибухове плавлення дроту й осадження розплавлених частинок металу на поверхні виробу.

### ***Нанесення неметалевих покриттів***

Нанесення неметалевих покриттів можна здійснювати такими способами:

#### ***1. Хімічні та електрохімічні способи***

*Хімічне нанесення покриття* – утворення фосфатного, оксалатного або іонного хімічного неметалічного покриття на поверхні металевих виробів, занурених у розчин необхідного складу і витриманих у ньому за температури до 200 °С, застосовують в основному під час оброблення виробів із алюмінію, сталі, міді, срібла та інших металів для підвищення корозійної стійкості, як декоративні елементи або як ґрунтовку перед фарбуванням.

*Фарбування під час нагрівання* – реакція металів із газами, що призводить до утворення тонкої плівки, що надає різне забарвлення (кольору мінливості) залежно від її товщини.

*Тонування* – оброблення поверхні металу або покриття хімічним або електрохімічним способом для отримання неметалічного неорганічного шару з певним кольоровим відтінком.

*Оксидування* – оброблення металу і (або) покриття хімічним або електрохімічним способом, у результаті якого на його поверхні утворюється оксидна плівка; застосовується для запобігання від корозії та зношування, а також із декоративною метою.

Оксидування сталі – один із найдавніших способів захисту від корозії. Сьогодні застосовують хімічне та електрохімічне

оксидування сталі в лугах і кислих розчинах, оброблення парою, у розплавлених солях.

*Вороніння* – хімічне оксидування – отримання на поверхні виробів із вуглецевої та низьколегованої сталі й чавуну шару оксидів заліза товщиною 1–10 мкм; застосовують для декоративного оздоблення – додавання поверхні коричневого, темно-синього або чорного кольору різних відтінків зі збереженням металевого блиску.

## **2. Фізичні способи нанесення неорганічних покриттів**

*Нанесення лакофарбових покриттів* – створення на поверхні виробу одного або декількох тонких шарів плівки, що утворюється після затвердіння (висихання) лакофарбових матеріалів (рідких, пасто- або порошкоподібних складів), і утримується на поверхні силами адгезії. Лакофарбові покриття використовують для декоративного оздоблення виробів і їх захисту від корозії (метали) або гниття (деревина). Розрізняють нижні (грунтові), проміжні (шпаклювальні) і верхні (покривні) шари лакофарбових покриттів.

За складом і призначенням лакофарбові матеріали поділяють на лаки, шпаклівки, ґрунтовки, фарби (зокрема емалі).

Лаки – розчини плівкоутворювальних речовин в органічних розчинах, що застосовують для отримання прозорих захисних і декоративних покриттів або для електроізоляційного просочення різних матеріалів, а також для приготування емалевих фарб, ґрунтовок, шпаклівок.

Шпаклівки – пастоподібні суміші, що містять плівкоутворювальні речовини (алкідні або епоксидні смоли) і велику кількість наповнювачів (крейда, тальк тощо), які застосовують для вирівнювання шорсткуватих, пористих, хвилястих поверхонь перед їх фарбуванням. Можуть використовуватися для закладення пазів, стиків, вибоїн, клепаных і зварених швів.

Ґрунтовки – матеріали, основними компонентами яких є плівкоутворювальні речовини і пігменти, що утворюють нижні

шари лакофарбових покриттів і використовуються в основному для створення надійного зчеплення з поверхнею, що фарбується.

Фарби – однорідні суспензії пігментів у плівкоутворювальних речовинах (сполучних), які також можуть містити матуючі речовини, пластифікатори, розчинники та інші речовини. Фарби залежно від в'язучих речовин поділяють на олійні фарби, як сполучні використовують оліфи, емалеві фарби, зв'язувальні речовини – лаки, емульсійні та клейові фарби, на основі дисперсних і водних розчинів полімерів, силікатні фарби на основі рідкого скла. Особливим видом фарб є порошкові фарби на основі синтетичних плівкоутворювальних речовин і пігментів, що використовують для отримання покриттів методом напилення. Під час нанесення на поверхню тонким шаром утворюють непрозорі міцні плівки, що додають поверхні гарного зовнішнього вигляду й захищають її від шкідливого впливу середовища.

*Інгібування* – це захист поверхні виробів речовинами, що гальмують хімічні процеси, такі як корозія, полімеризація, окиснення тощо.

Захисні препарати – інгібітори – діляться на дві групи: засоби для просочення пакувальних матеріалів і засоби для створення на поверхні виробів захисної плівки.

Для захисту від дій сірки на срібло і його сплави, а також для мідних сплавів широко використовують різні тіо- і аміноорганічні з'єднання. Найпростішим сірковмісним інгібітором для срібла є тіосечовина  $CS(NH_2)_2$ .

Щоб вироби з міді та її сплавів не тьмяніли, на їх поверхні створюють штучну пасивну плівку, тобто переводять поверхневий шар матеріалу з активного (у хімічному відношенні) у пасивний стан. Для цього вироби витримують в 10%-му розчині біхромату калію  $K_2Cr_2O_7$  упродовж 10–15 с, після чого вироби ретельно промивають і висушують у струмені теплого повітря.

*Емалювання* – це процес з'єднання склоподібно-силікатного або склокристалічного матеріалу (емалі) із металом, тобто створення системи «емаль–метал», для захисту його від

корозії, стирання, високих температур, а також надання гарного зовнішнього вигляду. В емальованих виробках вдало поєднуються механічна міцність металу з хімічної стійкістю скла і його декоративними характеристиками – блиском і забарвленням.

Емаль (матеріал) – склоподібна застигла маса, отримана в результаті плавлення або спікання, має неорганічний, здебільшого оксидно-силікатний склад, наплавляється в один або кілька шарів із додаванням на виріб із металу, для поліпшення якості поверхні та формування нових технічних і функціональних властивостей одержуваної нової системи.

### ***3. Механічні способи нанесення покриттів***

*Напилення* – нанесення речовини в дисперсному стані на поверхню виробів і напівфабрикатів для надання їм спеціальних фізико-хімічних, механічних, декоративних властивостей або для відновлення дефектної поверхні. Розрізняють такі методи напилення неметалічних матеріалів: газоплазмове, вихрове, в електричному полі, електровихрове.

Менш поширені – струминне, полум'яне й деякі інші методи. Зазначеними методами наносять хімічні сполуки (силіциди, бориди, карбіди, оксиди тощо) і неметалеві матеріали (пластмаси). Товщина напилюваного шару залежить від методу, режиму напилення і необхідних властивостей.

Напилення полімерів – метод, отримання тонкошарових покриттів і тонкошарових виробів шляхом нанесення порошкоподібних полімерних композицій на поверхню виробів (деталей). Захисна плівка утворюється у разі нагрівання виробів (деталей) із нанесеним шаром порошку вище за температуру плавлення полімеру або у разі витримування в парах розчинника, в якому полімер набухає.

*Вакуумне напилення* – отримання шару матеріалу на поверхні виробів випаровуванням у вакуумі. Процес плазмового хімічного вакуумного напилення гідрованого аморфного вуглецю використовують для отримання покриття з красивим чорним відтінком, що нагадує китайський лак. Таке покриття

відрізняється високою міцністю й внутрішньої пружністю, а отже, зносостійкістю, навіть на такому м'якому металі, як золото.

Матеріали придатні як підшар: дорогоцінні метали й сплави, нержавіюча сталь, титан, алюміній, мідь, кераміка. Застосовують у годинниковій та ювелірній промисловості.

## ЛЕКЦІЯ 12

### Наноматеріали та нанотехнології

*Наноструктурні матеріали* (НМ) – це новий клас матеріалів, що мають унікальні властивості завдяки нанорозмірним структурним елементам – морфологічним одиницям, із яких вони складаються.

*Наноматеріалознавство* – комплексна міждисциплінарна сфера діяльності, що поєднує фундаментальну й прикладну науку, технологію та виробництво.

