

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

В. М. ПЛЕСКАЧ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
з дисципліни «Сучасні виробничі технології»
для студентів спеціальності G8 Матеріалознавство
спеціалізації Композиційні та порошкові матеріали, покриття
усіх форми навчання

2026

-

Конспект лекцій з дисципліни «Сучасні виробничі технології»
для студентів спеціальності G8 Матеріалознавство спеціалізації
Композиційні та порошкові матеріали, покриття усіх форми навчання
/ Укл.: В.М.Плескач – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка, 2026. –
121 с.

Укладач: В.М.Плескач, доц., к.т.н.

Рецензент: О.А.Мітяєв, проф., д.т.н.

Відповідальний за випуск: В.М.Плескач, доц., к.т.н.

Затверджено на засіданні
кафедри композиційних
матеріалів, хімії та технологій,
протокол № 2 від 25.08.2025 р.

Рекомендовано до видання НМК
факультету БАД,
протокол № 1 від 11.09.2025 р.

ЗМІСТ

Вступ	6
1 Організація виробничих процесів. Типи виробництв	7
1.1 Виробництво, основні поняття	7
1.2 Типи виробництв	8
1.3 Форми організації виробництва	11
2 Взаємозамінність і якість промислової продукції	14
2.1 Взаємозамінність, основні поняття	14
2.2 Види взаємозамінностей	17
2.3 Якість промислової продукції	17
3 Основні конструкційні матеріали, їх будова і властивості	20
3.1 Класифікація конструкційних матеріалів	20
3.2 Кристалічна будова металів	21
3.3 Металеві сплави	23
3.4 Сталі та чавуни	24
3.5 Кольорові метали і сплави	26
3.6 Порошкові матеріали	27
3.7 Композиційні матеріали	26
3.8 Кераміка і скло	28
4 Спеціальні конструкційні матеріали	30
4.1 Високоміцні конструкційні сталі	30
4.2 Холодостійкі сталі	30
4.3 Жаростійкі і жароміцні сталі	32
4.4 Корозійностійкі сталі	33
4.5 Зносостійкі матеріали	34
4.6 Матеріали з особливими властивостями	35
5 Методи підвищення конструктивної міцності сталей і сплавів	38
5.1 Металургійні методи підвищення міцності	38
5.2 Термічне і хіміко-термічне оброблення	42
5.3 Термомеханічне оброблення	44
5.4 Зміцнювально-калібрувальне оброблення	45
6 Виробництво і використання сучасних композиційних і порошкових матеріалів	47
6.1 Виробництво і використання КМ	47
6.2 Виробництво і використання ПМ	53
7 Сучасні металургійні технології виробництва сталей і сплавів	59

7.1	Міндекс-процес	59
7.2	Установка металізації окатишів	60
7.3	Отримання заліза з карбїду заліза	61
7.4	Сталеплавильна установка безперервної дії	61
7.5	Установка рїдкофазного відновлення	62
7.6	Неперервне розливання сталї	63
8	Сучасні ливарні технологїї	65
8.1	Удосконалення лиття у пїщанї форми	65
8.2	Удосконалення спеціальних способів лиття	68
9	Виробництво виливків методами спрямованої кристалізації	71
9.1	Методи спрямованої кристалізації	72
9.2	Методи отримання монокристалїчних виливків	75
10	Сучасний стан і перспективи розвитку ковальсько-штампувального виробництва	79
10.1	Сучасне обладнання для кування	80
10.2	Сучасне обладнання для штампування	82
10.3	Перспективи розвитку ковальсько-штампувального виробництва	85
11.	Виробництво зварних і комбїнованих заготовок	89
11.1	Основні способи зварювання	89
11.2	Зварні і комбїнованї заготовки	90
11.3	Основні напрямки удосконалення зварювального виробництва	94
12	Загальна характеристика і проблеми оброблення рїзанням	96
12.1	Основні способи оброблення рїзанням	96
12.2	Режим рїзання при обробленнї заготовок	97
12.3	Сучасні інструментальні матеріали	98
12.4	Вибїр способу оброблення заготовок рїзанням	100
12.5	Механїзація оброблення на універсальних верстатах	101
12.6	Проблеми оброблення рїзанням	103
13	Електрофізичні і електрохімічні методи оброблення	105
13.1	Електрофізичні методи оброблення	105
13.2	Електрохімічні методи оброблення	105
13.3	Фїзичні методи оброблення	109
14	Автоматичні лїнії і гнучкї виробничї системи	112
14.1	Автоматичні лїнії	112

14.2 Гнучкі виробничі системи	114
15 Перспективні напрямки розвитку провідних виробничих технологій	116
15.1 Спільні напрямки розвитку виробничих технологій	117
15.2 Перспективні напрямки розвитку окремих виробничих технологій	118
Література	120

ВСТУП

Життя людини не можна уявити без виробничих процесів. Навіть найдавніша людина виготовляла собі якісь знаряддя праці або полювання. З часом життя людей ускладнювалося, з'явилися складніші знаряддя праці. Потреби людей збільшувалися, а вони вимагали все нових і нових технологій та організації людей до спільної праці.

Уже недостатнім стало натуральне господарство, коли господар все необхідне для життя, виробляв собі сам. Поступово ремісники почали об'єднуватися у цехи, виникла необхідність у регламентації їх праці. Пізніше виникли фабрики, які дозволили розпочати випуск серійної продукції. Виникло поопераційне виконання робіт, а з ним і спеціалізація робітників, механізмів і пристроїв. Поступово все це привело до постійного ускладнення і удосконалення обладнання, технологій і конструкційних матеріалів.

У сьогоdnішньому глобалізованому світі виробничі процеси удосконалюються і змінюються досить швидко. Тому спеціалісти, випускники вищих навчальних закладів повинні слідкувати за змінами у їхніх виробничих галузях, за світовими тенденціями розвитку техніки і технологій.

Курс «Сучасні виробничі технології» не може охопити усі світові новинки, він призначений для розширення кругозору студентів, повинен надати їм основи для подальшого розширення своїх знань та інтересів. Сьогодні неможливо ефективно працювати лише з «шкільним» запасом знань. Цей курс наводить відомості про стан сучасних технологій і пропонує ознайомитися з перспективами їх розвитку у різних галузях виробництва.

1 ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ. ТИПИ ВИРОБНИЦТВ

1.1 Виробництво, основні поняття

Виробництво — процес створення з речовин природного або штучного походження матеріальних і суспільних благ, необхідних для існування і розвитку.

У деяких випадках виробництвом називають місце, де виготовляється продукція, наприклад, фабрика, шахта, цех, виробнича дільниця, майстерня тощо.

Різноманітні виробництва за характером праці, як правило, класифікуються за такими ознаками: призначення, рівнем застосування засобів механізації та автоматизації, за видами і типом виробництва тощо.

За призначенням виробництва поділяються на основне, допоміжне і дослідне.

Основне виробництво займається виготовленням товарної продукції за своїм призначенням. Вони мають більш-менш розгалужену структур залежно від обсягу продукції, що випускається, і повністю відповідають за її якість.

Допоміжне виробництво виготовляє засоби, необхідні для забезпечення функціонування основного виробництва. У більшості випадків основне і допоміжне виробництва працюють на одному підприємстві. Але іноді організуються спеціалізовані допоміжні виробництва, які випускають свою продукцію масово для значної кількості підприємств. Прикладами таких виробництв можуть бути підприємства, які випускають стандартизовані вироби: підшипники, металорізальний інструмент і т.п.

Дослідницьке виробництво випускає зразки, партії або серії виробів для проведення дослідницьких робіт або інноваційних розробок. Таке виробництво характерне для підприємств, які мають свої конструкторські бюро, що займаються проблемами вдосконалення і подальшого розвитку своєї продукції.

За рівнем застосування засобів механізації та автоматизації поділяються на автоматизоване і механізоване.

До автоматизованих відносяться підприємства, в яких всі етапи, пов'язані з технічною підготовкою та управлінням виробництвом, контролем якості продукції комплексно автоматизовано. Як правило, на таких підприємствах використовуються автоматизовані системи управління (АСУ), а виготовлення окремих елементів виконується за допомогою обладнання, оснащеного системами з числовим програмним керуванням (СЧПК). Воно дозволяє у порівняно короткий термін освоювати і випускати нові, досконаліші вироби з підвищеною якістю.

До механізованих виробництв відносяться підприємства, в яких механізовані всі процеси, пов'язані з полегшенням ручної праці, точними операціями, операціями, небезпечними для здоров'я людини, і т.п. Засобами механізації можуть бути різного роду транспортні конвеєри, промислові роботи та ін.

Засоби автоматизації і механізації можуть носити не комплексний характер, а зустрічатися тільки в окремих процесах і операціях.

За видами виробництва поділяються за тими методами, які використовуються для виготовлення (ремонт) виробу або його складових частин. До найпоширеніших видів виробництв відносяться: ливарне, ковальсько-пресове, механообробне, термічне, зварювальне, складальне, гальванічне та ін. Наявність того чи іншого виду виробництва на підприємстві залежить від особливостей конструкції основних виробів підприємства та часу їх виготовлення. Розділення виробництв за видами характерне для підприємств крупносерійного і масового виробництва.

1.2 Типи виробництв

Залежно від випуску продукції та ступеня повторюваності виробів виробництва поділяються на типи виробництв: одиничне, серійне і масове.

***Тип виробництва** – класифікаційна категорія виробництва, яка виділяється за ознаками широти номенклатури, регулярності, стабільності та обсягу випуску виробів.*

Приналежність виробництва до того чи іншого типу визначається кількісними і якісними характеристиками.

Кількісною характеристикою типу виробництва є коефіцієнт закріплення операцій:

$$K_{з.о} = \frac{O}{P}, \quad (1.1)$$

де O – кількість операцій, які виконуються на робочих місцях ділянки (цеху) за певний період часу; P – кількість робочих місць, на яких виконуються ці операції.

У деяких випадках для визначення типу виробництва використовуються такі кількісні характеристики, як такт виробництва і коефіцієнт серійності.

Тактом виробництва називається проміжок часу між двома послідовними операціями або випуском двох виробів.

Коефіцієнтом серійності називається кількість різних операцій, які виконуються на одному обладнанні (наприклад, верстаті).

Якісною характеристикою типу виробництва є повторюваність виготовлення виробничої партії, характеристика інструментів, технологічного обладнання та оснащення, які використовуються, кваліфікація робітників. Технічні характеристики різних типів виробництв наведені у табл. 1.1.

Одиничне виробництво відрізняється виготовленням в одиничних кількостях широкої номенклатури виробів, виготовлення яких не повторюється або повторюється через непевні проміжки часу на робочих місцях, що не мають певної спеціалізації. Коефіцієнт закріплення операцій $K_{з.о}$ не регламентується. Це означає, що всі операції з виготовлення виробу можуть здійснюватися на одному робочому місці. Робітник використовує майже виключно універсальні та стандартні технічне обладнання, пристрої та інструменти (наприклад, лещата для закріплення деталей, викрутки, гайкові ключі і т.п.). Універсальність виконання робіт вимагає від робітника високої

кваліфікації. Кожний виріб виготовляється майже індивідуально, тому собівартість готової продукції висока.

Серійне виробництво характеризується виготовленням обмеженої номенклатури партіями, які повторюються через деякі проміжки часу, а також широкою спеціалізацією робочих місць.

Таблиця 1.1 Якісні характеристики різних типів виробництва

Характерна ознака	Виробництво		
	одиничне	серійне	масове
Повторюваність виробництва партії	Відсутня	Періодична	Безперервний випуск одних і тих же виробів
Технологічне обладнання	Універсальне	Універсальне, частково спеціалізоване і спеціальне	Широке використання спеціального обладнання та автоматичних ліній
Пристрої	Переважно універсальне	Спеціальні переналагоджувані	Спеціальні, часто тісно пов'язані з обладнанням
Інструмент	Універсальний	Універсальний та спеціальний	Переважно спеціальний
Кваліфікація робітників	Висока	Різна	Низька (але при наявності висококваліфікованих налагоджувальників)
Собівартість готової продукції	Висока	Середня	Найнижча

Залежно від числа виробів у партії і значення коефіцієнта закріплення операцій $K_{з.о}$ розрізняють дрібно-, середньо- та крупносерійне виробництво. Вважається, що $20 < K_{з.о} < 40$ відповідає дрібносерійному виробництву, $10 < K_{з.о} < 20$ – середньосерійному і $1 < K_{з.о} < 10$ – крупносерійному. При виконанні робіт використовується не тільки універсальне обладнання, але й спеціалізоване та таке, що може переналаджуватися при переході до виготовлення іншої партії виробів.

У серійному виробництві середня кваліфікація робітників нижче, ніж в одиничному виробництві.

Масове виробництво характеризується великим обсягом випуску продукції, яка безперервно виготовляється тривалий час, протягом якого на більшості робочих місць виконується одна робоча операція ($K_{з.о} = 1$). У масовому виробництві використовується високопродуктивне обладнання: спеціальні та спеціалізовані верстати, верстати з ЧПК, автоматичні лінії. Широко використовується спеціальний різальний інструмент, швидкодіючі автоматичні або механізовані пристрої, вимірювальні інструменти тощо. Для технологічних процесів характерний високий рівень використання автоматизації та комплексної механізації.

Для виконання таких робіт не потрібний високий рівень кваліфікації робітників. Але щоб всі ці системи автоматичного обладнання працювали, необхідні кваліфіковані налагоджувальники, технологи-програмісти. Вартість обладнання, що використовується, досить висока, але, розкладаючись на велику кількість виробів, вона дає низьку собівартість кінцевої продукції.

Типовим для масового виробництва є ефективне використання такту виробництва при виконанні складальних робіт на конвеєрі. З одного боку, бажано величину такту виробництва мінімальною, оскільки вона визначатиме продуктивність складання. З іншого боку, виробник за час такту повинен встигнути виконати всі покладені на нього операції. І цей час, єдиний для всього конвеєра, повинен забезпечити якісне виконання робіт на всіх робочих місцях.

1.3 Форми організації виробництва

Від правильної організації виробничого процесу залежать результати виробничо-господарської діяльності підприємства, економічні показники його роботи: собівартість продукції, прибуток та рентабельність виробництва.

Форми і методи організації технологічних процесів залежать від устанавленого порядку виконання операцій, розташування технологічного обладнання, кількості виробів і напрямку їх руху при виготовленні. Згідно з чинними стандартами найчастіше використовуються такі форми організації виробництва: групова, потокова і стала.

Групова форма організації виробництва характеризується єдністю засобів технологічного оснащення і спеціалізацією робочих місць. Призначена для виготовлення груп виробів з різними конструктивними, але спільними технологічними ознаками. При груповій формі організації виробництва обладнання в цеху розташовують за його типами, і вироби різних груп виготовляють на різних ділянках. Наприклад, у цеху можуть існувати окремі ділянки для фрезерування і шліфування. На них зосереджені відповідні верстати. Перехід від виготовлення одного виробу до іншого зводиться до заміни відповідної оснастки верстатів.

Потокова форма організації виробництва характеризується спеціалізацією кожного робочого місця, узгодженим та ритмічним виконанням усіх операцій технологічного процесу на основі такту виробництва, розміщенням робочих місць у послідовності, яка відповідає послідовності виконання технологічних операцій.

Вона реалізується у вигляді потокової лінії на одній ділянці цеху. Потокові лінії характерні для серійного виробництва і використовуються при виготовленні конструктивно близьких виробів з відповідними переналагоджуваннями обладнання та оснащення. Зокрема, такі потокові лінії часто використовуються у цехах автомобілебудівних заводів. У цих цехах, можуть використовуватися різні види транспортних засобів, наприклад, конвеєри або рольганги.

Якщо на потоковій лінії всі процеси автоматизовані, то вона називається автоматичною.

Сталим виробництвом називається виробництво виробів за остаточно відпрацьованою конструкторською і технологічною

документацією.

