

Міністерство освіти і науки України
Інженерний навчально-науковий інститут
Запорізького національного університету

О. С. Воденнікова

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ

Конспект лекцій
для здобувачів ступеня вищої освіти магістра
спеціальності «Металургія»
освітньо-професійних програм «Металургія чорних металів»,
«Металургія кольорових металів» та «Обробка металів тиском»



Затверджено
Вченою радою ЗНУ
Протокол № 9 від 27.04.221р.

Запоріжжя
2021

УДК 669+620.22](075)

В 620

Воденнікова О. С. Сучасні проблеми металургії: конспект лекцій для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності «Металургія» освітньо-професійних програм «Металургія чорних металів», «Металургія кольорових металів» та «Обробка металів тиском». Запоріжжя : Запорізький національний університет, 2021. 76 с.

У конспекті лекцій на основі сучасних теоретичних та практичних уявлень розглянуто сучасні проблеми виробництва та обробки металів та сплавів, сьогоденні досягненнями в області створення нових матеріалів і процесів, нанесення зносостійких покриттів, а також проблеми енерго-та ресурсозбереження металургійного виробництва. Приведено досягнення в області створення тонких плівок, інтелектуальних матеріалів та покриттів, наноматеріалів та нанотехнологій. Приділено увагу сучасним проблемам радіоактивності металургійної сировини та металопродукції. Розглянуто сучасні проблеми теоретичного й прикладного матеріалознавства та інженерії поверхні металів, а також проблематику проведення експертизи дослідження металів та сплавів. Значну роль відведено перспективам та проблемам адитивного виробництва.

Для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності «Металургія» освітньо-професійних програм «Металургія чорних металів», «Металургія кольорових металів» та «Обробка металів тиском».

Рецензент

Ю. О. Белоконь, кандидат технічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри обробки металів тиском.

Відповідальний за випуск

О. Г. Кириченко, кандидат технічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри металургії.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
Тема 1. СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА ТА ОБРОБКИ СТАЛЕЙ ТА СПЛАВІВ.....	8
1.1 Основні технології та світові тенденції в металургії.....	8
1.2 Проблеми розсипання та самодиспергування марганцевих та кремнієвих сплавів.....	13
1.3 Нові технологічні методи обробки металів.....	14
Тема 2. СЬОГОДЕННІ ДОСЯГНЕННЯ В ОБЛАСТІ СТВОРЕННЯ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ І ПРОЦЕСІВ, ТОНКИХ ПЛІВОК, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І ПОКРИТТІВ, НАНОМАТЕРІАЛІВ І НАНОТЕХНОЛОГІЙ.....	15
2.1 Досягнення в створенні нових матеріалів.....	15
2.2 Біметали.....	18
2.3 Тонкоплівкові матеріали та покриття.....	19
2.4 Інтелектуальні матеріали та покриття.....	20
2.5 Наноматеріали та нанотехнології.....	21
Тема 3. ПРОБЛЕМИ НАНЕСЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ. ПРОБЛЕМИ ТРИБОЛОГІЇ.....	24
3.1 Проблеми нанесення зносостійких покриттів.....	24
3.1.1 Протикорозійний захист деталей та металоконструкцій.....	24
3.1.2 Зносостійкі покриття для захисту деталей тертя сучасних газотурбінних двигунів.....	25
3.1.3 Застосування самопоширюваного високотемпературного синтезу в технологіях нанесення зносостійких покриттів.....	26
3.2 Проблеми трибології та триботехніки.....	27
Тема 4. ПРОБЛЕМИ РАДІОАКТИВНОСТІ МЕТАЛУРГІЙНОЇ СИРОВИНИ ТА МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ.....	31
4.1 Основні поняття радіоактивності металів.....	31
4.2 Радіоактивність шихтових компонентів та продуктів плавки металургійного виробництва.....	32
4.3 Радіоактивні метали в червоних шламах.....	35
4.4. Радіаційний контроль металургійної сировини та металопродукції..	36
Тема 5. ПРОБЛЕМИ УТИЛІЗАЦІЇ ТА ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННИХ МАТЕРІАЛІВ.....	38
5.1 Вторинні матеріали металургійного виробництва.....	38
5.2 Шляхи підвищення ефективності металургійного виробництва.....	39
5.3 Утилізація металобрухту.....	44
Тема 6. СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ТА ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ МЕТАЛІВ.....	47
6.1 Фізико-технічні проблеми матеріалознавства.....	47
6.2 Сучасні проблеми матеріалознавства та інженерії поверхні металів.....	48

Тема 7. ЕКСПЕРТИЗА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ.....	52
7.1 Основні поняття експертизи дослідження металів та сплавів.....	52
7.2 Основні методи аналізу металів та сплавів, що використовуються при проведенні матеріалознавчої експертизи.....	54
Тема 8. АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО: ПЕРСПЕКТИВИ ТА ПРОБЛЕМИ 3D-ДРУКУ.....	60
8.1 Основні поняття адитивного виробництва.....	60
8.2. Сучасні технології адитивного виробництва.....	63
8.2.1 Технологія лазерної стереолітографії (SLA).....	64
8.2.2 Технологія селективного лазерного спікання (SLS).....	65
8.2.3 Технологія селективного лазерного плавлення (SLM).....	66
8.2.4 Технологія прямого лазерного спікання металів (DMLS).....	67
8.2.5 Моделювання методом пошарового наплавлення (FDM).....	68
8.2.6 Технологія фотополімерного друку (PolyJet)	69
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА.....	72

ВСТУП

Потенціал гірничо-металургійного комплексу базується на наявності в Україні достатньої власної сировинної бази, наявності великої кількості виробничих потужностей, а також високим рівнем науково-технічного потенціалу. Перспективи розвитку металургійного комплексу України тісно пов'язані з підвищенням конкурентоспроможності продукції на основі зменшення енерго- та матеріалоємності продукції, скорочення трудових витрат, впровадження досягнень науково-технічного прогресу.

Осмислення сучасних проблем металургії та матеріалознавства, пошук методів їх вирішення дасть змогу підвищити теоретичні та практичні знання в галузі металургійного виробництва та підготувати висококваліфікованих фахівців, конкурентоспроможних на ринку праці.

Метою вивчення навчальної дисципліни «Сучасні проблеми металургії» є ознайомлення із сучасними проблемами металургійного виробництва, зокрема проблемами виробництва та обробки металів та сплавів, сьогоденними досягненнями в області створення нових матеріалів і процесів, нанесення зносостійких покриттів, сучасними проблемами теоретичного й прикладного матеріалознавства та інженерії поверхні металів, а також проблемами енерго- та ресурсозбереження металургійного виробництва.

Основними завданнями вивчення навчальної дисципліни «Сучасні проблеми металургії» є:

- освоїти основні методи дослідження, аналізу, діагностики та моделювання властивостей речовин (матеріалів), фізичних і хімічних процесів, що протікають в них, освоїти методи дослідження в технологіях отримання, виробництва і модифікації матеріалів;
- оволодіти навичками використання принципів і методик комплексних досліджень, випробувань і діагностики матеріалів та виробів, а також процесів їх виробництва, обробки та модифікації;
- виробити навички порівняльного аналізу існуючих технологій в галузі створення нових матеріалів і процесів, тонких плівок, інтелектуальних матеріалів та покриттів, наноматеріалів та нанотехнологій;
- набути навичок вибору матеріалів для заданих умов експлуатації з урахуванням вимог технологічності, економічності, надійності та довговічності, а також екологічних наслідків їх застосування.

Навчальна дисципліна «Сучасні проблеми металургії» вивчає:

- проблеми створення наукових основ управління структурою і властивостями матеріалів, розробки вискоефективних і екологічно чистих технологій отримання та виробництва металевих матеріалів із заданими властивостями;
- сьогоденні досягнення в області створення нових матеріалів і процесів, тонких плівок, інтелектуальних матеріалів та покриттів, наноматеріалів та нанотехнологій;
- сучасні проблеми радіоактивності металургійної сировини та

металопродукції;

- проблеми утилізації та використання вторинних матеріалів;
- сучасні проблеми теоретичного й прикладного матеріалознавства та інженерії поверхні металів;
- проблематику проведення експертизи дослідження металів та сплавів;
- перспективи та проблеми адитивного виробництва, зокрема технології лазерної стереолітографії, селективного лазерного спікання, селективного лазерного плавлення, прямого лазерного спікання металів, моделювання методом пошарового наплавлення та технології фотополімерного друку.

Згідно з вимогами освітньо-професійних програм «Металургія чорних металів», «Металургія кольорових металів» та «Обробка металів тиском» при викладанні дисципліни «Сучасні проблеми металургії» студенти повинні досягти таких **компетентностей**:

1. Загальних компетентностей:

- Прагнення до збереження навколишнього середовища.

2. Фахових компетентностей спеціальності:

- Здатність приймати ефективні рішення в металургії.
- Здатність розв'язувати складні задачі і проблеми металургії в широких та мультидисциплінарних контекстах, у нових або незнайомих середовищах за наявності неповної або обмеженої інформації з урахуванням аспектів соціальної та етичної відповідальності.

– Здатність управляти робочими або навчальними процесами у сфері металургії, які є складними, непередбачуваними та потребують нових стратегічних підходів.

Згідно з вимогами освітньо-професійних програм «Металургія чорних металів», «Металургія кольорових металів» та «Обробка металів тиском» при викладанні дисципліни «Сучасні проблеми металургії» **програмними результатами навчання є**:

– . Розробляти технологію виробництва на основі розуміння процесів, що відбуваються, з урахуванням особливостей виробництва та визначати оптимальний режим роботи обладнання з урахуванням наявних невизначеностей та ризиків.

– Розробляти заходи з охорони праці та навколишнього середовища при проведенні досліджень та у виробничій діяльності.

– Пропонувати нові технічні рішення з урахуванням цілей та ресурсних обмежень, економічних, екологічних, правових та безпекових аспектів, розробляти і застосовувати нові металургійні технології.

– Обирати і обґрунтовувати вихідну сировину, матеріали та напівпродукти відповідно до умов металургійного виробництва за спеціалізацією з урахуванням технологічних та інших невизначеностей.

Мета конспекту лекцій з дисципліни «Сучасні проблеми металургії»

– допомогти студентам у вивченні теоретичного матеріалу, набутті навичок самостійного прийняття рішень у конкретних умовах металургійного виробництва. Конспект лекцій буде сприяти не тільки засвоєнню знань, а й

формуванню необхідних умінь і навичок.

Результатом вивчення студентами дисципліни «Сучасні проблеми металургії» стане ознайомлення зі сучасними проблемами виробництва та обробки металів та сплавів, сьогоденними досягненнями в області створення нових матеріалів і процесів, нанесення зносостійких покриттів, енерго-та ресурсозбереження металургійного виробництва, проблемами теоретичного та прикладного матеріалознавства та інженерії поверхні металів.

Знання, отримані під час вивчення дисципліни «Сучасні проблеми металургії» стануть у пригоді в процесі написання кваліфікаційної роботи магістра за спеціальністю 136 «Металургія» освітньо-професійних програм «Металургія чорних металів», «Металургія кольорових металів» та «Обробка металів тиском», а також подальшої наукової та практичної діяльності за галуззю знань 13 «Механічна інженерія».

Тема 1. СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА ТА ОБРОБКИ СТАЛЕЙ ТА СПЛАВІВ

Мета лекції – ознайомлення з сучасною проблематикою виробництва та обробки металів та сплавів.

План

- 1.1 Основні технології та світові тенденції в металургії
- 1.2 Проблеми розсіпання та самодиспергування марганцевих та кремнієвих сплавів
- 1.3 Нові технологічні методи обробки металів

Перелік ключових термінів і понять: сучасні технології сталеплавильного виробництва, світові тенденції металургії, процес прямого відновлення заліза, ливарно-прокатний модуль, цифрові технології в виробництві металопродукції, розсіпання та самодиспергування сплавів, технологічні методи обробки металів.

1.1 Основні технології та світові тенденції в металургії

Металургія сьогодні – це одна з найважливіших і найбільш енергоємних галузей промисловості. Зростаючий попит на високоякісні марки сталі потребує особливої уваги до обладнання як на нових, так і на модернізованих металургійних підприємствах, при цьому діджиталізація буде невід'ємною частиною всіх етапів виробничої діяльності.

Серед основних тенденцій у світовій металургії слід виділити наступні напрямки:

1. Водень проти вуглецю

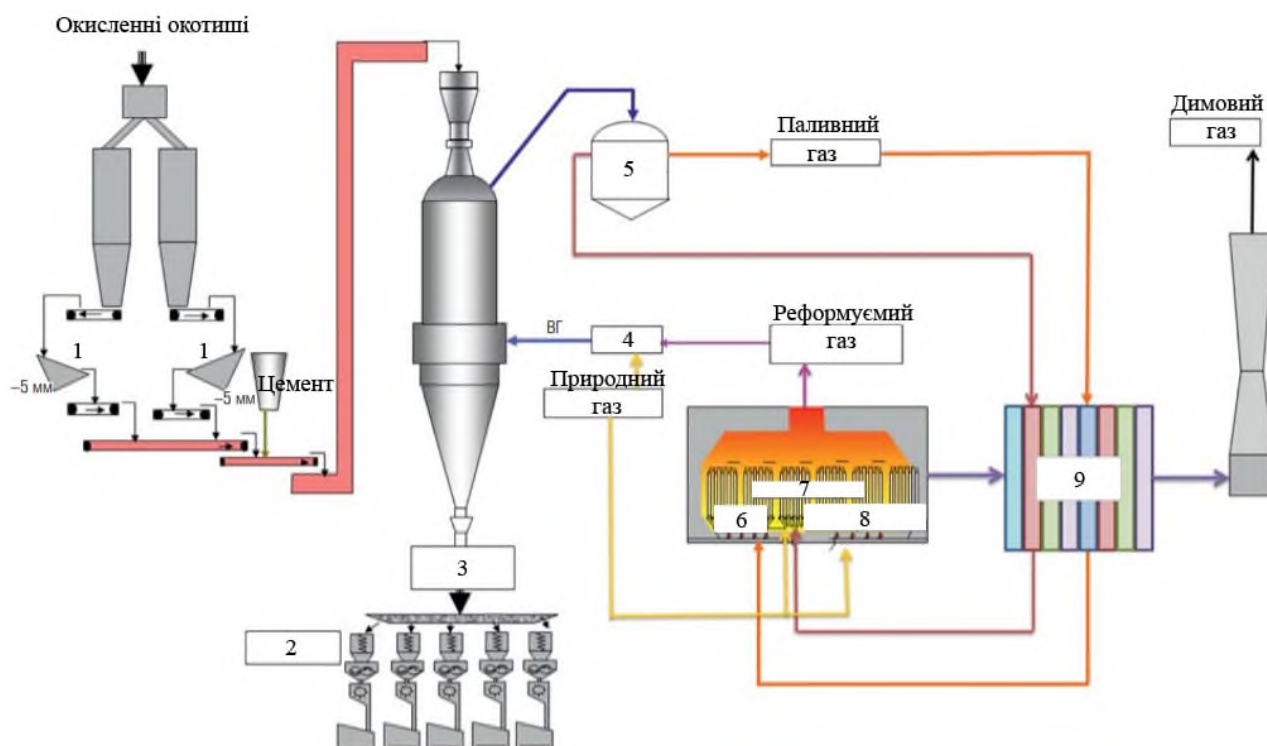
На сьогодні стає актуальним відмова від вуглецю на користь водню, тобто спостерігається тенденція переходу на «зелене виробництво сталі», яке покликане зробити процес виробництва більш екологічним. Так застосування у якості відновника водню дозволяє безпосередньо використовувати будь-які види залізної руди, при цьому викиди вуглекислого газу можна знизити до нуля, а металургійні процеси виконуватимуться з максимальною енергоефективністю з повторним використанням вторинних ресурсів.

Активно розвивати цю технологію вже почали такі металургійні гіганти, як ArcelorMittal, VoestAlpine, SSAB, Dillinger та інші підприємства. Слід зазначити, що Nippon Steel (Японія) заявляв про свої наміри до 2025 р. відмовитися від технології використання вуглецю на користь водню. Але на даний момент такої промислової установки немає.

2. Пряме відновлення заліза

Другий «зелений» напрямок, який вже давно застосовується в металургії – це бездоменне отримання напівпродукту для подальшого виробництва сталі шляхом прямого відновлення заліза з високозалізистої сировини спеціальними технологіями (Midrex (рис. 1.1), Arex, Hyl та інші). На виході утворюється так

звана металізована сировина – гарячебрикетоване залізо (HBI), металізовані окотиші DRI (Direct Reduced Iron), губчасте залізо. Це металевий продукт з високим вмістом заліза (аж до 99%), який може відразу ж використовуватися в сталеплавильному переділі для отримання сталі. На сьогодні таке залізо прямого відновлення є основною сировиною при виробництві електросталі, як заміщення металевого брухту та інших залізовмісних інгредієнтів. Ця технологія розвивається вже понад 30 років. В тій чи іншій мірі 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.



- 1 – грохот; 2 – брикет-прес; 3 – камера вивантаження; 4 – змішувач;
 5 – скруббер колошникового газу; 6 – головні пальники; 7 – реакційні труби;
 8 – допоміжні пальники; 9 – рекуператор 2-го каналу

Рис. 1.1. Схема процесу прямого відновлення заліза Midrex

Саме тому такі лінії розміщуються в Бразилії та Австралії в районі гірничодобувних підприємств, де є в наявності дуже «багата» руда, а також на Близькому Сході, де в надлишку дешевий газ, який використовується для відновлення заліза з залізовмісної сировини.

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

3. Киснево-конвертерний та електросталеплавильний процеси

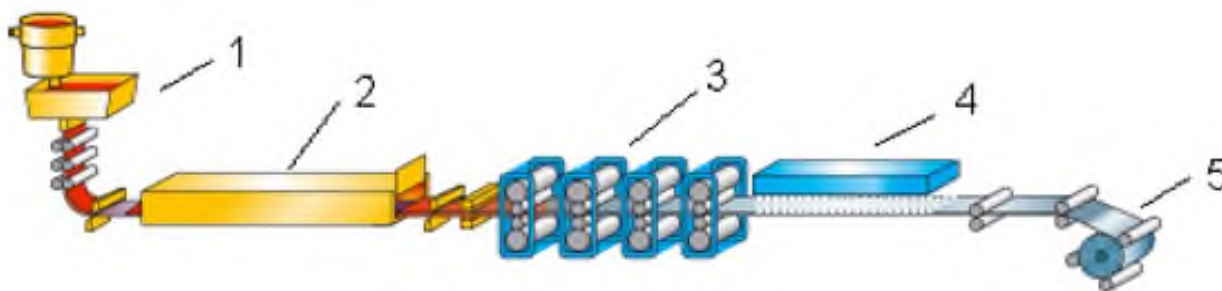
На сьогодні ключовими сталеплавильними технологіями у всьому світі є киснево-конвертерне та електросталеплавильне виробництво. Так близько 70% сталі виплавляється в конвертерах, 29% виплавляється в електросталеплавильних печах і зовсім небагато – в мартенівських печах.

Мартенівський спосіб виплавки сталі в світовій металургії використовується все менше, і це в більшій мірі пов'язане із «зеленою екологією», тому як при мартенівській плавці використовується природний газ, в результаті чого в атмосферу виділяється велика кількість шкідливих та небезпечних викидів. При цьому також слід зазначити, що мартенівська плавка триває 9 годин, а конвертерна та електросталеплавильна – лише 50 хв.

4. Суміщені процеси виплавки та прокату металу

На сьогодні все більшого поширення набувають суміщені процеси виплавки сталі та прокатки смуги. Так в одному цеху встановлюється плавильний агрегат (конвертер або електропіч), відбувається безперервна розливка сталі на машині безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), з якої тільки-но застигли гарячі сляби, блюми або заготовки надходять відразу ж до прокатки. Ці агрегати називаються **ливарно-прокатними модулями** або **ливарно-прокатними агрегатами**. Вони дозволяють економити площі цеху, при цьому скорочуються логістичні витрати і час виконання замовлення. Особливістю такої технології є наявність дуже високої «культури» виробництва та висококваліфікованого персоналу. В іншому випадку ризик отримання браку кінцевої продукції є високим (тут не вийде «перехопити» брак на якомусь певному етапі виробництва, а лише у фіналі). Всі агрегати повинні працювати злагоджено, і персонал повинен бути максимально компетентним, щоб мінімізувати ризики отримання браку в готовій продукції.

Так фірма Schloemann Siemag розробила технологію CSP (Compact Strip Production – компактне виробництво смуги), яка вже успішно впроваджена на близько тридцяти листових прокатних агрегатів по всьому світу (рис. 1.2).



1 – машина безперервного лиття заготовок; 2 – прохідна піч; 3 – прокатний стан; 4 – ділянка охолодження; 5 – моталка

Рис. 1.2. Одноструменевий агрегат CSP прямої прокатки смуги

Лінія QSP-DUE (Danieli Universal Endless) є сучасним ливарно-прокатним модулем з оптимізованою конфігурацією обладнання. До її складу входить тонкослябова МБЛЗ радіусом 5,5 м для отримання слябів товщиною 100–123 мм на швидкостях до 6 м/хв. (в 5–6 разів більше, ніж на звичайних слябових МБЛЗ), буферна тунельна піч Danieli Centro Combustion та листовий стан нескінченної прокатки (рис. 1.3).

Наразі існують такі модулі, які поєднують не тільки плавку, розливку і гарячу прокатку, але ще й на додачу – холодну прокатку рулонів або

довгомірного прокату, витягування дроту та інші операції. Тобто на виході з цеху отримуємо не тільки гарячекатаний прокат, але і продукцію більш високих переділів.

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

У чорній металургії найпопулярніший агрегат даного типу знаходиться в США на заводі компанії Nucor та дозволяє отримувати унікальні структури, які неможливо отримати будь-якими альтернативними способами. Переважно така продукція використовується в автомобільній та аерокосмічній галузі.



Рис. 1.3. Комплекс ливарно-прокатного модуля QSP-DUE у Китаї

5. Зміцнені марки сталі

На сьогодні важливою тенденцією в металургії є перехід від рядових марок сталей до високоміцних (термо- та механічно зміцнених, загартованих, двофазних, зміцнюваних при сушінні покриття та інші). Особливо це помітно в автомобілебудуванні, де постійно зростаючі норми безпеки та економії палива 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 з подальшою тенденцією до зниження частки «м'яких» низьковуглецевих низьколегованих сталей.