Її завданнями є:

- поліпшення характеристик традиційних матеріалів;
- створення нових матеріалів із унікальними, наперед заданими властивостями;
- дослідження структури на різних масштабно-часових рівнях для вдосконалення матеріалів і прогнозування їх поведінки за різних умов експлуатації;
- вивчення спектра властивостей (фізико-механічних, фізико-хімічних, теплових, електричних, магнітних, оптичних тощо) у широкому діапазоні умов, включаючи екстремальні;
- розвиток теоретичних основ, що дозволить передбачати властивості матеріалів на основі фізичних моделей різного рівня (електронного, атомарного, кластерного, мезоскопічного);
- розроблення програм для комп'ютерного моделювання, аналізу й дизайну матеріалів із використанням апарату квантової механіки, методів молекулярної динаміки, кінцевих елементів, динаміки структурних дефектів тощо;

- оптимізація вибору матеріалів під час конструювання виробів, розроблення нових принципів конструювання та складання;
- створення нових та вдосконалення традиційних технологій виробництва, оброблення, діагностики та утилізації матеріалів;
- пошук нових сфер і способів застосування наноматеріалів.

Загалом наноструктурні матеріали мають задовольняти всю сукупність вимог, що ставлять до звичайних матеріалів.

Властивості матеріалу визначаються передусім хімічним складом, технологією отримання, режимами та методами термочасового оброблення у разі дії зовнішніх чинників та реальною структурою на різних рівнях.

Особливості наноматеріалознавства полягають у такому:

1. Зменшення характерних розмірів  $R$  морфологічних одиниць (окремих частинок, зерен полікристалів, пор, включень інших фаз тощо) до  $R < 100$  нм спричиняє істотні зміни усіх фізико-хімічних властивостей речовини. У цьому приховуються значні резерви модифікації відомих матеріалів і створення абсолютно нових, із унікальними властивостями. У результаті матеріалознавство перетворюється з емпіричної суми знань технічної дисципліни на фундаментальну науку.

2. Оперування нанооб'єктами, створення наноструктурних матеріалів і виробів, їх атестація і контроль потребують специфічних підходів, прийомів, технічних рішень. У нанотехнологіях (НТ) важливу роль відіграють дифузійні та міграційні процеси, самоорганізація структури, самозбирання. Основним принципом НТ є заміна традиційних технологій «зверху – вниз», тобто перехід від великого до малого через відсікання непотрібного, до принципу «знизу – вверху», тобто від малого до великого шляхом безвідходного дизайну або самозбирання з окремих атомів, молекул або їх кластерів.

3. Переваги використання наноматеріалів та нанотехнологій досить різноманітні, але не завжди можуть бути прогнозовані. Нанотехнології істотно змінюють електроніку,



обчислювальну техніку, телекомунікаційні системи, медицину, екологічну безпеку, оборонну сферу, освіту, побут тощо.

НТ можуть запропонувати низку перспективних рішень: об'ємне й поверхнєве зміцнення за рахунок трансформації традиційних матеріалів у наноструктурний стан, розроблення нових наноконпозиційних матеріалів і покриттів, мікроелектро-механічних пристроїв для навігації та управління польотами та багато іншого.

Г. Глейтер запропонував три класи НМ:

- наночастинки;
- наношари, плівки, поверхнєві структури;
- об'ємні наноструктурні матеріали.

Однак наноматеріали слід розглядати в межах більш широкої класифікації (рис. 12.1), яка враховує різноманітність структур і функцій об'ємних НМ та їх високу значущість для практики. При цьому необхідно дотримуватись такої схеми: методи отримання → властивості → діагностика та атестація → сфери застосування.



Рисунок 12.1 – Основні типи наноматеріалів

Безумовно, будь-які класифікації та межі між окремими групами матеріалів умовні. Так, фулерени, нанотрубки, біомолекули, міцели можна вважати наночастинками, але дуже специфічними; нанокласти можуть бути створені різними технологіями (керамічній або біотехнології тощо). Проте міждисциплінарні межі, традиції, термінологічні переваги, інші подібні міркування часто відіграють вирішальну роль у віднесенні конкретного об'єкта до того чи іншого класу.

### ***Неорганічні наноматеріали***

***Класти*** – це дисперсні фази величиною порядку 1 нм та менше. Кластерами є групи близько розташованих, тісно пов'язаних один із одним атомів, молекул, іонів. Найменша

кількість атомів у кластері дорівнює двом. Верхній межі кластера відповідає така кількість атомів, коли додавання ще одного вже не змінює властивостей кластера. Залежно від форми та способу пакування цьому критерію відповідають частинки, що складаються з  $10^3$ – $10^5$  атомів.

Кластери часто називають «ною фазою речовини». Завдяки дискретній структурі їх електронних спектрів і великому значенню відношення поверхня/об'єм кластери мають характерні фізико-хімічні властивості, які відмінні від властивостей як окремих складових їх частинок, так і об'ємної речовини. Саме на рівні кластерів активно проявляються найрізноманітніші квантові ефекти. У деяких випадках установлено граничну кількість атомів, починаючи з якої у кластері проявляються певні характеристики макроскопічної речовини.

### ***Механізми зародження кластерів***

Існує два погляди на механізм початкової стадії зародження кластерів:

1. Термодинамічна, згідно з якою у переохолодженій (пересиченій) парі спонтанно виникають стійкі зародки, радіус яких визначають за умови термодинамічної рівноваги фаз із використанням мікроскопічного поверхневого натягу. За таких умов енергія кристалізації витрачається на утворення поверхні.

2. Кінетична, згідно з якою димери утворюються у разі потрібного зіткнення атомів, причому один із них забирає теплоту конденсації і розсіює її в газі або віддає стінкам посудини. До димеру може приєднатись третій атом і так далі.

Головну роль у процесі зростання частинок відіграє більш холодний газ – носій (буферний газ), який здатний приймати і розсіювати теплоту конденсації. Утворення стійких кластерів повинно починатися на деякій відстані від випаровувача, що задає внутрішню межу зони конденсації.

### ***Наночастинки та нанопорошки***

Наночастинки можуть бути ізольованими або оточеними газоподібним, рідким чи твердим середовищем, мати рівноважну форму, близьку до сфери або багатогранника, форму лусок, стрижнів, кілець та різних комбінацій цих структур. Вони можуть створюватися людиною в результаті виробничої діяльності або конструюватися чи синтезуватися спеціально.

Найбільш прості та продуктивні методи розпорошення струменя розплаву рідиною або газом. Реалізовано багато схем із співіснуючими потоками розплаву та розпилювального середовища, спрямованими під кутом один до одного, з відцентровими розпилюваними голівками, що обертаються, і електродами (рис. 12.2).

Як диспергувальне середовища застосовують інертні гази (азот, аргон та ін.) або рідини (воду, спирти, ацетон) тощо.

Цими методами зазвичай отримують порошки металів і сплавів із розмірами частинок  $\sim 100$  нм.

У разі розпорошення розплаву критичний розмір краплі можна оцінити зі співвідношення між її кінетичною енергією та енергією поверхневого натягу.

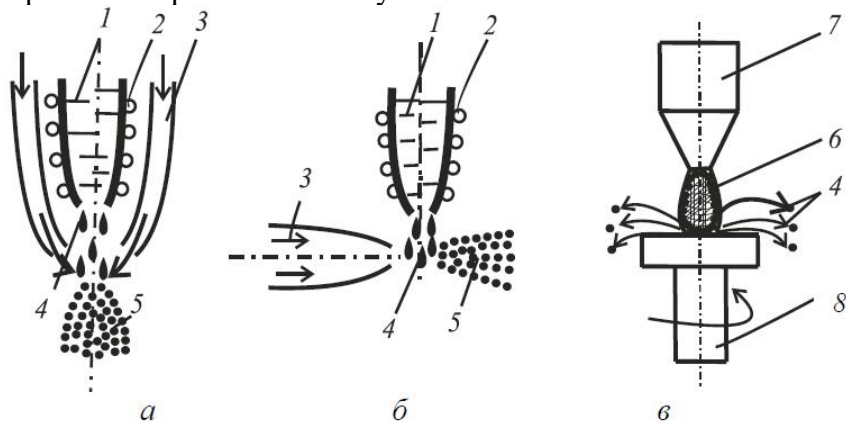


Рисунок 12.2 – Схеми отримання нанопорошків методом розпорошення рідкого розплаву:

а – співвісним потоком інертного газу; б – перпендикулярним потоком; в – в електричній дузі на електроді, що обертається.