Основним принципом раціональної організації виробничого процесу є спеціалізація робочих місць. *Спеціалізація* – одна з форм поділу праці, яка полягає у тому, що підприємство в цілому або його окремі підрозділи та робочі місця виготовляють продукцію обмеженої номенклатури. Скорочення номенклатури продукції, яка виготовляється на кожному робочому місці, у цеху і на заводі, веде до збільшення випуску однойменної продукції, до покращення економічних показників за рахунок використання спеціального і продуктивнішого обладнання, підвищення ступеня механізації й автоматизації всіх процесів, набуття робітниками високої кваліфікації у роботі, що вони виконують, покращення організації праці тощо. Зменшенню номенклатури продукції, яка випускається, сприяють стандартизація, нормалізація й уніфікація виробів та їх складових частин.

2 ВЗАЄМОЗАМІННІСТЬ І ЯКІСТЬ ПРОМИСЛОВОЇ ПРОДУКЦІЇ

2.1 Взаємозамінність, основні поняття

За умов сучасного крупносерійного і масового виробництва існує необхідність, щоб незалежно виготовлені деталі, вузли чи агрегати можна було використовувати на будь-якому підприємстві, при ремонті або в експлуатації без додаткового попереднього оброблення. Для цього ці вироби повинні відповідати певним заздалегідь встановленим нормам і стандартам, що створюють можливості для взаємозамінності.

***Взаємозамінністю** називається придатність одного виробу виконувати замість іншого одні й ті ж самі функції (вимоги) без регулювання і припасовування.*

Взаємозамінність була неможлива за умов індивідуального або цехового виробництва. Перехід до масового виробництва був би неможливим без урахування взаємозамінності. Крім того, вона полегшує експлуатацію машин і приладів та їхній ремонт, оскільки зношена або поламана деталь може бути замінена без погіршення експлуатаційних властивостей іншою, заздалегідь підготовленою. У такому випадку ремонт легко зводиться до простої і швидкої заміни зіпсованої деталі на іншу, яка повністю відповідає замінюваній за всіма параметрами.

Взаємозамінність - це принцип конструювання, виробництва і експлуатації виробів, який забезпечує можливість складання (або заміни при ремонті) незалежно виготовлених деталей і вузлів, що сполучаються. Вона ґрунтується на високій технологічній культурі, починаючи від заготовок деталей, через механічне оброблення і до остаточного складання виробу. Для заготовок і напівфабрикатів це означає точність заданих хімічного складу, механічних, фізичних і хімічних властивостей. Оброблення різанням має забезпечити точність розмірів і форм згідно з вимогами конструктора, а складання – функціональну відповідність складеного виробу технічному завданню на виріб.

У сучасному машинобудуванні взаємозамінність є однією з головних передумов організації масового виробництва. За цих умов робітник при складанні виробу виконує за встановлений невеликий

проміжок часу (такт виробництва) певну кількість операцій. Висока точність і узгодженість при їх виконанні може бути досягнута лише у випадку, коли необхідні для складання деталі не вимагають додаткового оброблення – регулювання, припасування чи добирання.

При ремонті машин взаємозамінність набуває особливого значення, оскільки зайвий час простою на виготовлення нової деталі викликає додаткові витрати часу і коштів. Натомість наявність запасних взаємозамінних деталей забезпечує швидке усунення неполадок.

Використання принципу взаємозамінності дає можливість у широких масштабах здійснювати спеціалізацію і кооперування підприємств, що дає велику економію праці і коштів завдяки застосуванню на спеціалізованих виробництвах чи ремонтних підприємствах продуктивнішого високоточного технологічного обладнання, комплексної механізації та автоматизації виробничих процесів.

2.2 Види взаємозамінностей

Взаємозамінність може бути повною і неповною (обмеженою, частковою).

Повна взаємозамінність вимагає, щоб всі геометричні механічні, електричні та інші показники властивостей деталей та вузлів витримувалися з точністю, яка дозволяє проводити складання (або заміну при ремонті) деталей і вузлів, що сполучуються, без додаткового їх оброблення або підбору для забезпечення необхідної точності складання і збереження у заданих межах оптимальних експлуатаційних характеристик для всіх однорідних вузлів і машин.

Повна взаємозамінність має цілу низку переваг при складанні, експлуатації та ремонті. Спрощується сам процес складання, його може виконувати робітник невисокої кваліфікації. На кожному робочому місці можна створити комплект спеціальних інструментів і пристроїв, які забезпечуватимуть швидкість і ефективність виконання необхідних операцій. Процес складання можна легко розбити на певні елементи в часі і організувати поточне виробництво. Повна взаємозамінність створює широкі можливості для використання спеціалізованих виробництв, спрощує ремонт машин і механізмів.

Неповна взаємозамінність використовується при груповому підборі деталей (селективне складання) або при застосуванні

компенсаторів (метод регулювання). В обох випадках складові деталі виготовляються з меншою точністю. При груповому підборі для забезпечення необхідної точності складання проводиться сортування деталей, що використовуються, на однотипні групи у межах меншого допуску і тим самим компенсувати менші вимоги при їх виготовленні.

Застосування неповної взаємозамінності дозволяє отримати точні сполучення при використанні простіших і дешевших технологій виготовлення деталей. Але при цьому збільшується трудомісткість складання і контролю вузлів і виробів, збільшується незавершене виробництво, зростає можливість постачання запасних деталей і вузлів.

Розрізняють також взаємозамінність за геометричними параметрами деталей і функціональну.

Взаємозамінність *за геометричними параметрами деталей* передбачає взаємозамінність за розмірами, формою, взаємним розташуванням поверхонь і осей деталей та шорсткістю їх поверхонь.

Якщо деталь зайняла своє місце у машині (вузлі чи агрегаті) без додаткових операцій оброблення чи припасування ще не означає, що вона взаємозамінна з даною деталлю, яку вона замінила. Деталь буде вважатися взаємозамінною, якщо вона не лише зайняла своє місце у вузлі, а ще й виконує свої функції відповідно до технічних вимог.

Функціональна взаємозамінність полягає у тому, що деталь (вузол) крім того, що зайняла своє місце в машині без припасування чи регулювання, може виконувати свої функції відповідно до технічних вимог.

Наприклад, взаємозамінне зубчасте колесо, зайнявши своє місце у механізмі, повинно передавати заданий обертовий момент, мати у зчепленні з іншим зубчастим колесом задане передаточне відношення і володіти достатнім технічним ресурсом.

Взаємозамінності за геометричними параметрами і функціональна є взаємопов'язаними. Перш ніж досягнути функціональної взаємозамінності, необхідно забезпечити взаємозамінність за геометричними параметрами. Взаємозамінності за геометричними параметрами забезпечує з'єднання деталей у вузлі, а функціональна взаємозамінність забезпечує економічно оптимальне функціонування вузлів і агрегатів за своїм призначенням.

Для складальних вузлів чи агрегатів, які у свою чергу входять до складу більших машин, розрізняють внутрішню і зовнішню взаємозамінність.

Внутрішня взаємозамінність визначається точністю розмірів деталей, які входять до складальних одиниць чи вузлів, що виготовляються на даному виробництві. Наприклад, це може бути взаємозамінність кульок чи роликів у підшипниках кочення, внутрішніх деталей авіадвигунів, коробок передач тощо.

Зовнішня взаємозамінність визначається розмірами і формою приєднувальних поверхонь вузлів чи агрегатів та їх основними експлуатаційними показниками. Зовнішня взаємозамінність електродвигуна дозволяє замінити двигун, який, наприклад, вийшов з ладу у пральній машині, оскільки він співпадає із замінюваним за приєднувальними розмірами, потужністю, частотою обертання тощо.

Зовнішня взаємозамінність має важливе значення при кооперуванні виробництв.

2.3 Якість промислової продукції

Якість продукції – сукупність властивостей продукції, що обумовлюють її придатність задовольняти певні потреби відповідно до її призначення.

Якість відноситься до числа найважливіших показників діяльності людини. Проблема забезпечення і підвищення якості продукції актуальна для всіх підприємств. Поняття якості багатозначне. Під ним розуміють і якість підприємства, пов'язану із забезпеченням організаційно-технологічного рівня виробництва, і якість роботи, що включає систему прийняття рішень, контроль якості на виробництві і т.п., а також врешті - власне якість продукції, що є наслідком якості роботи всього підприємства.

Будь-яке виробництво включає певні функції, спрямовані на досягнення поставлених завдань у галузі якості. Ці задачі вирішуються шляхом контролю якості та наступного регулювання наявних технологічних процесів.

Якість визначається дією випадкових і суб'єктивних чинників. Для контролю за ними і попередження впливу негативних чинників служать різні системи управління якістю. Відсутність на підприємстві продуманої системи управління якістю і ефективного контролю якості

як її складової є, як правило, причиною занепаду і навіть краху такого підприємства.

До якості продукції ставляться певні вимоги. Вимоги до продукції – це умови та особливості, яким мають відповідати вироби. Вони з часом можуть змінюватися зі зміною суспільних потреб і вимог на ринку аналогічної продукції.

Вимоги поділяються на *поточні*, що пред'являються до продукції, яка випускається нині, і обґрунтовані можливостями виробництва та характером попиту, і *перспективні*, які розробляються на підставі прогнозів використання нових видів сировини, нових технічних ідей і методів виробництва. Поточні й перспективні вимоги можуть регламентуватися стандартами. Перспективні вимоги встановлюють на основі фундаментальних і прикладних наукових досліджень. Згодом перспективні вимоги стають поточними, а замість них з'являються вимоги вищого рівня, що забезпечує безперервне вдосконалення продукції.

Щоб задовільнити останню вимогу, виробництву треба пильно слідкувати за станом конкуренції на відповідному ринку, новинками технологій і обладнання. Випускаючи будь-яку продукцію, завжди треба дивитися у майбутнє, бо продукція з моменту виходу на ринок швидко застаріває.

Забезпечення якості промислової продукції починається з розроблення нової конструкції виробу, що передбачає розроблення і встановлення вимог до якості та технічного рівня майбутньої продукції (у тому числі й з урахуванням можливої взаємозамінності деяких деталей). За цими вимогами передбачається розроблення ефективного технологічного процесу виготовлення виробу. Згідно з ним всі сировинні матеріали, напівфабрикати і комплектувальні елементи, які надходять на підприємство, піддаються вхідному контролю. За технологічним процесом на робочих місцях проводиться поопераційний контроль кожної виготовленої деталі. Способами поопераційного контролю можуть бути візуальний огляд, вимірювання розмірів, лабораторний аналіз, механічні випробування, контроль за дотриманням вимог технологічного процесу та ін.

Готовий виріб піддається вихідному контролю, який може складатися з таких етапів. Спочатку перевіряється первинна

працездатність виробу: здатність виконувати елементи рухів за своїм призначенням. Далі перевіряється, чи відповідає виріб запланованим технічним параметрам. Наприклад, будь-який авіадвигун проходить випробування, на якому перевіряється, чи відповідає його потужність і витрати палива на різних режимах визначеним характеристикам двигуна. У деяких випадках окремі вироби проходять тривалі випробування для підтвердження гарантованого часу експлуатації.

3 ОСНОВНІ КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ, ЇХ БУДОВА І ВЛАСТИВОСТІ

3.1 Класифікація конструкційних матеріалів

Перелік конструкційних матеріалів, які застосовуються у сучасному виробництві, дуже великий, і класифікують за різними ознаками.

Перш за все всю сукупність конструкційних матеріалів можна розділити на дві великі групи: метали і неметали. Кожна з них вимагає суттєвої додаткової класифікації. Крім того, у теперішній час отримала поширення група матеріалів, яка займає проміжне становище між металами і неметалами. Різні за своїм складом і будовою, вони можуть містити у своєму складі одночасно і метали, і неметалеві речовини.

За обсягом використання у виробництві безумовно левову частку займають метали. Вони у свою чергу поділяються на чорні і кольорові. Чорні метали на основі заліза – сталі та чавуни – і тут на першому місці. Причиною цього є їхні цінні фізичні і механічні властивості, значне поширення у природі вихідних ресурсів, відносно просте й дешеве їх виробництво.

Серед кольорових металів на перше місце виходять алюміній і титан та їхні сплави завдяки таким важливим властивостям, як висока питома міцність та корозійна стійкість.

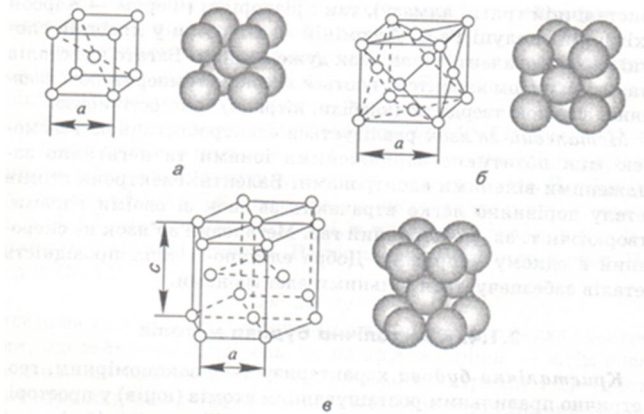
Обсяги виробництва і використання неметалів значно менші, але без їх застосування було б неможливо створення таких галузей промисловості, як електро-, радіо-, приладобудування, авіація, ракетна техніка тощо.

До металевих конструкційних матеріалів певною мірою можна віднести порошкові матеріали. Більша частина з них містить порошки чистих металів і сплавів. Технології порошкової металургії дозволяють отримати такі сплави з новими важливими властивостями, які неможливо отримати звичайними ливарними методами. Іноді у склад порошкових виробів додаються неметалеві речовини (графіт, тальк, кремній), щоб отримати такі додаткові властивості, як антифрикційні, фрикційні, підвищену електропровідність тощо.

Композиційні матеріали, які найчастіше виготовляються на основі полімерної матриці, використовуються замість металів і сплавів, тому що дозволяють знизити масу виробів, зекономити дефіцитні метали і сплави, збільшити термін служби деталей і вузлів, знизити собівартість та трудомісткість виробництва.

3.2 Кристалічна будова металів

Усі метали мають кристалічну будову. Їхня кристалічна будова характеризується закономірним розташуванням атомів. Уявна просторова мережа, творена атомами металу називається *кристалічною ґраткою*. Найчастіше метали мають кристалічні ґратки наступних типів: об'ємноцентрована кубічна (ОЦК), гранецентрована кубічна (ГЦК) і гексагональна щільноупакована (ГЦУ) (рис.3.1).



а - об'ємноцентрована кубічна; б - гранецентрована кубічна; в - гексагональна щільноупакована

Рисунок 3.1 - Типи кристалічних ґраток

Багато властивостей кристалів у різних кристалічних напрямках різні. Це пов'язано з неоднаковою кількістю атомів по різних напрямкам кристалічної ґратки. Це явище називається *анізотропією*. Зокрема по різних напрямках проявляється анізотропія міцності кристалів. При навантаженні у ґратці виникає ковзання по площинах з максимальною щільністю атомів. Різні ґратки мають різну кількість можливих площин ковзання, а отже й різну пластичність. Найбільшу

кількість таких площин має ГЦК-гратка (12), а найменшу – ГЦУ-гратка (6). Тому метали з ГЦК-граткою (наприклад, свинець) добру пластичність, а з ГЦУ-граткою (наприклад, титан) – низьку.

При зміні температури або тиску у низці металів відбувається зміна типу кристалічної ґратки. Це явище називається *поліморфізмом*, або *алотропією*. Різновиди одного й того ж металу з різними кристалічними ґратками називаються *модифікаціями* і позначаються грецькими буквами α , β , γ і т.д.

Реальні металеві кристали не мають ідеально правильного розташування атомів по всьому об'єму виробу. Крім того, між ними зустрічається значна кількість дефектів, які за геометричними ознаками поділяються на точкові, лінійні та поверхневі.