6. Цифрові технології в виробництві металопродукції

Діджиталізація – ще один важливий напрямок в сучасній металургії. Вона

повністю автоматизує всі установки і передбачає використання роботів у небезпечних робочих зонах. Так системи моніторингу стану (CMS) та доповнена реальність (AR) полегшують технічне обслуговування металургійних агрегатів. При цьому передбачається, що процеси будуть оптимізовані за допомогою штучного інтелекту, а дефекти кінцевих продуктів стануть незначними.

Так на сьогодні лідерами діджиталізації є країни ЄС, США та Японія, які є драйверами світових інноваційних зрушень, оскільки цифрові технології зумовлюють використання широкого спектру динамічних можливостей.

7. Реновації нарівні з інноваціями

На сьогодні «класичні» технології виробництва сталей та сплавів поступово модернізуються і вдосконалюються з метою підвищення якості металопродукції та забезпечення її конкурентоспроможності на перенасиченому ринку. Так Група «Метінвест» займається реконструкцією існуючих агрегатів та будівництвом нових інноваційних агрегатів.

На доменних печах металургійних комбінатів Групи «Метінвест» з'являються системи очищення, на аглофабриках впроваджується система аспірації, а також модернізуються існуючі прокатні стани.

В 2018 р. на ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча» була встановлена машина безперервного лиття №4, з'явилася нова установка «ківш-піч», а в 2018–2019 р.р. поетапно був модернізований прокатний стан 1700. Завдяки цьому вже зараз виробляється гарячекатаний рулон товщиною від 1,2 до 8 мм та масою до 27 т відповідно до найсучасніших європейських стандартів якості. У 2020 р. на стані встановлено ще одну моталку, яка дозволяє збільшити вагу рулону до 32 т, при цьому максимальна товщина смуги, що змотується, досягає 16 мм.

Слід зазначити також і запуск нової доменної печі на ВАТ «Запоріжсталі», реконструкцію доменної печі на металургійному комбінаті «Азовсталі» та на ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча». Завдяки новому ступеню автоматизації на підприємствах в м. Маріуполі та м. Запоріжжі покращується контроль за технологічними параметрами та за випуском чавуну з доменних печей. Також ведуться роботи щодо проекту будівництва сучасних конвертерів.

Серед планів ВАТ «Запоріжсталь» також є встановлення сучасного ливарно-прокатного модуля, який поєднає в собі киснево-конвертерний цех, безперервну розливку сталі та виробництво рулонів.

Реновації торкнулися і зарубіжних підприємств Групи «Метінвест». На Metinvest Trameal (Італія) з'явилась лінія дробоструменевої обробки та фарбування товстого листа, яка допомагає усунути проблему корозії та забезпечує збереження металу до моменту його переробки в готовий виріб.

Прагнення передових металургійних підприємств задовольняти потреби як ринку в цілому, так і окремих клієнтів, розробка нових продуктів, діджиталізація процесів, удосконалення наявних технологій та імплементація нових «зелених» проектів є рушійними силами розвитку як вітчизняної, так і світової металургії на сьогодні.

1.2 Проблеми розсіпання та самодиспергування марганцевих та кремнієвих сплавів

Відомо, що феросиліцій та феромарганець схильні до самодиспергування, результатом якого є погіршення споживчих якостей феросплавів, зміна їх фракційного складу, а також самовиділення шкідливих отруйних газів.

Явище **розсіпання феросплавів** (мимовільної втрати механічної міцності та цілісності шматків феросплавів в результаті фізико-хімічних перетворень в структурних складових або взаємодії надлишкових фаз з зволоженою атмосферою) має місце при їх транспортуванні та зберіганні. Самодиспергування в значній мірі пов'язане зі структурою та фізико-хімічними характеристиками сплавів.

Основною причиною розсіпання феросиліцію та високовуглецевого феромарганцю у вологій атмосфері вважається наявність та ізоляція в них домішок (P, S, Al та Ca). Механізм руйнування сплавів – це концентрування комплексних карбідів і фосфідів алюмінію, кальцію і марганцю за границями зерен. Взаємодіючи з вологою, вони розкладаються з виділенням газів, границі зерен окислюються, що робить вирішальний вплив на розсіпання сплавів. Так, руйнування високовуглецевого феромарганцю може відбуватися внаслідок руйнування з'єднання Mn_3C , а розсіпання феросиліцію з вмістом більш 50% Si ускладнюється тим, що відбувається при охолодженні лебоїтним розпадом. При швидкому охолодженні α -лебоїт фіксується у вигляді метастабільної фази, яка в подальшому розпадається зі збільшенням об'єму до 20% і викликає внутрішні напруги в сплаві, що сприяють розсіпанню.

Утворення тріщин по границям дозволяє фосфору, миш'яку, сульфідам та карбідам алюмінію реагувати з вологою повітря, в результаті чого утворюються PH_3 , PH_4 , AsH_3 та інші, а в тріщинах – пухкі оксиди Al_2O_3 , SiO_2 та інші з'єднання, які сприяють розсіпанню.

Особливістю сплавів системи Fe-Si (зокрема для висококремністих марок ФС65, ФС70, ФС75 та інших) в рідкому стані є сильний розвиток ліквіації у процесі розливки, який супроводжується різним вмістом кремнію по висоті зливку. Домішки у вигляді Ca, Al, P та As також піддаються ліквіації, що призводить до самовільного розсіпання окремих районів зливку або повному розсіпанню їх до порошкоподібного стану. Так при формуванні в структурі ФС75 надлишкових фаз виділення, що ініціюють розсіпання злиwkів з виділенням отруйних газів PH_3 та AsH_3 , в основному беруть участь три елементи – це кальцій, алюміній та фосфор. Кремній і залізо в складі цих фаз, мабуть, стабілізують їх стійкість і знижують схильність злиwkів до розсіпання у вологій атмосфері. При наявності в розплаві навіть невеликої кількості миш'яку він концентрується в фазах з кальцієм, алюмінієм і фосфором.

Таким чином, зниження схильності до саморозсіпання феросиліцію передбачає придушення ліквіації перед розливкою сплаву, раціональні межі вмісту кремнію, а також зниження концентрації домішок, в першу чергу, фосфору і алюмінію, що надходять в сплав з шихтових матеріалів.

Аналіз основних вимог до якості оксидних та карбонатних марганцевих

концентратів показав, що залучення в металургійний переділ карбонатної марганцевої сировини потребує додаткового вивчення особливостей його термообробки і, зокрема, явища саморуйнування кускових карбонатних концентратів при випалюванні. Дослідження саморуйнування та умов термообробки карбонатних марганцевих концентратів свідчать про можливість збереження кускової природи марганецьрудних матеріалів при їх термообробці з помірними швидкостями (до $10^{\circ}\text{C}/\text{хв.}$) в інтервалі інтенсивної дегідратації і розпушення матеріалу ($100\text{--}400^{\circ}\text{C}$), що підтверджує результати розрахунку ймовірності руйнування сировини, виконаного за критеріями теорії пластичної деформації.

Дослідження проблем розсіпання феросиліцію з утворенням токсичних отрут дозволяють розкрити фізико-хімічну картину процесів, що відбуваються в ванні феросплавної печі, металофізичну природу миш'яку і фосфору в сплавах заліза з кремнієм з урахуванням інших домішок, механізм впливу вологого середовища на розсіпання феросиліцію та утворення арсину та фосфіну.

Аналіз самодиспергування алюмосилікомарганцю, виплавленого із застосуванням техногенних та вторинних матеріалів горно-металургійної промисловості Грузії, показує, що інтенсивне самодиспергування алюмосилікомарганцю пояснюється високою концентрацією фосфору і карбідних включень по границях зерен при кристалізації сплаву.

Для запобігання розсіпання сплавів можна їх модифікувати магнієм, легувати добавками елементів, що подрібнюють зерно (V, Ti, Zr та інші), або роблять його більш пластичним, при цьому подрібнення зерна зменшує на його границях концентрацію таких домішок як P, Al та Ca.

1.3 Нові технологічні методи обробки металів

В зв'язку із зростанням інтенсивності навантажень на машини та обладнання, зростанням швидкісних характеристик транспортних засобів значно підвищуються вимоги до показників надійності металевих конструкцій та окремих деталей. Саме правильний вибір матеріалу деталі, технології її механічної та термічної обробки забезпечує надійну роботу всієї конструкції.

Саме тому одним з головних завдань технологів і конструкторів залишається розробка способів металообробки, які б відрізнялися найбільшою точністю, продуктивністю та забезпечували б мінімальну витрату сировини. Тому розрізняють три основних напрямки в металообробці:

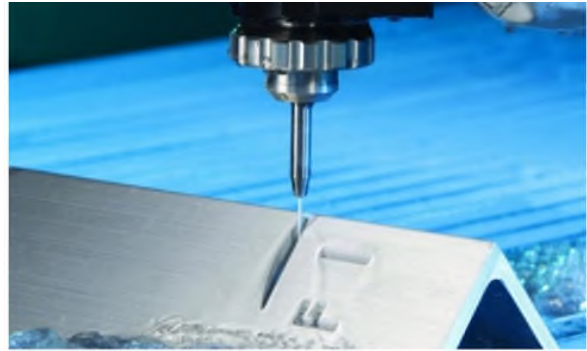
- формозміна за допомогою високоточних методів пластичного деформування;
- застосування традиційних способів металообробки, які не відрізняються підвищеною точністю та продуктивністю;
- використання високоенергетичних методів.

Вибір оптимального методу обробки (рис. 1.4) визначається виробничими вимогами і серійністю виробництва. Наприклад, перенавантаження конструкції обладнання викликають підвищену витрату енергії, а знижена точність

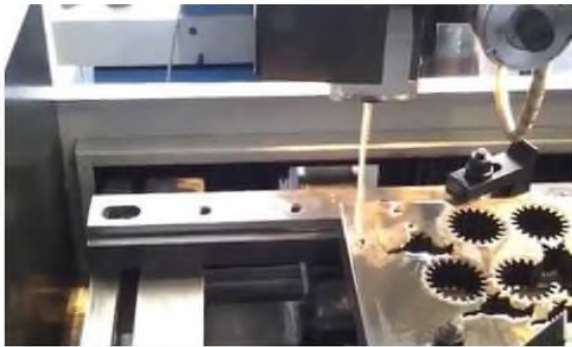
виготовлення окремих деталей і вузлів – низьку продуктивність техніки.



а



б



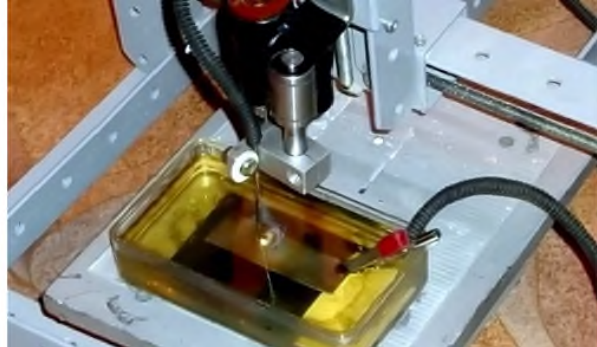
в



г



д



е

а – токарно-фрезерна обробка; б – гідроабразивна обробка;
в – електроерозійна обробка; г – магнітоімпульсна обробка; д – лазерна
обробка; е – електрохімічна обробка

Рис. 1.4. Види механічної обробки металів

Слід зазначити, що деякі технології не можуть забезпечити необхідні властивості міцності та задовільну мікроструктуру виробу, що в підсумку позначається на довговічності та стійкості деталей, нехай навіть і виготовлених з мінімальними допусками. Нова технологія обробки металу заснована на використанні нетрадиційних джерел енергії, які забезпечують його розмірне плавлення, випаровування або формоутворення.

Серед нових технологічних методів обробки металів слід виділити:

- технології електроерозійного методу обробки;
- технології з використанням ультразвуку;
- нові технології електрохімічної обробки.

Існують і успішно розвиваються також комбіновані способи впливу на метал, при яких використовуються два і більше джерела енергії.

Технологія обробки металів тиском, крім підвищеного коефіцієнта використання металу, володіє також й іншими істотними перевагами:

- у результаті пластичного деформування поліпшується макро- і мікроструктура виробу;
- продуктивність обладнання для штампування в рази перевищує аналогічний показник для металорізальних верстатів;
- після обробки тиском підвищується міцність металу, зростає його стійкість від динамічних і ударних навантажень.

Високоенергетичні технології застосовуються в тих випадках, коли традиційними методами змінювати форму і розміри металевої заготовки неможливо.

Серед проблем і складностей галузі металообробки слід виділити:

- екологічність і безпека для навколишнього середовища;
- вигода використання;
- витратність виробництва;
- якість матеріалу, що виробляється.

Таким чином, перехід на нові технології та реорганізація застарілих виробництв виявляються актуальними і необхідними вже через те, що старе виробництво перестає бути вигідним, не кажучи вже про можливість отримання матеріалу, який відповідав би всім сучасним вимогам, що проблематично при використанні старих технологій та напрацювань.

Питання для самоконтролю

1. Визначити основні тенденції у світовій металургії.
2. Охарактеризувати суміщені процеси виплавки та прокату металу.
3. Визначити, які існують цифрові технології в виробництві металопродукції.
4. Надати визначення поняття «розсіпання феросплавів».
5. Розкрити проблеми розсіпання та самодиспергування марганцевих та кремнієвих сплавів.
6. Охарактеризувати нові технологічні методи обробки металів.
7. Які основні проблеми і складності галузі металообробки?

Тема 2. СЬОГОДЕННІ ДОСЯГНЕННЯ В ОБЛАСТІ СТВОРЕННЯ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ І ПРОЦЕСІВ, ТОНКИХ ПЛІВОК, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І ПОКРИТТІВ, НАНОМАТЕРІАЛІВ І НАНОТЕХНОЛОГІЙ

Мета лекції – ознайомлення з досягненнями в області створення нових матеріалів і процесів, тонкоплівкових та інтелектуальних матеріалів й покриттів, проблемами наноматеріалів та нанотехнології.

План

- 2.1 Досягнення в створенні нових матеріалів
- 2.2 Біметали
- 2.3 Тонкоплівкові матеріали та покриття
- 2.4 Інтелектуальні матеріали та покриття
- 2.5 Наноматеріали та нанотехнології

Перелік ключових термінів і понять: нові матеріали і процеси, біметали, тонкоплівкові матеріали, інтелектуальні матеріали та покриття, наноматеріали та нанотехнології.

2.1 Досягнення в створенні нових матеріалів

Серед досягнень в створенні нових матеріалів слід виділити наступні напрямлення:

- нові органічні речовини і матеріали та композити на їх основі для техніки нового покоління;
- нові неорганічні матеріали для сучасної техніки;
- нові полімерні матеріали різного функціонального призначення;
- нові речовини і матеріали для потреб медицини й агропромислового комплексу;
- створення нових енерго-, ресурсоощадних та екологічно безпечних способів одержання малотоннажних речовин і матеріалів хімічного виробництва.

Більшість фундаментальних результатів **проблем створення нових речовин і матеріалів хімічного виробництва** стосується насамперед:

- проектів зі створення новітніх нанорозмірних напівпровідникових і молекулярних люмінесцентних матеріалів, придатних для використання в нових електролюмінесцентних і фотовольтаїчних приладах;
- робіт у галузі полімерних матеріалів;
- досліджень, спрямованих на одержання нових сорбентів;
- робіт зі створення субстанції для лікарських засобів;
- робіт зі створення нових енерго-, ресурсоощадних та екологічно безпечних способів одержання речовин і матеріалів.

На окрему увагу заслуговують дослідження зі створення нового покоління каталізаторів – перспективних для розроблення нових, ефективніших

процесів одержання тих чи інших хімічних речовин та процесів на їх основі, призначених для захисту довкілля.

2.2 Біметали

Біметал – це металевий матеріал, що складається з двох шарів різнорідних металів або сплавів (наприклад, сталь і алюміній, сталь і ніобій, сталь і мідь, сталь і чавун, алюміній і титан, титан і молібден та інших).

Застосування біметалевих виробів або шаруватих композицій набуває все більшого поширення при виробництві та відновленні зношених деталей в хімічній, нафтохімічній, харчовій і машинобудівній промисловості завдяки отриманню унікальних комплексів властивостей: високої міцності, жароміцності, корозійної стійкості, електропровідності, теплопровідності, технологічності та інших властивостей, якими не володіють складові композиційних матеріалів окремо. При цьому композиція може складатися не тільки з двох, але і з більшої кількості металів, що мають різні характеристики.

Для роботи в екстремальних умовах застосовують біметалеві матеріали, основним шаром яких є неіржавіючі та жароміцні сплави, ніобій, тантал та інші тугоплавкі матеріали.

Біметали отримують наступними способами: обробкою тиском (прокатка, осад, пресування, волочіння), зварювання вибухом, литтям, наплавленням, паянням та нанесення порошкових покриттів.

Застосування біметалевих листів, дроту, багат шарової стрічки, двошарової інструментальної сталі дає значну економію міді, нікелю, вольфраму та інших дефіцитних металів (рис. 2.1 а).



Рис. 2.1. Біметалева стрічка (а) та термобіметалевий датчик (б)

Здатність біметалу протистояти корозії в тому чи іншому середовищі визначає галузь його застосування. При цьому корозійна стійкість визначається матеріалом шару, що плакує. Двошарові сталі з шаром, що плакує, з аустенітних хромонікелевих сталей типу 08X18H10T застосовують для виготовлення апаратів, які працюють в більшості органічних сполук і таких середовищах, як розчини азотнокислих, сірчано-кислих і хлористих солей, сірчисті та вуглекислі гази.

У зносостійких біметалів для шару, що плакує, застосовують сталі та

сплави з високою стійкістю проти абразивного зношування, а для основного шару зазвичай використовують маловуглецеву сталь. Застосування шару твердої сталі в поєднанні з більш м'якою дозволяє не тільки збільшити термін служби зносостійких біметалів, а й надати їм нову властивість – самозагострювання. Біметалеві двохшарові та трьохшарові листи і смуги знайшли широке застосування для ріжучого інструменту. В результаті широкого використання біметалу досягається значна економія високолегованих сталей, що мають дефіцитні легуючі елементи, такі як хром, вольфрам, ванадій та інші.

Термобіметали знайшли широке застосування для виготовлення чутливих теплових приладів, реле часу, компенсаторів та інших приладів (рис. 2.1 б). Основна властивість термобіметалів полягає в здатності згинатися при нагріванні. Співвідношення шарів в термобіметалах приблизно становить 1: 1. Шар з великим коефіцієнтом лінійного розширення називають активним, з меншим – відповідно пасивним.

2.3 Тонкоплівкові матеріали та покриття

Розвиток технології одержання матеріалів у вигляді тонких плівок можна віднести до найбільш пріоритетних напрямів матеріалознавства. Цей факт зумовлений тим, що в тонких плівках властивості матеріалів часто значно відрізняються від тих, які були типовими для тих самих матеріалів у вихідному стані.

Головною характеристикою тонких плівок є **адгезія** – здатність матеріалів міцно зчіплюватися один з одним. Тому залежно від властивостей адгезії матеріалу, що напилюється, всі тонкоплівкові покриття можна поділити на дві групи: адгезійні покриття та неадгезійні покриття.

Тонкоплівкові покриття складаються з діелектричних, металевих і оксидних сполук.

Тонкоплівкові оксидні покриття на основі перехідних металів IV, V груп широко використовуються у виробництві мікроелектронних і оптичних компонент, захисних і біологічно сумісних покриттів. На основі оксидних покриттів титану, танталу, кремнію, алюмінію розроблені багатошарові діелектричні дзеркала з високим коефіцієнтом відображення (> 99,99%) і стійкістю до лазерного випромінювання. Покриття на основі оксидів титану і танталу є основою біосумісних покриттів при ендопротезуванні; покриття на основі діоксиду кремнію використовуються для сорбції високомолекулярних сполук різного походження в біохімічній промисловості.

Тонкі плівки, що наносяться у вакуумі, широко застосовуються у виробництві дискретних напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем (ІМС), а також при виготовленні фотошаблонів – основного технологічного інструменту мікроелектроніки. Сьогодні тонкоплівкові елементи займають до 80% площі напівпровідникових кристалів, що зумовлено постійним функціональним ускладненням ІМС.

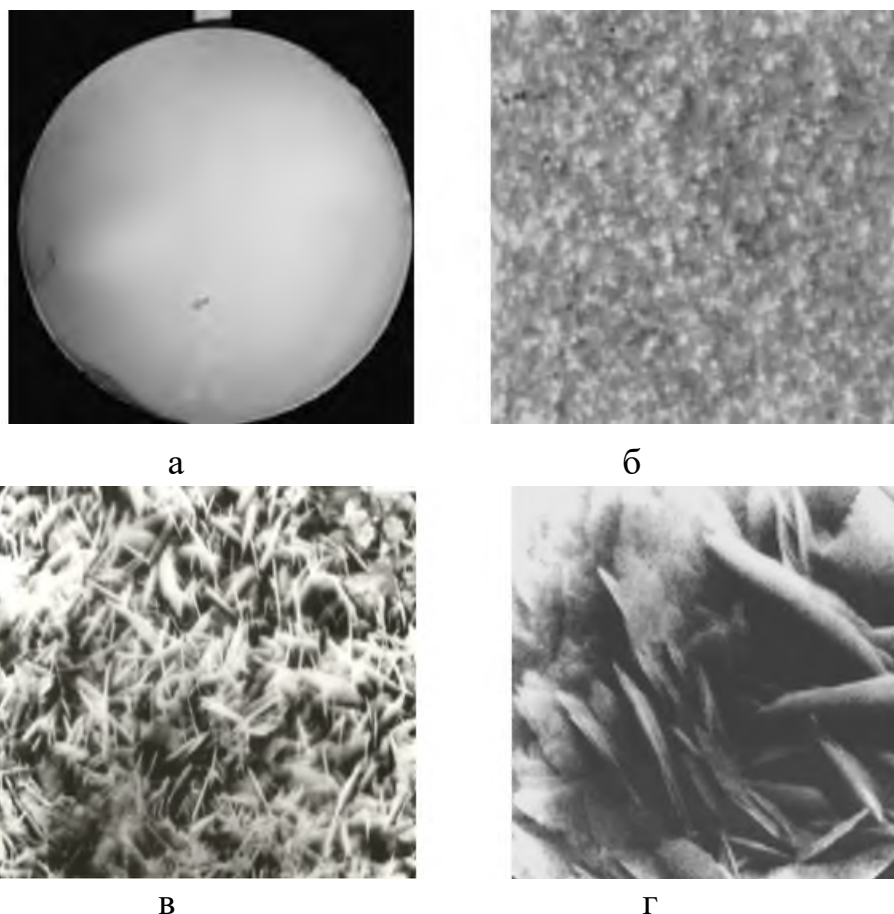
Тонкоплівкова технологія базується на складних фізико-хімічних

процесах і застосуванні різних металів та діелектриків. Так, тонкоплівкові резистори, електроди конденсаторів і проміжні з'єднання виготовляють шляхом осадження металевих плівок, а міжшарову ізоляцію та захисні покриття – шляхом осадження діелектричних плівок.