1 – розплав; 2 – нагрівач; 3 – інертний газ; 4 – краплі розплаву; 5 – диспергований матеріал; 6 – електрична дуга; 7 – нерухомий електрод; 8 – електрод, що обертається

За необхідності отримання частинок із розмірами в одиниці – десятки нанометрів використовують метод подвійного розпорощення, у якому розплав спочатку насичують під високим тиском розчинним газом, а потім розбризкують його та диспергують інертним газом. Швидке охолодження крапель призводить до вибухоподібного виділення розчиненого газу та їх руйнування на дрібніші частинки.

Загальними перевагами фізичних методів є висока продуктивність, широкий діапазон матеріалів, що можуть бути дисперговані, а недоліками – забрудненість продукту (особливо киснем), великий розкид розмірів отримуваних частинок, необхідність спеціального устаткування. Частково ці недоліки компенсуються застосуванням вакуум-сублімаційної технології, що полягає в розчиненні оброблюваної речовини у відповідному розчиннику, заморожуванні розчину і подальшій його сублімації у вакуумі.

Не менш поширені методи механічного подрібнення твердих тіл. Вони здійснюються у млинах різних типів: кульових, планетарних, струменевих, вихрових, вібраційних, дезінтеграторах, атриторах.

Методи тонкого помелу застосовують у промисловості, фармакології, будівельній індустрії. Проте забруднення продукту матеріалом тіл, що змелюють, і суттєва різниця розмірів та форм вихідних частинок обмежують застосування механічних методів для отримання високочистих і монодисперсних продуктів. Різновидом механічних способів можна вважати оброблення сировини детонаційною хвилею. Цим методом вдається

отримувати нанопорошки оксидів Al, Ti, Zr та інших твердих матеріалів, зокрема частинки алмазу з розмірами менше 10 нм.

Більш комплексне та глибоке перероблення сировини забезпечують фізико-хімічні методи, що змінюють не тільки розміри та структуру частинок, а й їх хімічний склад. На відміну від сухої механохімічної технології їх проводять у рідкому стані реагентів (розчинах, гелях, колоїдах) або у разі газофазних реакцій. Найбільш поширеним є золь-гель-метод, методи осадження з розчину, сушки, сублімації, методи відновлення оксидів металів газами ( $H_2$ , CO), гідридами металів, гідрaziном, формальдегідом, гіпофосфітом та ін.

З допомогою золь-гель-технології неорганічних матеріалів отримано нові види тонкої кераміка, тонкі плівки з унікальними фізичними властивостями, оптичні середовища, неорганічні композити, нанокompозити. Значна кількість наукових розробок присвячена золь-гель-технологіям оксидних матеріалів, що пов'язано із застосуванням цих матеріалів у напівпровідниковій газочутливій сенсориці, каталізі, волоконній оптиці. Особливий інтерес викликають синтез та дослідження органо-неорганічних нанокompозитів, зокрема створення структур типу дендримерів.

### *Об'ємні наноструктурні матеріали*

Об'ємні матеріали можна розділити на конструкційні та функціональні. Основне призначення конструкційних матеріалів – витримувати механічне навантаження впродовж певного часу в заданих умовах експлуатації і задовольняти вимоги мінімізації маси конструкції, її функціональності, надійності, економічності. Основними характеристиками конструкційних матеріалів є: модуль Юнга; межі текучості, міцності, втоми; зносостійкість; в'язкість руйнування (критичний коефіцієнт інтенсивності напруження для гострих концентраторів і тріщин  $K_{Ic}$ ). Майже всі фізико-механічні характеристики наноструктурних матеріалів є структурно чутливими.

Основне завдання наноструктурного матеріалу – забезпечення високих характеристик міцності.

Причому позитивний ефект досягається не завдяки легувальним компонентам високої вартості, а лише шляхом зміни структури.

Це покращує техніко-економічні показники виробу. Зокрема, зростання напружень, що допускається під час експлуатації, у разі граничного навантаження дозволяє зменшити перетин елементів конструкції, а отже, і її габаритні характеристики. Інша можливість для досягнення цієї мети полягає в розробленні й застосуванні матеріалів із меншою, ніж у конструкційних сталей, густиною: полімерів, композитів, керамік, сплавів на основі Al і Ti. У тих випадках, коли маса конструкції має визначальне значення, доцільно використовувати питомі механічні характеристики, що нормуються на щільність матеріалу.

Існує декілька підходів, що використовують під час формування об'ємних НМ: компактування порошків, контрольована кристалізація аморфних сплавів, інтенсивна пластична деформація об'ємних зразків, вирощування їх на підкладці з парової або рідкої фази і деякі інші.

Залежно від геометрії початкових компонентів, характеру прикладеного навантаження, процесів рекристалізації можуть формуватись морфологічно різні структури.



Рисунок 12.3 – Методи отримання об'ємних наноматеріалів

### ***Наноалотропи вуглецю***

Синтез вуглецевих фулеренів (каркасних кластерів вуглецю  $C_n$ ) і нанотрубок – одно- або багаточарових циліндрів,



стілки яких утворені гексагонами  $C_6$ , – відкрив сучасний етап у розвитку уявлень про алотропію вуглецю й ініціював проведення численних експериментальних і теоретичних робіт із пошуку і одержання нових нанорозмірних форм (наноалотропів) вуглецю.

**Фулерени** – молекулярні форми  $sp^2$ -вуглецю, що складають один із найбільш цікавіших і досліджених класів наноалотропів вуглецю. Ці порожнисті квазінульвимірні 0D-системи являють собою опуклі замкнуті багатогранники, що складаються з трьох координованих  $sp^2$ -атомів вуглецю. Для існування таких замкнутих багатогранників, що побудовані з  $n$  вершин і мають лише п'яти- і шестикутні грані, згідно з теоремою Ейлера необхідна наявність 12 п'ятикутних граней і  $(n/2-10)$  шестикутних граней.

Структурними блоками «класичних» вуглецевих фулеренів є п'яти- і шестичленні кільця – пентагони  $C_5$  і гексагони  $C_6$ . Найбільш відомий стабільний фулерен  $C_{60}$  має форму зрізаного ікосаедра симетрії  $I_h$ , де вуглецеві атоми утворюють багатогранник, що складається з 20 гексагонів  $C_6$  і 12 пентагонів  $C_5$ .

Фулерени можуть брати участь у різних реакціях приєднання, заміщення, полімеризації. У результаті, крім ендоедральних комплексів, фулерени можуть утворювати хімічні сполуки з атомами, групами, молекулами, що приєднують зовні оболонки (екзопохідні). При цьому остов  $C_{60}$  може зберігати свою форму або розширюватися. Синтезовані також і гетерофулери, у яких деякі атоми вуглецю заміщені іншими атомами.

**Нанотрубки** (НТ) – порожнисті протяжні (квазіодновимірні) наноструктури циліндричної морфології, стінки яких утворені гексагонами  $C_6$ .

Нанотрубки виявилися надзвичайно привабливими матеріалами для надмініатюрних елементів наноелектроніки, атомно-силової мікроскопії, польових та електронних емітерів, широко обговорюються перспективи використання НТ як акумуляторів газів (зокрема водню), газових датчиків,

нановібраторів, елементів наномашинерії тощо. Продовжуються роботи з використання вуглецевих трубок у тонкому хімічному синтезі, біології та медицині. Такі технічні застосування неорганічних нанотрубок базуються на їх унікальних структурних, електронних, електромагнітних, механічних та термодинамічних властивостях.

Багатостінні вуглецеві нанотрубки на відміну від одностінних складніші за структурою та зазвичай містять більше різних дефектів. Їх зовнішній діаметр може варіюватися в діапазоні від одиниць до десятків нанометрів, а довжина – від часток до одиниць мікрометрів. Внутрішній діаметр зазвичай становить 1–2 нм.