Точкові дефекти мають дуже малі розміри в усіх трьох напрямках у просторі, їхні розміри не перевищують декількох параметрів кристалічної ґратки. Розрізняють три види точкових дефектів: вакансії, міжвузлові атоми і атоми домішок.

Вакансією називається порожнє місце, на якому у ґратці мав би бути атом. На концентрацію вакансій впливає температура. Чим вище температура металу, тим більше вакансій. Пересичення вакансій може виникнути при раптовому охолодженні, наприклад, при гартуванні.

Міжвузловий атом – це атом, який вийшов з положення рівноваги і зайняв місце у просторі між сусідніми атомами.

Атоми домішок заміщають атоми основного металу у вузлах кристалічної ґратки або розташовуються між вузлами.

Навколо точкових дефектів кристалічна ґратка спотворюється, але це суттєво не позначається на механічних властивостях металу.

З точковими дефектами типу неметалевих включень ведеться боротьба шляхом електрошлакового переплаву.

Лінійні дефекти – *дислокації* – мають малі розміри у двох напрямках і велику довжину у третьому. Фактично це площини додаткових атомів, які «вклинюються» між атомами кристалічної ґратки. Густина дислокацій помітно впливає на механічні властивості: при збільшенні зростає міцність і зменшується пластичність. Дислокації можуть взаємодіяти між собою, об'єднуватися або відштовхуватися.

Переміщення дислокацій служить одним з механізмів пластичного деформування.

Поверхневі дефекти малі в одному напрямку і значно більші у двох інших. Вони утворюють границі різноорієнтованих блоків ґраток і зерен. Границі зерен помітно впливають на механічні властивості металів. Чим дрібніші зерна, тим вище пластичність і міцність металів.

3.3 Металеві сплави

На практиці чисті метали використовуються дуже рідко. Звичайно застосовуються сплави.

Сплавами називають речовини, які утворюються при сплавленні двох і більше елементів.

Елементи або хімічні сполуки, які утворюють сплав, називаються *компонентами*. Компонентами металевих сплавів можуть бути метали, неметали, гази та хімічні сполуки.

Компоненти сплаву при взаємодії у твердому стані можуть утворювати: механічні суміші двох або декількох чистих компонентів, хімічні сполуки і тверді розчини.

Механічні суміші утворюються при великій різниці у властивостях компонентів що входять у сплав. У цьому випадку у твердому стані поруч окремо існують зерна чистих компонентів. Приклад: сплави Pb-Sn, Pb-Sb та ін. Властивості таких сплавів становлять компроміс між властивостями вихідних компонентів залежно від їх співвідношення у сплаві.

Хімічні сполуки утворюються при хімічній взаємодії компонентів. Найчастіше утворюються хімічні сполуки при взаємодії металів і неметалів. Наприклад, карбіди (Fe_3C), нітриди (AlN), оксиди (FeO , SiO_2), які присутні у залізовуглецевих сплавах. Можлива взаємодія і металів з металами – утворюються інтерметаліди типу CuAl_2 у дуралюміні.

Властивості хімічних сполук істотно відрізняються від властивостей вихідних компонентів. Хімічним сполукам властиві низька пластичність і висока твердість.

У *твердому розчині* одна з компонент, що входить до складу сплаву, зберігає свою кристалічну ґратку, а інший у вигляді окремих

атомів займає місця у цій кристалічній ґратці.

Залежно від розташування атомів розчиненого компонента розрізняють тверді розчини *заміщення* (атоми знаходяться у вузлах основної ґратки) і тверді розчини *проникнення* (атоми знаходяться між атомами металу-розчинника) (рис. 3.2).

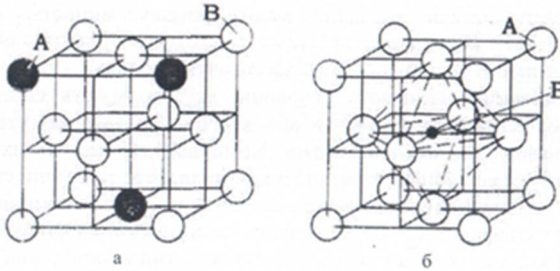


Рисунок 3.2 - Кристалічна ґратка твердого розчину заміщення (а) та проникнення (б)

Необмежені тверді розчини заміщення утворюють метали з невеликою різницею атомних радіусів, наприклад, мідь – золото, мідь – нікель. Такі тверді розчини характеризуються підвищеною твердістю, міцністю, але зниженою електропровідністю і пластичністю. Тверді розчини проникнення утворюють лише компоненти з малими розмірами – неметали (вуглець, азот, бор). Концентрація розчинених компонентів у них завжди обмежена (наприклад, аустеніт – максимум 2, 14%С). При збільшенні концентрації розчиненого компонента у них сильніше зростає твердість і міцність при погіршенні пластичності.

3.4 Сталі та чавуни

Сталь – залізовуглецевий сплав, який містить не більше 2, 14% вуглецю. Це основний матеріал основних виробничих галузей, недорогий, виготовляється у великій кількості. Сталі класифікуються за хімічним складом, призначенням, якістю, ступенем розкиснення.

За хімічним складом сталі поділяються на вуглецеві та леговані. Вуглецеві сталі, крім заліза і вуглецю, можуть містити лише домішки. У леговані сталі, крім вуглецю, вводяться різноманітні легувальні елементи, якими можуть бути метали, неметали і гази.

За призначенням сталі поділяються на конструкційні, інструментальні та сталі зі спеціальними властивостями. Конструкційні сталі – найбільша

група сталей, призначена для виготовлення різноманітних деталей машин. Інструментальні сталі використовуються для виготовлення різального, вимірювального інструментів та інше. Спеціальні сталі - це нержавіючі, жаростійкі, зносостійкі та інші сталі.

За якістю сталі поділяються на сталі звичайної якості, якісні та високоякісні. Різниця між ними досягається металургійними методами за рахунок зменшення вмісту шкідливих домішок.

За ступенем розкиснення сталі поділяються на спокійні, напівспокійні та киплячі. Спокійна сталь якісніша, але й коштовніша.

На механічні властивості сталей суттєвий вплив має вміст вуглецю (рис. 3.3).

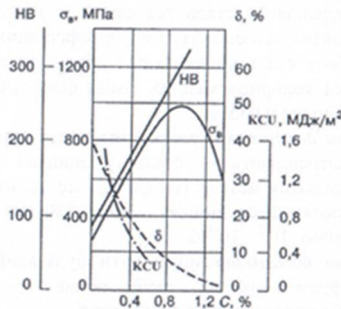


Рисунок 3.3 - Залежність властивостей сталей від вмісту вуглецю

Чавун – залізовуглецевий сплав, який містить більше 2,14% вуглецю і теоретично не більше 4,3% вуглецю. Чавуни значно дешевші за сталі, мають добрі ливарні властивості, проте непластичні, не здатні до оброблення тиском.

За структурою чавуни поділяються на білі та графітовані. Як конструкційний матеріал використовуються практично лише графітовані чавуни.

У графітованих чавунах за допомогою певних ливарних технологій отримують вуглець у вигляді структурно вільного графіту. Залежно від форми включень графіту розрізняють такі види чавунів:

- сірий – пластинчастий графіт;
- високоміцний – кулястий графіт;
- ковкий – пластівчастий графіт;
- вермікулярний – графіт у формі черв'яків.

Вирішальний вплив на властивості чавунів має форма включень графіту. Графіт не має зв'язку з металевою основою чавуну, тому включення графіту можна розглядати як порожнечі, надрізи або тріщини, які значно знижують міцність і пластичність чавунів. Найбільше зниження властивостей викликають включення графіту у вигляді пластинок, найменше – включення кулястої форми.

3.5 Кольорові метали і сплави

У порівнянні з чорними металами кольорові метали є коштовнішими і дефіцитнішими. Проте області їх застосування у виробництві безперервно розширюється. Це пов'язано з тим, що більшість з них мають унікальні фізичні та хімічні властивості. До того ж багато з них, особливо сплави легких металів, мають високу питому міцність.

Мідь і мідні сплави широко застосовуються завдяки таким цінними властивостям, як високі електро- та теплопровідність, пластичність, добра корозійна стійкість і рідиноплинність. Мідь та її сплави добре обробляються тиском, зварюються всіма способами зварювання.

Чиста мідь використовується переважно в електротехніці, для виготовлення теплообмінників і т.п. Більше використовуються основні мідні промислові сплави: латуні та бронзи.

Латуні – це сплави міді з від 3 до 45% цинку та іноді до 7...9% інших легувальних елементів. Деформівні латуні випускаються у вигляді простих і багатокомпонентних сплавів. Вони мають високу пластичність, постачаються у вигляді дротів, прутків, стрічок, штаб, листів, труб та інших видів катаних та пресованих виробів.

Бронзи – це сплави міді з оловом або невеликими добавками алюмінію, кремнію свинцю та інших елементів. Бронзи мають високу стійкість проти корозії, добрі ливарні властивості та оброблюваність різанням, високі антифрикційні властивості.

Найпоширенішими є олов'яні бронзи, з них виробляють водяну і парову апаратуру, підшипники ковзання, зубчасті колеса, пружини тощо. Головний недолік олов'яних бронз – висока вартість та дефіцитність олова. Алюмінієві бронзи мають високу міцність, хімічну стійкість та антифрикційні властивості. З них виготовляють зубчасті колеса, деталі турбін, сидла клапанів, електропровідні

пружини і т.п. Свинцеві бронзи відрізняються високими антикорозійними властивостями та теплопровідністю (у чотири рази вище, ніж в олов'яних бронзах), Вони застосовуються для високонавантажених підшипників ковзання з великим питомим тиском.

Алюміній має малу міцність, низьку твердість, але високу пластичність і електропровідність. Алюміній добре обробляється тиском і зварюється; має високу стійкість проти атмосферної корозії та у прісній воді.

Як конструкційний матеріал використовують сплави алюмінію з легувальними елементами, головним чином з міддю, магнієм, марганцем. Всі сплави поділяються на деформівні та ливарні.

Найпоширеніший з деформівних алюмінієвих сплавів є дюралюміні. Вони випускаються у вигляді листів, пресованих і катаних профілів, прутків, труб. Особливо широко застосовують в авіаційній промисловості та будівництві. Найпоширенішими ливарними алюмінієвими сплавами є силуміни – сплави алюмінію з 4...13% кремнію. Вони широко застосовуються для виготовлення литих приладів, корпусів турбонасосів та інших малонавантажених деталей, у тому числі тонкостінні виливки складної конфігурації.

Титанові сплави відрізняються високою міцністю і малою густиною, мають добру жароміцність і високу корозійну стійкість у багатьох корозійних середовищах. Титан та його сплави широко використовуються у ракетно-космічній та авіаційній промисловості, у суднобудуванні та транспортному машинобудуванні. У зв'язку з тим, що титан має достатню пластичність та в'язкість при низьких температурах, вони застосовуються у холодильній та криогенній техніці. Титан також використовується у медицині завдяки високій його стійкості у тканинах людського організму.

3.6 Порошкові матеріали

Порошкові матеріали виготовляються з порошків металів і сплавів з додаванням різноманітних неметалевих матеріалів, хімічних сполук та інших елементів. Після пресування і спікання їх міцність та інші властивості можуть наближатися до властивостей компактних металів аналогічного складу. Ступінь наближеності залежить від остаточної

пористості виробу. З порошкових матеріалів виготовляють вироби з таким складом і властивостями, які не вдається отримати традиційними методами.

За областю використання порошкові матеріали надзвичайно різноманітні. Переважну частину становлять конструкційні матеріали, які використовуються для виготовлення різних деталей загального призначення. Крім того з порошків виготовляють фрикційні та антифрикційні матеріали, фільтри для агресивних речовин і гарячих газів, тверді сплави для металорізальних інструментів, електроконтактні матеріали і таке інше.

3.7 Композиційні матеріали

Композиційні матеріали складаються з взаємно нерозчинних компонентів, які сильно відрізняються за властивостями, але будова композиту дозволяє використати переваги кожного з них.

Основою матеріалу є матриця. Вона об'єднує всі компоненти, надає виробу форму і забезпечує опір зовнішньому середовищу. Міцність виробу визначається головним чином наповнювач. Як матриця можуть використовуватися полімери, метал і кераміка. Наповнювачі можуть бути дуже різноманітними за складом і формою присутності у композиті. За цією ознакою наповнювачі поділяються на дисперсні (порошки, різані волокна), волокнисті і шаруваті (папір, тканина, фанера).

Комплекс властивостей композитного матеріалу залежить не лише від властивостей матриці і наповнювача, але й від міцності зв'язку між ними, об'ємної частки наповнювача, розмірів і орієнтації волокон, їх термічної стійкості тощо.

Важливими характеристиками композиційних матеріалів є високі питома міцність і жорсткість, стійкість у агресивних середовищах, проникність до електромагнітного випромінювання та ін.

3.8 Кераміка і скло

Керамікою називають матеріали, отримані при високотемпературному спіканні мінеральних порошків. При нагріванні вихідні речовини взаємодіють між собою, утворюючи кристалічну і аморфну фази. Кераміка має полікристалічну будову з

прошарками скла і безладним розташуванням зерен, і тому кераміка однорідна за властивостями.

Позитивні властивості кераміки: високі діелектричні властивості, хімічна стійкість і зокрема лугостійкість, водо- і теплостійкість, стабільність властивостей у часі (не старіє), відсутність залишкових напружень після виготовлення виробу.

Недоліки: крихкість, велика усадка при спіканні (до 25%), важко обробляється різанням.

Найчастіше використовується як довговічний матеріал, стійкий проти зношування, нагрівання і агресивних середовищ. Використовують у радіо- та електротехніці, як вогнетриви, елементи різального інструменту, для виготовлення сантехнічних виробів.

Скло – аморфна речовина, яка утворюється сплавленням оксидів або безоксидних сполук шляхом переохолодження розплаву. Головні оксиди для виготовлення скла: SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , а також деякі з'єднання миш'яку, селену, телуру. Основна особливість скла: ізотропність, висока хімічна стійкість, високі діелектричні властивості, оптичні властивості, висока технологічність.

За призначенням і хімічним складом розрізняють такі види стекол:

- звичайне скло – застосовується у будівництві, хімічній і харчовій промисловості;
- електротехнічне скло – застосовується як діелектрик при виготовленні ізоляторів, колб електро- і радіоламп, ізоляційної плівки на дротах;
- кварцеве скло (99% SiO_2) – має мінімальний коефіцієнт лінійного розширення, працює без руйнування при температурі до 1000°C , проникне для ультрафіолетових променів;
- особливі стекла – мають спеціальний склад і призначення: для інфрачервоного випромінювання, для поглинання або проникнення γ -променів
- інші.

4 СПЕЦІАЛЬНІ КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Розвиток технік і технологій час від часу зустрічався з проблемами, які не можна вирішити звичним, традиційним шляхом. Тоді починався пошук нових, спеціальних рішень і матеріалів. На сьогодні розроблена велика кількість спеціальних конструкційних матеріалів для використання у різних галузях виробництва, деякі з яких розглядаються у даному розділі.

4.1 Високоміцні конструкційні сталі

Високоміцні сталі застосовуються у виробках, для яких важливим є зменшення маси при збереженні високої міцності. Це наприклад болти та кріпильні вироби, деякі види тросів, високошвидкісні ротори та багато інших деталей машин, зокрема у космічній, ракетній та авіаційній техніці.

Отримання високої міцності сталей неминує веде до зниження пластичності та опору крихкому руйнуванню. Тому надійність таких виробів можна охарактеризувати конструктивною міцністю – комплексом механічних і службових властивостей, пов'язаних з умовами роботи виробів.