Важливим етапом є контроль параметрів тонких плівок (швидкості нанесення, їх товщини та рівномірності, поверхневого опору), який здійснюється за допомогою спеціальних приладів як під час виконання окремих технологічних операцій, так і по завершенні всього процесу.

Тонкі плівки наносять у вакуумі методами термічного випару та іонного розпилення. У першому методі використовують випарники з резистивним або електронно-променевим нагріванням, а у другому – системи діодного або магнетронного розпилення.

Аморфно-кристалічна структура плівки складу MoO_3 приведена на рис. 2.2.



а – макроструктура, х 20; б – г – мікроструктура, б – х 500, РЕМ; в – х 2000; г – х 10000

Рис. 2.2. Аморфно-кристалічна структура плівки складу MoO_3

2.4 Інтелектуальні матеріали та покриття

Інтелектуальні матеріали («розумні» або смарт-матеріали) – це клас різних за хімічним складом і агрегатним станом матеріалів, яких об'єднує

наявність однієї або декількох фізичних (оптичних, магнітних, електричних, механічних) або фізико-хімічних (реологічних та інших) характеристик, що суттєво (нелінійно) змінюються під впливом зовнішніх факторів: тиску, температури, вологості, концентрації рН, електричного або магнітного полів та інших.

«Розумними» різноманітні матеріали цієї групи робить наявність у них взаємозалежних, але різних за своєю природою властивостей (механічних, електричних, магнітних та інших). Це дозволяє використовувати дані матеріали або як сенсори, чутливі до якогось зовнішнього впливу, або як виконавчі пристрої (актуатори), що передають вплив з пристрою керування на об'єкт керування.

Деякі з «розумних» матеріалів можуть самостійно реагувати на зовнішні впливи, як, наприклад, біметалеві пластини в найпростіших регуляторах температури. Матеріали цього типу зазвичай створюються з використанням різних фізичних або фізико-хімічних ефектів (наприклад, п'єзоелектричних, електрострикційних або магніострикційних явищ чи ефекту пам'яті форми), що спостерігаються в певних матеріалах.

Сучасне покоління **інтелектуальних матеріалів і структур** на їх основі має переважно декілька характерних складових:

- вбудований в структуру матеріал або прикріплені до його поверхні датчики (чутливі елементи) та приводи (виконавчі елементи, зазвичай збуджуються зовнішнім впливом, їх функції можуть також виконувати безпосередньо гібридні матеріали, які одночасно мають конструкційні та функціональні властивості);

- один або декілька мікропроцесорів та канали передавання даних, які забезпечують керівні властивості внаслідок зворотного зв'язку між зовнішнім впливом і реакцією структури на нього.

Так полімерні композиційні матеріали з функцією моніторингу напружено-деформованого стану рекомендуються для авіаційних, будівельних конструкцій, мостів, будівель та інших інженерних систем.

Інтелектуальні полімерні композиційні матеріали II-го покоління - це інформкомпозиції, матеріали з інтегрованими сенсорами, призначені для виготовлення «розумних» конструкцій з функцією моніторингу деформації та температури.

2.5 Наноматеріали та нанотехнології

Наноматеріали – це матеріали, що містять структурні елементи, геометричний розмір яких хоча б в одному вимірі не перевищує 100 нм, і завдяки цьому володіє якісно новими властивостями, в тому числі заданими функціональними та експлуатаційними характеристиками.

Основними перспективними напрямками для розвитку нанотехнологій на цей час є:

- використання наноматеріалів для освоєння космічного простору;

- створення нанороботів на світлових індикаторах;
- створення рідкорепелентних матеріалів;
- створення алмазних нановолокон для квантових мультипроцесорів;
- використання нанотехнологій для терапії ВІЛ;
- виготовлення самовідновних акумуляторів із високою інтерполяційною здатністю;
- створення електронних пристроїв на ефекті дискретного одно електронного тунелювання та самозбирання ДНК;
- створення «розумного» текстилю;
- створення девайсів на основі штучного інтелекту;
- створення квантово-фотонних схем та методів їх використання;
- виготовлення мультифункціональних чипів;
- термоелектричний трафаретний друк: технологія та апаратна частина;
- виготовлення самовідновних матеріалів;
- створення приладів та технологій на основі пам'яті зі зміною фазового стану.

В умовах просторово обмеженого середовища відбувається суттєва зміна і поява нових, своєрідних фізико-хімічних властивостей. Відомо, наприклад, що при зменшенні розмірів наночастинок розчинність елементів збільшується. Зменшення розмірів системи може призводити також до зміни кристалічних модифікацій, аморфізації, до зміни температури топлення, поверхневого

натягу, нерівності температур топлення і кристалізації, підвищеної здатності утворювати інтерметалічні сполуки, зміни провідності й оптичних властивостей.

Використання сучасних конструкційних матеріалів зазвичай обмежується тим, що збільшення міцності призводить до зниження пластичності. Дані про нанокompозити показують, що зменшення структурних елементів і більш глибоке вивчення фізики деформаційних процесів, які визначають пластичність наноструктурних матеріалів, можуть привести до створення нових типів матеріалів, що поєднують високі міцність і пластичність.

Аналіз проведених в останні роки вітчизняних і зарубіжних досліджень свідчить про високу перспективність таких основних напрямків в області розробки конструкційних матеріалів:

- виготовлення наноструктурних керамічних і композиційних виробів точної форми;
- створення наноструктурних твердих сплавів для виробництва ріжучих інструментів з підвищеною зносостійкістю і ударною в'язкістю;
- створення наноструктурних захисних термо - і корозійностійких покриттів;
- створення що володіють підвищеною міцністю і низькою займистістю полімерних композитів з наповнювачами з наночасток і нанотрубок.

В останні роки розроблені нанокompозитні металокерамічні матеріали, зокрема, на основі і, що значно перевершують по зносостійкості, міцності і ударної в'язкості аналоги зі звичайною мікроструктурою. Підвищені

експлуатаційні характеристики нанокompозитних матеріалів обумовлені утворенням при спіканні специфічних безперервних ниткоподібних структур, що формуються в результаті тривимірних контактів між наночастинками різних фаз. Розробка і впровадження в промислове виробництво технології створення нанокompозитних виробів сприятиме розв'язанню проблеми виготовлення високоякісних ріжучих інструментів.

Підвищення корозійної стійкості наноструктурних покриттів обумовлено, в першу чергу, зниженням питомої концентрації домішок на поверхні зерен у міру зменшення їх розмірів. Чистіша поверхня забезпечує більш однорідну морфологію і більш високу корозійну стійкість міжзеренних кордонів. Наноструктурні покриття характеризуються надвисокою міцністю. Один з основних механізмів зміцнення обумовлений ефектом скупчення дислокацій поблизу перешкод, якими при зменшенні розмірів зерен є їх межі. Важливою перевагою покриттів з нанорозмірною структурою є обумовлена підвищеною пластичністю можливість зниження в них залишкових напружень, що дозволяє виготовляти покриття міліметрової товщини.

Використання диспергованих в полімерній матриці неорганічних наповнювачів з нанорозмірних порошоків дозволяє істотно підвищити вогнестійкість пластмас, що є одним з основних недоліків при використанні їх в якості конструкційних матеріалів, оскільки продукти згоряння полімерів, як правило, представляють собою отруйні речовини. Результати досліджень показують, що зниження горючості може бути доведено до самозатухання полум'я. При цьому нанорозмірні порошоків наповнювачі не знижують механічної міцності та оброблюваності матеріалів. Полімерні нанокompозити мають високу абляційну стійкість, що відкриває перспективи їх використання для захисту поверхні виробів, експлуатованих в умовах впливу високих температур.

Питання для самоконтролю

1. Охарактеризувати останні досягнення в створенні нових матеріалів.
2. Які ви знаєте досягнення в створенні біметалів?
3. Охарактеризувати проблеми створення тонкоплівкових матеріалів та покриттів.
4. Надати визначення поняттям «біметал», «інтелектуальні матеріали» та «наноматеріали».
5. Визначити основні перспективні напрямки для розвитку нанотехнологій.

Тема 3. ПРОБЛЕМИ НАНЕСЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ. ПРОБЛЕМИ ТРИБОЛОГІЇ

Мета лекції – ознайомлення з сучасними технологіями нанесення зносостійких покриттів та проблемами трибології та триботехніки.

План

3.1 Проблеми нанесення зносостійких покриттів

3.2 Проблеми трибології та триботехніки

Перелік ключових термінів і понять: зносостійкі покриття, протикорозійний захист, «розумні» покриття, самопоширюваний високотемпературний синтез, трибологія, триботехніка.

3.1 Проблеми нанесення зносостійких покриттів

3.1.1 Протикорозійний захист деталей та металоконструкцій

Захисні покриття металів використовуються для запобігання корозії та забезпечення надійної ізоляції поверхні виробів від впливу агресивного середовища. Для забезпечення максимального захисту від корозійного пошкодження покриття повинне бути суцільним, гладким і попередньо очищеним.

Крім того, необхідно забезпечити хороше зчеплення поверхонь. Це допоможе найбільш рівномірно нанести покриття, зробити його «суцільним» і непроникним для елементів агресивного середовища. Рівномірний розподіл по поверхні забезпечує високі показники зносостійкості, жаростійкості та твердості металоконструкції або окремих металевих деталей.

Дослідження процесів корозії дає основу стверджувати, що надійний захист від корозії - це, в першу чергу, правильна підготовка поверхні і тільки потім якісний шар герметиків, фарб або інших типів покриття. Відомо багато досліджень процесів корозії та улаштування захисних покриттів. Існує також багато речовин для очищення поверхонь, інгібіторів, напилень, домішок та інших.

Серед найпоширених напрямків вирішення **проблем протикорозійного захисту** є:

- фундаментальні аспекти корозії та корозійно-механічного руйнування;
- воднева та газова корозія;
- нові корозійнотривкі матеріали та покриття;
- інгібіторний та біоцидний захист;
- електрохімічний захист;
- методи досліджень і корозійний контроль;
- протикорозійний захист обладнання нафтогазової, хімічної та енергетичної промисловості.

Проблема **протикорозійного захисту** загострюється і через обмежений випуск металургійними підприємствами корозійно-захищеного металопрокату, дефіцит вітчизняних ефективних засобів його протикорозійного захисту - інгібіторів корозії, лакофарбових, полімерних матеріалів, технологічного обладнання для підготовки поверхні та нанесення захисних покриттів, апаратури і матеріалів для електрохімічного захисту, апаратури, призначеної здійснювати контроль і моніторинг корозії промислових об'єктів.

3.1.2 Зносостійкі покриття для захисту деталей тертя сучасних газотурбінних двигунів

Загальні вимоги до зносостійких покриттів, які можуть застосовуватися для захисту деталей тертя газотурбінних двигунів (ГТД) від високотемпературного зношування: висока мікротвердість при збереженні пластичності, висока адгезія до основи, температура експлуатації >500 °C при тривалій жаростійкості, низька шорсткість поверхні для зниження тертя між контактуючими деталями пари.

Розробкою подібних покриттів за кордоном займаються такі фірми як Honeywell International Inc., NASA, General Electric, Dow Global Technologies Inc., Union Carbide Coatings Corp., Kennametal Inc., United Technologies, General Electric (США), MTU Aeroengines і Sulzer Metco (Німеччина).

Оксиди РЗМ, таких як ітрій, гадоліній, празеодім, знаходять широке застосування при виготовленні перспективних керамік для теплозахисних покриттів. Наявність РЗМ в подібній кераміці (до 15%) істотно знижує її теплопровідність і підвищує механічні властивості. Однією з порівняно недавно відкритих галузей застосування кераміки стало використання її для високотемпературних зносостійких покриттів.

Основні технології нанесення високотемпературних зносостійких покриттів - це різні способи плазмового напилення (APS, LPPS), високошвидкісного напилення (HVOF) і детонаційного напилення з подальшою фінішним доведенням робочої поверхні покриття, а також різні способи іонно-плазмового осадження, в тому числі з використанням асистував осадження і (або) іонної імплантації, що дозволяють отримувати покриття заданої товщини з мінімальною фінішною обробкою поверхні після нанесення покриття. Широке використання в трибології отримали нанопокриття, в тому числі зі структурою, яка само організується та трансформується в процесі експлуатації та дозволяє істотно збільшити ресурс захищаються деталей.

Також новим напрямком у розвитку зносостійких покриттів є поява «розумних» матеріалів. Покриття мають багатошарову структуру (чергуються шари дисульфиду молібдену, що наноситься магнетронним розпиленням, і керамічного оксиду цирконію, стабілізованого ітрієм з додаванням РЗМ (Er та Sm)). Загальна товщина покриття, в залежності від поставленого перед розробниками завдання, досягає >3 мкм. Ефект «розумного» покриття досягається завдяки перерозподілу і демпфіруванню напружень між шарами в залежності від зовнішнього навантаження. Відомі різні конструкції

«адаптивних» покриттів:

- на основі алмазоподібної матриці з включеннями твердих частинок з карбиду вольфраму і змащувальних - з дисульфідів вольфраму або молібдену;
- з урахуванням матриці з золота і кераміки (YSZ) з включеннями дрібнодисперсних частинок з дисульфиду молібдену та алмазоподібних частинок вуглецю.

На особливу увагу заслуговує механізм роботи даних покриттів в залежності від умов тертя - в сухому або вологому середовищі. У вологому середовищі працюють алмазоподібні частки, в яких відбувається фазове перетворення з утворенням структури, що забезпечує низький коефіцієнт тертя. При сухому терті основну роль грають включення дисульфиду молібдену та карбиду вольфраму, які завдяки знаходженню в матриці мають аморфну структуру, але під час процесу тертя їх структура стає кристалічною, що забезпечує підвищену зносостійкість і низький коефіцієнт тертя (до 0,01) внаслідок базисної орієнтації кристалів MoS_2 та WS_2 паралельно площині ковзання.

Слід додати, що даний напрямок дуже перспективний, проте поки технологія нанесення подібних покриттів є дорогою та експериментальною і саме тому не знаходить широкого застосування в промисловості.

3.1.3 Застосування самопоширюваного високотемпературного синтезу в технологіях нанесення зносостійких покриттів

Передумовою отримання нових матеріалів з оптимальним комплексом ефективних властивостей є розробка технологій якісно нового рівня, які базуються на розумінні та прогнозуванні процесів структуроутворення, а, отже, і можливостях впливу на сам механізм формування структури з бажаними фізико-механічними властивостями.

Однією з нових та найбільш ефективних технологій виготовлення широкого спектру матеріалів, в тому числі композиційних, є технологія самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС), суть якої полягає у проходженні прямого синтезу цінних в практичному відношенні сполук в екзотермічних реакціях між певними хімічними елементами.

Основними фізичними параметрами СВС-процесу є максимальна температура горіння в межах 800–4000 °С та лінійна швидкість горіння в межах 1–150 мм/с. Процес горіння складається з двох основних стадій: відновлення оксидів з утворенням металу (металотермічна стадія) та стадія прямого синтезу елементів. Для отримання щільного СВС-матеріалу з високими фізико-механічними властивостями необхідно враховувати закономірності горіння реакційної суміші, формування хімічного й фазового складів кінцевого продукту, режим кристалізації сплаву.

Метод СВС-процесу дозволяє отримувати тугоплавкі сполуки різного хімічного й фазового складу (карбіди, нітриди, силіциди, халькогеніди, інтерметаліди, гідриди), а також відновлені метали. Крім того, методом СВС-

процесу можна отримувати неорганічні матеріали з різними фізичними властивостями (порошкоподібні; спечені – суцільні та пористі; литі), а також вироби певної форми та розміру. Можливе також проведення вирощування монокристалів з розплавлених продуктів горіння.

Важливим завданням СВС-процесу є отримання структури термітних сплавів з карбідами металів. Метод ґрунтується на використанні теплоти від реакції горіння алюмотермітної суміші для розплавлення порошків шихти з легуючими елементами і отримання рівнорозподіленої структури на основі карбідів металів. З основних двох елементів структури – карбідів і металевої основи утворюється висока зносостійкість та міцність сплавів, що визначаються характеристиками головного структурного елементу – карбиду.

Основна увага в експериментальних і теоретичних дослідженнях СВС-процесу приділяється безгазовому і фільтраційному горінню (горінню сумішей металів і неметалів та горінню металів в газоподібному середовищі – N_2 , H_2 та інших). В обох випадках у ході горіння утворюються тільки конденсовані продукти, при цьому в хвили горіння може розвиватися висока температура (до 3000 К).

Технології із застосуванням явища СВС-процесу відрізняються між собою багатьма параметрами, серед яких є: типи хімічних реакцій та процесів, зовнішній вплив, склад та структура шихти, морфологія продуктів і способи їх обробки чи переробки, призначення кінцевої продукції.

Серед основних переваг СВС-процесу, у порівнянні з традиційними технологіями отримання матеріалів, є висока температура та швидкість проходження процесу, використання більш дешевої хімічної енергії замість електричної, простота та довговічність обладнання.

В практичному значенні значно ширші перспективи відкриває метод суміщення процесів СВС із одночасним нанесенням покриттів, оскільки дозволяє об'єднати в собі переваги як СВС, так і переваги конкретної технології нанесення покриттів.

3.2 Проблеми трибології та триботехніки

Завдання триботехніки полягає у дослідженні тертя, змащування і зношування механічно оброблених поверхонь з метою отримання детальної уяви про їх взаємодію.

На сьогодні можна виділити наступні **напрямки трибології та триботехніки**:

- фізико-хімічна механіка контактної взаємодії тіл з урахуванням впливу середовища при ударі, ковзанні і коченні, а також при різних вібраціях;
- вчення про площі контурного і фактичного контактів;
- дослідження сухого і граничного тертя ковзання, кочення і кочення з ковзанням (коли виникають ефекти буксування і юза) для створення розрахункових методів оцінки деталей і вузлів тертя, що працюють при найбільш важких умовах за втратами на тертя і зношення;
- газо- і гідроеластодінаміка;

– дослідження різних видів зношування (в тому числі абразивного і водневого як найбільш важких) і розробка інженерних методів розрахунку деталей і вузлів тертя на знос при проектуванні та оцінці необхідної кількості запасних частин і міжремонтних термінів;

– теплофізика та теплова динаміка тертя і зношування, в тому числі випадків тертя з проходженням електричного струму через контакт;

– системний аналіз і моделювання тертя, зношування і мастильної дії, а також розробка наукових основ трибології та прискорених методів випробувань;

– дослідження тертя і зношування однойменних пар тертя з керамічних і вуглецевих матеріалів стосовно фрикційних пристроїв, ущільнень і двигунів внутрішнього згоряння;

– створення і оптимальне використання універсальних і цільових машин тертя в дослідженнях з трибології та в практичних завданнях триботехніки для оцінки та вибору оптимальних матеріалів для конкретних службових умов;

– розробка наукових основ сумісності трибологічних матеріалів, а також практичних рекомендацій, необхідних для створення зносостійких антифрикційних і фрикційних матеріалів, нових технологій зміцнення і нанесення покриттів, нових матеріалів і присадок до них, в тому числі для біологічних вузлів тертя і деталей;

– форсування досліджень в області мікро- і нанотрибології;

– економічні та екологічні проблеми трибології та триботехніки.

У зв'язку з зазначеними вище напрямками трибології та триботехніки на передній план висувуються такі **проблеми трибології та триботехніки**:

– забезпечення економічно доцільною найбільшою довговічністю вузлів тертя або по можливості рівною зносостійкістю в порівнянні з іншими частинами машини при роботі в різних середовищах і кліматичних умовах;

– підвищення працездатності матеріалів і вузлів тертя в широкому діапазоні температур (негативних і позитивних);

– мінімізація габаритних розмірів конструкцій вузлів тертя і забезпечення пов'язаного з цим підвищення питомих навантажень на опори та інші деталі, що працюють в умовах тертя;

– підвищення швидкостей ковзання і кочення без небезпеки руйнування вузлів від динамічних і теплових навантажень;

– забезпечення в одних пристроях мінімального опору руху (в підшипниках), а в інших – максимального опору (в гальмах).

Для подолання цих проблем необхідно вирішити такі конкретні **завдання триботехніки**:

1. Підвищити термін служби вузлів тертя будівельно-дорожніх та тягово-транспортних машин, а також обладнання підприємств будівничої індустрії за рахунок застосування нових конструктивних матеріалів, зниження шкідливого рівня вібрації та шуму, які викликаються тертям.

2. Збільшити коефіцієнт корисної дії (ККД) різних передач і вузлів тертя в машинах та механізмах. Для цього в силових і кулачкових передачах та навантажених підшипниках збільшити контактну міцність і знизити втрати на

тертя. Знизити також шкідливі вібраційні та шумові ефекти, що виникають у вузлах тертя за рахунок застосування покриттів, нових мастильних матеріалів і антифрикційних присадок, а також мікрофільтрів і ущільнень для запобігання попадання абразивних частинок в зону тертя.

3. Підвищити температурний бар'єр в підшипниках високооборотних машин за рахунок застосування нових більш теплостійких підшипникових матеріалів, здатних працювати при температурі вище 200 °С, забезпечуючи малий опір руху при пуску.

4. Підвищити несучу здатність і довговічність підшипників кочення за рахунок нових технологій та матеріалів, а також оптимізації форми поверхонь тертя кочення.

5. Розробити нові типи фрикційних композитних матеріалів (порошкових і вуглецевих) для гальм і муфт, що працюють при високих об'ємних і поверхневих температурах. Для гальм і муфт гарячих виробництв нові матеріали повинні забезпечити необхідну працездатність при об'ємних температурах до 600–800 °С з коефіцієнтом стабільності гальмування не менше 0,8 і зношуванням не більше 1 мкм на одне гальмування.