**Графен** привертає велику увагу як самостійний  $sp^2$ -наноалотроп. Графен є моношаром графіту і складається з  $sp^2$ -атомів вуглецю, що утворюють гексагональну двовимірну кристалічну ґратку. Графенові пластинки можуть бути отримані у разі механічного впливу на графіт, коли проводять послідовне «відщеплення» усе більш тонких шарів графіту, поки не буде отриманий графітовий моношар (графен).

Графен одержують термічним розкладанням SiC. Відомо також низку хімічних способів розділення графіту на моношари, наприклад, під дією сірчаної або соляної кислоти.

Запропоновано також спосіб одержання графену в слабколужному середовищі: звичайній дистильованій воді з додаванням розчину аміаку. Підвищення рН розчину приводить до збільшення електростатичного заряду на поверхні вуглецевих «лусочок», які починають відштовхуватися.

Інтерес до графену зростає у зв'язку з можливостями його застосування у спінтроніці, зокрема як матеріалу клапанів спінів, фільтрів спінів тощо.

Крім фулеренів, нанотрубок і графену, відомо багато інших  $sp^2$ -наноалотропів, структура яких утворена різними вуглецевими циклами (Cn). У складі цих наноалотропів атоми вуглецю мають трикратну координацію і  $sp^2$ -електронну конфігурацію. Найбільш досліджені вуглецеві конуси, тори, а

також група так званих шварцонів – фулеренів від'ємної кривизни, що утворюються за рахунок вбудовування у структуру графенової сітки гептагонів  $C_7$ , що відповідають за утворення ділянок із від'ємною кривизною. Шварцони можуть поєднуватися у впорядковані структури – кристали, які називають шварцитами.

## ЛЕКЦІЯ 13

### Наноконпозиційні матеріали

*Композиційні матеріали* містять дві або більше різних фаз, сполучених у процесі зростання, просочення, змішування, компактування дрібнодисперсних фракцій тощо. Провести чітку межу між наноконползитами та багатофазними об'ємними нанострукторними матеріалами досить важко. Їх отримують подібними методами, значну роль відіграють структура міжфазних меж, сила зчеплення між окремими морфологічними одиницями, ступінь термодинамічної стійкості тощо.

Іноді до композитів відносять дисперснозміцнені сплави (ДС). Зміцнення у них досягається шляхом штучного старіння матеріалу, що заздалегідь гомогенізують гартуванням із області твердого розчину. У результаті розпаду пересиченого розчину виділяються дисперсні частинки, що блокують процеси утворення та переміщення дислокацій. Класичні приклади ДС – дуралюміні та жароміцні хромонікелеві сплави з домішками Мо, W, В. Деякою мірою процес виділення зміцнювальної фази під час термооброблення ДС нагадує утворення нанокристалів у разі керованої кристалізації з аморфної фази.

Матриця, у якій розміщено наповнювач, може бути рідкою або твердою. Наноструктурні рідини (колоїди, гелі, суспензії, полімерні композиції) використовують як змащувально-охолоджувальне середовище, герметики, середовище з керованими зовнішніми полями та фізичними властивостями (наприклад, що змінюють в'язкість під дією магнітного поля в гідромуфтах; коефіцієнти заломлення, повороту площини поляризації під дією електричних і магнітних полів у

рідкокристалічних індикаторах та дисплеях). Надзвичайно важливою рідиною є вода, у якій за різних температурних інтервалів можуть утворюватися різні асоціати нанометрових розмірів. Це впливає на їх властивості та функціонування біооб'єктів і живих організмів.

Відповідно до природи основи розрізняють металеві, керамічні, полімерні та біокомпозити. Деякі об'єкти можуть бути віднесені як до одного, так і до іншого класу.

Для віднесення композиту до наноматеріалів необхідно, щоб хоча б одна фаза у певному напрямі мала нанометрові розміри (зазвичай  $< 100$  нм). Нанорозмірна фаза може розташовуватися всередині крупніших зерен матриці або на їх межах. У граничному разі всі компоненти композиту можуть мати нанометрові розміри. Крім розмірів та характеристик частинок кожної фази, істотну роль у формуванні всього комплексу властивостей відіграють сили зчеплення між ними. Тому в технології має бути приділена увага як методам приготування окремих компонентів, так і їх змішуванню та консолідації.

Одне з найважливіших завдань під час створення конструкційних композитів – забезпечити передавання навантаження з матриці на зміцнювальні елементи. Для поліпшення зчеплення вуглецевих волокон із матрицею у композиті часто застосовують покриття нанотрубок додатковою оболонкою кремнію завтовшки у декілька десятків атомних шарів. Характерно, що чим міцніше волокно, тим більш довгим воно має бути для забезпечення надійного зчеплення з матрицею.

### ***Нановіскери***

Спрямоване зростання ниткоподібних кристалів, або віскерів (від англійського слова whiskers – вуса), на поверхнях, активованих краплинами каталізатора, було відкрито Вагнером і Еллісом в експериментах із газофазного осадження кремнію з пари  $\text{SiCl}_4$  і  $\text{H}_2$  на поверхні  $\text{Si}(111)$ , активованій золотом.

Ключовий ефект активації поверхні полягає в тому, що зростання на поверхні під краплиною відбувається значно швидше, ніж на неактивованій частині поверхні.

Для пояснення механізму формування ниткоподібних кристалів на активованих поверхнях був запропонований механізм зростання «пар – рідина – кристал», суть якого полягає у такому. Припустимо, що в системі створені такі умови, за яких епітаксіальне зростання на неактивованій поверхні достатньо повільне, і адсорбція речовини з газоподібного середовища відбувається переважно на поверхні краплини розчину. У разі газофазної епітаксії такі умови зростання зазвичай забезпечуються низькою температурою поверхні, за якої швидкість хімічної реакції на поверхні підкладки невелика.

Крім того, віскери зазвичай вирощують на тій поверхні, для якої звичайне епітаксіальне зростання кристала відбувається найповільніше, наприклад, на поверхні Si(111) для кремнію.

Адсорбція речовини на поверхні краплини призводить до того, що розчин стає перенасиченим і кристалізується на поверхні підкладки під краплиною. Як наслідок, під краплиною росте кристалічний стовпчик із розміром у площині зростання (латеральним), що приблизно дорівнює діаметру краплини, а сама краплина рухається вгору зі швидкістю, що дорівнює швидкості росту віскера. За невисоких перенасичень газоподібного середовища зародкоутворення на бічних гранях віскера дуже мале, тому розширення віскера в латеральному напрямі не відбувається.

Напівпровідникові нановіскери є одновимірними квантоворозмірними об'єктами, які мають унікальні транспортні й оптичні властивості. Це робить їх дуже перспективними елементами для створення нового покоління польових транзисторів із товщиною провідного каналу всього декілька нанометрів і світловипромінювальних приладів із наднизьким споживанням енергії.

## ***Нанопористі матеріали***

Усі пористі матеріали поділяють на три класи: нанопористі (характерний розмір пор  $R < 2$  нм), мезопористі ( $2 < R < 50$  нм) та макропористі ( $R > 50$  нм). Нанопористі матеріали можна розглядати як наноконпозиційні, у яких пори відіграють роль другої фази, випадково або закономірно розподіленої у матриці. Є декілька фізичних причин для того, щоб їх виділити в окремий клас матеріалів. Наявність великої кількості пор або каналів розмірами 0,3–10 нм додає нанопористим матеріалам низку унікальних фізичних властивостей.

Велика відносна кількість атомів, що знаходяться на поверхні та у приповерхневих шарах із високою кривизною, може радикально змінити властивості самого матеріалу, як і властивості атомів та молекул, адсорбованих порами з навколишнього середовища.

Важливим параметром пористих тіл є проникність для газових та рідких середовищ. За нанорозмірних пор вона може стати різною для молекул, тобто нанопористі матеріали можуть використовуватися в селективних молекулярних ситах та фільтрах. Нанопористі матеріали застосовують у протигазах, системах автономного життєзабезпечення на підводних човнах та космічних станціях, можуть використовуватися у фільтрах для тонкого очищення повітря та води від забруднень (зокрема від хімічних і бактеріологічних, отруйних речовин). Для їх ефективної роботи важливо перевищити перколяційну межу, за якою не зв'язані між собою пори та канали починають утворювати крізні проходи для пропускання плинного середовища.