Більшість високоміцних сталей містить не більше 0,4% вуглецю, оскільки більша кількість вуглецю призводить до зниження в'язкості руйнування і зварюваності. Легувальними елементами найчастіше є марганець, кремній, нікель, хром, молібден. Загальний вміст трьох з цих легувальних елементів звичайно лежить у межах від 2 до 4%. При легуванні високоміцних сталей рекомендується використовувати легувальні елементи, карбіди яких розчинюються при нагріванні під гартування, тому що нерозчинені карбіди значно знижують ударну в'язкість сталі. Розроблені високоміцні сталі, в яких високий комплекс властивостей досягається завдяки одержанню дисперсних нітридних фаз. Ці сталі легують азотом (0,02...0,04%) і нітридотвірними елементами (Al, V, Mo).

Вміст шкідливих домішок сірки та фосфору у високоміцних сталях має бути мінімальним.

Марки деяких високоміцних сталей: 40X5M2CF, 40X5M2CFB, 40X5FCB, 35X2AF, 40X2AFB.

4.2 Холодостійкі сталі

Холодостійкість – це здатність матеріалів зберігати експлуатаційні характеристики при зниженні температури без істотного погіршення властивостей/

За холодостійкістю металеві матеріали поділяються на дві групи: матеріали для низьких кліматичних температур (до -60°C) і матеріали для криогенної техніки, температура експлуатації яких може досягати -190°C .

Холодостійкі сталі кліматичного холоду широко використовуються у будівельних конструкціях, для виготовлення труб магістральних газопроводів, у суднобудуванні тощо. Ці сталі повинні мати низький поріг холодноламкості, добрі ливарні властивості та зварюваність, добре оброблятися різанням і тиском.

Вважається, що у цих сталях переважаючою структурою має бути ферит. Тому такі сталі містять не більше 0,2% вуглецю. Збільшення вмісту вуглецю на 0,1% підвищує поріг холодноламкості на 20°C .

Легування сталей некарбідотвірними елементами (нікель, кремній, марганець) зміцнює ферит і сприяє підвищенню пластичності та тріщиностійкості. Хром є слабим зміцнювачем фериту. При невеликому вмісті хрому (до 1%) дещо підвищується ударна в'язкість, але подальше збільшення вмісту хрому супроводжується зниженням в'язкості.

Легування карбідотвірними елементами (Ni, V, Nb, Mo, Cr) є необхідним для блокування зайвого вуглецю, зменшує схильність до крихкого руйнування.

Різко негативну дію на холодноламкість справляють фосфор, сірка та розчинені гази (водень, кисень, азот).

Для отримання необхідних властивостей треба враховувати високу вартість нікелю і молібдену. Використовувати їх як легувальні елементи варто лише при виготовленні особливо відповідальних деталей.

Приклади сталей: 14ХГС, 1515ХСНД, 25Г2С, 08Г2ДНФЛ, 20ГЛ.

Холодостійкі матеріали *криогенного призначення* широко використовуються у металургії, ракетобудуванні, ядерній енергетиці, при освоєнні космосі тощо.

Кращими холодостійкими сталями для криогенної техніки є аустенітні і мартенситостаріючі сталі. Ці сталі зберігають достатню в'язкість при робочих температурах до -250°C . Одержання аустенітної структури і збереження аустеніту при низьких температурах досягається легуванням і термічним обробленням. Основними легувальними елементами є хром і нікель. Краще співвідношення між ними: $\text{Cr} = 18\%$ і $\text{Ni} = 8\text{...}10\%$. Іноді використовуються також аустенітні сталі, в яких дорогий нікель замінений марганцем.

Гартування аустенітних сталей здійснюється при нагріванні до $1050\text{...}1150^{\circ}\text{C}$ з охолодженням у воду або на повітрі з інтенсивним обдування (тонкостінні вироби). Загартовані аустенітні сталі мають найвищі пластичність і в'язкість, а також корозійну стійкість.

Приклади сталей: 12Х18Н10Т, 03Х13АГ19, 07Х13Н4АГ20.

4.3 Жаростійкі і жароміцні сталі

У багатьох галузях металургії та машинобудування, нафтопереробної промисловості є технології, у яких прилади і апаратура працюють у середовищі активних газів при високій температурі. Хімічна дія на деталі цих пристроїв не обмежується високою температурою і киснем, а знаходиться під впливом азоту, водяної пари атмосфери. Для виготовлення таких деталей потрібні жаростійкі сталі.

Жаростійкістю називається здатність металу протидіяти хімічній корозії у газовому середовищі при високій температурі. Основою для створення жаростійких сталей є такий хімічний склад, який визначає захисні властивості оксидної плівки на поверхні виробу. Щільну оксидну плівку з високими захисними властивостями створюють легувальні елементи хром, алюміній. Хром та алюміній разом з кремнієм найчастіше використовують для підвищення жаростійкості. Сталь, що містить 5% хрому, зберігає жаростійкість

при температурі до 900⁰С. Високий вміст алюмінію і кремнію сприяє окрихчуванню і погіршує технологічну пластичність.

Приклади сталей: 40Х9С2, ХН32Т, 20Х25Н20С2, ХН70Ю.

Жароміцність називається властивість матеріалів витримувати механічні навантаження при високих температурах протягом певного часу.

Жароміцність є головним критерієм для вибору сталей виробів, які працюють при температурі понад 450...500⁰С. Основними показниками жароміцності металів є границя повзучості та границя тривалої міцності.

Жароміцність досягається за рахунок карбідотвірних елементів - хром, ванадій, вольфрам, молібден, ніобій. Ці елементи утворюють дисперсні фази карбідів, які підвищують опір сталей пластичному деформуванню при високих температурах.

Хром вводиться головним чином для підвищення корозійної стійкості й міцності сталі. Нікель, азот і кобальт стабілізують аустенітну структуру. Низький вміст вуглецю забезпечує сталям добру пластичність, зварюваність і ударну в'язкість. Карбіди вольфраму, молібдену, ванадію подрібнюють зерно, підвищують жароміцність і прогартовуваність, знижують чутливість сталі до перегріву.

Приклади сталей: 13Х11Н2В2МФ, 14Х16Н2М2К5ФАБ.

4.4 Корозійностійкі сталі

Корозійностійкі сталі залежно від властивостей навколишнього середовища здатні опиратися всім видам хімічної і електрохімічної корозії.

Корозійна стійкість сталей забезпечується високим вмістом хрому і низьким вмістом вуглецю. Хром визначає утворення на поверхні деталей пасивної оксидної плівки, яка забезпечує високу корозійну стійкість. При введенні хрому менше 13% корозійна стійкість сталей виявляється недостатньою.

Нікель, марганець і азот – аустенітотвірні елементи – забезпечують отримання однорідної аустенітної структури сталі. Титан зв'язує майже весь вуглець у карбід ТіС, який майже не

розчиняється при термічному обробленні і пригнічує схильність сталей до міжкристалітної корозії.

Корозійностійкі аустеніто-мартенситні сталі відрізняються вищою, ніж аустенітні сталі, міцністю, доброю зварюваністю, зберігають механічні властивості до температури 450⁰С. Особливість їх використання полягає у тому, що деталі проходять гартування на повітрі з температури 950⁰С. Після гартування сталі піддаються обробленню холодом при температурі -70⁰С протягом 2 годин. При цьому у сталі зберігається близько 25% неперетвореного аустеніту, завдяки чому вони мають високу технологічну пластичність, добре штамнуються.

Приклади сталей: 12Х18Н10Т, 08Х17Н5М3, 1Х15Н4АМ3.

4.5 Зносостійкі матеріали

Майже всі деталі у процесі більш-менш тривалої експлуатації зношуються. Зношування – це процес втрати деталлю маси, зменшення об'єму або лінійних розмірів. Згідно з ДСТУ 27574-88 розрізняється декілька видів зношування. Всі вони відрізняються характером взаємодії з контрагентами, середовищем і відповідно - механізмом руйнування поверхні деталі. За цих умов зносостійкі матеріали повинні створювати опір зовнішній дії.

Розчинений при температурі гартування вуглець визначає твердість *загартованої* сталі. Тому збільшення вмісту вуглецю сприяє поліпшенню зносостійкості сталей за рахунок зміцнення матриці і збільшення вмісту карбідів.

При підвищенні вмісту легувальних елементів, особливо карбідотвірних (Cr, V, Mo), поліпшується твердість і прогартуваність сталей. При перевищенні певного співвідношення легувальних елементів і вуглецю відбувається утворення спеціальних карбідів, що значно підвищує твердість поверхні та її зносостійкість.

Проте така твердість вигідна не при всіх видах зношування. Вибираючи легувальні елементи, їх співвідношення з вуглецем треба у першу чергу мати на увазі умови роботи поверхні при експлуатації.

Графітізовані сталі завдяки спеціальному термічному обробленню мають характерні виділення графіту, і завдяки цьому

«змащиванню», незважаючи на деяке зниження твердості, отримують підвищену зносостійкість. Графітізовані сталі містять близько 1,5% вуглецю і 0,7...2% кремнію. Кремній відіграє роль основного графітізатора при відпалюванні.

Графітізовані сталі мають добрі ливарні властивості, низьку усадку і малу схильність до утворення гарячих і холодних тріщин.

Високомарганцеві аустенітні сталі (сталі Гадфільда) використовуються в умовах ударно-абразивного зношування. Ці сталі містять 1,2% вуглецю і близько 13% марганцю. При низькій твердості НВ 200...250 в умовах ударного навантаження або високого питомого тиску вони набувають високу зносостійкість.

Високомарганцеві аустенітні сталі використовуються для виготовлення хрестовин залізничних стрілок, зубів ковшів екскаваторів, конусів і щік дробарок, ланок гусеничних машин і т.п.

Приклади сталей: 95X18, 8X4B9Ф2, ШХ15, ШХ15СГ, 110Г13Л, 110Г13ФГЛ.

4.6 Матеріали з особливими властивостями

Надпровідниковий матеріал – матеріал, електричний опір якого нижче критичної температури T_k стає рівним нулю.

Оснoву технічних надпровідних матеріалів становить сплав Nb-Ni з критичною температурою $T_k = 9,6\text{K}$. Другим надпровідниковим матеріалом, освоєним промисловістю, є інтерметалідна сполука Nb_3Sn . Матеріал на основі Nb_3Sn має критичну температуру $T_k = 18,3\text{K}$. Найпоширенішим надпровідним є сплав Nb-Ti (46,5% Ti за масою). Цей сплав відрізняється високою технологічністю, з нього звичайними засобами плавлення, оброблення тиском і термічним обробленням виготовляють дрiт, шини, кабелі.

Технічні надпровідні дроти виготовляються як складні композитні конструкції з різнорідних матеріалів з ультратонкими (діаметром до часток мікрметра) нитками надпровідника.

У 1986 р. науковці у Швейцарії одержали зразки з надпровідних керамічних оксидів системи La-Ba-Cu-O з температурою переходу у надпровідний стан $T_k = 35\text{K}$. Пошук і отримання нових надпровідних матеріалів залишаються чисто науковою проблемою.

Сплави з регламентованим температурним коефіцієнтом лінійного розширення (ТКЛР) відрізняються незмінністю розмірів при зміні температурних умов експлуатації. Ця властивість використовується при закріпленні жорстких трубопроводів складної просторової форми, у криогенних установках. Мала величина ТКЛР дозволяє зменшити напруження у труб і запобігти їх руйнуванню.

Основним представником сплавів з мінімальним і постійним ТКЛР є інвар 36Н – сплав заліза з 36% нікелю.

Значення і стабільність інварів у часі залежить від термічного оброблення. Для одержання мінімального ТКЛР проводять гартування з температури 850⁰С (витримка 30 хв.) у воду з наступним відпусканням при температурі 315⁰С протягом 1 год.

Крім інварів використовуються ще декілька аналогічних Fe-Ni - сплавів (суперінвар, ковар, плагиніт), які відрізняються незначною зміною складу і вищою критичною температурою.

У деяких випадках становлять інтерес *матеріали з пам'яттю форми*. Ефект пам'яті форми (ЕПФ) полягає у тому, що зразок, який має певну форму в аустенітному стані при підвищеній температурі деформують при нижчій температурі мартенситного перетворення і охолоджують. При наступному нагріванні відбувається зворотній ефект: вихідна форма відновлюється. ЕПФ проявляється у сплавах, що характеризуються когерентністю кристалічних ґраток, а також малими змінами об'єму при перетвореннях.

Найперспективнішими для практичного використання є сплави Ti-Ni (приблизно 50:50%), що звичайно називаються нікелід титану або нітінол. Невеличкі відхилення від стехіометричного співвідношення призводять до зміни температур фазових переходів.

Залежно від основних магнітних характеристик *магнітні сплави* поділяються на магнітотверді та магнітом'які. Магнітотверді сплави відрізняються широкою петлею гістерезису, високим значенням коерцитивної сили і застосовуються для виготовлення постійних магнітів. Магнітом'які сплави працюють в умовах магнітних полів, що циклічно змінюються, і безперервно перемагнічуються.

Вироби для постійних магнітів зазвичай виготовляють литтям або методами порошкової металургії. Для них використовують

головним чином високовуглецеві сталі зі структурою мартенситу, що містять близько 1% вуглецю додатково легуються хромом (до 3%) і кобальтом (до 6%).

Високі магнітні властивості мають сплави системи Fe-Ni-Al і Fe-Ni-Al-Co з додаванням 2...4% Cu. Ці сплави піддаються такому термообробленню. Спочатку нагрівання до температури 1280...1300⁰C, витримка при цій температурі, потім охолодження до 900⁰C. Далі повільне охолодження у магнітному полі з $H_c = 160...280$ кА/м, після чого проводиться відпускання при температурі 630⁰C, тривалість якого залежить від марки сплаву.

Як магнітом'який матеріал застосовують чисте залізо, в якому всі домішки, особливо вуглець, є шкідливими. Їх вміст має не перевищувати 0,025%. Для усунення наклепу і одержання крупного зерна листовий метал піддають високотемпературному відпалюванню у безокисній атмосфері.

За хімічним складом магнітом'які матеріали поділяються на такі групи:

- пермалої - залізо-нікелеві сплави, містять від 30 до 83% нікелю; найвищу магнітну проникність мають пермалої з 72...93% нікелю;

- залізо-кобальтові сплави (26...50% Co) мають більшу магнитострикцію, але низьку пластичність;

- сплави залізо-нікель (45...47%) - кобальт (25%) зберігають постійну магнітну проникність у магнітних полях низької напруженості;

- сплави заліза з хромом (13...17%) відрізняються високою корозійною стійкістю у прісній і морській воді, у тумані та промисловій атмосфері.

5 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ КОНСТРУКТИВНОЇ МІЦНОСТІ СТАЛЕЙ І СПЛАВІВ

Міцність – одна з найважливіших властивостей сталей і сплавів, підвищення якої при достатньому запасі пластичності і в'язкості веде до зниження матеріалоемності конструкцій та підвищення їх надійності та довговічності.

Міцність залежить від хімічного складу і структури матеріалу. З точки зору положень теорії дислокацій реальна міцність металів і сплавів може бути підвищена двома шляхами:

- отримання металів з мінімальною кількістю дефектів, наближаючись до теоретичної міцності матеріалу;
- і навпаки, збільшення кількості структурних недосконалостей, які перешкоджають руху дислокацій.

Перший шлях здатний забезпечити найбільше зміцнення, але на сьогодні здійснити його можливо лише для виробів малих розмірів. Другий шлях простіший для здійснення. Проте міцність, яка досягається при цьому, супроводжується зниженням пластичності та в'язкості, і тим самим одночасно – надійності.

Формуванню бажаної структури сприяють: підвищення металургійної якості металу за рахунок видалення шкідливих домішок - сірки, фосфору, газів та неметалевих включень; раціональне легування з метою підвищення пластичності і в'язкості; подрібнення зерна за рахунок легування і термічного оброблення.

5.1 Металургійні методи підвищення міцності

По закінченню плавлення сталі проводиться операція *розкиснення*, тобто видалення розчиненого і пов'язаного із залізом кисню. Для цього під час випуску сталі з печі у ківш додають розрахункову кількість спочатку феромарганця, потім феросиліцію і наприкінці – алюмінію. Утворені оксиди марганцю, кремнію та алюмінію впливають на поверхню металу й утворюють шлак. Однак частина їх може залишитися у металі у вигляді неметалевих включень.