6. Забезпечити за рахунок застосування нових конструкційних і мастильних матеріалів та різних технологічних покриттів зниження зношування, шкідливих викидів, а також витрати палива в двигунах.

7. Здійснити перехід до нових технологій, що дозволяє отримати поверхні тертя з заданими властивостями по тертю і зношуванню (плазмові, лазерні, газотермічні, іонно-вакуумні, електронно-променеві та інші).

8. Здійснити в міжнародному масштабі уніфікацію та стандартизацію методів і засобів триботехнічних випробувань зі створенням міжнародного банку даних фрикційно-зносостійких характеристик типових конструкційних і мастильних матеріалів.

При вирішенні найбільш актуальних завдань необхідно проведення наступних досліджень:

- тонких поверхневих шарів при терті ковзання та кочення, в тому числі при використанні ефекту виборчого перенесення;

- явищ задиру, схоплювання та пітінгу при ковзанні, коченні та коченні з ковзанням;

- теплових явищ і теплової динаміки при всіх видах тертя і зношуванні;

- специфіки тертя та зношування при малих швидкостях і малих переміщеннях, а також в умовах вібронавантаження;

- нових присадок до мастил, які радикально змінюють процеси взаємодії поверхні при терті;

- малов'язких рідин (зокрема води) в якості мастильних матеріалів;

- газоподібних речовин в якості мастильних матеріалів і умов їх застосування;

- нових самозмащувальних твердих і порошкових мастильних матеріалів;

- оптимального використання нових технологічних способів зміцнення поверхонь тертя і нанесення фрикційних та антифрикційних покриттів;

– нових фрикційних та антифрикційних матеріалів (в тому числі керамічних і вуглецевих) для використання в різних газових, рідких та інших середовищах.

Питання для самоконтролю

1. Які ви знаєте проблеми протикорозійного захисту деталей та металоконструкцій?
2. Надати визначення поняттям «зносостійке покриття» та «саморозповсюджений високотемпературний синтез».
3. Охарактеризувати проблеми нанесення зносостійких покриттів.
4. Визначити основні технології нанесення високотемпературних зносостійких покриттів.
5. Охарактеризувати проблеми застосування самопоширюваного високотемпературного синтезу.
6. Визначте основні напрямки трибології та триботехніки.
7. Визначте основні завдання триботехніки.
8. Надати характеристику основним проблемам трибології та триботехніки.

Тема 4. ПРОБЛЕМИ РАДІОАКТИВНОСТІ МЕТАЛУРГІЙНОЇ СИРОВИНИ ТА МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ

Мета лекції – ознайомлення з проблематикою природної та техногенної радіоактивності металургійної сировини та металопродукції.

План

- 4.1 Основні поняття радіоактивності
- 4.2 Радіоактивність шихтових компонентів та продуктів плавки металургійного виробництва
- 4.3 Радіоактивні метали в червоних шламах
- 4.4. Радіаційний контроль металургійної сировини та металопродукції

Перелік ключових термінів і понять: радіаційні метали, природна та техногенна радіоактивність, радіоактивні елементи, радіаційний контроль, радіоактивні метали в червоних шламах.

4.1 Основні поняття радіоактивності металів

На сьогодні перед суспільством постає проблема негативної екологічної дії радіації на навколишнє середовище. Це зумовлено невпинним зростанням кількості радіоактивних речовин як природного, так і техногенного походження, підвищенням інтенсивності космічних променів, унаслідок чого екологічні системи (екосистеми) Землі зазнають дедалі більшого впливу іонізуючого випромінювання.

Радіоактивні метали (рис. 4.1) – це метали, які мимоволі випромінюють потік елементарних частинок в зовнішнє середовище. Цей процес називають альфа (α), бета (β), гамма (γ) випромінюванням або просто радіоактивним випромінюванням.



Рис. 4.1. Радіоактивний метал

Радіоактивні елементи діляться на природні (існуючі в природі) та штучні

(одержувані в результаті лабораторного синтезу). Природних радіоактивних металів не багато – це полоній, радій, актиній, торій, протактиній та уран. Їх найбільш стабільні ізотопи зустрічаються в природі, частіше у вигляді руди.

Самий радіоактивний метал на даний момент – це ліверморій. Його ізотоп лівермор-293 розпадається всього за 61 мілісекунду. Інший дуже радіоактивний метал – це унунпентій. Ізотоп унунпентій-289 має трохи більший період розпаду – 87 мілісекунд. З більш-менш стабільних, практично застосовуваних речовин, самим радіоактивним металом вважається полоній (ізотоп полоній-210).

Серед шляхів попадання радіоактивних речовин в металобрухт слід виділити:

- зараження металобрухту від радіоактивного джерела;
- активування металобрухту в наслідок впливу на нього радіоактивного джерела;
- зараження металобрухту, що знаходиться в безпосередній близькості або захищає радіоактивний джерело.

4.2 Радіоактивність шихтових компонентів та продуктів плавки металургійного виробництва

На сьогодні актуальна проблема радіоактивності оточуючих людину матеріалів, зокрема проблема радіоактивності металів та сплавів. Замірюванню радіоактивності підлягають як залізородні матеріалами (залізна руда, агломерат, окотиші), кокс, вапняк, так і продукти доменного виробництва (чавун, шлак та пил, що уловлюється).

Мінеральні види сировини, кокси, що поступають на металургійні підприємства, вмішують радіоактивні елементи (радіонукліди) природного походження, головні серед яких це $^{226}_{88}\text{Ra}$, $^{232}_{90}\text{Th}$, $^{40}_{19}\text{K}$ та інші члени радіоактивних рядів урану, торію та актиноурану.

Радіоактивність мінеральних видів сировини визначається вмістом в них радіоактивних елементів – членів радіоактивного ряду $^{238}_{92}\text{U}$, $^{235}_{92}\text{U}$, $^{232}_{90}\text{Th}$ та радіоактивного ізотопу калію $^{40}_{19}\text{K}$. Вміст радіоактивних елементів в оксидних гірських породах (рудах) ($\text{U}=3,2 \cdot 10^{-4}\%$, $\text{Th}=1,1 \cdot 10^{-3}\%$) визначається їх походженням.

Максимальна їх концентрація знаходиться в органічних осадах, що обумовлено присутністю вуглецю органічного походження, фосфатів та інших речовин, що є важливим осаджувачем урану. Встановлено, що хемогенні осади (наприклад, чіпс $\text{Ca}[\text{SO}_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, галіт NaCl та інші) відрізняються низькою радіоактивністю.

До радіоактивних елементів відносять тільки елементи, усі ізотопи яких радіоактивні.

Природний ізотоп торію $^{232}_{90}\text{Th}$ володіє радіоактивними властивостями та має період напіврозпаду $T_{1/2}=1,389 \cdot 10^{10}$ років.

При оцінці еквівалентної радіоактивності гірських порід, вихідних рудних концентратів, органічного твердого палива та продуктів металургійного виробництва враховується радіоактивність ізотопу $^{40}_{19}K$ ($T_{1/2}=1,3 \cdot 10^9$ років), вміст в природі якого складає 0,01%.

Радіоактивні елементи U, Ra та Th мають високу спорідненість до кисню. В ході металургійного високотемпературного переділу вони повинні концентруватися у шлаковій фазі.

Поряд з залізорудними матеріалами (залізною рудою, агломератом, окотишами), коксом та вапняком заміру радіоактивності підлягають також продукти доменного виробництва – чавун, шлак та пил, що уловлюється (табл. 4.1).

Закордонні дослідження оцінки безпеки (придатності) матеріалів показують, що радіоактивність ізотопу $^{226}_{88}Ra$ повинна бути нижче 120 Бк/кг.

Таблиця 4.1 – Питома природна радіоактивність вихідних шихтових компонентів та продуктів плавки доменних чавунів в умовах Кошицького металургійного комбінату (Словенія)

Найменування матеріалу	Радіоактивність ізотопів елементів, Бк/кг		
	$^{40}_{19}K$	$^{226}_{88}Ra$	$^{232}_{90}Th$
Агломераційна шихта	27,7	19,5	<5,0
Кокс	118,9	50,9	<5,0
Вапняк	<15,0	<5,0	<5,0
Агломерат I	<20,8	<23,0	<5,0
Агломерат II	36,4	5,0	<5,0
Повернення агломерату	24,0	21,5	<5,0
Чавун	15,0	5,0	<5,0
Доменний шлак	303,4	87,9	<5,0
Колошнікова пил	60,9	<5,0	<5,0

Результати досліджень радіоактивності шихтових компонентів та продуктів плавки марганцевих та кременистих феросплавів в електропечах приведені в табл. 4.2.

Підвищення радіоактивності ізотопів $^{226}_{88}Ra$, $^{232}_{90}Th$, $^{40}_{19}K$ в малофосфористому шлаку обумовлено головним чином за рахунок потрапляння них з коксу. Ще більш великі значення має радіоактивність ізотопів $^{226}_{88}Ra$, $^{232}_{90}Th$ у відвальному кислому шлаку силікомарганцю (46–48% SiO_2 , 14–16% MnO , кратність шлаку 1,3–1,4), що підтверджує достатньо повний перехід цих ізотопів з марганецьрудної сировини та кварциту в кислий шлаковий розплав. Радіоактивність ізотопу $^{40}_{19}K$ в шлаку силікомарганцю знаходиться на рівні його в марганецьрудній сировині та навіть нижче. Це пов'язано з високою випарюваністю оксиду K_2O та відновлюваністю калію. Перехід цього оксиду в пилегазову фазу плавки силікомарганцю та ще в

більшій мірі при виплавці феромарганцю підтверджується високою радіоактивністю пилу газоочищення та шламів.

Таблиця 4.2 – Радіоактивність елементів $^{226}_{88}Ra$, $^{232}_{90}Th$, $^{40}_{19}K$ та еквівалентна радіоактивність шихтових компонентів та продуктів плавки марганцевих та кремнієвих феросплавів в електропечах

Найменування компонентів шихти та продуктів плавки	Радіоактивність ізотопів елементів, Бк/кг			
	$^{226}_{88}Ra$	$^{232}_{90}Th$	$^{40}_{19}K$	$a_{екв}$
Марганцевий концентрат	31,5–42,4	10,1–17,8	45,9–61,2	70
Кварцит	6,93–7,81	9,5–11,2	<1,0	22
Мало фосфористий шлак	54,9–65,2	20,1–27,7	71,3–84,2	99
Кокс	40,3–57,7	40,1–46,7	97,9–108,4	116
Силікомарганець	11,7–12,2	<1,0	43,2–44,5	13
Феромарганець	9,3–10,9	<1,0	19,1–20,4	12
Феросиліцій	11,5–19,4	2,5–3,5	208–291	24
Відвальний шлак силікомарганцю	96,9–102,1	35,2–47,4	48,5–56,8	161
Відвальний шлак феромарганцю	88,1–93,2	49,3–56,4	31,1–34,6	163
Відвальний шлак феросиліцію	31,5–31,9	19,5–23,2	13,3–15,7	61
Пил електрофільтрів	12,7–15,1	6,3–12,7	13,2–17,9	46
Пил газоочищення	23,4–41,5	<3-5	21,1–37,2	
Шлами	18,3–21,4	7,5–9,1	81,8–88,4	

Відвальний шлак високовуглецевого феромарганцю (кратність шлаку 1,2–1,3) має відносно низьку основність ($\%CaO/\%SiO_2=1,15-1,2$) та відповідно достатньо повно асимілює оксиди радіоактивних ізотопів. В силікомарганцеві та феромарганцеві радіоактивність ізотопу $^{232}_{90}Th$ нижче одиниці, що узгоджуються з високою термодинамічною міцністю оксиду ThO_2 .

У феросиліції марок ФС45 та ФС75 радіоактивність ізотопу $^{232}_{90}Th$ виявилася декілька вище, ніж у марганцевих сплавів, що узгоджується з більш високими температурами процесу виплавки феросиліцію. У відвальному шлаку феросиліцію спостерігається менша радіоактивність $^{232}_{90}Th$, що також підтверджує його більш повний перехід у сплав.

Дані о радіоактивності пилу газоочищення та шламів відображають положення о високій летучості оксиду K_2O , у меншій мірі RaO з переходом їх в визначеній кількості в пилегазову фазу плавки феросплавів та о малому ступені переходу ізотопу $^{232}_{90}Th$ в ці попутні продукти плавки. Радіоізотоп $^{232}_{90}Th$

концентрується головним чином в шлаковій фазі плавки феросплавів.

Відомо спосіб переробки радіоактивно забрудненого металу, технічним результатом якого є підвищення коефіцієнтів дезактивації при реалізації одностадійного процесу дезактивації, а також зниження обсягу кінцевих цементованих відходів, зниження трудомісткості, енергоємності процесу, можливість отримання металу, готового для повторного використання або утилізації звичайного переплаву та зменшення кількості вторинних радіоактивних відходів.

Серед способів переробки радіоактивних відходів слід зазначити електрохімічну дезактивацію у водному розчині сірчаної кислоти (15–20 г/л).

4.3 Радіоактивні метали в червоних шламах

При переробці бокситової сировини на глинозем за способом Байєра алюміній та велика частина галію переходять в алюмінатний розчин, а нерозчинна при вилуговуванні частина бокситу утворює осад – так званий **червоний шлам** (ЧШ). При цьому на кожну тонну одержуваного глинозему утворюється від 0,7 до 1,5 т червоного шламу в залежності від складу бокситу, що переробляється.

У червоному шламі з бокситу частково переходять такі рідкісні метали як ванадій, титан, цирконій, ніобій та тантал. Практично повністю в червоний шлам переходять рідкоземельні метали (скандій, ітрій, а також лантан, церій і неодим). У вигляді мікродомішок у червоному шламі містяться такі радіоактивні метали як уран і торій.

Радіоактивність червоного шламу є спадковою, отриманою від переробки за способом Байєра материнських бокситів, в яких досить поширеним елементом є торій. За літературними даними коефіцієнт концентрування торію в бокситу становить 3,4–4,2. Боксити є основним джерелом радіоактивності в процесі Байєра. Наприклад, бразильські боксити мають активність 37 ± 12 Бк/кг для ^{238}U та 154 ± 16 Бк/кг для ^{232}Th . При цьому червоний шлам, що утворюється, має концентрацію радіонуклідів вище ніж у бокситів. Вважається, що в червоному шламі, як правило, присутні природні радіонукліди, в основному це уран (50–60 г/т) і торій (20–30 г/т).

В Австралії використовуються єгипетські боксити з активністю приблизно 120 Бк/кг для ^{235}U і від 289 до 575 Бк/кг для ^{40}K .

Відомо, що червоний шлам використовується в якості матеріалу для дорожньої та будівельної техніки, в тому числі для виготовлення кераміки. Для зниження до прийняттого рівня спадкової радіоактивності рекомендується в керамічну суміш додавати карбонат барію, який сприяє утворенню в ній склоподібних фаз.

При виробництві глинозему з ямайських бокситів було встановлено збільшення вмісту урану, торію, актинію та їх нащадків (свинцю, вісмуту) в червоному шламі.

Вкрай важливо, щоб глинозем, що використовується для виробництва електронних пристроїв, містив мінімально низький рівень α -випромінювання,

основним джерелом якого в глиноземі є уран і, в меншій мірі, торій. Уран фіксується в червоному шламi у мiру проходження реакції знесолення.

Найбільш часто вилучаються з червоного шламу такі елементи як скандій та ітрій. Якщо вважається, що в бокситі міститься в середньому 0,001–0,01% Sc_2O_3 , то в червоному шламi його вміст вже становить 0,01–0,02%. Найбільш перспективним способом витягання скандію є сіркокислотний розчин червоного шламу з наступною сорбцією його на іонообмінних смолах (АФІ-21, АФІ-22, СФ-4, СФ-5) і десорбцією розчином Na_2CO_3 .

При сіркокислотному вилуговування червоного шламу разом зі скандієм витягають ітрій та інші рідкоземельні метали. Для вилучення ітрію пропонується обробка червоного шламу 5–7%-ним розчином HCl при 85–95 °С і відносно Р:Т = (3–5):1.

4.4 Радіаційний контроль металургійної сировини та металопродукції

З метою забезпечення мінімізації негативної екологічної дії радіації на навколишнє середовище слід проводити своєчасний радіаційний контроль металів та сплавів.

Джерела іонізуючого випромінювання у рамках будь-якої практичної діяльності, на яку поширюються вимоги основних санітарних правил забезпечення радіаційної безпеки України, включають:

- радіоактивні речовини та пристрої, які містять радіоактивні речовини, або пристрої, що створюють випромінювання, включаючи споживчу продукцію, закриті джерела, відкриті джерела, генератори випромінювання, включаючи пересувне радіографічне обладнання;

- установки та об'єкти, на яких є радіоактивні речовини або пристрої, що створюють випромінювання, включаючи опромінювальні установки, рудники та підприємства з переробки радіоактивних руд, установки з переробки радіоактивних речовин, ядерні установки у частині, що підпадає під визначення джерела іонізуючого випромінювання, та установки (технологічні лінії) для поводження з радіоактивними відходами.

При перевірці металобрухту на радіоактивність виявляють (за наявності) локальні джерела радіаційного забруднення, якими можуть виявитися будь-які металеві фрагменти, які накопичили заряд радіоактивності в результаті:

- попадання радіоактивних елементів з приладів, конструкцій, контейнерів, що містять радіоактивні елементи;

- знаходження в зоні підвищеного радіаційного фону, наприклад, при техногенній аварії на виробництві;

- осадження великої кількості природних радіонуклідів в процесі нафто- і газовидобутку, експлуатації артезіанських свердловин;

- проникнення радіоактивних частинок в ході переплаву «чистого» металобрухту з радіоактивно забрудненим металобрухтом.

Відомо, що радіаційний контроль є методом визначення внутрішньої структури матеріалів, виробів і зварних з'єднань з використанням іонізуючих

випромінювань. *Іонізуючим випромінюванням* називають випромінювання, взаємодія якого з речовиною призводить до утворення в цій речовині зарядів різного знака. Довжина хвилі електромагнітного іонізуючого випромінювання становить $6 \cdot 10^{-9} - 10^{-16}$, що зумовлює його здатність поширюватися в непрозорих середовищах, в тому числі металах і сплавах.

За допомогою радіаційних методів контролю виявляються тріщини, непровари, включення, пори, подрізи та інші дефекти. Результати контролю наочні (крім звичайної радіометрії), тому в порівнянні з іншими методами неруйнівного контролю при радіаційному контролі легше визначити вид дефекту. Як правило, не потрібна висока чистота поверхні зварних швів і виробів, можна контролювати порівняно великі товщини.

Радіаційний контроль експортних партій металобрухту в період формування транспортних партій у місцях його накопичення може здійснюватись представником організації, яка має дозвіл територіального органу Мінекобезпеки на проведення таких вимірювань.

Вхідний радіаційний контроль металобрухту проводиться за рівнем γ -випромінювання і повинен забезпечувати виявлення в металобрухті локальних джерел або його радіоактивного забруднення гамма-випромінюючими радіонуклідами. Залежно від обсягу металобрухту, що надходить в організацію, для проведення його вхідного радіаційного контролю можуть використовуватись як автоматичні стаціонарні засоби безперервного радіаційного контролю (спеціальні ворота, стійки та інше), так і переносні засоби радіаційного контролю (спеціалізовані пошукові прилади, радіометри, високочутливі гамма-дозиметри та інше).

Для проведення вхідного радіаційного контролю металобрухту можуть використовуватись спеціалізовані пошукові прилади (ДРС-РМ1401, ІСП-РМ1401М, МКС-РМ1402М, ІСП-РМ1701 та інші), радіометри (СРП-68, СРП-88 та інші), багатофункціональні прилади (ДКС-96, ДКС-1117А, МКС-А02, МКС-РМ1402М, МКС-01р та інші) та високочутливі γ -дозиметри (ЕЛ-1101, ДКС-1119С та інші), які використовуються в пошуковому режимі як радіометри.

Вимоги до забезпечення радіаційної безпеки при заготовці та реалізації металобрухту повинні відповідати СанПіН 2.6.1.993-00.

Питання для самоконтролю

1. Надати визначення поняттю «радіоактивні метали».
2. Які основні шляхи попадання радіоактивних речовин в металобрухт?
3. Охарактеризувати радіоактивність шихтових компонентів та продуктів плавки металургійного виробництва.
4. Які радіоактивні метали знаходяться в червоних шламах?
5. Яким чином проводиться радіаційний контроль металургійної сировини та металопродукції?

Тема 5. ПРОБЛЕМИ УТИЛІЗАЦІЇ ТА ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета лекції – ознайомлення з проблематикою утилізації вторинних матеріалів металургійного виробництва.

План

- 5.1 Вторинні матеріали металургійного виробництва
- 5.2 Шляхи підвищення ефективності металургійного виробництва
- 5.3 Утилізація металобрухту

Перелік ключових термінів і понять: вторинні ресурси, енерго-та ресурсозбереження, утилізація відходів, металобрухт.

5.1 Вторинні матеріали металургійного виробництва

Вторинні матеріали (ВМ) – це матеріали і вироби, які після первинного використання можуть піддаватися також вторинному використанню.

Згідно класифікації відходів металургійного виробництва до групи 27 включено відходи, що утворюються у процесі виробництва металів основних. Цю діяльність класифіковано у групах 27.1, 27.2, 27.3, 27.4, 27.5 КВЕД.

До групи 27 належать такі класифікаційні угруповання:

- відходи виробництва чавуну, сталі та феросплавів (271);
- відходи виробництва прокату, труб та метизів з чорних металів (272);
- відходи виробництва благородних та кольорових металів (273);
- відходи процесів ливарного виробництва (274);
- послуги спеціалізовані щодо поводження з відходами виробництва чавуну, сталі та феросплавів, які надаються за місцем утворення відходів (2719);
- послуги спеціалізовані щодо поводження з відходами виробництва прокату, труб та метизів з чорних металів, які надаються за місцем утворення відходів (2729);
- послуги спеціалізовані щодо поводження з відходами виробництва благородних та кольорових металів, які надаються за місцем утворення відходів (2739);
- послуги спеціалізовані щодо поводження з відходами процесів ливарного виробництва, які надаються за місцем утворення відходів (2749).