Особливої цінності набувають матеріали з крізними каналами правильної геометричної форми і однаковими розмірами, оскільки чим менший розподіл останніх, тим кращі селективні властивості фільтру. Важливими параметрами нанопористих матеріалів є термочасова та хімічна стабільність, механічна міцність, вартість, технологічність.

У хімічній, металургійній, біотехнологічній промисловостях одним із популярних типів нанопористих матеріалів є цеоліти – алюмосилікати, що отримують з особливих глин. Після спеціального термооброблення в них формуються пори розмірами  $\sim 0,1\text{--}10$  нм, що утворюють тривимірну структуру з крізними каналами. Розмір пор залежить від кількості атомів кисню в циклічних структурах. Це дозволяє пристосовувати матеріал на поглинання певних молекул або розділення їх сумішей у мембранних фільтрах. Зокрема, алюмосилікати містять впорядковані циліндричні пори діаметром  $2\text{--}10$  нм із малою дисперсією розмірів та характеризуються високою селективністю.

Ще одна перспективна сфера нанопористих середовищ – створення на їх основі нових магнітних матеріалів із унікальними властивостями шляхом заповнення пор магнітними наночастинками.

### *Функціональні матеріали*

Розвиток електроніки, обчислювальної та телекомунікаційної техніки, космонавтики, медицини визначив низку проблем щодо створення нових матеріалів із наперед заданими магнітними, електричними, оптичними, теплофізичними, п'єзоелектричними, надпровідними та іншими властивостями. Зокрема, можна згадати провідні та магнітовпорядковані полімери для електроніки, біосумісні матеріали для хірургії та імплантації, сплави з пам'яттю форми, екрануючі та теплозахисні матеріали (захищають від електромагнітного та іонізуючого випромінювання), іонні провідники, ядерні матеріали тощо. Такі матеріали називають функціональними.

У матеріалознавстві формується нова концепція конструювання так званих «інтелектуальних», або «розумних» матеріалів, які можуть адаптуватися до зовнішніх умов, що змінюють властивості у заданому напрямі самі, без участі людини або дій, що керують цими процесами.

### ***Текстильні наноматеріали***

Хіміки й текстильники розробили технологію отримання надміцного текстильного волокна, що складається з великої кількості нанотрубок, які скріплюють між собою полімерним наповнювачем. Такі волокна використовують у виробництві тканин для куленепробивних жилетів, спортивного інвентаря тощо. Створені лляні тканини, що просочені наночастинками із заданими властивостями.

Оболонка з наночастинок на кожному волокні робить тканину такою, що не мнеться та є водовідштовхувальною. Те саме лляне волокно має унікальні гігієнічні та медикаментозні властивості завдяки наявності в ньому специфічних наноструктур.

### ***Інтелектуальні матеріали***

Це матеріали, що мають властивості цілих пристроїв і здібності оцінювати поточний стан (сенсорна функція), ухвалювати рішення (обробляти інформацію, що надходить, – процесорна функція) і змінювати свої характеристики (ефекторна функція).

Матеріалів, що повною мірою відповідають цим критеріям, дотепер не існує, але ряд функцій вже реалізовано з допомогою різних наноструктур.

Усі інтелектуальні матеріали можна умовно розділити на два класи. Перші – змінюють свої властивості (хімічні, механічні, електричні, магнітні) під дією зовнішніх чинників та навколишнього середовища. Наприклад, фотохромне скло змінює колір, прозорість, інші характеристики під дією світла.

Споріднені матеріали змінюють колір у результаті впливу теплоти, механічних напружень або електричних полів. Матеріали іншого типу перетворюють енергію одного виду в другий і використовують фотовольтні, термоелектричні, п'єзоелектричні, електромагнітострикційні, фотолюмінесцентні ефекти. Вони можуть використовуватись для створення сенсорів, перетворювачів, актуаторів, інтегрованих електромеханічних систем. Зокрема, створені стекла та полімери, що змінюють



прозорість, забарвлення та інші характеристики під дією світла, теплоти, механічних чинників, електричних полів тощо. Розроблені сплави з пам'яттю форми, які здатні істотно змінювати розміри й форму в результаті незначної зміни температури.

Однією з найбільш перспективних стратегій у розробленні інтелектуальних матеріалів є наближення їх за функціональними можливостями до тканин живих організмів. Як структурні елементи можуть бути використані нановолокна, нанотрубки, фулерени, полімерні наноконпозиції, багатошарові покриття тощо.

### ***Тонкі плівки та покриття***

Створення тонких плівок та покриттів на поверхні матеріалу дозволяє значно змінити його властивості, не зачіпаючи об'єму, або об'єднати властивості різних матеріалів.

Покриття й тонкі плівки наносять з різною метою, а саме:

- підвищення зносостійкості, термо- та корозієстійкості конструкційних, інструментальних та інших матеріалів;
- створення планарних острівкових одно- та багатошарових плівок і гетероструктур для мікро- /наноелектроніки, оптоелектроніки, сенсорики;
- зміна оптичних характеристик поверхні (фотохромне скло, лінзи, дзеркала);
- створення магнітних середовищ для запису й зберігання інформації;
- розроблення оптичних засобів запису та зберігання інформації;
- створення поглиначів, сепараторів газових сумішей, каталізаторів, хімічно модифікованих мембран.

Є два принципових підходи щодо поліпшення функціональних характеристик поверхні, зокрема:

- модифікація приповерхневих шарів відповідним обробленням (хімічним, термічним, механічним, радіаційним або їх комбінацією);
- нанесення додаткових шарів або чужорідних атомів.

Серед різних способів нанесення покриттів можна виділити декілька найбільш популярних, що об'єднуються у дві групи: фізичне та хімічне осадження з парової фази (відповідно PVD і CVD). У обох випадках процес здійснюють у камері, де створюється невеликий тиск (0,1–10 Па) технологічного газу ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $C_2H_2$ , Ar).

### ***Рідкі кристали***

Речовини, які в певному температурному інтервалі вище точки плавлення поєднують одночасно властивості рідин (текучість, здатність утворення краплин) та кристалічних тіл (анізотропію), називають рідкими кристалами. Загальною ознакою рідких кристалів є наявність дальнього орієнтаційного порядку в розташуванні асиметричних молекул. Асиметрична форма молекул рідких кристалів забезпечує анизотропію поляризації та тенденцію до розташування молекул переважно паралельно одна до одної вздовж їх довгих (каламитики та санидики) і коротких (дискотики) осей. Молекули рідких кристалів (мезофаз) мають подовжену палицеподібну форму, чергуються лінійними або циклічними атомними угрупованнями.

Усі рідкі кристали поділяють на термотропні та ліотропні.

Утворення термотропних рідких кристалів відбувається лише за термічної дії на речовину. Зокрема, смоли та стекла одночасно мають властивості твердих тіл та в'язких переохолоджених рідин. Так, кристали бензойнокислового холестерину за 418 К плавляться, утворюючи мутну рідину, що за 452 К переходить у прозорий розплав. Якщо цей розплав охолоджувати, то за  $T < 450$  К він набуває синього кольору, який швидко зникає, і рідина стає мутною, а за 418 К забарвлення з'являється знову і речовина кристалізується.

Перехід твердого тіла в рідинно-кристалічне супроводжується руйнуванням дальнього порядку розташування центрів мас молекул за збереження упорядкування їх орієнтації. Перехід рідких кристалів у ізотропну рідину супроводжується повним руйнуванням дальнього порядку та зміною орієнтації молекул.

Ліотропні рідкі кристали утворюються під час розчинення асиметричних об'єктів у відповідних розчинниках.

За ступенем молекулярного упорядкування рідкі кристали поділяють на нематичні (параазоксіанізол, розчини синтетичних поліпептидів), смектичні (етилловий ефір азоксибензойна кислота, водні розчини мил) та холестеричні (пропиловий ефір холестерину).

Кожний тип рідких кристалів формує характерні текстури, за якими їх можна ідентифікувати.