Коли виплавляють леговані сталі, більшість легувальних елементів вводять також у ківш у вигляді феросплавів або чистих

металів. Елементи, що мають меншу спорідненість з киснем, ніж залізо (Ni, Mn, Mo, Cu) додають у піч під час плавлення.

Для поліпшення якості рідкої сталі в умовах масового виробництва застосовують *позапічні методи* її оброблення.

Один з найпростіших з них – метод *оброблення синтетичними шлаками*. В окремі печі розплавляють шлак заданого складу (звичайно це вапно, глинозем, плавиковий шпат та ін.). Потім у цей ківш з висоти 8...10 м випускають сталь з печі (рис. 5.1).

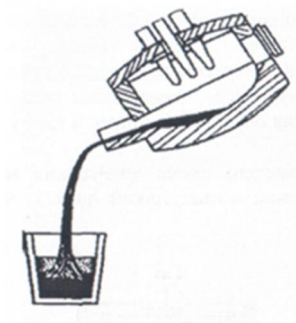


Рисунок 5.1 - Оброблення рідкої сталі у ківші з синтетичним шлаком

У процесі енергійного перемішування шлак поглинає зі сталі шкідливі домішки (сірка, фосфор, кисень, водень) і спливає. Проте не всі домішки вдається видалити зразу.

При *обробленні вакуумом* сталь розкиснюється, видаляються неметалеві включення (сірка, фосфор), і гази (водень, азот). Одночасно випаровуються легкоплавкі метали (олово, свинець, сурма та ін.). Використовують установки порційного і циркуляційного вакуумування (рис. 5.2).

В установках першого типу метал періодично засмоктується зі стопорного сталерозливного ківша у вакуумну камеру і очищений від домішок повертається у ківш. В установках другого типу завдяки тиску аргону сталь через лівий патрубок подається у вакуумну камеру і після оброблення повертається у ківш через правий патрубок.

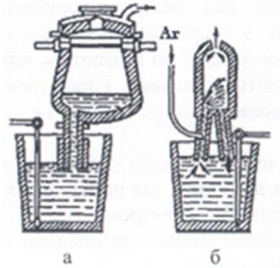
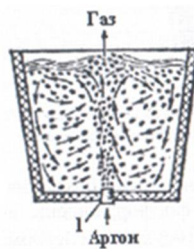


Рисунок 5.2 – Порційна (а) та циркуляційна (б) установки для вакуумування рідкої сталі

Ще один спосіб рафінування у ківші – *продування розплавленого металу аргонем* (рис. 5.3). У днищі ківша вставлений вогнетривкий блок, через який у ківш подається аргон.



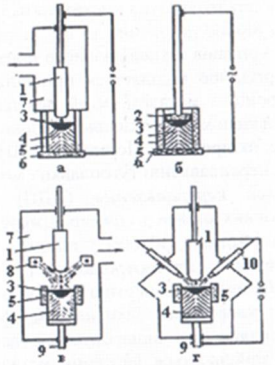
1 – вогнетривкий блок

Рисунок 5.3 – Схема продування рідкої сталі аргонем

При цьому у бульбашки аргону збираються розчинені у сталі гази, а на їх поверхні осідають неметалеві включення. При підйомі бульбашок аргону на поверхню відбувається рафінування сталі від газів та неметалевих включень. Продування може проводитися двома газами послідовно (киснем – для зневуглицьовування і аргонем), газами і порошковими матеріалами (вапно, кабід кальцію і т.п.). Можливе підігрівання установок в процесі вакуумування чи продування газами.

У металургії застосовується також декілька способів *електрорафінувального переплавлення*: вакуумно-дуговий (ВДП),

електрошлаковий (ЕШП), електронно-променевий (ЕПП), і плазмо-дуговий (ПДП). Спільним для всіх цих процесів є те, що краплі вихідного металу переносяться у виливницю, що охолоджується водою, і кристалізація відбувається знизу вверху, утворюючи зливоч (рис. 5.4).



а – вакуумно-дугове переплавлення (ВДП); б – електрошлакове переплавлення (ЕШП); в – електронно-променеве переплавлення (ЕПП); г – плазмово-променеве переплавлення (ПДП)

Рисунок 5.4 – Схеми установок для переплавлення сталі

При вакуумно-дуговому переплавленні рафінуючим засобом є вакуум, в умовах якого з металу виділяються гази і шкідливі домішки та легкоплавкі метали.

Електрошлакове переплавлення розроблене у 1958 р. в Інституті електрозварювання ім. Є.О.Патона за участі вчених НУ «Запорізька політехніка» і вперше впроваджене на заводі «Дніпроспецсталь» (м. Запоріжжя). Рафінуючим засобом служить розплавлений електропровідний синтетичний шлак (температура 2000...2500⁰С). Розплавлений метал осідає на дні виливниці, а неметалеві включення і легкоплавкі домішки залишаються у шлаку на цього поверхні. Гази видаляються у меншій кількості, ніж при ВДП.

Переплавлення у вакуумних електронно-променевих печах застосовують для отримання чистих і надчистих тугоплавких металів (Mo, Nb, Zr та ін.), а також для отримання спеціальних сталей і сплавів відповідального призначення. Джерелом тепла енергія, що виділяється

при обробленні металу потоком електронів. Ступінь рафінування аналогічна ВДП-рафінуванню. Але ЕПП технологічніше при переплавленні тугоплавких металів.

Плазмово-дугове переплавлення застосовується для отримання високоякісних сталей і сплавів. Джерелом тепла є низькотемпературна (близько 30000⁰С) плазма, що отримується у плазмотроні і становить потік високоіонізованого інертного газу. У печах здійснюється дегазація металу і забезпечується його спрямована кристалізація.

5.2 Термічне і хіміко-термічне оброблення

Зміна властивостей при термічному обробленні досягається шляхом зміни структури сталі. Серед способів термічного оброблення найбільшу міцність дає гартування. *Гартування* полягає у нагріванні сталі до температури вище її температури фазових перетворень, витримці для завершення перетворень та охолодженні з достатньо високою швидкістю, не меншою за критичну. При гартуванні отримують мартенситну структуру з високою твердістю, але крихку. Тому заключною операцією після гартування є відпускання. *Відпускання* полягає у нагріванні до температури нижче температури фазового перетворення та наступного охолодження, при якому формується остаточна структура сталі. Конкретна температура відпускання обирається залежно від твердості, отриманої після гартування, та робочої твердості, указаної у кресленні.

Отже, підвищення конструкційної міцності полягає не стільки у підвищенні міцнісних властивостей, скільки у тому, щоб при високій міцності забезпечити високий опір в'язкому руйнуванню.

Підвищенню комплексу механічних властивостей сприяє *термоциклічне оброблення* (ТЦО). ТЦО полягає у багаторазовому швидкому нагріванні в інтервалі фазових перетворень, витримці при максимальній температурі нагрівання і охолодженні. Багаторазові цикли «швидке нагрівання – охолодження» дозволяють подрібнити первинне зерно до середнього діаметра 3...5 мкм.

Сталі після термоциклоування у порівнянні зі сталями, які пройшли звичайне термічне оброблення, мають значно вищі міцнісні характеристики без зниження пластичності та ударної в'язкості.

Використання ТЦО також дозволило підвищити характеристики в'язкості руйнування, тривалої і втомної міцності сплавів алюмінію, титану і нікелю.

При гартуванні структура і властивості металу змінюються по всьому об'єму виробу. У деяких випадках за певних умов експлуатації для забезпечення довговічності достатньо забезпечити високу міцність і зносостійкість поверхневому шару виробу. Це досягається за допомогою хіміко-термічного оброблення.

Хіміко-термічним обробленням називається процес, який полягає у поєднанні термічного і хімічного впливу для зміни складу, структури і властивостей поверхневого шару деталей за рахунок дифузійного насичення його різними елементами.

Найпоширенішими видами хіміко-термічного оброблення є: цементування, азотування, нітроцементування, ціанування та металізування.

Цементування полягає у дифузійному насиченні поверхневого шару сталі вуглецем та отримання після гартування високої твердості поверхні при збереженні в'язкості осердя. Цементуванню піддають деталі з низьковуглецевих сталей (0,1...0,2% С). Для цементування використовують твердий чи рідкий карбюрізатори або штучні гази. Температура цементування – 950...1050⁰С.

Азотування полягає у дифузійному насиченні поверхневого шару сталі азотом і проводиться у середовищі аміаку, який при заданих температурах дисоціює з утворенням атомарного азоту. Для підвищення зносостійкості та міцності азотування проводять при температурі 450...600⁰С, а для підвищення корозійної стійкості – при температурі 600...800⁰С.

Азотуванню піддаються сталі, леговані елементами, здатними утворювати тверді й стійкі нітриди. Класичним прикладом сталі, придатної для азотування, є сталь 38ХМЮА.

Нітроцементування та ціанування – поверхневе насичення деталі одночасно вуглецем і азотом. Нітроцементування здійснюється у суміші аміаку у газу, яким навуглецьовують, при температурі 850...870⁰С протягом 2...10 год.

Ціанування проводиться у розплавленій ціанідній солі. При

температурі 540...560⁰С результати ціанування наближається до азотування, а при температурі 820...950⁰С – до цементації.

Одночасне насичення вуглецем і азотом відбувається швидше, ніж послідовне насичення кожним елементом послідовно. Співвідношення вуглецю й азоту у насиченому шарі регулюється зміною складу середовища та температурою процесу.

Дифузійне металізування – процес насичення поверхні сталі алюмінієм (алітування), хромом (хромування), кремнієм (силіцування). Різні види металізування використовуються для підвищення жаростійкості, кислотостійкості та зносостійкості. Оброблення проводяться при високих температурах залежно від матеріалу металізування.

5.3 Термомеханічне оброблення

Термомеханічне оброблення полягає у поєднанні пластичного деформування сталі, нагрітої до аустенітного стану, з її наступним гартуванням. Це дозволяє підвищити механічні властивості у порівнянні з властивостями після звичайного гартування. За діапазоном температури пластичного деформування розрізняють високотемпературне і низькотемпературне термомеханічне оброблення.

При *високотемпературному термомеханічному обробленні* (ВТМО) сталь деформується на 20...30% при температурах, вище верхньої аустенітної точки (приблизно до 950⁰С), а після цього відразу ж гартується з низькотемпературним відпусканням (100...300⁰С).

ВТМО у порівнянні із звичайним гартуванням приводить до підвищення міцності, пластичності та в'язкості приблизно у 1,5 рази. Ударна в'язкість при кімнатній і низьких температурах підвищується, знижується поріг холодноламкості. Крім того, ВТМО є технологічно вигіднішою операцією, оскільки деформування проходить при високих температурах і вимагає менших зусиль.

При *низькотемпературному термомеханічному обробленні* (НТМО) деформування на 75...90% проводиться при температурах вище 400...600⁰С; гартування і низькотемпературне відпускання проводять зразу після деформування.

НТМО, незважаючи на те, що протікає при порівняно низьких температурах, забезпечує великий запас пластичності при високих показниках міцності.

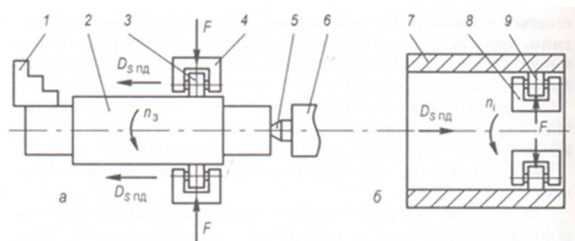
Термомеханічне оброблення дозволяє замінити низьколеговані сталі на дешевші вуглецеві, а також на 20...50% знизити масу виробів при збереженні їх міцності та довговічності.

5.4 Зміцнювально-калбрувальне оброблення

Зміцнювально-калібрувальне оброблення ґрунтується на пластичному деформуванні поверхні виробу твердим інструментом. Внаслідок оброблення зменшується шорсткість поверхні, збільшується твердість за рахунок наклепу. Так обробляють переважно зовнішні і внутрішні циліндричні і конічні поверхні. Інструментами є загартовані кульки, ролики або алмази спеціальної форми.

Обкочування зовнішньої і внутрішньої поверхонь здійснюється інструментом, притиснутим до оброблюваної поверхні. При обробленні зовнішньої поверхні виріб обертається, а інструмент робить зворотньо-поступальні рухи уздовж твірної оброблюваної поверхні.

Внутрішню поверхню розкочують за допомогою пристрою (штанги), на якому змонтовані вилки з роликами. Штанга закріплюється у кулачках патрона і у обертальному центрі задньої бабки, і таким чином отримує обертальний рух. Заготовка затискається на супорті і отримує поступальний рух (рис. 5.5).



1 – кулачок патрона; 2, 7 – заготовка; 3, 9 – ролики; 4, 8 – вилки; 5 – центр;
6 – задня бабка

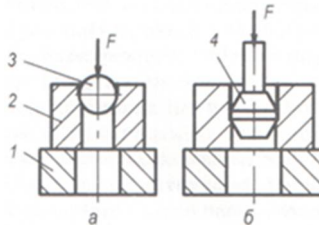
Рисунок 5.5 – Схема обкочування (а) і розкочування (б) циліндричних поверхонь

Порівняно з роликами кульки вимагають меншої сили притискання, але продуктивність оброблення кульками менша. Для повного оброблення поверхні виконується декілька поздовжніх ходів.

Основними параметрами оброблення є тиск інструмента на контактну поверхню, швидкість обкочування, подача та кількість проходів вздовж оброблюваної поверхні.

При обробленні поверхонь з підвищеною твердістю застосовують алмазне вигладжування. Інструмент складається з алмазу на державці. Оброблення відбувається під час обертання заготовки і поздовжній подачі інструмента. Завдяки малій поверхні контакту інструмента й заготовки сила притискання незначна.

Оброблення *калібруванням* полягає у проштовхуванні або протягуванні крізь оброблюваний отвір жорсткого й твердого інструмента, розмір якого дещо перевищує розмір отвору (рис. 5.6).



1 – підкладка; 2 – заготовка; 3 – кулька; 4 – дорн

Рисунок 5.6 – Схема калібрування отвору кулькою (а) і дорном (б)

Інструментом можуть бути кульки або дорни. Дорни можуть бути суцільними або складеними. Кульки і калібрувальні елементи дорнів виготовляються із загартованих сталей або твердих сплавів.

6 ВИРОБНИЦТВО І ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ І ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

6.1 Виробництво і використання КМ

Композиційні матеріали (КМ), маючи задане сполучення різнорідних за походженням матеріалів, дозволяють отримати унікальні властивості: високу питому міцність і твердість, жароміцність, зносостійкість, теплозахисні властивості тощо. Спектр властивостей КМ неможливо отримати при використанні традиційних матеріалів. Їх застосування дає можливість створювати раніше недоступні принципово нові конструкції.

Використання КМ дозволило створити стрибок у збільшувані потужності двигунів, зменшенні маси машин і механізмів, підвищенні ефективності транспортних засобів і авіаційно-космічних апаратів. Так, використання КМ в конструкції найбільшого транспортного літака світу АН-225 «Мрія» дало змогу замінити 16 тонн металевих сплавів, збільшити його вантажопідйомність і далькість польоту та зекономити пального.

6.1.1 Підвищення міцності та жорсткості КМ

Аналіз поведінки КМ під навантаженням показує, що головну роль у забезпеченні високої міцності виробу у більшості випадків бере на себе наповнювач і його взаємодія з матрицею. Дисперсні наповнювачі у незначному ступені затримують процес руйнування. Сучасні композити високої міцності використовують як правило волокнисті та шаруваті наповнювачі.