Відходи видобутку залізної руди. Основним напрямком утилізації розкрити скельних і нескельних порід є використання їх для улаштування дамб обвалування, гребель, насипів, основ доріг, для планувальних робіт, а також для виробництва будівельних матеріалів. Скельні породи широко використовуються для виробництва щебеню, що застосовують як великий заповнювач у важких і особливо важких бетонах. На багатьох гірничо-збагачувальних комбінатах України побудовані щебеневі комплекси. Обсяги утворення цих відходів перевищують масштаби можливої переробки і

основним напрямком їх використання є зворотне засипання та рекультивація кар'єрів.

Відходи збагачення залізної руди – це хвости, які утворюються при одержанні залізного концентрату методами електромагнітної чи магнітної сепарації.

Основним напрямком утилізації хвостів збагачення є використання їх як вторинної сировини для виробництва будівельних матеріалів. Піски з відходів збагачення можуть використовуватися в розчинах для кладки та штукатурки, для приготування бетонів, одержання силікатної цегли, улаштування штучних основ під дороги, будинки, споруди, для зворотних засипань, а також у якості сировини для одержання безклінкерного шлакоцементу (спільний помел піску з доменними шлаками).

Металургійні шлаки утворюються при виплавці металів та представляють собою продукти високотемпературної взаємодії руди, порожньої породи, флюсів та палива.

Металургійні шлаки використовують для виробництва жужільної вати. Жужільну вату застосовують у якості ізоляційного матеріалу, а за допомогою різних органічних і неорганічних в'язучих матеріалів з неї виготовляють різноманітні теплоізоляційні вироби. Металургійні шлаки використовують для виробництва шлакоситалових виробів. Виробництво їх полягає у варінні жужільного скла, формуванні та подальшій його кристалізації.

Перспективним напрямком використання **шлаків кольорової металургії** є комплексна переробка, що включає попереднє вилучення кольорових і рідких металів, заліза з наступним використанням силікатного залишку для виробництва будівельних матеріалів аналогічно шлакам чорної металургії.

На нових заводах **пил і шлам металургійного виробництва** використовують у технологічних процесах шляхом добавки до агломераційної шихти. При використанні шлами попередньо зневоднюють до вологості 8–9 %, з них видаляють шкідливі домішки, насамперед такі як сірка, цинк, свинець, лужні метали, а потім механічним чи термічним способом при додаванні в'язучих матеріалів формують шматки визначених розмірів. Іншим способом утилізації залізовмісного пилу є включення його до складу шихти при виробництві цементу, фарб та барвників.

Графіт застосовують при виготовленні штучних алмазів, металокераміки, різних пластмас, олівців і присадок для зняття статичної електрики. Графітовий пил, що містить у своєму складі менш 60 % графіту, може бути використаний для приготування теплоізоляційних сумішей у ливарному виробництві.

Напрямок утилізації **сірковміщуючих шлаків** є застосування їх у сільському господарстві в якості меліоранту для кислих, опідзолених і солонцюватих ґрунтів.

5.2 Шляхи підвищення ефективності металургійного виробництва

Одним з шляхів підвищення ефективності металургійного виробництва є використання вторинних ресурсів, що забезпечує:

- зменшення обсягів видобутих з надр первинних ресурсів;
- зниження матеріальних ресурсів і витрат на виготовлення продукції;
- скорочення витрат на спалювання та захоронення сміття внаслідок збільшення частки відходів, що перероблюються;
- зниження питомих витрат енергетичних ресурсів;
- заміщення в ряді випадків імпортованих матеріалів;
- поліпшення стану навколишнього середовища (зменшення забруднення ґрунту, водних ресурсів, повітряного басейну та інше).

До *основних напрямлень енерго-та ресурсозберігаючих технологій у металургійному виробництві* слід віднести:

- залучення у виробництво бідних за вмістом основного компоненту руд;
- організацію підготовки шихти (застосування агломерації, окотування та брикетування);
- використання вторинних енергетичних ресурсів для підігріву шихти;
- утилізацію промислових викидів та відходів в технологіях виробництва феросплавів;
- застосування сучасних систем очищення технологічних газів;
- заміну застарілих технологій та агрегатів для їх реалізації на більш ефективні за основними техніко-економічними показниками;
- підвищення частки металобрухту в сталеплавильному виробництві та доцільність рафінувальних операцій в конвертері з використанням нагріву дуговим або плазмовим розрядом постійного струму;
- застосування технологій вдування пиловугільного палива у доменному виробництві;
- використання технологій переробки сталеплавильних шлаків;
- удосконалення конструкції машин безперервного лиття заготовок, зокрема, суміщення їх з прокатними станами.

Базовими шляхами розв'язання питання енергозберігаючих технологій та енергозбереження у *гірничо-металургійному комплексі є*:

- перехід до інноваційних технологій для структурної перебудови галузі;
- ефективна підтримка наявних потужностей та агресивний розвиток сировинних баз як чорної, так і кольорової металургії;
- збалансований розвиток усіх взаємопов'язаних підгалузей гірничо-металургійного комплексу;
- переоснащення основних фондів підприємств гірничо-металургійного комплексу на базі наукових досягнень як вітчизняних науковців, так і зарубіжних;
- зменшення використання матеріальних та енергетичних ресурсів у виробництві металургійної продукції (природного газу, впровадження нових технологій більш економних у енергетичному плані та більш екологічно чистих);
- відновлення виробництва певних видів продукції та впровадження нових більш перспективних, покращення якості сировини, випуск продукції з високим рівнем доданої вартості.

В агломераційному та доменному виробництві шляхами розв'язання

питання енергозберігаючих технологій є:

- побудувати агломераційні фабрики та доменні печі нового покоління;
- створити альтернативне виробництво первинного металу, а також впровадити технологію прямого відновлення заліза;

- провести капітальні ремонти водночас із капітальною модернізацією основних фондів агломераційно-доменного виробництва, замінити застарілі агломераційні машини на сучасне устаткування, модернізувати доменні печі, які піднімуть рівень виробництва агломерату, чавуну та окотишів до стандартів світового рівня;

- запровадити енергозберігаючі технології агломераційно-доменного виробництва, використовувати радикально нові види енергоносіїв, а саме: заміники коксівних марок вугілля, впровадження газифікованого вугілля, відновлюваних гарячих газів, а також коксового та конвертерного газів;

- покращити якість залізорудної сировини та коксівних марок вугілля для доменного виробництва, використовувати у якості вторинного джерела сировини відходів металургійного та гірничодобувного виробництв;

- запровадити технологію вдування пиловугільного палива;

- запровадити систему автоматизованої усередненої конвеєрної подачі сировини на доменному виробництві;

- створити високоефективні нагрівачі повітря;

- впровадити новітні технології охолодження доменних печей;

- використовувати автоматизовані системи управління технологічним процесом та станом основних фондів;

- побудувати установки з утилізації енергії газів.

Сталеплавильне виробництво також потребує значних модернізацій:

- вивести з експлуатації мартенівські печі та запровадити конвертерне та електросталеплавильне виробництво сталі;

- спорудження нових металургійних підприємств;

- знизити енерговитрати за рахунок новітніх технологій та виробничого обладнання: «ківш-піч», машин безперервного лиття заготовок;

- розробити на базі науково-технічних досліджень способи безперервної розливки сталі нового покоління та ливарно-прокатні модулі.

У прокатному виробництві слід, перш за все:

- зменшити затрати на енергетичні ресурси та сировину за рахунок енергозберігаючих технологій та технології безперервної розливки сталі, оптимізувати температурно-деформаційні процеси та знизити витрати виробництва;

- модернізувати основне та допоміжне обладнання у прокатних цехах, підвищити технічний рівень механізмів та допоміжного устаткування, автоматизувати технологічні процеси;

- поліпшити сортамент прокату, а саме додати позиції високотехнологічної продукції, до такої продукції можна віднести двотавр, швелер зі паралельними гранями полиць, довгомірні рейки, металопрокат зі спеціальним покриттям, в тому числі із спеціальних сталей та сплавів;

- розвивати виробництво високоякісної тонколистової сталі:

автолистової із покриттям цинку та полімерів, покриттям цинку та алюмінію, жерсті вилудженої електролітичним способом, стрічку із спеціальних сталей та сплавів, корозійностійкої, інструментальної, пружинної;

- впровадити процеси термічного та термомеханічного зміцнення прокату широкого сортаменту, низьколегованих, мікролегованих та спеціально легованих марок сталей, де використовують тепло від прокатного нагрівання і агрегатів термообробки;

- впровадити спеціальні лінії деформаційно-термічної обробки прокату;

- оптимізувати режими нагріву прокатних станів у пічному господарстві, зменшити кількість окалини та зневуглецювання;

- за сумісництвом впровадити безперервну розливку сталі та прокатки за допомогою використання технології гарячого посаду;

- запровадити використання низькотемпературної прокатки;

- дослідити та освоїти розливку шарикопідшипникової, конструкційної, пружинної, рейкової, швидкорізальної та інших якісних марок сталі та фасонних заготовок, які будуть близькими до параметрів готового прокату;

- запровадити технологію з використанням тепла прокатного нагріву для термообробки;

- створити ефективні міні-заводи, котрі виплавляли б сталь в електродугових печах та розливали її на МБЛЗ;

- розробити та запровадити технологію енергозберігаючої прокатки листового та сортового прокату із безперервної гарячої стрічки та додаткового обладнання для виготовлення листів товщиною 0,5–1,5 мм;

- запровадити технологію прокатки зливків із підвищеною теплоємністю;

- реконструювати термічне обладнання.

У виробництві труб слід зробити наступні кроки з енерго-та ресурсозбереження:

- модернізувати обладнання термообробки для виготовлення гарячедеформованих зварних та холоднодеформованих труб;

- розробити нову енергозберігаючу технологію виробництва труб для атомної енергетики із тугоплавких металів титану, вольфраму, цирконію а також корозійностійкої сталі довжиною до 25 м на високопродуктивних поточних лініях, а також труб із нових низьконікелевих хромомарганцевих марок сталі та труб діаметром більше 920 мм для теплової енергетики, також труб із чавуну з кулястим графітом для теплових мереж, насоснокомпресорних, обсадних та нових видів труб для житлово-комунального господарства та паливно-енергетичного комплексу.

Гірничорудна галузь потребує:

- впровадження нових технологій, які підвищать якість залізної сировини, дадуть можливість випуску нової якісної сировини;

- модернізації збагачувальних та агломераційних фабрик заради підвищення якості залізорудної сировини;

- підвищення безпосереднього вмісту заліза на 1,5% у залізорудному концентраті;

- впровадити якомога більше енергозберігаючих технологій.

Феросплавне виробництво потребує наступних заходів *енерго-та ресурсозбереження*:

- технічного переоснащення для виробництва феросплавів та спеціальних сталей та сплавів;

- підвищення якості продукції та обсягів випуску, а також розширення сортаменту феросплавів та лігатур.

Коксохімічна галузь, в першу чергу, потребує:

- реконструкції коксових батарей, модернізації печей, а також впровадження енергозберігаючих та ресурсозберігаючих технологій при підготовці вугілля до коксування;

- впровадження технології сухого гасіння коксу, яка, в свою чергу, істотно знизить витрати на енергетичні ресурси;

- впровадження технології термолізу вугілля для виробництва газів, які в подальшому будуть використовуватись в хімічній та енергетичній галузі;

- розробка технології виробництва коксу із генерацією електроенергії;

- одержання відновлюваних газів та їх подальше використання замість природного газу;

- впровадження технології з утилізації відходів від коксохімічного виробництва для повного використання сировини;

- запровадження технології брикетування залишків коксівного вугілля, а також використання технології трамбування, термічної підготовки для підготовки шихти для подальшого процесу коксування.

Виробництво вогнетривів також потребує наступних заходів *енерго-та ресурсозбереження*:

- економії паливно-енергетичних ресурсів, за рахунок впровадження нових пальників, автоматизованих систем роботи печей та системи управління горіння в тунельних печах;

- впровадження радикально нових видів вогнетривів, легких, з дуже низькою теплопровідністю для металургійного устаткування.

Заходи *енерго-та ресурсозбереження* у *виробництві кольорової металургії* наступні:

- модернізація алюмінієвого виробництва, розширення глиноземного виробництва, запровадження виробництва алюмінієвої полоси та фольги, введення технології виробництва продукції із металобрухту та інших відходів;

- модернізація та впровадження додаткового обладнання для титаномагнієвого виробництва, налагодження виплавки губчастого титану, титанових зливків та його похідних сплавів при безпосередньому використанні електронно-променевого методу виплавки, впровадження технології виплавки листового та сортового титанового прокату, суцільнотягнутих труб, зварювальних дротів.

Таким чином, вищенаведені впровадження енергозберігаючих технологій дозволять достатньо знизити рівень використання паливно-енергетичних ресурсів, при чому безпосередня економія буде очікуватись у чорній металургії та коксохімічному виробництві.

5.3 Утилізація металобрухту

Утилізація відходів (переробка відходів) – це будь-які технологічні операції, пов'язані зі зміною фізичних, хімічних або біологічних властивостей відходів, з метою підготовки їх до екологічно безпечного зберігання, перевезення, утилізації чи видалення.

Металевий брухт (або металобрухт) – це непридатні для прямого використання виробу або частини виробів, які за рішенням власника втратили експлуатаційну цінність внаслідок фізичного або морального зношування і містять у собі чорні або кольорові метали або їх сплави, а також виробу з металу, що мають непоправний брак, залишки чорних і кольорових металів та їх сплавів.

Металевий брухт має велику класифікацію. Найчастіше його ділять на три види:

– дорогоцінні метали.

До цієї категорії відносяться срібні, золоті та платинові домішки, які можна зустріти практично повсюдно. Дорогоцінні метали знайшли застосування як в ювелірній справі, так і в різних галузях промисловості, наприклад, в електроніці. Срібло широко використовується при виготовленні акумуляторних батарей для мобільних пристроїв.

– чорний брухт.

Це всілякі сталеві та чавунні виробу, які відслужили свій вік. До них відносяться цвяхи, болти, гайки, сталева стружка, рейки, сталевий дріт і різні відходи чавунного виробництва.

– кольоровий брухт.

Це велика група металевого брухту, до якої відносять алюміній (столові прибори, кабельний брухт, радіатори), мідь (труби, газові пальники, різні сплави), свинець (важки, сплави, акумуляторні батареї), магній (деталі літаків, автоприлад) та інші.

Для переробки важливий не тільки вид вторинної сировини, але і його розміри. Від цього параметра залежать особливості подальшої обробки брухту із застосуванням конкретного обладнання.

За формою відходи поділяють на такі категорії:

– порошки;

– залізна крихта;

– стружка;

– цільні шматки та інші.

На підприємстві металобрухт зазвичай утворюється одним із двох способів:

– під час здійснення господарської діяльності у вигляді відходів від основної чи допоміжної діяльності підприємства (сталева стружка, обрізки металопрокату та інші);

– після ліквідації об'єкта основних засобів як матеріали, що залишилися після розбирання такого об'єкта і які містять у собі чорні або кольорові метали або їх сплави.

Утворений металобрухт підприємство може використати у господарській діяльності або передати (продати) його за плату спеціалізованим підприємствам, які займаються збором та переробкою даного виду вторинної сировини. Отже, отриманий металобрухт слід визнати активом підприємства і оприбуткувати на баланс.

У випадку, коли підприємство не планує отримати економічних вигод від утвореного металобрухту (тобто металобрухт збираються передати як промислові відходи на утилізацію), такий металобрухт активом підприємства не визнається. В цьому випадку утворений металобрухт просто передається на утилізацію як звичайні відходи, а витрати на утилізацію цих відходів включаються до інших операційних витрат

На сьогодні особливо актуальна утилізація кольорового металу. Так ціна на нікель залишається дуже високою. Завдяки стійкості до корозії, нікель використовується для виготовлення:

- протезів і брикетів;
- акумуляторів для автомобілів;
- обмотки для струн музичних інструментів;
- посуду;
- меблевої фурнітури;
- столових предметів;
- змішувачів та інших виробів.

Вторинна переробка металобрухту здійснюється в залежності від виду сировини. Розрізняють такі варіанти:

– термічне подрібнення (передбачає температурний вплив з подальшим дробленням; процедура застосовується для кольорових металів і деяких сталевих сплавів);

– копрове дроблення (в ході переробки застосовується спеціальний прес);

– вибухове дроблення (передбачає використання герметичної ями, в якій металобрухт піддається вибуху та подрібненню під впливом сильної ударної хвилі).

Етапи утилізації металобрухту:

1. Купівля сировини. Для цього компанії, встановлюють спеціальні пункти, куди юридичні та фізичні особи можуть доставити брухт.

2. Попереднє сортування. Матеріал сортується за певними властивостями і характеристиками, після чого відправляється на переділ.

3. Радіоактивний контроль. Якщо норму рівня радіації перевищено, сировину піддають похованню.

4. Перевірка на пожежонебезпечні та вибухові речовини. Вони можуть потрапити випадково або просто їх могли не помітити на пункті прийому.

5. Перевірка правильності сортування. Змішування видів матеріалів неприпустимо, адже від цього залежить якість виробів, що випускаються.

Після цього металобрухт піддають переробці. Він подрібнюється, пресується і переплавляється. Якщо після виробництва залишаються відходи, вони повторно піддаються всім перерахованим вище процедурам.

Питання для самоконтролю

1. Надати визначення поняттям «вторинні матеріали», «утилізація відходів» та «металобрухт».
2. Згідно класифікації відходів металургійного виробництва до групи 27 які включено відходи?
3. Які основні напрямки утилізації металургійних відходів?
4. Які сучасні енерго-та ресурсозберігаючі технології металургійного виробництва?
5. Охарактеризувати енерго-та ресурсозберігаючі технології у гірничо-металургійному комплексі.
6. Які ви знаєте енерго-та ресурсозберігаючі технології у агломераційному та доменному виробництві?
7. Охарактеризувати енерго-та ресурсозберігаючі технології у прокатному виробництві.
8. Надати характеристику енерго-та ресурсозберігаючих технологій у виробництві труб.
9. Зазначити основні енерго-та ресурсозберігаючі технології у гірничорудній галузі.
10. Охарактеризувати енерго-та ресурсозберігаючі технології у феросплавному виробництві.
11. Надати характеристику енерго-та ресурсозберігаючих технологій у виробництві вогнетривів.
12. Охарактеризувати енерго-та ресурсозберігаючі технології у виробництві кольорової металургії.
13. Зазначити основні етапи утилізації металобрухту.

Тема 6. СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ТА ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ МЕТАЛІВ

Мета лекції – ознайомлення з сучасними проблемами матеріалознавства та інженерії поверхні металів.

План

6.1 Фізико-технічні проблеми матеріалознавства

6.2 Сучасні проблеми матеріалознавства та інженерії поверхні металів

Перелік ключових термінів і понять: фундаментальні та прикладні наукові дослідження; металеві та неметалеві матеріали; композиційні матеріали; аморфні та дрібнокристалічні матеріали; матеріали і вироби з порошків; функціональні матеріали; методи інженерії поверхні; наноструктурні матеріали; фазові перетворення та структурні зміни; наплавлювальні матеріали; процеси дифузії та деградації; водневе та комп'ютерне матеріалознавство.

6.1 Фізико-технічні проблеми матеріалознавства

Фундаментальні наукові дослідження – це наукова теоретична та (або) експериментальна діяльність, спрямована на одержання нових знань про закономірності розвитку природи, суспільства, людини та їх взаємозв'язку.

До *фундаментальних проектів проблем матеріалознавства* належать теоретичні та експериментальні дослідження, результати яких формують відкриття нових або уточнення відомих закономірностей розвитку природи, суспільства та техніки і є вихідними положеннями для розвитку нових концепцій, принципів і методів синтезу наукових знань у конкретних галузях науки.

Прикладні наукові дослідження – це наукова та науково-технічна діяльність, спрямована на одержання й використання знань для практичних цілей.

До *прикладних проектів проблем матеріалознавства* належать оригінальні дослідження і розробки, які здійснюються для отримання нових знань, створення елементів нових матеріалів. Прикладні дослідження визначають можливі шляхи використання результатів фундаментальних досліджень, нові методи розв'язання проблем, сформульованих раніше. Прикладні розробки базуються, як правило, на результатах попередніх прикладних досліджень і результатом їх є технологія, матеріал та інше.

Фізико-технічними проблемами матеріалознавства в Україні займаються:

– Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України;

– Науково-інженерний центр «Матеріалообробка вибухом» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона;

- Міжнародна асоціація «Зварювання»;
- Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля;
- Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича Національної академії наук України;
- Чернівецьке відділення Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича;
- Фізико-технологічний інститут металів та сплавів;
- Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка;
- Науково-технічний комплекс «Інститут монокристалів»;
- Інститут монокристалів НАН України;
- Інститут сцинтиляційних матеріалів;
- Науково-дослідний інститут мікроприладів НАН України;
- Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України;
- Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України;
- Інститут термоелектрики НАН України та МОН України.

В Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича Національної академії наук України основними напрямками наукової діяльності є:

- фундаментальні засади сучасного матеріалознавства; електронна будова, фазові рівноваги та діаграми стану, фізика міцності, змочування та адгезія, комп'ютерне моделювання матеріалів;
- прогресивні матеріали і технології, наноматеріали, біомедичне матеріалознавство, матеріали водневої енергетики, надлегкі конструкційні матеріали;
- порошкова металургія та композиційні матеріали, кераміка, тугоплавкі сполуки, покриття, адитивні технології.

6.2 Сучасні проблеми матеріалознавства та інженерії поверхні металів

Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі технічних наук затверджуються Національною академією наук України на визначений термін дії.

Серед сучасних проблем матеріалознавства та інженерії поверхні металів слід виділити наступні напрямки:

1. Металеві матеріали:

- рудні та гібриднорудні матеріали;
- металеві матеріали на основі чорних металів;
- металеві матеріали на основі кольорових металів;
- інструментальні матеріали та матеріали з високою твердістю;
- сплави з особливими властивостями (неіржавіючі, жаростійкі, жароміцні, холодностійкі, радіаційностійкі, магнітні, діелектричні, акустичні, напівпровідникові, надпровідникові, фрикційні, оптоволоконні).