Рідкі кристали застосовують у системах оброблення та відображення сигналів, що використовують їх електричні властивості (електронні індикатори, мікрокалькулятори, керовані екрани, оптичні затвори, медичні індикатори тощо). Широке застосування мають монодоменні шари нематиків, у яких напрями орієнтації молекул на поверхнях утворюють між собою кут  $90^\circ$ . За таких умов орієнтація осей молекул усередині зазора між пластинами залежить від їх відстані до поверхонь. В оптичних комірках плоский шар рідкого кристала обмежений скляними пластинами з нанесеними на них прозорими електродами.

Товщина шару фіксується діелектричними прокладками (слюда, тефлон, поліетилен), які розташовані між пластинами.

Підключення до електродів електричної напруги призводить до зміни орієнтації молекул, унаслідок чого змінюється коефіцієнт поглинання світла. Такі комірки використовують в керованих оптичних трансформаторах та телевізорах із рідкокристалічним екраном.

### ***Полімерні, біологічні та біосумісні матеріали***

Полімерні та біологічні матеріали мають складну ієрархічну структуру, і кожен ієрархічний рівень (атоми, сегменти ланцюгів, упорядковані кластери – кристаліти, ламелі, блоки тощо) взаємодіє з іншими та впливає на їх поведінку.

Оскільки теоретична міцність  $\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{V}{L}} = \frac{F \cdot L}{V}$  зв'язку, що забезпечує стійкість більшості полімерних молекул, дуже висока, можна значно поліпшити фізико-механічні параметри реальних

пластмас шляхом оптимізації їх молекулярної та надмолекулярної структур. Визначальну роль можуть відіграти нанокристали – високовпорядковані фрагменти з певним укладанням ланок полімерних ланцюгів. Властивостями полімерів можна керувати, впливаючи на ступінь впорядкованості їх молекулярних ланцюгів. Зокрема, для деяких полімерів вдається виростити контрольовані дендритні структури – дендромери, що мають низку унікальних властивостей (висока селективність у хімічних реакціях, функціональність тощо).

Велику перспективу мають наноструктури на основі штучно синтезованих полімерів. Серед них є електропровідні молекули (наприклад, поліацетилен, політіофен, поліпірол), які використовують як нанодроти. Поліанімен та його аналоги з появою зовнішніх напружень змінюють колір, тобто є електрохроматичним матеріалом. Деякі полімерні молекули та супрамолекулярні структури (катенани, ротаксани та ін.) здатні відіграти роль молекулярних перемикачів, на основі яких можна створити елементи пам'яті нанометрових розмірів. Можливість зміни конформації молекул під дією електричного поля або випромінювання (тобто зміни положення одних груп щодо інших) є фізичною основою дії елементів наноелектроніки та фотоніки.

Під біоматеріалами розуміють такі, що виділені з біологічних об'єктів або призначені для медичних застосувань імплантатів, діагностичних або терапевтичних засобів. Одним із найбільш вражаючих досягнень є використання фрагментів молекул дезоксирибонуклеїнової кислоти (ДНК) як компонентів наноелектроніки, у якій вони є провідниками струму, вентилями, логічними елементами електронної пам'яті.

Значних успіхів вдалося досягти у створенні матеріалів для відновної кісткової хірургії. Так, були створені керамічні й композиційні матеріали на основі гідрооксіяпатиту з нанорозмірними морфологічними одиницями (волокнами, наночастинками, порами). Вони мають прийнятні

характеристики біоактивності, біодеградації, сумісні з кістковою тканиною тощо. Наявні цікаві розробки матеріалів для доставлення ліків у потрібні точки організму. Оболонка пігулки повинна бути нетоксичною, біоінертною та здатною розчинитися через заданий час, звільняючи препарат для поступової дії.

Особливе місце у нанотехнології займають біологічні та біохімічні методи синтезу наноматеріалів. Специфічні білки – ферменти, що є високоефективними селективними каталізаторами біохімічних процесів, мають нанометрові розміри і відіграють значну роль у метаболізмі живих організмів. Пакування ферментів у оболонку з ПАР, які створюють наноконтейнери-міцели, дозволяє зберігати їх каталітичну активність тривалий час і доставляти у вигляді лікарських, косметичних, харчових засобів за потрібною «адресою» в організмі.

## **ЛЕКЦІЯ 14**

### **Матеріали майбутнього**

Упродовж багатьох століть люди досить широко використовували тільки природні матеріали. Однак усезростаючі потреби людства змусили науковців шукати нові речовини з більш корисними і ефективними властивостями. Як наслідок, ХХ століття подарувало тисячі штучних матеріалів, що були дешевші, надійніші та більш точно відповідали тим чи іншим завданням науково-технічного прогресу.

#### ***Метаматеріали***

Метаматеріалом науковці називають будь-який композиційний матеріал, властивості якого зумовлені штучно створеною структурою. Такі матеріали вже сьогодні як дослідні зразки використовують для виготовлення плащів-невидимок та інших виробів із незвичайними оптичними властивостями.

За допомогою метаматеріалів науковці можуть створювати так звані суперлінзи. У них можна розгледіти частинки, які навіть менші за довжину інфрачервоних хвиль.

Що ж до сфери їх застосування, то, крім уже згаданих плащів-невидимок, вони можуть використовуватися для створення голограм, що не відрізняються від реальних фізичних об'єктів.

*Метаматеріали* – композиційні матеріали, властивості яких залежать не лише від елементів, із яких вони складаються, а насамперед від штучно створеної періодичної структури. З фізичного погляду метаматеріали є штучно сформованими й особливим чином збудованими структурами, що мають електромагнітні або оптичні властивості, яких немає у природі.

Електромагнітні властивості метаматеріалів визначаються елементами їх внутрішньої структури, розміщеними за заданою схемою на мікроскопічному рівні, що модифікує діелектричну та магнітну проникності, дозволяє управляти законами дисперсії, заломлення та відбивання електромагнітних хвиль.

Можливість управління структурою компонентів матеріалу сприяє конструюванню та створенню матеріалів із властивостями, що не трапляються в природних матеріалах. Властивості цих матеріалів можна змінювати таким чином, щоб вони мали більш широкий діапазон електромагнітних характеристик.

Існують метаматеріали з багатократно збільшеними електричною проникністю та магнітною сприйнятливістю, ефективність нелінійних ефектів у метаматеріалах може збільшуватися в рази порівняно зі звичайними речовинами. Зокрема, ефективність гігантського комбінаційного розсіювання може зростати багатократно порівняно з вимушеним комбінаційним розсіюванням у компонентах, відповідно збільшується й ефективність генерації другої та третьої гармонік.

Один із найвідоміших класів метаматеріалів – метаматеріали з негативним коефіцієнтом заломлення, у яких одночасно негативні діелектрична та магнітна проникність. Вони характеризуються негативним значенням показника заломлення, а їх оптичні властивості істотно відрізняються від властивостей традиційних матеріалів.

Перші виготовлені метаматеріали мали вигляд неупорядкованих маленьких дротів, скручених у спіраль та вкладених у фіксувальне середовище. Мікрохвильові лінзи створювали з провідникових сфер, дисків і періодично розташованих металевих смужок, що утворювали штучне середовище зі специфічним ефективним показником заломлення. Плідною виявилася ідея створення ізотропних метаматеріалів на основі діелектричних резонансних включень. Така гіпотетична регулярна структура складається зі сферичних резонаторів, виконаних із магнітодіелектрика з однаковою величиною діелектричної та магнітної проникності, були також запропоновані численні варіанти лише діелектричних структур, що складаються з резонаторів різної форми. Природних матеріалів із такими властивостями поки що не виявлено.

Експериментально речовини з негативним показником заломлення в радіодіапазоні електромагнітних хвиль були створені 1999 р. Нині науковці здійснюють роботи зі створення та дослідження метаматеріалів із негативним показником заломлення в оптичному діапазоні. Усі створені штучно матеріали з одночасно негативними діелектричними і магнітними проникностями в оптичному діапазоні є композитами, що містять металеві та діелектричні компоненти.