Що стосується волокон, то ступінь їхньої ефективності у забезпеченні міцності залежить від властивостей волокон, їх розмірів, частки у об'ємі композиту і взаємодії з матрицею.

Дослідження показують, що збільшення діаметра волокон у складі КМ призводить до зниження їх міцності, але різною мірою, залежно від природи волокон. Вважається, що при збільшенні діаметра волокон їх міцність різко падає, а при діаметрі d понад 15 мкм асимптотично наближується до певної мінімальної величини.

Міцність КМ, армованих *волокнами*, залежить від співвідношення їх довжини l та діаметра d . Чим більше співвідношення l/d , тим міцніший матеріал. При аналізі його впливу на міцність композиту використовується поняття *критичної довжини* волокон $l_{кр}$ - величини кінцевої ділянки волокна, яка не бере участі у

створенні опору руйнуванню. Її довжина залежить від діаметра волокна і $\tau_{зч}$ - границя міцності зсуву на межі матриця-волокно. Задача технології виробництва композиту полягає у забезпеченні більшого зчеплення волокна з матрицею. Ступінь зчеплення залежить головним чином від стану поверхні волокна і характеру контактної взаємодії (змочування) матриці з його поверхнею.

Об'ємна концентрація волокон, забезпечуючи високу міцність, повинна бути не менше мінімальної величини, але й не завищеною. На практиці об'ємний вміст волокон звичайно становить $60 \pm 10\%$ і створює вирішальний вплив як на механічні, так і на службові властивості КМ (тепло- і звукопровідність, тепло- і зносостійкість) та інше. Зайвий вміст волокон не сприяє підвищенню міцності.

Отже, ефективність армування КМ волокнами проявляється при мінімальному діаметрі (10...15 мкм і менше), якнайбільшій їх довжині, відсутності поверхневих дефектів, а також при обґрунтованій об'ємній концентрації волокон.

Міцність шаруватого композиту може бути суттєва підвищена за рахунок *пошарової схеми формування* виробу. Суть такої схеми полягає у тому, що у виробі за товщиною формується декілька шарів, у кожному з яких довгі і неперервні волокна розташовуються по-різному відносно напрямку дії головного навантаження під час експлуатації. Матеріал виробу стає ізотропним, здатним створювати значний опір зовнішньому навантаженню у будь-якому напрямку.

Як конструкційний матеріал найчастіше використовують склопластики. Вони формуються з неперервних та різних волокон або склотканин. Як матрицю використовують епоксидні і поліефірні смоли. Ці смоли мають дуже добру змочуваність зі скляними наповнювачами. Склопластики використовуються при виготовленні труб, контейнерів, деталей автомобілів, човнів, елементів будівельних конструкцій тощо. Вони використовуються не лише для виготовлення кузова автомобіля, але й завдяки високій жорсткості для виготовлення пружнодемпфуючих елементів підвіски коліс.

Як технології виготовлення використовують пресування, намотування, пултрузію та інші.

6.1.2 Жароміцні і жаростійкі композити

Найважливіший елемент сучасного газотурбінного авіаційного двигуна – це його «гаряча» частина: камера згоряння, напрямні та

турбінні лопатки, жарові труби тощо. Всі вони працюють в окиснювальному середовищі при температурах 1000° і вище. Серед них найвідповідальніший елемент – робоча лопатка – піддається механічній втомі та термоциклюванню, а її матеріал схильний до повзучості. Підвищити коефіцієнт корисної дії газотурбінного двигуна можна за рахунок використання ефективних жароміцних матеріалів.

Один з них - дисперсно-зміцнені композиційні матеріали - відомі сплави типу ВДУ: ВДУ-1 (нікель, зміцнений діоксидом торію), ВДУ-2 (нікель, зміцнений діоксидом гафнію) і ВДУ-3 (нікель + 20% хрому, зміцнений діоксидом торію). Ці сплави мають високу жароміцність при температурі 1200⁰С.

Композити з металевою матрицею, армованою волокнами, сьогодні розглядаються як найперспективніші жароміцні і одночасно жаростійкі матеріали, що використовуються при високих температурах.

Покращити жароміцність металевих сплавів можна також за допомогою волоконних наповнювачів. Зокрема, для армування металевих композиційних матеріалів використовують волокна: вуглецеві, боридні, з оксидів алюмінію та кремнію, карбїду кремнію, а також тонкий металевий дріт зі сталі, вольфраму, молібдену, титану. Теоретично максимальний вміст волокон може досягати 91% (об.), але уже при об'ємній частці волокон 80% виникають проблеми на межі поділу волокно-матриця.

Велике поширення отримали боридні волокна та волокна карбїду кремнію. Залежно від використання волокон у тій чи іншій матриці на поверхню волокон можуть наноситися покриття, які захищають їх від взаємодії з металом матриці в процесі виготовлення виробу. Так, крім звичайного волокна карбїду кремнію промисловість виготовляє волокно карбїду кремнію SCS-2, покрите вуглецевим шаром товщиною 1 мкм.

Волокна з вольфрамових сплавів як арматура високотемпературних композиційних матеріалів сьогодні достатньо вивчені. Вони мають високі значення показників міцності та модулю пружності у широкому діапазоні температур, але не мають достатньої міцності у поперечному напрямку і тому схильні до розшарування. У деталей, армованих такими волокнами, при робочих навантаженнях буде знижуватися міцність у напрямках, які не співпадають з напрямком армування.

Композиційні матеріали на металевій основі можуть також використовуватися як жаростійкі покриття деталей авіадвигунів, які працюють при високих температурах.

Сьогодні як перспективний розглядається композит на металевій основі з використанням дибориду титану-хрому ($TiCrB_2$). Сам диборид титану-хрому становить твердий розчин хрому у дибориді титану, відрізняється високими жаро- та зносостійкістю і достатньо низькою густиною ($4,5 \text{ г/см}^3$). Його недоліком є висока крихкість. Але як компонент композиту з металевою матрицею він може суттєво підвищити жаростійкість матричного матеріалу.

Крім ливарних способів для виготовлення армованих жаростійких і жароміцних виробів як заготовки використовується листовий композит, армований вольфрамовими волокнами або дротом. Так, пакетним прокатуванням виготовляють крупногабаритні листи, матрицею яких є сплави на нікелевій основі або вуглецеві та низьколеговані сталі, плаковані шаром хромонікелевих сплавів.

Досліджувався процес формування композиційного матеріалу з шаруватою ніобій-титановою матрицею, зміцненої вольфрамовим дротом. Композит формувався за технологією контактного зварювання, розробленою авторами. Складені заготовки зварювалися по всій поверхні на електроконтактній машині шовного зварювання. Задача полягала в отриманні монолітного матеріалу з одночасним збереженням міцнісних характеристик армувального дроту.

Виготовлення виробів з цих матеріалів здійснюється за допомогою технологій, які аналогічні виготовленню виробів з полімерних композиційних матеріалів, вони достатньо відпрацьовані і порівняно дешеві. Виготовлені таким чином вироби піддаються високотемпературному обробленню, внаслідок якого упорядковується структура матеріалу і утворюється високотемпературний квазіізотропний композиційний матеріал.

6.1.3 Керамоматричні матеріали

Керамоматричні композиційні матеріали (ККМ) створюються шляхом суміщення керамічної матриці з вуглецевими волоконними або іншими армувальними компонентами. У порівнянні з металевими композиційними матеріалами вони мають низку переваг: невелика густина при високій міцності, хімічна інертність, високі жаростійкість

і жароміцність, зносостійкість та теплоізоляційна здатність, стійкість до дефектів мікроструктури та ін. Такі властивості дозволяють використовувати ККМ з високою надійністю в експлуатації при високих температурах та за умови статичних, вібраційних і ударних навантаженнях.

Як *матриця* для ККМ використовують різноманітні керамічні матеріали на основі оксидів (Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2), карбідів (SiC , TiC , B_4C), нітридів (Si_3N_4 , AlN , BN), боридів (TiB_2 , ZrB_2) та ін. Проте найбільше практичне застосування отримали композити з карбидокремнієвою матрицею.

Новим напрямком у застосуванні ККМ є використання склокристалічної (ситалової) матриці. Її перевага полягає у тому, що формування заготовок відбувається при порівняно низьких температурах. При наступному термообробленні у матриці відбувається спрямована кристалізація, наслідком якої є підвищення робочих температур ККМ (до 1250°C).

Як *наповнювачі* керамічної матриці добрий результат показали високоміцні неперервні і дискретні карбидокремнієві та вуглецеві волокнисті матеріали (волокна, нитки, стрічки, джгути тощо) і ультрадисперсні керамічні сполуки, зокрема порошки SiC , Si_3N_4 , Al_2O_3 . У деяких випадках (наприклад, при створенні теплоізоляційних ККМ) кращий результат дає використання дисперсних наповнювачів типу карбіду кремнію. А при використанні для армування вуглецевого джгута можна отримати досить високі міцнісні характеристики композиту: $\sigma_b = 3000 \text{ МПа}$, $E = 230 \text{ ГПа}$ при $\rho = 1,75 \text{ г/см}^3$.

Технологія виготовлення виробів з ККМ - досить складний і тривалий процес. Її основа – ущільнення і просочування волокнистого наповнювача або пористої основи матричним матеріалом. Вироби можуть бути отримані твердо- і рідиннофазними методами.

Суть твердофазних методів полягає у формуванні виробів пресуванням у прес-формах, мундштучним формуванням та інше. Для отримання монолітної кераміки спресовані вироби піддаються спіканню. Іноді використовують технології, які поєднують формування зі спіканням – наприклад, гаряче ізостатичне пресування.

Рідиннофазні методи є порівняно дешевшими. Вони використовують декілька технологій. Наприклад, просочування армувального наповнювача (у вигляді підготовленого волокнистого

каркасу) розплавом матричного матеріалу. Це перш за все кераміка на основі боросилікатних, алюмосилікатних та інших видів стекл.

Галузі *використання* ККМ досить широкі і різноманітні. Нові композиційні матеріали є перспективними для багатьох галузей машинобудування.

Так, з них виготовляють крупногабаритні тонкостінні вставки для вузлів тертя (підшипники ковзання, занурені відцентрові насоси), торцеві ущільнення, деталі клапанів і запірної арматури, які працюють у різноманітних агресивних і абразивовмістних середовищах при підвищених температурах і вібраційних навантаженнях.

Керамоматричні композиційні матеріали знаходять застосування у виробі аерокосмічної техніки. Наприклад, компанія GE Aviation повідомила про створення з ККМ бандажа і лопаток турбіни високого тиску авіадвигуна. Керамічні турбінні лопатки значно легше звичайних лопаток з хромонікелевих сплавів. Легші лопатки створюють менше відцентрове навантаження на диски, підшипники та інші деталі двигуна, а отже дозволяють зменшити їх масу.

6.1.4 Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали

Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (ВВКМ) з'явилися в останні роки. Вони характеризуються хімічною інертністю, малою густиною, добрими електрофізичними властивостями, можливістю регулювання теплопровідності та електричного опору в широких межах. Під «вуглець-вуглецевими матеріалами» прийнято розуміти матеріали з графітоподібною структурою – від кристалічної до аморфної.

Першою стадією виготовлення виробів з ВВКМ є виготовлення каркасу. Каркас виготовляється звичайними технологіями КМ - намотуванням, викладанням або іншим способом з гідроцелюлозних (ГЦВ) і поліакрилінітирильних (ПАН) волокон. Використовують як волокна, так і нитки, джгути, стрічки з них. Під час отвердіння потрібно забезпечити рівномірне прогрівання матеріалу по всьому об'єму з одночасним ущільненням. Кращим варіантом вважається отвердіння у автоклаві. Каркас має точно відповідати конфігурації виробу.

Наступний етап – карбонізація. Карбонізацію заготовки проводять у середовищі інертного газу або у засипці при температурі

900...1000⁰С . При цьому випаровуються леткі складники, а вміст вуглецю збільшується до 99%. Виготовлений таким чином каркас становить міцний пористий виріб, який складається практично з чистого вуглецю.

Після цього проходить процес насичення пор каркасу піролізним вуглецем, який утворюється при розкладанні природного газу. Вуглець здебільшого у вигляді сажі заповнює пори каркасу. Процес насичення йде повільно, повторюючись декілька разів і може тривати до 7 діб.

Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали перспективні для застосування у газотурбінних двигунах (ГТД). До їх переваг належать низька густина, високі міцнісні характеристики і теплопровідність. Однак для них необхідне вирішення проблеми вигорання або окиснювання при температурах вище 370⁰С шляхом застосування захисних покриттів. Зокрема, фірма «Вільям Інтернейшнл» (США) проводить випробування турбінної форсунки з вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу з покриттям із карбїду кремнію.

Основні напрямки робіт із застосування деталей з ВВКМ у конструкції ГТД спрямовані на одержання антиокиснювальних покриттів або заміну, повну або часткову, вуглецевої матриці на карбїдну.

6.2 Виробництво і використання ПМ

Методи порошкової металургії дозволяють створювати принципово нові матеріали, які складно або навіть неможливо отримати іншими способами. За допомогою цих методів можна отримати багатшарові композиції. Різні комбінації металевих і неметалевих компонентів, пористі матеріали з широким діапазоном контрольованої пористості, вироби з тугоплавких матеріалів тощо. Порошкова металургія дає можливість використовувати стружку, одержувати вироби складної конфігурації, спростити технологію виготовлення точних деталей і знизити трудомісткість їх виробництва. Коефіцієнт використання матеріалу досягає 0,97.

На початок ХХІ століття механічні властивості порошкових сталей досягли рівня властивостей сталевого прокату, тому відкривається перспектива переходу до виробництва деталей з

порошкових матеріалів, економлячи до того ж на механічному обробленні заготовок.

6.2.1 Методи підвищення міцності ПМ

Відомо, що найважливішим фактором, що впливає на міцність порошкових виробів, є їхня пористість. Пори у пресованому виробі призводять до зменшення площі поперечного перерізу виробу під навантаженням, а також служать концентраторами напружень і джерелом утворення тріщин.

Тобто, основним напрямком підвищення міцності порошкових виробів є зменшення кількості пор.

Для підвищення міцності виробу достатньо широко використовуються технології пресування, спрямовані на підвищення щільності, а отже й зниження пористості сирих пресовок. Зокрема, однією з таких технологій є *тепле пресування* брикетів. При цьому і порошок, і прес-форма попередньо нагріваються до температури 150⁰С. Нагрівання здійснюється за допомогою індукторів, мікрохвильових пристроїв тощо. Наступне пресування проходить при тиску до 700 МПа.

Для отримання практично безпористої пресовки застосовують *імпульсне формування*, при якому ущільнення здійснюється ударними хвилями в інтервалі часу, що не перевищує 1 с. За видом джерела енергії розрізняють вибухове, електрогідравлічне, електромагнітне та пневмомеханічне імпульсне формування. Ударна хвиля, створюючи надзвичайно великий тиск (до 1...3 ГПа), діє дуже короткий час. Тепло, яке виділяється за рахунок адіабатичного деформування і тертя частинок металу, не встигає поширитися назовні і сприяє значному ущільненню пресовки. Цим методом виготовляють брикети порівняно простої конфігурації.

Для отримання мінімальної пористості використовують також *гаряче пресування*. Воно проводиться при температурі 0,5...0,9 від температури плавлення основного металу порошку. При гарячому пресуванні проходять одночасно два процеси: пресування і спікання. Оскільки температура при пресуванні може досягати 1000⁰С, виникає проблема матеріалу прес-форми і способу її нагрівання. Крім того, при таких температурах більшість порошкових матеріалів вимагає захисту від окиснення. Враховуючи все вище зазначене, треба зауважити, що цей метод підвищення міцності вимагає використання досить складного і коштовного обладнання.

Щоб запобігти впливу пор як концентраторів напружень на міцність порошкових виробів, використовують ще один метод оброблення пресовок – *інфільтрацію*. Суть її полягає у заповненні пор пресовок металом або сплавом, температура плавлення якого менше температури плавлення основного металу виробу. Ущільнення порошкового виробу при інфільтрації аналогічне процесам при рідинофазному спіканні.