2. Неметалеві матеріали:

- матеріали на основі вуглецю;

- скло, скловироби, ситали;
- технічна кераміка;
- біоматеріали та біосумісні матеріали;
- полімери, гума та пластмаси;
- лакофарбові матеріали;
- клейові матеріали та герметики;
- текстильні матеріали;
- деревина та деревні матеріали;

3. Композиційні матеріали:

- металеві композиційні матеріали;
- полімерні композиційні матеріали;
- металополімерні композиційні матеріали;
- вуглецеві композиційні матеріали;
- керамічні композиційні матеріали;
- металокерамічні композиційні матеріали;
- нанокompозити.

Композиційні матеріали (КМ) – це матеріали з новим корисним комплексом фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, утворені поєднанням двох і більше компонентів – матриці (пластичної основи) та наповнювача, між якими є чітка границя та які мають границю розподілу та різняться хімічним складом, структурою й фізико-хімічними характеристиками.

4. Аморфні та дрібнокристалічні матеріали:

- аморфні матеріали;
- дрібнокристалічні матеріали.

Аморфні матеріали – це речовини, в яких спостерігається відсутність кристалічних областей (областей зі структурою далекого порядку) і які в силу цього мають ізотропні властивості.

5. Матеріали і вироби з порошків:

- конструкційні, інструментальні, порошкові матеріали зі спеціальними властивостями;
- способи одержання порошків, подрібнення та спікання порошків, додаткова обробка порошкових матеріалів.

6. Функціональні матеріали:

- вплив атомно-електронної структури на функціональні властивості;
- вплив фазового складу та мікроструктури на оптичні, електрофізичні, магнітні, корозійно-електрохімічні та фізико-механічні властивості;
- вплив текстури та субструктури на фізико-механічні та хімічні властивості.

Функціональні матеріали – це матеріали, які володіють певним рівнем фізико-хімічних і механічних властивостей, що в сукупності забезпечують використання цих матеріалів в якості робочого елемента або деталі в певному пристрої, приладі або конструкції.

Функціональні композити – це композити, сукупність функціональних властивостей яких, за винятком механічних, не може бути реалізована для кожного з їх компонентів окремо.

7. Методи інженерії поверхні:

- механічні та термомеханічні;
- термічні та хіміко-термічні;
- електрохімічні та хімічні;
- фізичні;
- формування покриттів та плівок.

До інженерії поверхні відносять:

- процеси модифікування і зміцнення поверхневих шарів конструкційних та інструментальних матеріалів способами хіміко-термічної обробки;
- зміцнення і легування поверхні виробів з використанням лазерного, електронно-променевого, плазмового, іонно-плазмового та інших дій на метал;
- науково-технічні проблеми дослідження процесів і закономірностей структуроутворення у поверхневих шарах конструкційних, інструментальних та функціональних матеріалів під час синтезування поверхневих шарів методами інженерії поверхні;
- фундаментальні, прикладні та експериментальні дослідження трансформації структури, фазового складу та напруженого стану поверхневих шарів під час поверхневої пластичної деформації (ППД);
- дослідження механізму та кінетики фазових перетворень при комбінованій хіміко-термічній та термічній обробці;
- встановлення закономірностей впливу деградації структури поверхневих шарів на властивості конструкційних та інструментальних матеріалів у процесі експлуатації виробів.

8. Наноструктурні (нанодисперсні, нанокристалічні) матеріали:

- проблеми синтезу матеріалів за екстремальних параметрів (температури і тиску);
- визначення функціональних властивостей наноматеріалів;
- шляхи підвищення експлуатаційних властивостей наноматеріалів та удосконалення технологій їх одержання.

Наноструктурні матеріали (наноматеріали) – це матеріали, у яких дискретні елементи структури – зерна, блоки, включення, кластери та інші. Вони мають розміри менше 100 нм хоча б в одному вимірі.

9. Фазові перетворення та структурні зміни:

- фазові перетворення та структурні зміни металів в процесі кристалізації, електрокристалізації, конденсації та аморфізації.
- структурні зміни матеріалів у твердому стані під час обробки.
- текстуроутворення металів при кристалізації, електрокристалізації та конденсації.

10. Наплавлювальні матеріали, а також матеріали, що наносяться на поверхню виробів різними технологічними способами:

- наплавлювальні матеріали суцільного перетину, порошкові та спечені, зокрема, для електродугового наплавлення, що відновлює форму, розміри та підвищує експлуатаційні властивості виробів;
- матеріали, що наносяться на поверхню виробів різними технологічними способами, зокрема, металізацією із розплавів, електроіскровим легуванням,

напиленням та інші.

11. Процеси дифузії та деградації:

- процеси дифузії, деградація та ідентифікація структури поверхневих шарів матеріалів у процесі експлуатації виробів і моніторинг їх працездатності;
- програмно-апаратні методи моделювання структури матеріалів та прогнозування динаміки деградації їх експлуатаційних властивостей.

12. Водневе матеріалознавство:

- металогідридні процеси синтезу та обробки матеріалів;
- функціональні матеріали для водневої енергетики.

13. Комп'ютерне матеріалознавство:

- моделювання процесів синтезу та обробки матеріалів;
- теоретичне прогнозування структури та властивостей нових речовин та матеріалів;
- розробка методів комп'ютерного моделювання оцінки впливу структури сплавів на працездатність деталей машин та інструменту.

Оскільки матеріал як макроскопічна система являє собою складну ієрархічну конфігурацію підсистем, зазвичай неможливо в рамках однієї моделі врахувати всі деталі кожної підсистеми. У зв'язку з цим моделі також будують за принципом ієрархії, підрозділяючи їх відповідно до масштабним фактором на моделі макро-, мезо-, мікро-, нано - та електронного рівнів. Кожна модель більш високого масштабного рівня враховує властивості глибших підсистем узагальнено, в інтегральній формі.

Моделі найглибшого рівня, електронного, є головними, оскільки пов'язані з рішенням фундаментальних рівнянь квантової механіки. У моделях нанорівних, або атомісичних, розглядаються взаємодії окремих атомів за законами класичної механіки.

Поряд з моделями, які спиралися б на реальні структури матеріалу, як на прообраз, який хочуть відтворити в деякому наближенні, існують і безструктурні, формально-математичні (евристичні) моделі. Зв'язок з матеріалом в даному випадку здійснюється через параметри, відповідні його властивостями, і набір деяких експериментальних закономірностей.

Питання для самоконтролю

1. Надати визначення поняттям «фундаментальні наукові дослідження» та «прикладні наукові дослідження».

2. Які дослідження відносяться до фундаментальних та прикладних проектів проблем матеріалознавства?

3. Які наукові інститути України займаються фізико-технічними проблеми матеріалознавства?

4. Охарактеризувати сучасні проблеми матеріалознавства та інженерії поверхні металів.

5. Надати визначення поняттям «композиційні матеріали», «аморфні матеріали», «функціональні матеріали», «функціональні композити» та «наноструктурні матеріали».

Тема 7. ЕКСПЕРТИЗА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

Мета лекції – ознайомлення з сучасними особливостями проведення експертизи дослідження металів та сплавів.

План

7.1 Основні поняття експертизи дослідження металів та сплавів

7.2 Основні методи аналізу металів та сплавів, що використовуються при проведенні матеріалознавчої експертизи

Перелік ключових термінів і понять: експертиза дослідження металів та сплавів, матеріалознавча експертиза, макроскопічний аналіз, мікроскопічний аналіз, ультразвуковий дефектоскопічний аналіз, рентгеноструктурний аналіз.

7.1 Основні поняття експертизи дослідження металів та сплавів

Вихід з ладу різних деталей машин та механізмів, металоконструкцій та іншої металопродукції при їх експлуатації, часто викликає суперечки про те, чи призвів до руйнування стан якості тієї чи іншої деталі, або всьому провиною є порушення режимів експлуатації. Тому на допомогу у вирішенні спірних питань приходять судова експертиза матеріалів, речовин та виробів (зокрема, експертна спеціальність 8.9 – Дослідження металів і сплавів), яка відноситься до групи хімічних досліджень і застосовується для аналізу будь-яких об'єктів металеві природи та є найпоширенішим об'єктом криміналістичної експертизи.

Експертиза дослідження металів та сплавів проводиться з метою:

- визначення виду та елементного складу металів та виробів з них;
- визначення вірогідного призначення металів та виробів з них;
- диференціація конкретних сплавів та виробів із металів;
- встановлення спільної родової (групової) належності об'єктів, що порівнюються;
- виявлення на предметах-носіях слідів металізації та інше.

Об'єктами експертизи дослідження металів та сплавів (рис. 7.1) є:

- холодна зброя: ножі, кинджали, кортики, кастети, мечі, стилети та інше;
- деталі вибухових пристроїв: уламки снарядів, мін, фрагменти саморобних бомб, металеві наповнювачі вибухових пристроїв, які застосовуються для збільшення площі пошкодження, створення додаткових факторів вражаючої дії та інше;
 - автомобільні деталі та їх фрагменти;
 - вироби з чорних металів: дроти, рейки, хрестовини, шпали, стикові накладки, вироби з чавуну та інше;
 - вироби з кольорових металів: труби, арматура, заготовки, ювелірні вироби, стоматологічні коронки, деталі для електроніки, фармакологічні вироби та інше;
 - об'єкти зі слідами металізації;

– побутові предмети: посуд, елементи одягу, меблеві деталі, світильники та інше.

Матеріалознавча експертиза визначає склад, структуру, походження металовиробів та виявляє причини їх руйнування. Основним документом, що узагальнює результати експертного аналізу, є експертний висновок.

Основними завдання матеріалознавчої експертизи є:

1. Визначення хімічного складу матеріалу.
2. Визначення структурних характеристик речовин матеріалу.
3. Атомна будова речовини (кристалічна будова, встановлення аморфності матеріалу).
4. Наявність макро-і мікродефектів.
5. Визначення причин, умов і енергоємності руйнування матеріалу.
6. Визначення відповідності матеріалів умовам їх експлуатації.
7. Відповідність матеріалу його паспортним характеристикам.



а



б



в



г

а – деталі механізмів; б – вироби з кольорових металів;

в – монети; г – куля (зброя)

Рис. 7.1. Об'єкти експертизи дослідження металів та сплавів

Складовою частиною матеріалознавчої експертизи є металознавча експертиза, метою якої є виявлення металевих часток і слідів металізації на об'єктах, дослідження якісного та кількісного складу металів, сплавів і виробів з них, встановлення технології та часу виготовлення виробів з металів і сплавів, умов їх експлуатації, видозмін, пов'язаний з обставинами цієї події.

Об'єкти металознавчої експертизи можуть бути об'єктами дослідження не тільки експертизи даного роду, але і комплексної металознавчої експертизи, інших класів і підкласів експертиз, зокрема, трасологічної, електротехнічної, пожежно-технічної, балістичної, вибухотехнічної й автотехнічної. Металознавча експертиза призначається у справах, пов'язаних із претензіями до якості придбаних металевих виробів, у справах із захисту прав споживачів.

7.2 Основні методи аналізу металів та сплавів, що використовуються при проведенні матеріалознавчої експертизи

До основних методів аналізу металів та сплавів, що використовуються при проведенні матеріалознавчої експертизи слід віднести:

1. **Руйнівний аналіз** – це макро- і мікроскопічний аналіз за допомогою оптичних систем.

1.1. **Макроскопічний аналіз** (макроаналіз) – це дослідження будови металів і зварних з'єднань неозброєним оком або із застосуванням лупи, що дає збільшення в 5–30 разів. Макроаналіз дає можливість виявляти раковини, шлакові включення, порушення суцільності металу, тріщини та інші дефекти будови сплаву, хімічну і структурну неоднорідність (рис. 7.2).



1 – зона зародження тріщини; 2 – зона поширення тріщини; 3 – зона доламу
Рис. 7.2. Злами сталі (а) та штока компресора від втоми (б)

При макроскопічному аналізі в основному використовують спектральні способи та способи аналітичної хімії.

За допомогою макроаналізу можна дати загальну оцінку стану великих поверхонь матеріалу або деталі в цілому, а також вибрати невеликі найбільш важливі та типові ділянки для подальшого поглибленого вивчення.

Методом макроаналізу визначають:

– вид зламу: в'язкий, крихкий, нафталіністий (в сталі), кам'яноподібний (в сталі) та інші;

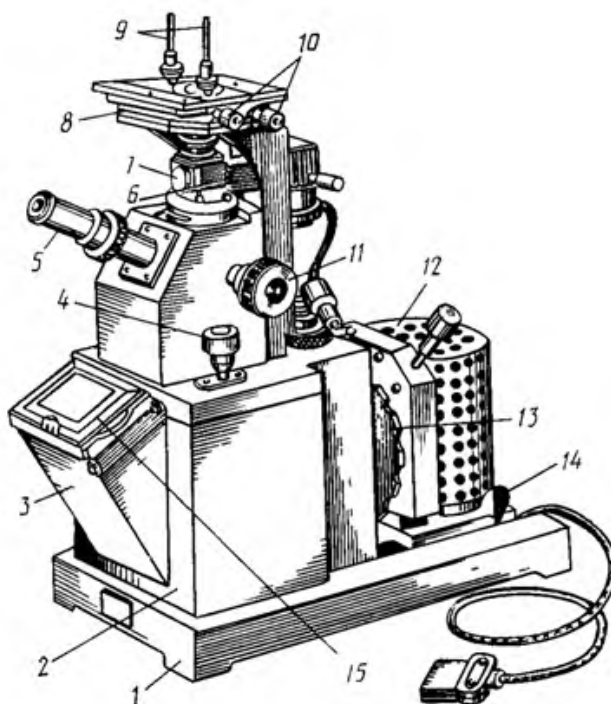
– порушення цілісності металу: усадкова рихлість, центральна пористість, свищі, підкіркові бульбашки, міжкристалічні тріщини та тріщини, що виникли при обробці тиском і термічній обробці, флокени в сталі, дефекти зварювання (непровари, газові бульбашки та інші);

- дендритну будову, зону транскрісталізації в литому металі;
- хімічну неоднорідність литого металу (ліквацію) і присутність в ньому грубих включень;
- волокнисту структуру деформованого металу;
- структурну та хімічну неоднорідність металу, створену термічною, термомеханічною або хіміко-термічною обробкою.

При цьому вид зламу визначають безпосереднім наглядом, тоді як інші особливості макростану на макрошліфах.

Злам може бути різним за формою, видом і здатності до відбиття світла і, отже, відрізнятися в залежності від складу металу, його будови, окремих дефектів, умов обробки і напруженого стану, при якому сталося руйнування зразка (деталі). Аналіз зламу дозволяє встановити багато особливостей будови матеріалів, а в ряді випадків і причини крихкого або в'язкого руйнування.

1.2. Мікроскопічний аналіз – це дослідження структури матеріалів при великих збільшеннях (в 50–50000 разів) за допомогою мікроскопу, наприклад типу МІМ –7 (рис 7.3).



- 1 – основа; 2 – корпус; 3 – фотокамера; 4 – мікрометричний гвинт;
- 5 – візуальний тубус з окуляром; 6 – ручка ілюмінатора; 7 – ілюмінатор;
- 8 – предметний столик; 9 – клеми; 10 – гвинти переміщення столика;
- 11 – макрометричний гвинт; 12 – освітлювач; 13 – ручка світлофільтрів;
- 14 – стопорний пристрій освітлювача; 15 – рамка з матовим склом

Рис. 7.3 Загальний вигляд вертикального мікроскопу МІМ –7

Будова металу, що спостерігається під мікроскопом, називається **мікроструктурою**, яка є зображенням досить малої ділянки поверхні, складена з відбитих від неї світлових променів. Мікроаналізу піддають спеціально підготовлені зразки, які називають **мікрошліфами**.

Залежно від необхідного збільшення для чіткого спостереження всіх присутніх фаз, їх кількості, форми і розподілу, тобто структури в цілому, в мікроскопах використовують:

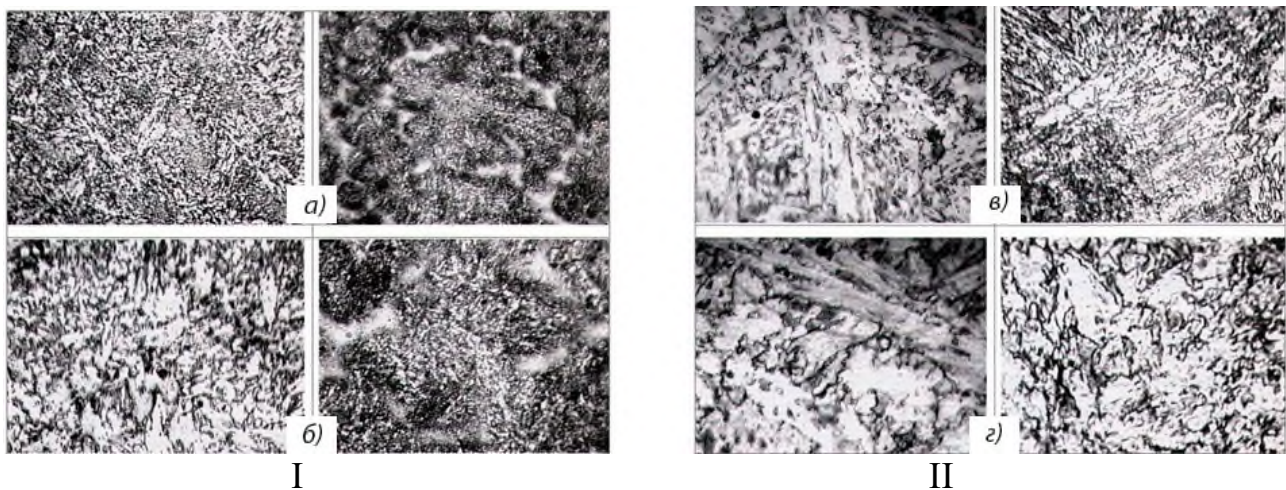
1) білий світ і звичайні оптичні системи, що є комбінацією скляних лінз і призм (оптична мікроскопія);

2) електронні промені або точніше потік електронів, для створення оптичних систем, для яких необхідно застосовувати електромагнітні або електростатичні лінзи (електронна мікроскопія).

Вивчення протравленого шліфа дозволяє вирішувати ряд задач при аналізі мікроструктурної будови металу або сплаву: встановлювати кількість структурних складових сплаву та характер їх розташування; величину зерен (шляхом їх зіставлення зі спеціально встановленою шкалою або безпосереднім вимірюванням, знаючи величину збільшення); вид термічної обробки і правильність вибору її режиму (температури нагрівання, швидкості охолодження); приблизний вміст деяких елементів, наприклад, вуглецю у відпалених сталях.

Між структурою та властивостями металів і сплавів існує пряма залежність. Тому в практиці металознавства мікроаналіз є одним з основних методів, які дозволяють вивчати будову металів і сплавів, а, отже, отримувати дані про їх властивості.

Мікроструктура сталі 10ХНЗМДЛ при різних збільшеннях приведена на рис. 7.4.



а – х 517; б – х 1300; в – х 2200; г – х 4200;

Рис. 7.4. Мікроструктура зразків необробленої (I) та обробленої (II) сталі 10ХНЗМДЛ при різному збільшенні

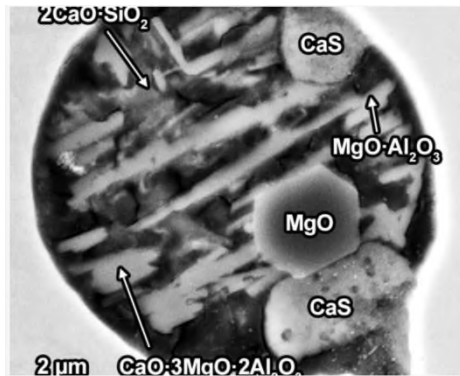
2. Неруйнівний контроль (ультразвуковий дефектоскопічний аналіз, рентгеноструктурний, деякі способи спектрального аналізу).

При експертизі дослідження металів та сплавів найбільшого розповсюдження набули (рис. 7.5–7.8):

– рентгенофлуоресцентний аналіз (рентгенофлуоресцентна спектрометрія, якісний та напівякісний аналіз складу металу, визначення марки

сплаву, визначення вмісту вуглецю в сплаві та інше);

- атомно-емесійний аналіз;
- оптико-емесійний спектральний аналіз;



а



б



в



г

Рис. 7.5. Аналіз хімічного складу (а), тріщин (б), зламу (в) та експертиза покриттів металевих виробів

- аналітична хімія;
- рентгенівська дифракція;
- експертиза покриттів;
- вимір товщини;
- визначення твердості металу (за шкалами Брінеллю, Роквеллу та Віккерсу);
- механічні випробування металів та сплавів (випробування на розтягнення, вигин, стиснення, ударну в'язкість та інші);
- металографічні дослідження;
- дефектоскопія металів та сплавів;
- визначення причин пошкодження металу;
- аналіз на відповідність сертифікатам та іншим документам, підтвердження або спростування відповідності марки;
- фрактографічний аналіз зламів;
- визначення рівня радіоактивності металу (γ -фон та β -фон) та інші.