Перспективним класом метаматеріалів є фотонні кристали. Так, зокрема, резонансні фотонні кристали метаматеріалів можуть практично застосовуватися в різних прикладних галузях: це пристрої оптичного маскування, передавання зображень із надвисокою роздільною здатністю, концентратори-колектори світлової енергії, спеціальні датчики, широкосмугові НВЧ-поглиначі та поляризатори, засоби ближньопольової мікроскопії.

На базі метаматеріалів можна створювати сенсори складних молекул, які, потрапляючи в поле метаматеріалу, починають світитися. Це дає змогу визначати одиничні молекули, що важливо, наприклад, для судової криміналістики. Метаматеріали використовують як світлофільтр, який виділяє

світло певної довжини з випромінювання, що падає. Такий матеріал може бути основою для створення наднадійних магнітів пам'яті, тому що структура осередків метаматеріалів не дає можливості перемагнічувати один одного та втрачати записану інформацію.

Створено плоскі лінзи з метаматеріалів, роздільна здатність яких дозволяє аналізувати об'єкти з розмірами, що менші за довжину хвилі. Лінза складається з масивів вертикальних платівок, виконаних із оксиду титану й розташованих під чітко визначеними кутами. Фазовий профіль лінзи з метаматеріалу збігається з профілем сферичної лінзи. Розроблено метаматеріали, що дозволяють захищати пілотів від осліплення лазером. Значно зростає інтерес до використання метаматеріалів у радіотехнічних системах, зокрема в антенній техніці. Завдяки тому що метаматеріали мають негативний показник заломлення, вони ідеальні для маскуванню об'єктів, оскільки їх неможливо виявити засобами радіорозвідки.

Проте сучасні метаматеріали тільки в першому наближенні мають негативний показник заломлення, що призводить до значного вторинного перевипромінювання. Основні сфери їх застосування – виготовлення підкладок і випромінювачів у плоских антенах для досягнення широкої смуги та зменшення розмірів антенних елементів; компенсація реактивності малих антен у широкій смузі частот; досягнення вузької просторової спрямованості елементарних випромінювачів; виготовлення антен поверхневої хвилі; зменшення взаємного впливу між елементами антенних ґраток.

Провідні наукові школи в галузі розроблення метаматеріалів функціонують в Інституті радіофізики та електроніки НАНУ, Національному університеті радіоелектроніки, Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», Інституті проблем матеріалознавства НАНУ, Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут».



## ***Вуглецеві нанотрубки***

Вуглецеві нанотрубки вже сьогодні активно вивчають фахівці. Нанотрубки являють собою довгі вуглецеві ланцюги, більш міцні, ніж алмазні. Серед корисних і важливих властивостей вуглецевих нанотрубок фізики відзначають їх виняткову міцність і легкість проведення по них електронів. Такі нанотрубки в десятки разів міцніші за сталь, а отже, придатні для створення ліфтів, що з'єднують землю та орбітальні станції в космосі. Якщо ж використовувати вуглецеві нанотрубки в будівництві, то можна буде створювати будівлі висотою в сотні кілометрів та будь-які інші конструкції.

Вуглецеві нанотрубки мають низку властивостей, а саме:

- Фізико-технічні властивості. Ці властивості обумовлені високою міцністю вуглець-вуглецевих зв'язків, сітчастою гексагональною будовою і відсутністю дефектів, а також тим, що довжина нанотрубок у десятки разів перевищує їх діаметр. Нанотрубки в 10 разів міцніші та в 6 разів легші за сталь.
- Електричні властивості. Ці властивості нанотрубок пов'язані з тим, що атоми вуглецю мають потрібну координацію, а тому нанотрубки – це ароматичні системи, у яких три із чотирьох валентних електронів беруть участь в утворенні сигма ( $\sigma$ )-зв'язків, а четвертий утворює пі ( $\pi$ )-зв'язок. Саме пі ( $\pi$ )-електрони завдяки слабким зв'язкам переносять заряд.
- Оптичні властивості. Через те що напівпровідникові нанотрубки є напівпровідниками, у них проходить рекомбінація електронно-діркових пар, що призводить до ефективного вивільнення фотона – випромінювальної рекомбінації. Тому нанотрубки відносять до матеріалів оптоелектроніки.

Унікальні властивості вуглецевих нанотрубок обумовлюють їх перспективне використання в багатьох сферах: як армувальні домішки в композиційних матеріалах, для одержання електропровідних композиційних полімерів, як

додавання в метали для одержання надпровідникових матеріалів, як компонент холодних емісійних катодів у дисплеях, якісно нове джерело світла, напівпровідникові транзистори з р-п переходами, для виробництва особливих марок графіту, пористого графіту, сировина для виробництва теплоізоляційних матеріалів, як сорбент.

### *Аерогель*

Уже сьогодні знаменита Книга рекордів Гіннеса має 15 статей, присвячених досягненням аерогелю. А таку кількість рекордів не має жоден інший матеріал.

Створюють аерогель з хрому, алюмінію, оксиду вуглецю або олова шляхом найскладніших технологічних процесів. Унаслідок цього 99,8 % складу аерогелю займає порожнеча. Вона ж є причиною прозорості цього унікального матеріалу, нерідко званого «замороженим димом».

Для чого потрібен матеріал, який практично повністю складається з нічого? Все просто: аерогель завдяки незрівнянно великій площі поверхонь своєї внутрішньої структури забезпечує винятковий ступінь ізоляції як від високих, так і від низьких температур. Наприклад, він чудово підійде для місячного або марсіанського купола. А будучи нанесеним на військову техніку, забезпечить їй чудовий захист від ворожих снарядів. І це незважаючи не те, що його щільність доволі низька.

На дотик аерогелі нагадують легку, але тверду піну, щось схоже на пінопласт. У разі сильного навантаження аерогель тріскається, але загалом це дуже міцний матеріал – зразок аерогелю може витримати навантаження, в 2 000 разів більше від власної ваги. Аерогелі, особливо кварцові, – гарні теплоізолятори. Вони також дуже гігроскопічні.

За зовнішнім виглядом аерогелі напівпрозорі. Завдяки релієвському розсіюванню світла на деревоподібних структурах вони здаються блакитнуватими у відбитому світлі та світло-жовтими – у проникному.

### *Аморфні фулерени*

Дивно, але міцність алмазу не абсолютна! І аморфні фулерени або агреговані алмазні нанострижні демонструють ще більші показники міцності.

Поки що основні зусилля науковців спрямовані на виробництво доступних алмазів, оскільки аморфні фулерени ще занадто енерговитратні й дорогі у виробництві. Однак не виключено, що відразу після «ери алмазів» людство вступить в «епоху доступних фулеренів».

До речі, фулерени іскристі, переливаються на світлі й нітрохи не поступаються алмазам за красою.

### *Аморфні метали*

Аморфні метали ще називають металевим склом. Вони складаються з металів за відсутності порядку в розташуванні атомів.

Важливими властивостями аморфних металів є підвищена міцність (удвічі міцніше від сталі) та їх здатність ефективно розсіювати енергію удару.

Передбачається, що вже до 50-х років цього століття аморфні метали стануть найбільш поширеними матеріалами для виготовлення броні військової техніки. Але успішно вони можуть застосовуватися і в мирному житті. Наприклад, електронні властивості металевого скла здатні підвищувати ефективність енергомереж до 40 %.

Існує чотири основних методи одержання аморфних металів та сплавів:

- швидке охолодження (зі швидкостями 104–106 К/с) рідкого розплаву; отримані аморфні сплави мають назву «металеве скло»;
- конденсація парів, або напилювання атомів на холодну підложку з утворенням тонких плівок аморфного металу;
- електрохімічне осадження;
- опромінення кристалічних металів інтенсивними потоками іонів або нейтронів.

Механізми кристалізації аморфних сплавів поділяють на чотири типи: поліморфна, первинна, евтектична та кристалізація з розшаруванням.

*Поліморфна кристалізація* – це кристалізація, за якої аморфний сплав без будь-яких змін концентрації переходить у пересичений твердий розчин, метастабільний чи стабільний кристалічний стан.