Швидкість інфільтрації становить близько 1 мм/с. Товщина інфільтрованого шару залежить від фізичних властивостей розплаву та тривалості заповнення пор. Час повної інфільтрації у свою чергу залежить від густини розплаву, первинного об'єму пор у пресовці та площі її поперечного перерізу.

Після інфільтрації виріб практично не має пор і за необхідністю легко піддається наступним видам оброблення, у тому числі й додатковому деформуванню.

Окрім пористості, значною мірою на механічні властивості порошкових виробів також впливає їх подальше термічне оброблення. Аналіз літературних джерел показав, що найвивченішими матеріалами щодо впливу термічного оброблення на структуру та їх механічні властивості є вуглецеві порошкові сталі. Як і компактні, порошкові матеріали піддаються усім видам термічного оброблення. При цьому найчастіше використовуються відпалювання, гартування з подальшим відпусканням, а також старіння. На відміну від компактних матеріалів при термообробленні порошкових матеріалів існує низка особливостей, викликаних наявністю у них пор.

Перш за все треба зазначити, що нагрівання порошкових виробів необхідно проводити у захисній атмосфері для запобігання окисненню частинок та знеуглецьовуванню їх поверхні. Нагрівання проводиться струмами високої частоти (СВЧ), яке приводить до швидкого нагрівання поверхні (зокрема, при поверхневому гартуванні), і процеси окиснення та знеуглецьовування не встигають відбутися. Друга особливість термооброблення порошкових матеріалів - наявність пор та вільних поверхонь великої протяжності, висока дисперсність частинок порошку, велика нерівномірність розподілу хімічних складників (наприклад, вуглецю в сталях) – все це значно змінює умови структурних перетворень.

Для порошкових сталей цікавим фактом є те, що міцність після гартування, на відміну від компактних сталей, підвищується незначно

у порівнянні з міцністю після спікання або навіть зменшується. Це пов'язано з нерівномірним розподілом внутрішніх напружень у порошкових матеріалів, які, до того ж, можуть зменшувати й ударну в'язкість та спонукати до крихкого руйнування. Щодо міцності, то у загартованих порошкових сталях її суттєве збільшення відбувається після відпускання. Причому оптимальна температура відпускання коливається у межах 200...450°C й так само залежить від пористості оброблюваної порошкової сталі: чим вона вище, тим вище має бути й температура відпускання.

6.2.2 Ефективні технології у ПМ

Гаряче ізостатичне пресування (ГІП – Hot Isostatic Pressing) використовується для виготовлення виробів точної форми масою до 1 тонни (переважно з нержавіючої сталі та жаростійких сплавів) для енергетики, військової та медичної техніки, аерокосмічного машинобудування. Розвитку цієї технології сприяє впровадження удосконалених методів автоматичного проектування та можливість виготовлення деталей зі складною внутрішньою геометрією. Виробництво деталей з інструментальних сталей методами ГІП з 2010 р. до 2020 р. зросло на 62%.

Переваги ізостатичного пресування полягають у здатності виготовляти деталі значно більших розмірів, ніж це можливо іншими технологіями порошкової металургії, з практично необмеженими за складністю геометричними формами і високою точністю розмірів. ГІП застосовується для виготовлення виробів з таких малопластичних матеріалів, як жаростійкі сплави, титан, інструментальні сталі з високим коефіцієнтом використання матеріалу. Методами ГІП можуть бути виготовлені деталі, які мають стовідсоткову щільність з ізотропними механічними властивостями.

Інжекційне формування (ІФ - Metal Injection Molding) – формування заготовок із суміші тонкого металевого порошку і 15...30% (об.) пластифікатора, який забезпечує суміші пластичність, шляхом впорскування її у прес-форму при невеликому тиску і невисокому нагріванні. Перевагами ІФ є придатність процесу для виробів необмежено складної форми з високою точністю розмірів і високою міцністю, тому що тонкі порошки спікаються до практично суцільної щільності; висока продуктивність за рахунок використання багатогніздної оснастки. За механічними властивостями такі вироби успішно конкурують з виробами, виготовленими гарячим пластичним

деформуванням. Розміри виробів - від десятих часток грама до 250 г при товщині 0,7...5,0 мм.

Методами ІФ виготовляють вироби з низьколегованих і нержавіючих сталей, сплавів на основі нікелю й кобальту та магнітних матеріалів. Головні споживачі виробів – автомобільна та медична промисловості, виробництво споживчих товарів. Збільшення у подальшому виробництва деталей, виготовлених методами ІФ, пов'язане зі збільшенням попиту на компоненти для стільникових телефонів, комп'ютерів та інших електронних приладів, а також деталей авіаційних двигунів, вогнепальної зброї.

Для виготовлення виробів використовують порошки з розмірами частинок менше 20 мкм, але бажано, щоб середній розмір частинок не перевищував 10 мкм. Тому головний недолік процесу – висока вартість вихідних порошків.

Екструзія металевих порошків дозволяє досягти 100%-ної щільності без проведення операції спікання. Зерна у структурі екструдованих порошкових виробів малі та витягнуті. Зменшення розмірів зерен сприяє інтенсифікації межзереної дифузії, яка протікає зі значною швидкістю. Утворення вільних від оксидів контактних поверхонь зерен активує безпосередньо взаємодію між частинками, що приводить до збільшення міцності і пластичності кінцевого виробу.

6.2.3 Адитивні технології формування

Відмінність **адитивних технологій** від традиційних ґрунтується на пошаровому синтезі виробу шляхом *додавання* шарів матеріалу виробу згідно з програмою, заданою моделлю конструктора. Їх назва походить від англійського дієслова add – додавати, доповнювати, долучати, приєднувати, тому їх можна назвати також **додіваними**. Ці технології дозволяють виготовляти з високою точністю тривимірні деталі складної структури без закріплення у будь-якій оснастці.

На практиці використовуються два варіанти *додавання*, або адитивних, технологій, які відрізняються за методом формування шарів металу.

Перший варіант – **осаджування на основі-підкладці** (ООП - Bed Deposition) – полягає у тому, що над певною основою (робочою платформою) створюється достатній об'єм порошку, в якому послідовно, шар за шаром товщиною 20...50 мкм кожний певним джерелом енергії (найчастіше - лазерним променем) частинки

порошку сплавляються, а основа-підкладка поступово опускається вниз. Фактично виріб, *оточений з усіх боків порошком*, і таким чином, спираючись на невитрачений порошок, «вирощується» знизу вверх. Лазерний промінь плавить порошок та з мікронною точністю створює деталі найскладнішої конфігурації. При цьому отримують деталі зі щільністю понад 99%.

Другий варіант додаваних технологій - *спрямоване осаджування* (CO - Directed Deposition або Directed Energy Deposition) – полягає у тому, що за схемою 3D-технологій виріб формується на певній основі-підкладці без оточення порошком послідовно, шар за шаром, шляхом спрямованого підведення одночасно енергії (лазерний або електронний промінь, електрична дуга) і будівельного матеріалу (у вигляді порошку або порошкового дроту) безпосередньо у місце побудови виробу. На початковому етапі створюється міжатомний з'язок між основою і осадженим металом. А далі виріб *без зовнішньої опори (оснастки)* нарощується знизу вверх послідовним нанесенням розплавленого металу на попередні шари за певною програмою.

Проблемою додаваних, або адитивних, технологій є необхідність використання високоякісних і досить коштовних порошоків. Порошки для адитивних технологій повинні бути хімічно однорідними, мати понижений вміст газових домішок, бажано сферичної форми. Середній розмір частинок принаймні на 50% має бути не більше 40 мкм. Чим менше середній розмір частинок порошку, тим менший крок побудови виробу можна використати, а це означає, що можна досягнути меншу шорсткість поверхні деталі та рельєфніше проробити її дрібні елементи.

Адитивні технології, практично безвідходні на відміну від традиційних, вигідні в умовах дрібносерійного виробництва, вимірюваного десятками або сотнями виробів. Таких виробів, найчастіше складної геометрії, зі спеціальних матеріалів досить багато в авіаційній промисловості, космічній індустрії, енергетичному машинобудуванні і низці інших галузей.

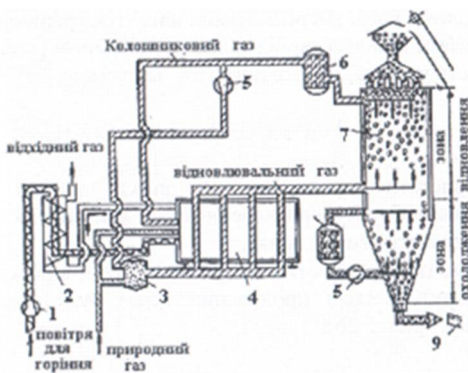
7 СУЧАСНІ МЕТАЛУРГІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА СТАЛЕЙ І СПЛАВІВ

Основні металургійні заводи України сьогодні виплавляють сталь *двостадійним* методом. Він полягає у тому, що спочатку з залізної руди з використанням коксу у доменному процесі отримують чавун, а потім з чавуне – сталь. Сталеплавильний процес може виконуватися декількома шляхами: з одного чавуну, з металобрухту та з чавуну і металобрухту разом у мартеновських чи електродугових печах або у конверторах. Цей процес вимагає значних енерговитрат і витрат доволі коштовного коксу. Щоб зменшити їх і отримати чистішу (без сірки, фосфору та інших шкідливих домішок) сталь, ведуться постійні роботи до створення *одностадійного*, безпосереднього отримання сталі з руди. Всі такі процеси, існуючі на сьогодні, об'єднуються під назвою: пряме отримання сталі.

7.1 Міндекс-процес

Мідрекс-процес — один з багатьох способів прямого одержання заліза із залізної руди. Процес може бути використаний, зокрема, у країнах, в яких немає покладів коксівного вугілля, натомість є великі поклади природного газу.

Окатиши із збагаченої залізної руди завантажуються зверху у шахтну піч (рис. 7.1). Назустріч руді з конверсійної установки



1 – повітрядувка; 2 – теплообмінник; 3 – змішувач газів; 4 – конверсійна установка; 5 – компресор; 6,8 – скрубери; 7 – шахтна піч; 9 – грохот

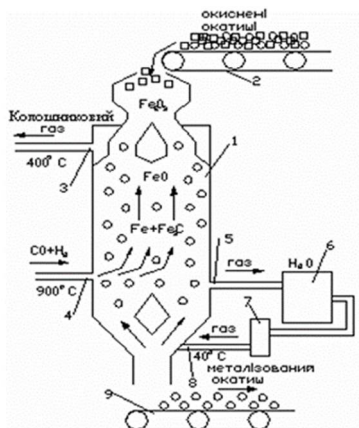
Рисунок 7.1 – Схема отримання металізованих окатишів у шахтній печі

подається конвертований природний газ (CO_2 , H_2). Процес відновлення здійснюється при температурі 760°C у верхній частині печі. Відновлення триває 4...6 год. Опускаючись у нижню частину печі, окатиші охолоджуються. Сумарний час перебування окатишів у печі становить 8...12 год. На виході отримують губчасте залізо, яке містить 90...93% заліза.

З 1969 по 2019 роки у 21 країні світу було побудовано близько 100 модулів Мідрекс.

7.2 Установа металізації окатишів

Установа - 64-метрові циліндрична башта з внутрішнім діаметром 5 м (рис. 7.2). Окатиші подаються у приймальний пристрій стрічковим конвеєром. Далі по трубах опускаються вниз в шахту. Назустріч їм підіймається відновлювальний газ $\text{CO}+\text{H}_2$, який отримують у реформаторах.



1 – циліндрична башта; 2, 9 – стрічкові конвеєри; 3, 4, 5, 8 – трубопроводи; 6 – скруббер; 7 – компресор

Рисунок 7.2 – Установа металізації окатишів

Відновлення проходить при температурі $600\text{...}800^\circ\text{C}$, і окислені окатиші перетворюються у металізовані з вмістом заліза понад 90%.

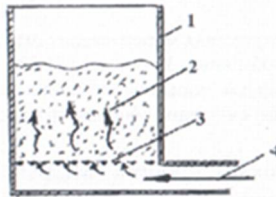
Весь процес проходить у замкненій системі: колошниковий газ через трубопроводи виходить з температурою 400°C і

використовується для конверсії разом з природним газом, що подається по трубопроводу 4 (рис. 7.2) знову у шахту.

7.3 Отримання заліза з карбіду заліза

Технологія ґрунтується на тому, що використовують карбід Fe_3C замість «брудного» сталевого брухту при варенні сталі у кисневих конвертерах або електродугових печах.

Карбід заліза отримують з подрібненої руди у реакторах (печах киплячого шару) шляхом продування через руду конвертованого природного газу (рис. 7.3).



1 – реактор; 2 – подрібнена залізна руда; 3 – пористе днище; 4 – конвертований газ-відновлювач

Рисунок 7.3 – Схема печі киплячого шару для отримання карбіду заліза

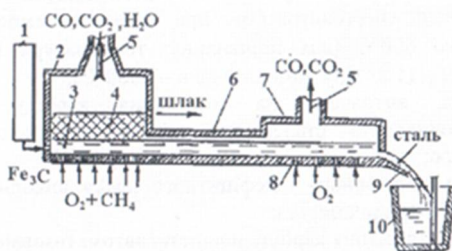
Температура процесу – $590^{\circ}C$, продуктивність реактора діаметром 12,5 м – близько 40 т/год. Карбід заліза на виході з реактора має температуру $550^{\circ}C$. Завдяки цьому і високому вмісту вуглецю (6,67%) він не поступається за властивостями рідкому переробному чавуну. Процес отримання карбіду повністю автоматизований.

Далі карбід завантажується на дно конвертора або електродугової печі перед заливанням рідкого чавуну. Метод дозволяє отримати сталь високої якості.

7.4 Сталеплавильна установка безперервної дії

Установка складається з двох конверторів, поєднаних жолобом (рис. 7.4).

У перший конвертор безперервно подається карбід заліза, підігрітий до $500^{\circ}C$, кисень, природний газ і вапно. На поверхні розплаву утворюється товстий шар шлаку. Природний газ, кисень та карбід заліза подаються під шлак у розплавлений метал через спеціальні фурми.

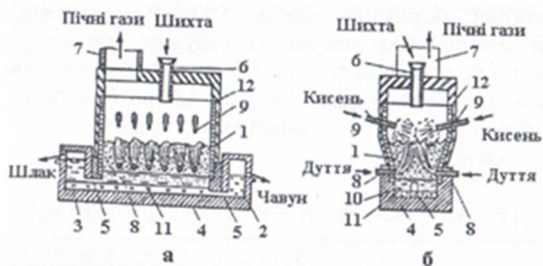


1 – підігрівач карбиду заліза; 2 – перший конвертор; 3 – рідкий метал; 4 – шлак; 5 – гази, що відходять; 6 – жолоб; 7 – другий конвертор; 8 – кисневі фурми; 9 – жолоб для випуску сталі; 10 - ківш

Сталь з температурою 1450°C та вмістом $1,5\%\text{C}$ з першого конвертора по жолобу безперервно поступає у другий конвертер. Через днище другого конвертера вдувається кисень. Вуглець окиснюється, і з конвертера виходить сталь з $0,05\%$ вуглецю з температурою 1650°C .

7.5 Установка рідкофазного відновлення

Процес рідкофазного відновлення (ПРВ) полягає у тому, що шихта (грудкова руда, шлам, що містить залізо, вугілля і флюс) завантажуються зверху на шар шлаку, і барботує за допомогою спеціальних фурм (рис. 7.5).