Іншими словами, для експертизи дослідження металів, сплавів та виробів з них необхідно проводити дослідження матеріалів з метою:

- визначення природи, якісного та кількісного складу, виду та

призначення металу та сплаву;

- визначення специфічних ознак хімічного складу матеріалу (об'єкта);
- визначення факту належності наданих для дослідження частин одного й того ж предмета;

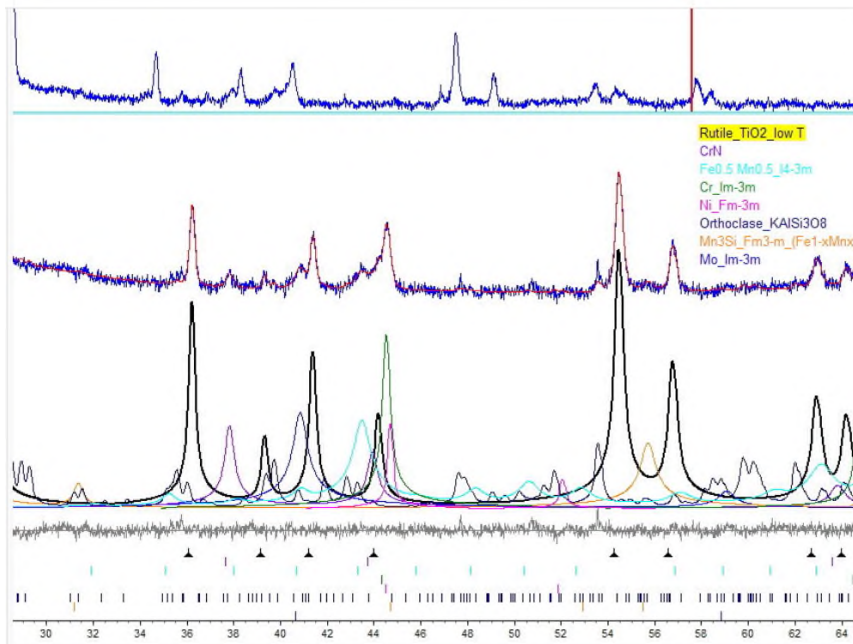


Рис. 7.6. Рентгеноструктурний аналіз металів та сплавів

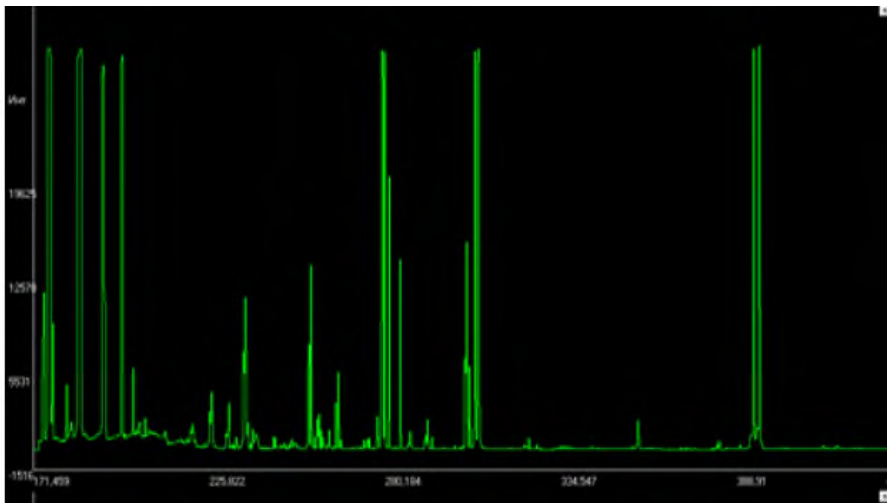


Рис. 7.7. Атомно-емісійний спектральний аналіз (спектр алюмінію, зразок – алюмінієвий та деформуємий марки АД31 ($\approx 98\% \text{ Al}$))

- виявлення слідів обробки;
- визначення марки металу або сплаву, використаного для виготовлення наданого для вивчення предмета або фрагмента;
- аналіз наявності в досліджуваному предметі металевих частинок та аналіз хімічного складу виявлених частинок;
- визначення можливого способу виготовлення (обробки) того чи іншого предмета (матеріалу);
- аналіз часу та природи окислення наданого для дослідження матеріалу;
- аналіз причин (механізмів) руйнування наданого об'єкта (деталі,

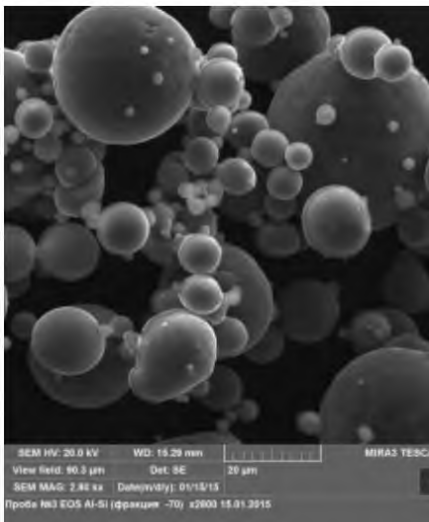
агрегату, вузла, кріплення);

– визначення слідів оплавлення на металевих предметах (проводах, трубах, кабелів, електроцитів та інше);

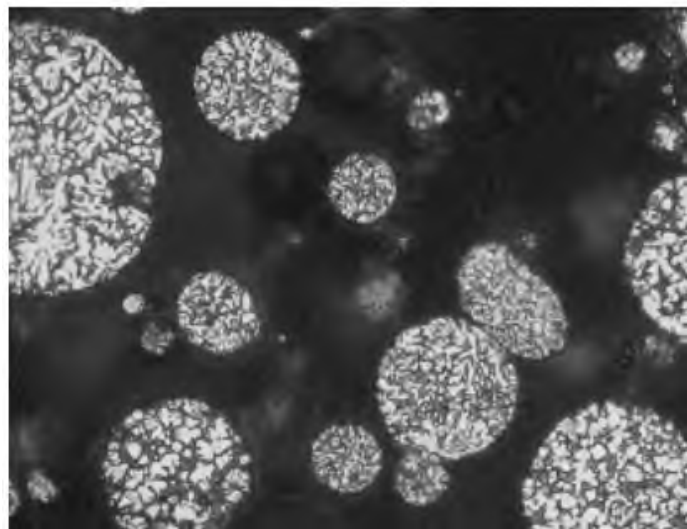
– аналіз відповідності якості досліджуваної продукції тим чи іншим розпорядженням,

– визначення технології та встановлення часу виготовлення матеріалів або виробів, умов їх експлуатації та видозмін, пов'язаних з обставинами якої-небудь події.

Проведення експертизи дослідження металів та сплавів може здійснюватися як в науково-дослідних установах судових експертиз (НДУСЕ), так і в спеціалізованих лабораторіях та науково-дослідних інститутах.



а



б

а – електронно-мікроскопічні дослідження металевого (алюмінієвого) порошку;

б – мікроструктура частинок алюмінієвого порошку

Рис. 7.8. Металографічні дослідження

Питання для самоконтролю

1. Яка мета проведення експертизи дослідження металів та сплавів?
2. Що є об'єктами експертизи дослідження металів та сплавів?
3. Визначити основні завдання експертизи дослідження металів та сплавів.
4. Охарактеризувати основні методи аналізу металів та сплавів, що використовуються при проведенні матеріалознавчої експертизи.
5. Надати визначення поняттям «макроскопічний аналіз», «мікроскопічний аналіз», «мікроструктура» та «мікрошліф».
6. Визначити головну мету застосування мікроаналізу.

Тема 8. АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО: ПЕРСПЕКТИВИ ТА ПРОБЛЕМИ 3D-ДРУКУ

Мета лекції – ознайомлення з сучасними уявленнями про адитивне виробництво, різновидами 3D-принтерів та особливостями технологій адитивного виробництва.

План

- 8.1 Основні поняття адитивного виробництва
- 8.2. Сучасні технології адитивного виробництва

Перелік ключових термінів і понять: адитивне виробництво, 3D-друк, 3D-принтер, тривимірний цифровий модель, пошарове додавання матеріалів, лазерна стереолітографія (SLA), селективне лазерне спікання (SLS), селективне лазерне плавлення (SLM), пряме лазерне спікання металів (DMLS), моделювання методом пошарового наплавлення (FDM), технологія фотополімерного друку.

8.1 Основні поняття адитивного виробництва

Адитивне виробництво – це узагальнена назва технологій, які передбачають виготовлення виробу за даними тривимірної цифрової моделі методом пошарового додавання матеріалів.

На сьогодні поява адитивних технологій змінює як індустрію виробництва заготовок та деталей для машин та механізмів, так і всю пов'язану з цим екосистему. Широкого застосування адитивні технології набули в авіаційній та аерокосмічній промисловості, зокрема при виробництві та ремонті лопаток двигунів, паливних баків, деталей камер згорання та інших металевих конструкцій.

Сучасні адитивні технології наряду з об'ємним друком неметалевих виробів широко використовуються і для виробництва металопродукції для машинобудування. Якщо класичне виробництво металопродукції має на увазі зняття «зайвого» металу з заготовки різцем, фрезою, свердлом, абразивом, лазером, то адитивні технології припускають виготовлення виробів шляхом поступового додавання матеріалу на платформу побудови і буквального вирощування на ній геометричного тіла потрібної конфігурації.

За допомогою пошарового формування матеріальних об'єктів вдається отримувати елементи практично будь-якої геометрії. Якщо раніше зубчасті компоненти планетарної механічної передачі виготовлялися тільки на фрезерному верстаті, то сьогодні застосування адитивних технологій дозволяє вирішувати цю задачу з використанням 3D-принтера (лазерного або не лазерного).

Адитивна технологія може бути реалізована на трьох етапах виробництва – моделей, прототипів та деталей, які відповідають всім вимогам конструкторської документації для складних технічних систем на повний

ресурс експлуатації.

3D-принтер – це спеціальний пристрій, здатний з комп'ютерної тривимірної моделі відтворити реальний фізичний об'єкт з призначеного для цього матеріалу.

Усі **3D-принтери по металу класифікуються** залежно від методу формування об'єкта та поділяють на:

– *лазерні принтери*

Будівельним матеріалом є металева порошкова субстанція – суміш металевих частинок і подрібненого сполучного мінералу. Порошок насипається всередину ємності, над якою розміщується світлова головка. Цифрова модель деталі програмним методом розбивається на шари.

При русі променя по поверхні будівельного матеріалу металеві частинки зварюються, утворюючи шар монолітного металу. Після цього платформа опускається на крок побудови, заданий проектом, і додається нова порція будівельного матеріалу. Вона розрівнюється спеціальним роликком, а лазер формує другий шар об'єкта. Платформа знову опускається. Процес повторюється до повного вирощування шестерінки або турбінної лопатки. При завершенні процесу залишки будівельного порошку висипають, а отриманий металевий виріб піддається шліфовці;

– *електромагнітні принтери*

Вони є різновидом лазерних принтерів. Об'єкти формуються так само з металевого порошку, але спікання частинок відбувається під впливом струмів високої частоти, а не лазера. Ці апарати отримали не дуже широке поширення через велику ціну, яка зумовлена складністю конструкції. Також електромагнітні 3D-принтери по металу забезпечують низьку точність – помилки доводиться виправляти досить трудомістким шліфуванням кінцевого виробу. Даний момент тягне за собою утворення деякої кількості відходів, що погіршує економічні показники;

– *екструзійні принтери*

Принтери цього типу реалізують принцип литого формування деталей. Розплавлений метал подається невеликими порціями через екструдер на платформу побудови, де відбувається пошарове формування деталі. Перевагою обладнання є висока продуктивність, а недоліком – необхідність розігріву будівельного матеріалу до високої температури, що змушує виготовляти екструдер тугоплавким, збільшуючи вартість техніки;

– *ламінарні принтери*

Дані принтери отримали своє найменування від назви технології Sheet Laminate. Ця технологія передбачає формування виробів з тонких листових заготовок, що скріплюються високочастотним електричним струмом. Тобто кінцевий продукт збирається пошарово в буквальному сенсі цього слова. Кожна заготовка вирізається автоматично згідно цифрової моделі кожного шару.

Сьогодні найбільш поширені лазерні модифікації, оскільки їх застосування дає можливість отримувати продукцію будь-якої геометрії. Другий фактор, який робить ці принтери найпопулярнішими, пов'язаний з простотою управління світловою головкою, що дозволяє автоматизувати

виробничі операції.

Широкого застосування, наприклад, набув 3D-принтер «EOS M400» (рис. 8.1), який володіє точністю друку 100 мкм та областю друку 400 x 400 x 400 мм. Він дозволяє отримувати вироби зі неіржавіючої та інструментальної сталі, а також суперсплавів (наприклад, Inconel 718).

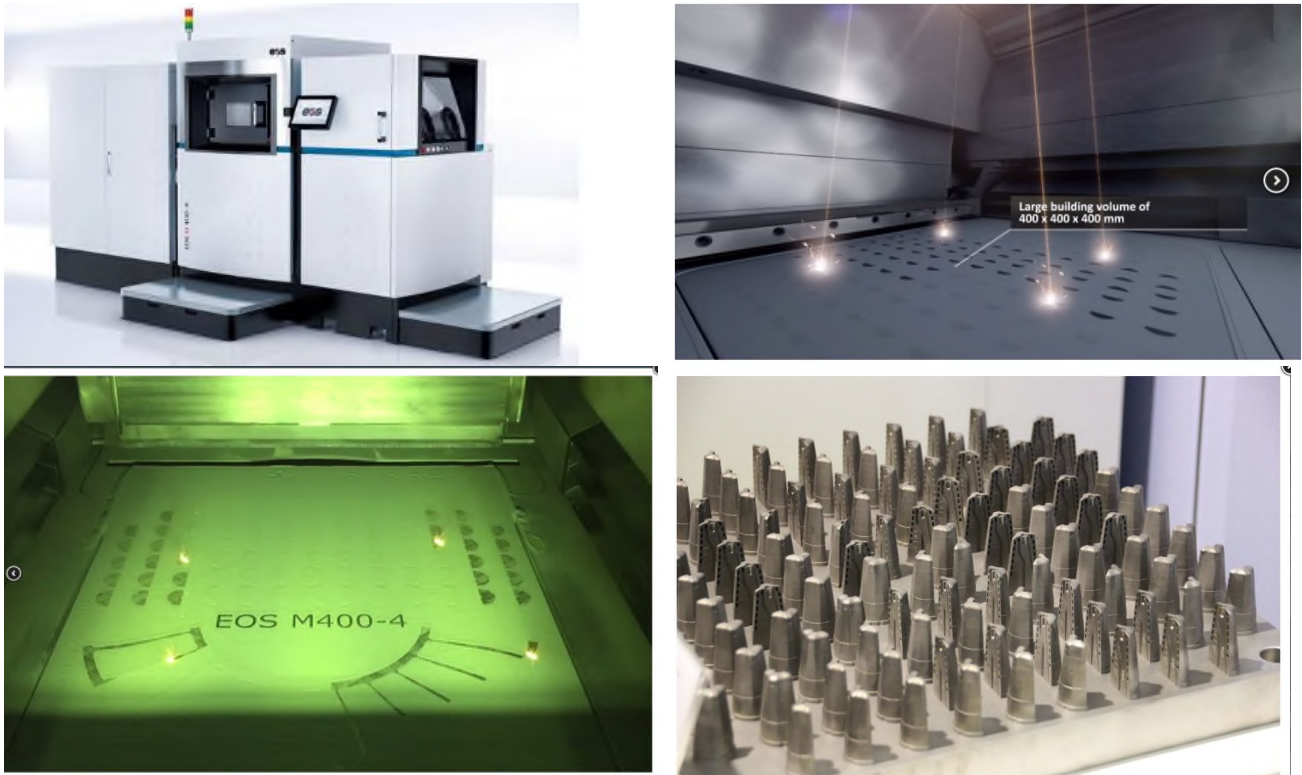


Рис. 8.1. 3D-принтер «EOS M400»

Виробництвом апаратів для об'ємного вирощування металовиробів займається кілька компаній, головним чином американських, а також європейських. До числа найбільш відомих фірм відносяться наступні:

- 3D Systems (США);
- Concept Laser (Німеччина);
- Phenix Systems (Франція);
- Renishaw (Великобританія);
- Arcam (Швеція).

Сучасні адитивні технології передбачають використання близько двадцяти протестованих і готових до експлуатації матеріалів, в їх числі:

- інструментальні (1.2343, 1.2344, 1.2367, 1.2709);
- неіржавіючі (15–5PH, 17–4PH, AISI 410, AISI 304L, AISI 316L, AISI 904L);
- нікелеві сплави (Inconel 625, Inconel 718, Inconel 939, Invar 36, NX);
- алюмінієві сплави (AlSi10Mg, AlSi12, AlSi7Mg0.6, AlSi9Cu3);
- титанові сплави (Ti6Al4V, TiGd.II, Ti6Al7Nb);
- медичні кобальт-хром (CoCr);
- кольорові метали (CuSn6, CuSn10).

Серед **основних переваг 3D–друку металами** слід виділити:

- високі показники щільності (в 1,5 рази вище ніж при литті);
- можливість створення мініатюрних і геометрично складних об'єктів та інших неповторних форм у вигляді закритих біонічних структур;
- широкий вибір металевих сплавів як стандартних, так і спеціальних;
- скорочення циклів виробництва і прискорення виходу готової продукції;
- скорочення термінів виробництва. Так 3D–принтер дозволяє надрукувати готовий виріб за кілька годин, тоді як при використанні традиційних технологій потрібні тижні, а іноді – місяці;
- усунення «людського фактора», зниження ризиків і помилок. Виріб, сотворений за допомогою 3D–принтера, на 99% повторює CAD–модель;
- поліпшення параметрів готових виробів: зниження ваги, підвищення точності та міцності;
- можливість управляти фізико-механічними властивостями деталей шляхом змішування різних матеріалів (наприклад, сплавів різних металів).

Так провідна авіакомпанія світу Boeing вже виготовляє за допомогою адитивних технологій близько 300 найменшуваних деталей (в тому числі лопатки турбін і компресорів) для 10 типів військових і цивільних літаків.

Альянс компаній Materialise та Airbus дозволив модернізувати літаки Airbus шляхом застосування 3D–друку пластикових деталей. 3D–друк забезпечує безліч переваг для модернізації повітряних суден, в тому числі прискорення виробничого процесу, можливість кастомізації та економічність дрібносерійного виробництва. Так панелі, надруковані на 3D–принтері, легше на 15% в порівнянні з оригінальною конструкцією.

4D–технології полягають у використанні композитних матеріалів, які здатні набувати різних складних форм на основі різноманітності фізико-механічних властивостей. Трансформація запускається потоком тепла або світлом певної довжини хвилі.

Вбудовування датчиків в надруковані 3D–пристрої також має великі перспективи. Шляхом вставки наноматеріалів можна створити багатофункціональні нанокомпозити, які здатні змінювати властивості відповідно до зміни навколишнього середовища.

Серед **основних проблем 3D–друку** є вартість або доступність необхідних матеріалів, проблеми нестачі кваліфікаційного персоналу, труднощі з виробничими процесами, проблеми з платформою (з доступністю або вартістю 3D–принтерів) та екосистемою (взаємодія з виробничим циклом, системами управління підприємством та організація виробництва).

8.2. Сучасні технології адитивного виробництва

Адитивні технології можна розрізняти за:

- *методом фіксації шару*: фотополімеризація, сплавлення та склеювання;
- *типом конструктивних матеріалів*: рідкі, сипучі, ниткоподібні або

пруткові, листові або плівкові;

– *ключовою технологією*: лазерні та не лазерні.

За класифікацією стандарту **ASTMF2792/1549323-1** адитивні технології поділяються на 7 категорій:

1. Material Extrusion – видавлювання матеріалів або пошарове нанесення розплавленого конструкційного матеріалу через екструдер.

2. Material Jetting – розбризкування або пошарове струменеве нанесення конструкційного матеріалу.

3. Binder Jetting – розбризкування або пошарове струменеве нанесення пов'язуючого матеріалу.

4. Sheet Lamination – з'єднання листових матеріалів або пошарове формування виробу з листових конструкційних матеріалів.

5. Vat Photopolymerization – фотополімеризація у ванні або пошарове затверджування фотополімерних смол.

6. Powder Bed Fusion – розплавлення матеріалу в попередньо сформованому шарі або послідовне формування шарів порошкових конструкційних матеріалів і вибіркоче (селективне) спікання частин конструкційного матеріалу.

7. Directedenergydeposition – прямий підвід енергії безпосередньо в місце конструювання або пошарове формування виробу методом внесення конструктивного матеріалу безпосередньо в місце підведення енергії.

Серед сучасних методів 3D–друку слід виділити:

– технологію лазерної стереолітографії (Stereolithography Apparatus);

– технологію селективного лазерного спікання (Selective Laser Sintering);

– технологію селективного лазерного плавлення (Selective Laser Melting);

– технологію прямого лазерного спікання металів (Direct Metal Laser Sintering);

– моделювання методом пошарового наплавлення (Fused Deposition Modeling);

– технологію фотополімерного друку (PolyJet).

8.2.1 Технологія лазерної стереолітографії (SLA)

У технології лазерної стереолітографії (рис. 8.2) в якості матеріалу використовується рідка фотополімерна смола, яка застигає під ультрафіолетом, стаючи твердим пластиком.

Технологія SLA застосовується в таких областях:

– створення дизайнерського або конструкторського прототипу виробу;

– 3D–макетування;

– виробництво оснащення для різних видів точного лиття;

– виготовлення моделей, які застосовуються для створення формотворного оснащення;

– створення майстер-моделей, необхідних в процесі виробництва електродів;

– відновлення об'єктів, за отриманими даними акустичної та

рентгенівської томографії в області медицини, археології, криміналістики та інших.

Основними перевагами SLA є:

- можливість виробництва готової моделі об'єкта будь-якого рівня складності, об'єктів з великою кількістю дрібних елементів і тонкостінних;
- висока якість поверхні готового виробу;
- висока точність моделей, що одержуються;
- легкість обробки видаткового матеріалу;
- можливість застосування в якості вихідного матеріалу полімерних смол;
- безвідходність виробництва.

Недоліками SLA є:

- висока ціна самого лазерного 3D-принтера;
- дорогі витратні матеріали;
- можуть використовуватися тільки фотополімери.



Рис. 8.2. Пластикові стереолітографічні моделі робочих коліс для водометних рушіїв, виготовлені за ним воскові моделі («восківки») та готовий металевий виливок

8.2.2 Технологія селективного лазерного спікання (SLS)

Для технології селективного лазерного спікання (рис. 8.3) використовують міцні, зносостійкі, жаростійкі, гнучкі, інженерні та термостійкі порошки.

Різниця між технологіями SLM та SLS в тому, що SLS забезпечує лише часткове плавлення порошку, необхідне лише для його об'єднання в єдиний елемент, а SLM плавить частки повністю, при цьому спікаючи порошок в монолітний виріб.

Але слід зазначити, що незважаючи на високу технологічну та економічну привабливість адитивних технологій, далеко не до всіх металевих матеріалів підходить технологія SLS. Низька зварюваність та складність хімічного складу сплавів призводить до утворення гарячих тріщин та високої пористості матеріалу. Відбувається швидка кристалізація матеріалу, що

супроводжується високою швидкістю охолодження, в результаті чого в матеріалі формується специфічна структура, яка має нерівноважний характер.

Сфера застосування SLS:

- функціональне тестування;
- прототипування;
- дрібносерійне виробництво;
- виготовлення готових функціональних компонентів;
- виготовлення виробів зі складною геометрією;
- виробництво аерокосмічних компонентів;
- розробка і виготовлення автомобільних деталей та інші.