*Первинна кристалізація* – це кристалізація, за якої відбувається кристалізація фази, хімічний склад якої відрізняється від складу аморфної фази.

*Евтектична кристалізація* – це кристалізація, за якої проходить виділення двох чи більше кристалічних фаз.

*Кристалізація з розшаруванням* – це кристалізація, за якої спостерігається поділ на різні аморфні фази, кожна з яких кристалізується окремо.

Взагалі процес кристалізації аморфного сплаву дуже залежить від технології та способу його виробництва.

### ***Прозорий алюміній***

Як бачимо з назви, однією з корисних властивостей такого алюмінію є його прозорість. Крім того, він на 300 % міцніше від сталі. Зрозуміло, потенціал цього матеріалу по-справжньому безмежний. Наприклад, можна побудувати офісний будинок, стіни якого будуть міцні й прозорі, або виготовити меч, непомітний для ворога.

Крім того, матеріал має високу термостійкість – він здатен витримувати нагрівання до 2 100 °С, а також є стійким до впливу радіації, кислот, лугів і води. Ці характеристики роблять прозорий алюміній незамінним матеріалом у сферах, де потрібен високий ступінь міцності, прозорості та стійкості до зовнішніх чинників.

Прозорий корабель, літак або космічна станція – будь-який металевий предмет у майбутньому зможе стати справжнім шедевром дизайну.

### ***Металева піна***

Додавши в розплавлений алюміній гідрид титану у вигляді порошку, можна отримати металеву піну, її особливостями є міцність і легкість.

Сьогодні науковці й винахідники наввипередки пропонують сфери застосування металевої піни, що більш ніж на третину заповнена порожнечою. Зокрема, пропонується використовувати таку піну для будівництва колоній у космосі та на інших планетах або для зведення плавучих міст.

### ***Електронна тканина***

Електронна тканина – це основа одягу майбутнього. Завдяки її використанню відпаде необхідність скрізь брати з собою смартфони, MP3-плеєри та інші девайси. Справді, навіщо вони потрібні, якщо потужні комп'ютери будуть вшиті буквально в кожну сорочку.

Подивитися фільм на футболці одного або поспілкуватися по телефону, піднісши до вуха рукав куртки, у майбутньому можна буде без будь-яких труднощів.

## **ЛЕКЦІЯ 15**

### **Підсумкове заняття**

Метою підсумкового заняття є узагальнення отриманих аспірантами знань з дисципліни «Сучасні тенденції в матеріалознавстві».

На занятті проводять аналіз та підбивають підсумки зі створення і захисту презентацій за такими темами самостійних робіт:

1. Сучасні методи виробництва матеріалів. Сучасні методи дослідження матеріалів.
2. Чорні та кольорові метали.
3. Тверді сплави. Мінералокераміка.
4. Зносостійкі покриття та технології їх отримання.
5. Матеріали майбутнього. Технології, що змінюють світ.

Результати захисту практичних робіт обговорюють за такими темами:

1. Вибір оптимального матеріалу для забезпечення високих експлуатаційних властивостей виробу.
2. Вибір раціонального інструментального матеріалу для забезпечення надійності та якості інструменту.
3. Властивості та характеристики полімерних матеріалів.
4. Вибір раціонального методу отримання захисного покриття.
5. Застосування наноматеріалів у техніці та електроніці.

## Список використаної літератури

1. Тимофєєва Л. А., Комарова Г. Л. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів : конспект лекцій. – Харків : УкрДАЗТ, 2013. – Ч.1. – 68 с.
2. Металознавство та термічна обробка металів [Електронний ресурс] // Роль матеріалознавства в сучасному світі та історії людства / С. В. Бондарєв. – Київ: Фізико-технологічний інститут металів та сплавів, 2017. – С. 15–18. – Режим доступу: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/bitstream/123456789/490/1/BONDAREV.pdf>.
3. Гутник М. В. Етапи розвитку матеріалознавства //Актуальні питання історії науки і техніки : матеріали 16-ї Всеукр. наук. конф., 5–7 жовтня 2017 р. – Київ : Центр пам'яткознавства НАНУ і УТОПІК, 2017. – С. 98–102.
4. Сучасні тенденції розвитку матеріалознавства /М. М. Чуйко, А. М. Чуйко, В. О. Назарько // Сучасне матеріалознавство та товарознавство: теорія, практика, освіта : матеріали I Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (м. Полтава, 26–27 лют. 2014 р.). – Полтава : ПУЕТ, 2014. – С. 114–118.
5. Сучасні технології та світові тенденції в металургії [Електронний ресурс] // Metinvest. – Режим доступу: <https://metinvestholding.com/ua/media/article/sovremennie-tehnologii-v-metallurgii-i-mirovie-tendencii>.
6. Фізичні властивості і методи дослідження матеріалів / Т. П. Говорун, А. Ф. Будник, В. Б. Юскаєв. – Суми: СумДУ, 2014. – 255 с.
7. Методи дослідження структури матеріалів [Електронний ресурс] : конспект лекцій з матеріалознавства. – Режим доступу: [https://e-tk.lntu.edu.ua/pluginfile.php/24415/mod\\_resource/content/0/Заняття%205.pdf](https://e-tk.lntu.edu.ua/pluginfile.php/24415/mod_resource/content/0/Заняття%205.pdf).
8. Кащеєв М. А. Металургія кольорових металів : конспект лекцій. – Кам'янське. ДДТУ. 2019. – 48 с.

9. Матеріалознавство : навч. посіб. / В. І. Бузило, В. П. Сердюк, А. В. Яворський, О. А. Гайдай. – Дніпро : НТУ «ДП», 2021. – 243 с.
10. Метали і сплави різного призначення [Електронний ресурс] : конспект лекцій. – Режим доступу: [https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/481435/mod\\_resource/content/1/Лекція%207.pdf](https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/481435/mod_resource/content/1/Лекція%207.pdf).
11. Сучасні інструментальні матеріали у машинобудуванні : навчальний посібник / В. О. Залога, В. Д. Гончаров, О. О. Залога ; за заг. ред. В. О. Залози. – Суми : Сумський державний університет, 2013. – 371 с.
12. Композитні та порошкові матеріали : навчальний посібник / П. П. Савчук, В. П. Кашицький, М. Д. Мельничук, О. Л. Садова ; за заг. ред. П. П. Савчука. – Луцьк: Видавець: ФОП Теліцин О.В., 2017. – 368 с.
13. Прикладне матеріалознавство : підручник для вищих навчальних закладів III–IV ступенів акредитації / авт. колектив: О. В. Сушко, Е. К. Посвятенко, С. В. Кюрчев, С. І. Лодяков. – Мелітополь: ТПЦ «Forward press», 2019. – 352 с.
14. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва : навч. посібник / А. М. Верховлюк, А. В. Нарівський, В. Г. Могилатенко ; за ред. академіка НАН України В. Л. Найдека. – К. : Видавничий дім «Вініченко», 2016. – 224 с.
15. Скородумова О. Б. Технологія вогнестійких захисних покриттів : конспект лекцій. – Харків : Національний університет цивільного захисту України, 2016. – 62 с.
16. Наноматеріали, нанотехнології, нанопристрої : навчальний посібник / М. О. Боровий та ін. – Київ: «Інтерсервіс», 2015. – 350 с.
17. Вісім дивовижних матеріалів майбутнього [Електронний ресурс] // Всвіті. – Режим доступу: <https://vsviti.com.ua/life/tech/23213>.



Електронне навчальне видання

Дегула Андрій Іванович,  
Харченко Надія Анатоліївна

## СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ В МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ

Конспект лекцій  
для аспірантів спеціальності  
*G8 Матеріалознавство*  
*(132 Матеріалознавство)*  
усіх форм здобуття вищої освіти

Відповідальна за випуск О. П. Гапонова  
Редакторка Т. Г. Чернишова  
Комп'ютерне верстання А. І. Дегули

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 8,13. Обл.-вид. арк. 9,23.

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Харківська, 116, м. Суми, 40007

Свідоцтво про внесення суб'єкта господарювання до Державного реєстру видавців,  
виготовлювачів та розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 8193 від 15.10.2024.