Рис. 8.3. Технологія селективного лазерного спікання

Переваги технології SLS:

– *велика область побудови в 3D-принтерах.* Промислове обладнання для застосування технології селективного лазерного спікання зазвичай обладнано великою областю побудови, що дозволяє створювати не тільки великі деталі, але і виконувати дрібносерійне виробництво;

– *висока якість 3D-друку.* Ця методика дозволяє практично повністю уникнути видимої пошаровості на моделі, а відсутність підтримок також благотворно позначається на якості виробів;

– *відсутність необхідності в побудові підтримок.* Селективне лазерне спікання дозволяє створювати вироби складної геометрії без необхідності побудови підтримок структур. Це не тільки розширює можливості друку, але і добре позначається на якості поверхні виробу;

– *висока швидкість і продуктивність.* За рахунок того, що матеріал не плавиться повністю, 3D-принтери технології селективного лазерного спікання працюють набагато швидше за інших своїх порошкових аналогів, при цьому чим вище швидкість друку, тим вища продуктивність виробництва;

– *можливість виготовлення готових виробів.* Завдяки властивостям витратних матеріалів цю технологію 3D-друку цілком реально використовувати для виробництва кінцевих продуктів.

8.2.3 Технологія селективного лазерного плавлення (SLM)

За допомогою технології селективного лазерного плавлення (рис. 8.4)

можна створити унікальні складнопрофільні вироби без використання механічної обробки та дорогого оснащення, зокрема, завдяки можливості управляти властивостями виробів.

Селективне лазерне плавлення металу відрізняється тим, що в ньому можуть використовуватися не тільки сплави, але і чисті металеві порошки. Зазвичай використовують кобальт-хром, неіржавіючу сталь, інструментальну сталь, титанові сплави, титан, алюміній, золото, платину, вольфрам та мідь.



Рис. 8.4. Технологія селективного лазерного плавлення

Переваги SLM:

– *практично повна монолітність виробів.* Селективне лазерне плавлення металу не частково (як при застосуванні технологій SLS та DMLS), а повністю сплавляє порошок між собою, що впливає на міцність виробу в кращу сторону;

– *можливість виготовлення виробів зі складною геометрією.* Як і в інших промислових технологіях 3D-друку, форма виробу не має значення. За рахунок цього, а також попереднього фактора, селективне лазерне плавлення металу здатне скласти серйозну конкуренцію литтю під тиском;

– *зменшення маси виробів.* Цей пункт частково перетинається з попереднім: за рахунок додавання внутрішніх порожнин в вихідну 3D-модель готовий виріб буде легше, що надзвичайно важливо, наприклад, в аерокосмічній сфері;

– *економія матеріалу.* Цей метод не можна назвати повністю безвідходним, але близько 97–99% матеріалу, який не був задіяний в безпосередній побудові виробу, готовий до повторного використання.

8.2.4 Технологія прямого лазерного спікання металів (DMLS)

Технологія прямого лазерного спікання металів (рис. 8.5) полягає у впливі на металевий порошок лазером з метою його спікання та утворення на площині єдиної фігури заданої геометрії. Таким способом виріб будується поверх за поверхом, як будинок. При DMLS використовують бронзу, неіржавіючу сталь, мартенситно-старіючу сталь, надміцний сплав кобальт-молібден-хром, титанові сплави, нікелевий сплав та алюмінієвий сплав.

Основні переваги DMLS:

– вироби можуть мати геометрію будь-якої складності;

- вироби мають меншу вагу, ніж при виробництві методом лиття, за рахунок більшої точності;
- висока міцність;
- висока міцність при термічному впливі.

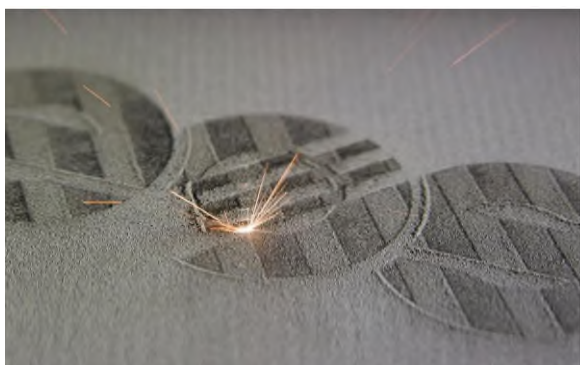


Рис. 8.5. Технологія прямого лазерного спікання металів

Основні недоліки DMLS – у порівнянні зі схожими технологіями, такими як електронно-променева плавка фірми Acram, має меншу швидкість вирощування та міцність готових виробів.

8.2.5 Моделювання методом пошарового наплавлення (FDM)

При моделюванні методом пошарового наплавлення (рис. 5.5) найпростіший струминний 3D-принтер використовує метод видавлювання розплавленого матеріалу – екструзії, коли крапля за краплею формується шар майбутнього об'єкта, шар за шаром створюється сам об'єкт. При цьому може використовуватися водорозчинні, флуоресцентні, люмінесцентні матеріали, пластик з дерев'яним наповненням і багато інших.

Етапи 3D-друку при FDM:

- розробка 3D-моделі в спеціальних програмах (Autodesk 3DsMAX, ZBrush, Maya, Blender, SolidWorks та інші);
- перевірка готової моделі на придатність до 3D-друку, наприклад, в програмі NetFabb (3D-модель не повинна містити дірок, розірваних граней, інвертованих полігонів та інші).
- завантаження 3D-моделі в програму-слайсер. На цьому етапі вибираються необхідні налаштування 3D-друку (швидкість, температура та інші), а також генеруються підтримки при наявності нависаючих елементів в моделі. По завершенню підготовчої частини програмою генерується керуючий код (G-code) для 3D-принтера на основі цифрових даних (моделі) і вибраних налаштувань;
- передача керуючого коду на 3D-принтер. USB-флеш-накопичувач або SD-карта з записаним G-code (в просунутих моделях 3D-принтерів також можлива передача файлу по бездротовій мережі Wi-Fi) підключається до пристрою, в меню якого вибирається необхідний файл і запускається друк;

– по завершенню 3D-друку готовий виріб від'єднується від столу 3D-принтера, очищається від підтримок і зайвого пластику.

Переваги FDM:

– *доступність*. Цей вид 3D-друку є найбільш доступним у фінансовому плані, що пояснює високу популярність 3D-принтерів моделюванні методом пошарового наплавлення;

– *великий вибір матеріалів*. Підібрати матеріал для 3D-друку з використанням FDM не дуже складно. Більш того, такий 3D-пластик також є цілком доступним у фінансовому плані;

– *функціональність*. Не тільки за рахунок величезного вибору витратних матеріалів, а й за рахунок особливостей моделюванні методом пошарового наплавлення зазначені 3D-принтери можуть застосовуватися для найрізноманітніших завдань, що і робить їх надзвичайно затребуваними;

– *співвідношення ціна якість*. Сучасні прилади для FDM можуть похвалитися відмінною якістю відтворення об'єктів (аж до 40 мікрон!) при відносно невисокій вартості.

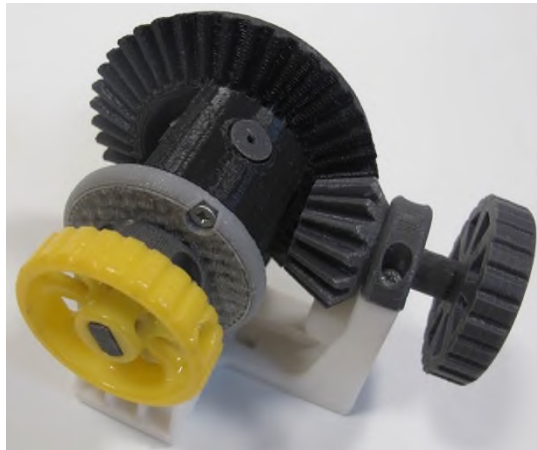


Рис. 8.5. Технологія прямого лазерного спікання металів

Сфери застосування FDM:

- прототипування;
- виготовлення функціональних компонентів;
- дрібносерійне виробництво;
- макетування;
- створення медичних моделей;
- дизайн;
- архітектурне макетування та інші.

8.2.6 Технологія фотополімерного друку (PolyJet)

За технологією фотополімерного друку (рис. 8.6) використовується рідка речовина – фотополімер. Фотополімери володіють різними характеристиками, вони можуть бути твердими або м'якими, кольоровими, прозорими, біосумісними, а також стійкими до термічного використання.

Основною перевагою технології **PolyJet** є гладка поверхня готових виробів, відмінні фізичні та механічні властивості прототипів (включаючи стабільність геометричних розмірів), швидкість побудови, а також можливість обробки поверхні.

Альтернативою технології **PolyJet** є технологія Multi Jet modeling (MJM), яка заснована на багатоструменевому моделюванні за допомогою фотополімерного або воскового матеріалу.

Принцип побудови виробів за технологією **PolyJet** наступний. Друкуючий блок 3D-принтера тонкими шарами (16/30 мкм) розпорошує матеріал моделі та матеріал підтримки, згідно з даними математичної 3D-моделі. Кожен шар полімеризується світлом ультрафіолетової лампи відразу ж після нанесення. Як підсумок виходить об'єкт, який не потребує будь-якої додаткової обробки поверхні. Модель, надруковану за технологією **PolyJet**, можна використовувати відразу ж після завершення процесу друку.

Товщину шару друку можна регулювати, щоб знайти компроміс між швидкістю друку та естетичними властивостями моделей. Технологія **PolyJet** забезпечує високу точність побудови в 0,02–0,085 мм для об'єктів розміром до 50 мм. Для об'єктів більше 50 мм точність побудови варіюється в межах від 0,1 до 0,2 мм. Тобто точність друку залежить від геометрії моделі, параметрів її побудови та орієнтації, а також матеріалу, що використовується.

В цілому, моделі, створені за технологією **PolyJet**, – це справжня знахідка для тих, хто шукає просте рішення складних завдань.

- принцип друку полягає в пошаровому накладення рідкого фотополімеру, який створює ідеальну поверхню без видимих шарів з високим опрацюванням дрібних конструктивних елементів;

- товщину шару друку можна регулювати, щоб знайти компроміс між швидкістю друку та естетичними властивостями моделей;

- технологія дозволяє використовувати матеріали з різними характеристиками та отримувати вироби з унікальними властивостями, включаючи управління друку на рівні елементарної об'ємної одиниці – вокселю;

- деякі моделі 3D-принтерів дозволяють друкувати вироби з сотень різних матеріалів, а також використовувати палітру з 500 000 кольорів.

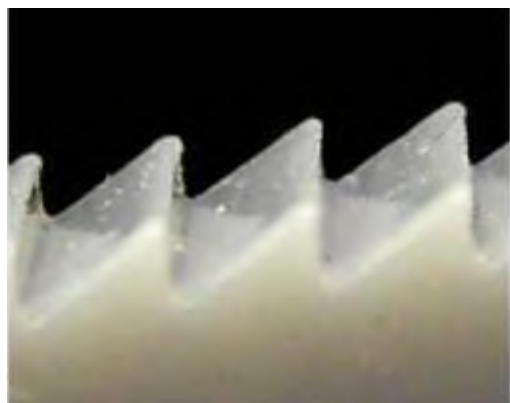
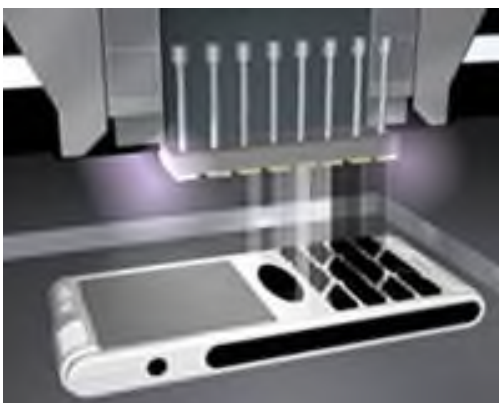


Рис. 8.6. Технологія фотополімерного друку **PolyJet**

Питання для самоконтролю

1. Надати визначення поняттям «адитивне виробництво» та «3D-принтер».
2. Привести класифікацію 3D-принтерів по металу.
3. Визначити основні переваги 3D-друку металами
4. Визначити основні проблеми 3D-друку.
5. На які категорії за класифікацією стандарту ASTM F2792/1549323-1 поділяють адитивні технології?
6. Охарактеризувати технологію лазерної стереолітографії (SLA).
7. Розкрити суть технології селективного лазерного спікання (SLS).
8. Охарактеризувати технологію селективного лазерного плавлення (SLM).
9. Надати характеристику технології прямого лазерного спікання металів (DML).
10. Охарактеризувати процес моделювання методом пошарового наплавлення (FDM).
11. Охарактеризувати технологію фотополімерного друку (PolyJet).

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Сучасні технології та світові тенденції в металургії. URL: <https://metinvestholding.com/ua/media/article/sovremennie-tehnologii-v-metallurgii-i-mirovie-tendencii> (дата звернення: 01.03.2021).
2. Салганик В. М., Гун Г. И., Карандаев А. С., Радионов А. А. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос. Москва: МГТУ им. Баумана, 2003. 506 с.
3. Ганоченко М. О., Воденнікова О. С. Проблеми розсипання феросплавів. Матеріали XXV науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів, молодих вчених та викладачів (Запоріжжя, 24–27 листопада 2020 р.). ІННІ ЗНУ. Запоріжжя: ЗНУ, 2020. С. 15–16.
4. Захаров В. Г., Петрова С. А., Жданов А. В., Жучков В. И. Изучение влияния структуры ферросилиция на его рассыпаемость. *Металлы*, 2014. №1. С. 12-18.
5. Новые технологии обработки металлов. URL: <https://www.metobrexpo.ru/ru/articles/novye-tehnologii-obrabotki-metallov/> (дата звернення: 01.03.2021).
6. Современные технологии обработки металлов. URL: <http://www.dsnspsb.ru/articles/view/sovremennye-tehnologii-obrabotki-metallov/> (дата звернення: 01.03.2021).
7. Лихошва В. П., Шатрава А. П., Пеликан О. А. Современные способы производства биметаллических изделий. *Металл и литьё Украины*. 2018. №9–10 (304–305). С. 46–53
8. Сиротенко Л. Д., Шлыков Е. С., Абляз Т. Р. Применение биметаллических материалов в машиностроении. *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 2 (часть 1).
9. Гогаєв К. О., Радченко О. К., Нгуен К. К., Радченко Л. О. Одержання біметалів методами порошкової металургії (Огляд). *Современные проблемы физического материаловедения*. Серія : Физико-химические основы технологии порошковых материалов. 2011. Вып. 20. С. 101–107.
10. Тонкоплівкові матеріали та технології їх одержання: навч. посібн. / Є. П. Калинушкін, Н. М. Федоркова, Ю. П. Синиціна та ін. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2009. 175 с.
11. Александров Д. А., Артеменко Н. И. Износостойкие покрытия для защиты деталей трения современных ГТД. *Труды ВИАМ*. 2016. №10 (46). С. 65–72.
12. Антикоррозионная защита металлов в строительстве: учеб. пособие / Н. Л. Федосова и др. Иваново: ИГАСУ. 2009. 190 с.
13. Наноматеріали і нанотехнології: навч. посіб. / М. О. Азаренков та ін. Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2014. 316 с.
14. Мельник Я. В. Энергозберігаючі технології як основа для підвищення конкурентоспроможності гірничо-металургійної продукції. *Інвестиції: практика та досвід*. 2011. №14. С. 72–76.
15. Наноматериалы и нанотехнологии / Ж. И. Алферов и др.

Микросистемная техника. 2003. №8. С. 3–13.

16. Наноматеріали і нанотехнології: навч. посіб. / М. О. Азаренков та ін. Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2014. 316 с.

17. Кущевська Н. Ф., Терещенко О. Я., Папроцька О. А., Малишев В. В. Наноматеріали та нанотехнології: навч. посібн. Київ: Університет «Україна», 2018. 140 с.

18. Кущевська Н. Ф., Терещенко О. Я., Папроцька О. А., Малишев В. В. Наноматеріали та нанотехнології: навч. посібн. Київ: Університет «Україна», 2018. 140 с.

19. Луцак Д. Л., Криль Я. А., Пилипченко О. В. Застосування самопоширюваного високотемпературного синтезу в технологіях нанесення зносостійких покриттів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2015. № 2. С. 43–50.

20. Жихарев И. В., Ляшенко В. И. Нанотехнологии в мире и Украине: проблемы и перспективы. *Економічний вісник Донбасу*. 2007. №1. С. 117–145.

21. Жигуц Ю.Ю. Властивості карбідосталей синтезованих СВС та металотермією. *Науковий Вісник Ужгородського університету*. Серія Фізика. 2004. № 15. С. 101–112.

22. Евтушенко А.Т. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез инструментальной стали. *Известия Томского политехнического института*. 2008. Т. 313. № 3. С. 100–104.

23. Основы трибологии: підручн. / А. М. Антипенко, О. М. Белас, В. А. Войтов та ін.; за ред. Войтов В.А. Харків: ХНТУСГ, 2008. 342 с.

24. Закалов О.В., Закалов І. О. Основы тертя і зношування в машинах: навч. посібн. Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 322 с.

25. Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій; під заг. ред. В. В. Панасюка. Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2004. 912 с.

26. Воденнікова О. С. Радіоактивність металів та сплавів. *Дискусійні питання з теорії та практики сучасної експертизи: матеріали Круглого столу (Запоріжжя, 24 листопада 2020 р.)*. Запорізький національний університет. Запоріжжя: ЗНУ, 2020. С. 129–133.

27. Природная радиоактивность шихтовых материалов и продуктов плавки ферросплавов /М. И. Гасик и др. *Актуальные проблемы и перспективы электрометаллургического производства: теория и технология, эффективность использования минерально-сырьевых ресурсов, экология, экономические аспекты развития внутреннего и внешнего рынков: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящённой 100-летию ГметАУ и 75-летию кафедры электрометаллургии (г. Днепропетровск, 30.06–02.07.1999 г.)*. Днепропетровск: Системные технологии, 1999. С. 427–433.

28. Kolobov G. A., Kirichenko A. G., Vodennikova O. S., Panova V.O. Problems of atomic science and technology. *Series Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science*. 2020. Vol. 4 (128). pp. 33–39.

29. Державний класифікатор України. Класифікатор відходів ДК 005-96. URL: <http://plast.vn.ua/DK005-96.html> (дата звернення: 01.03.2021).

30. Горбунов О. Д. Конспект лекцій з дисципліни «Сучасні маловідходні технології» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня спеціальності 144 «Теплоенергетика» очної та заочної форм навчання. Кам'янське: ДДТУ, 2016. 124 с.

31. Абашина К. О., Хандогіна О. В. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Утилізація промислових відходів» (для студентів 6 курсу денної форми навчання спеціальності 8.17020201 – Охорона праці (за галузями). Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2016. 58 с.

32. Мельник Я. В. Енергозберігаючі технології як основа для підвищення конкурентоспроможності гірничо-металургійної продукції. *Інвестиції: практика та досвід*. 2011. №14. С. 72–76.

33. Утилізація металобрухту. URL: <https://xn--80ancaco1ch7azg.xn--j1amh/uk/utilizatsiya-othodov/utilizatsiya-metalloloma/> (дата звернення: 01.03.2021).

34. Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2014–2018 роки. URL: http://bitp.kiev.ua/files/doc/news/2014/napr_14-18.pdf (дата звернення: 01.03.2021).

35. Функціональні матеріали і покриття : навч. посібн.: для студ. вищ. навч. закл. / М. О. Азаренков та ін. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2013. 208 с.

36. Воденнікова О. С. Експертиза дослідження металів та сплавів. *Актуальні проблеми проведення економічних, товарознавчих, будівельних експертиз та правові шляхи їх вирішення*: Матеріали круглого столу (Запоріжжя, 29 квітня 2020 р.). Запоріжжя: ЗНУ, 2020. С. 125–131.

37. Дубовий О. М., Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю., Самохін С. М. Інженерне матеріалознавство: підручн. Миколаїв: НУК, 2009. 444 с.

38. Куцова В. З., Федоркова Н. М. Експертиза матеріалів та металів: навч. посібн. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2015. 51 с.

39. Воденнікова О. С. Адитивні технології в сучасній промисловості. *Біоекономіка як ключовий фактор розвитку виробництва та екологізації промислового регіону*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (Запоріжжя, 26-27 листопада 2020 р.). Запоріжжя: ЗНУ ІННІ. 2020. С. 382–386.

40. Макроаналіз металів і сплавів. URL: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fmbt/shapovalova_materialoznavstvo/1.htm (дата звернення: 01.03.2021).

41. 3д-печать металлом на принтере <https://metalworking-expo.com/blog/3d-pechat-metallom/>

42. Селективное лазерное плавление (SLM). URL: <https://3ddevice.com.ua/selektivnoe-lazernoe-plavlenie-metalla/> (дата звернення: 01.03.2021).

43. Селективное лазерное спекание (SLS). URL: <https://3ddevice.com.ua/selektivnoe-lazernoe-spekanie-sls/> (дата звернення: 01.03.2021).

44. Прямое лазерное спекание металлов (DMLS). URL: <https://3ddevice.com.ua/priamoe-lazernoe-spekanie-metallov/> (дата звернення: 14.11.2020).
45. Технология селективного лазерного плавления (SLM). URL: <https://blog.iqb.ru/slm-technology/> (дата звернення: 01.03.2021).
46. 5 особенностей металлических порошков для 3D-печати. URL: <https://blog.iqb.ru/metals-for-3d-printing/> (дата звернення: 01.03.2021).
47. Адитивні технології. URL: http://wikipedia.ua.nina.az/wiki/%D0%90%D0%B4%D0%B8%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D1%96_%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%97 (дата звернення: 01.03.2021).
48. Стереолитография: виды, понятие, применение. URL: <https://klona.ua/blog/3d-pechat-i-prototipirovanie/stereolitografiya-vidy-ponyatie-primenenie> (дата звернення: 01.03.2021).
49. Технология 3D-печати PolyJet. URL: https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/polyjet/ (дата звернення: 01.03.2021).
50. Технология PolyJet. URL: https://www.ddmlab.ru/technology/polyjet_technology/ (дата звернення: 01.03.2021).

Навчальне видання
(українською мовою)

Воденнікова Оксана Сергіївна

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ

Конспект лекцій

для здобувачів ступеня вищої освіти магістра
спеціальності «Металургія»

освітньо-професійних програм «Металургія чорних металів», «Металургія
кольорових металів» та «Обробка металів тиском»

Рецензент *Ю.О. Бєлоконь*

Відповідальний за випуск *О. Г. Кириченко*

Коректор *О. С. Воденнікова*