1 – шлак; 2 – металевий сифон; 3 – шлаковий сифон; 4 – під печі; 5 – перетоки; 6 – завантажувальний патрубок; 7 – відвідний патрубок; 8 – фурми барботажу; 9 – кисневі фурми; 10 – спокійний шлак; 11 – металева ванна; 12 – охолоджувачі

Рисунок 7.5 – Схема печі ПРВ (а - поздовжній, б – поперечний перерізи)

Внаслідок розкладання і неповного згоряння вугілля утворюються відновлювальний газ ($\text{CO} + \text{H}_2$), який відновлює залізо з його оксидів.

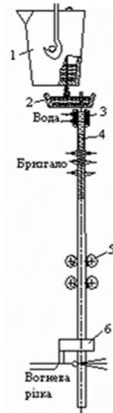
Відновлене залізо науглецьовується у шарі шлаку, що барботує, проходить через шар спокійного шлаку і утворює металеву ванну на поді печі. Фурми верхнього ряду використовуються для подачі кисню для допалювання газу-відновлювача. Температура металевої ванни у верхній частині печі підвищується до $1500 \dots 1600^\circ\text{C}$. Ефективність роботи печі залежить від ступеня допалювання пічних газів.

7.6 Неперервне розливання сталі

Після закінчення варіння сталь виливається з печі у розливний ківш, а з ківша – у виливниці. При кристалізації зливка у виливниці утворюється зональна структура: у стінок – зона стовпчастих кристалів, а у центрі утворюється зона крупних рівновісних кристалів. У верхній частині зливка утворюється велика усадкова раковина, насичена шкідливими домішками (сірка, фосфор та ін.). Після закінчення кристалізації верхня, надливна частина зливка відрізається і спрямовується на переплавлення. Тобто, розливання сталі у виливниці характеризується витратами металу (до $15 \dots 20\%$) і неоднорідною будовою зливка.

Щоб уникнути цих недоліків, використовується неперервне розливання сталі на *машинах безперервного лиття заготовок* (МБЛЗ) (рис. 7.6).

З розливного ківша сталь поступає у проміжний ківш, а з нього – у мідний охолоджуваний водою кристалізатор. Залежно від розмірів і конфігурації поперечного перерізу кристалізатора формується блюм або сляб. Витягнутий частково затверділий зливочок охолоджується водою, а потім безперервний зливочок кисневим різакром розрізається на відрізки необхідної довжини.



1 – ківш; 2 – проміжний ківш; 3 -мідний кристалізатор; 4 – кірка відлітої заготовки; 5 – ролики; 6 – кисневий різак
Рисунок 7.6 – Схема неперервного розливання сталі

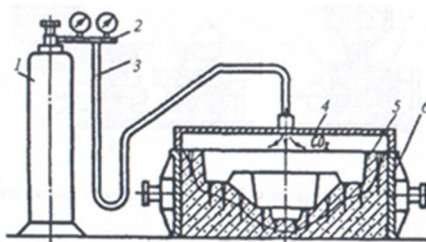
8 СУЧАСНІ ЛИВАРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Ливарне виробництво відомо з найдавніших часів. З часом воно вдосконалювалося, з'являлися нові й нові способи лиття. На теперішній час збереглися і удосконалилися такі основні способи лиття: у піщані та оболонкові форми, за витоплюваними моделями, кокільне, відцентрове і лиття під тиском. Вони й досі є сучасними, без них не обходиться жодний ливарний цех. Проте у них є свої удосконалення нових часів.

8.1 Удосконалення лиття у піщані форми

8.1.1 Формувальні суміші та оснастка

У деяких випадках для виготовлення крупних форм і стрижнів використовують рідкоскляні суміші, які крім кварцового піску містять 3...7% рідкого скла, 3...5% глини та 3,5...4,5% вологи. Форми після ущільнення піддають твердінню шляхом витримки на повітрі протягом декількох годин при кімнатній температурі або декількахвилинним продуванням вуглекислим газом (рис. 8.1).



1 – балон; 2 – редуктор; 3 – шланг; 4 – парасолька;
5 – формувальна суміш; 6 – півформа

Рисунок 8.1 – Схема продування форми вуглекислим газом

Проходячи через формувальну суміш, вуглекислий газ вступає у реакцію з *рідким склом* суміші і викликає її твердіння.

Перевагою CO₂-процесу є тривала живучість форми, її швидке твердіння, відсутність токсичних викидів, але така форма важко вибивається при видаленні виливка.

Процес виготовлення форм з використанням *пластичних самотвердіючих сумішей* (ПСС-процес) здійснюється у два етапи. Спочатку готують суміш, яка складається з 5% глини, 3% меленого

вугілля, 5,5% рідкого скла, 3, 5% води, решта – пісок. Суміш має високу пластичність, легко ущільнюється струшуванням. Під час формування у суміш вводять 2...5% ферохромового шлаку як каталізатор, який прискорює твердіння суміші на основі рідкого скла. Ця суміш використовується як облицювальна. Через 20...30 хвилин після ущільнення форму фарбують протипригарною сумішшю, а через 4...6 годин до неї можна заливати метал.

ПСС-процес використовується для середніх і крупних форм і стрижнів; головні перевага – зниження витрат і спрощення процесу формування.

Рідкі самотвердіючі суміші (РСС) розроблені і вперше впроваджені у виробництво в Україні. Їхня особливість – форми і стрижні виготовляються не механічним ущільненням, а шляхом заливання. Склад суміші: пісок, рідке скло, ферохромовий шлак як каталізатор, вода, мелене вугілля, піноутворювач і стабілізатор піни. Через 1,5...2 хв. після введення каталізатора суміш заливають у форму або стрижньовий ящик. Модель з форми і стрижні з ящиків видаляють через 30...40 хв. після заливання суміші. Головна перевага РСС-суміші - виключення процесу ручного ущільнення та формувальних машин.

З розвитком 3D-процесів формування різноманітних виробів у ливарному виробництві почав застосовуватися метод швидкого виготовлення *моделей* - технологія швидкого прототипування (Rapid Prototyping RP) – це пошаровий синтез чи пошарове «вироснування» полімерної моделі безпосередньо за електронними даними. Після розроблення конструкції моделі вилівка і елементів ливникової системи розробляється програма, яка керує лазером при створенні твердотільної моделі.

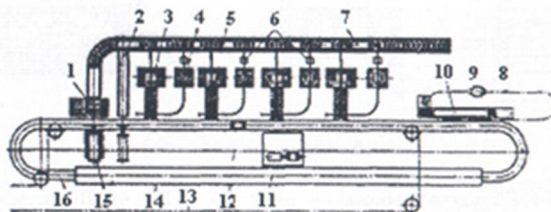
Перевагою RP-технологій є швидкість і точність виготовлення, зменшення витрат, особливо при виготовленні дослідних або одиничних зразків, мінімальний обсяг ручної роботи.

8.1.2 Удосконалення ущільнення формувальної суміші

При формуванні досить добре відомо застосування пресових і струшувальних формувальних машин, піскострільних машин для виготовлення стрижнів тощо.

Для ливарних цехів важливо, щоб всі технологічні операції здійснювалися одночасно і синхронно. Для цього виготовлення форм, їх складання, заливання і вибивання здійснюється на *наземних конвеєрах*, обладнаних відповідними пристроями і засобами

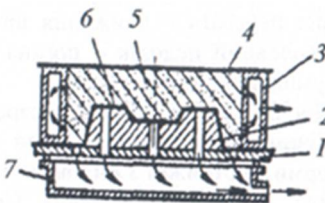
транспортування. На рис. 8.2 як приклад показана схема наземного горизонтально-замкнутого ливарного конвеєра, призначеного для повної механізації виготовлення форм, заливання металу, охолодження та вибивання виливків.



- 1 – вибивна решітка; 2, 7 – стрічкові транспортери; 3, 4 – формувальні нахили;
 5 – рольганг; 6 – пневмопідіймачі; 8 – монорейка; 9 – ківш; 10 – розливочна площадка;
 11 – приводна станція; 12 – візок; 13 – підвісний транспортер; 14 – охолоджувач;
 15 – штовхач; 16 – конвеєр

Рисунок 8.2 – Схема ливарного конвеєра

Сучасним способом формоутворення в ливарному виробництві є *вакуумно-плівкове формування* – формування в опоках по постійних моделях з сухим піском без зв'язуючого. Пісок спресовується і утримується в опоці за допомогою вакууму і синтетичної полімерної плівки (рис. 8.3).



- 1 – модельна плита; 2 – модель; 3 – опока; 4, 6 – плівки; 5 – формувальна суміш; 7 – вакуумна камера

Рисунок 8.3 – Схема плівково-вакуумного формування

Модельну плиту з моделлю накривають нагрітою полімерною плівкою товщиною 0,5...1 мм, яка під дією вакууму тиском 40...50 кПа щільно прилягає до модельного оснащення. Після цього на плиту установлюють опоки і засипають кварцевим піском. Верхню поверхню півформи знов накривають плівкою і створюють вакуум

між верхньою і нижньою плівками. У такий спосіб пісок зберігає конфігурацію моделі і набуває високу твердість.

Вакуумування триває при складанні форми, заливанні металу і кристалізації виливка. Під час заливання металу плівка згоряє, виконуючи роль протипригарного покриття.

Перевага метода: знижується вартість формувальних сумішей, відпадає необхідність у сумішепідготовчому обладнанні, різко полегшується процес вибивання виливків, продовжується термін служби модельно-опочного оснащення.

Імпульсне ущільнення відбувається під дією раптового вдування повітря в опоку, попередньо наповнену формувальною сумішшю.

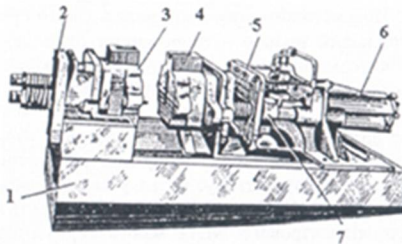
На машині імпульсної дії змонтована модельна плита з моделлю. Над нею є імпульсна головка, що має камеру відповідного об'єму з повітряним клапаном і великою кількістю отворів у нижній частині. Після наповнення опоки формувальною сумішшю на неї накладається імпульсна головка і відкривається повітряний клапан. Повітря під тиском 5...8 МПа з великою швидкістю спрямовується на формувальну суміш, ущільнює її та виходить крізь пори в атмосферу.

Переваги: рівномірне ущільнення по висоті опоки, висока продуктивність праці, низькі витрати енергії та відсутність шуму.

8.2 Удосконалення спеціальних способів лиття

8.2.1 Пневматичні ливарні машини

У кокільному литті використовуються пневматичні ливарні машини (рис. 8.4).



1 – станина; 2, 5 – плити з штовхачами; 3 – нерухома півформа; 4 – рухома півформа; 6 – пневмоциліндр; 7 – каретка

Рисунок 8.4 – Схема пневматичної кокільної машини

Кокільна ливарна машина з вертикальною площиною різної форми має на станині нерухому і рухому півформи. З'єднання півформ перед заливанням здійснюється за допомогою пневмоциліндра, а виштовхування виливка з форми – спеціальними штовхачами.

Кокільні пневматичні ливарні машини можуть встановлюватися на карусельний стіл з вертикальною віссю обертання у кількості 8...12 штук. При обертанні каруселі кожний кокіль проходить зони всіх послідовних операцій від підготовки кокіля до заливання і видалення виливка та очищення робочих поверхонь кокіля.

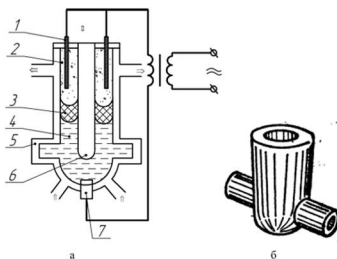
8.2.2 Лиття за газофікованими моделями

Суть метода полягає у тому, що модель та ливникову систему виготовляють з пінополістиролу та покривають вогнетривкою фарбою. Модель встановлюють в опоку, ззовні засипають формувальну суміш. Далі рідкий метал заливається безпосередньо на модель, яка згорає (газифікується), а метал займає місце, яке до цього займала пінополістирольна модель.

Переваги: модель має менші припуски на механічне оброблення, не має ливарних нахилів, форма виготовляється нерознімною; пінополістирольна модель коштує дешевше дерев'яної.

8.2.3 Електрошлакове лиття

Метод розроблений в Інституті електрозварювання ім. Є.О.Патона (м. Київ). При *електрошлаковому литті* металева ливарна форма-кристалізатор виконує дві функції: є агрегатом для плавлення металу і одночасно поступово, знизу вгору, формує вилівок (рис. 8.5).



а – установка для електрошлакового лиття; б – вилівок;

1 – витрачені електроди; 2 – шлак; 3 – метал у зоні плавлення; 4 – метал виливка; 5 – ливарна форма-кристалізатор; 6 – водоохолоджуваний стрижень;

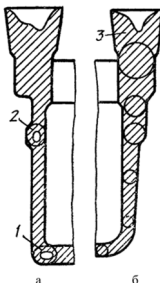
7 – затравка для первинного запалювання дуги
Рисунок 8.5 – Схема електрошлакового лиття

Поповнення форми металом відбувається за рахунок плавлення металу витрачених електродів. Розплавлений метал, проходячи через шар шлаку, очищується від сірки, фосфору та інших шкідливих домішок. Плавлення металу, заповнення форми і твердіння відбуваються у формі безпосередньо і одночасно. Тому забезпечується спрямована кристалізація, відсутність дефектів усадкового походження, гальмується розвиток зональної і міждендритної ліквіації.

Електрошлаковим литтям можна отримувати складні за конфігурацією деталі шляхом з'єднання їхніх частин у формі. Електрошлакове лиття застосовується у масовому і крупносерійному виробництвах для виготовлення заготовок корпусів атомних реакторів, суднових гребних валів, деталей потужних двигунів, валків прокатних станів та інших відповідальних і, як правило, масивних деталей. Перехід на виготовлення виливків електрошлаковим литтям дозволяє значно зменшити масу заготовки. При цьому коефіцієнт використання металу може становити 0,98.

9 ВИРОБНИЦТВО ВИЛИВКІВ МЕТОДАМИ СПРЯМОВАНОЇ КРИСТАЛІЗАЦІЇ

Структура реальних металів після кристалізації у ливарній формі не є ідеальною. У них зустрічаються різноманітні недосконалості. Низка дефектів пов'язана з конструкцією вилівка і власне процесом кристалізації. Через некомпенсовану усадку у процесі кристалізації у вилівку виникають усадкові раковини і пухкості. Вони можуть виникнути при неправильному розподілі маси металу за перерізом вилівка. Для того, щоб запобігти виникненню цього дефекту, роблять перевірку конструкції стінки методом "вписаних кіл, що викочуються" (рис. 9.1). У правильній конструкції вилівка будь-яке вписане коло повинне без перешкод "викочуватися" у напрямку надливу.



а – нетехнологічно; б – технологічно;
1, 2 – усадкові пухкості; 3 – надлив

Рисунок 9.1 - Схема перевірки ефективності конструкції вилівка.

Уникненню усадкових дефектів сприяє організація *спрямованої кристалізації* знизу вгору, при якій усадкова раковина, шлаки, неметалеві включення спливають у надлив.

Крім того, кристалічні ґратки різних кристалів у вилівку розташовані довільно відносно діючого при експлуатації навантаження. Відсутність відповідності орієнтації кристалічних ґраток призводить до суттєвого зниження механічних властивостей відливої деталі. Теоретична міцність металів з бездефектною структурою і кристалічною ґраткою, односпрямованою з діючим навантаженням (*монокристалів*), у сотні разів вище, ніж реальних металів (рис. 9.2).



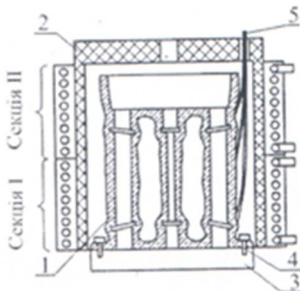
Рисунок 9.2 - Вплив спотворень кристалічної ґратки на міцність металів

Тому у сучасному ливарному виробництві склалися два напрямки підвищення міцності і якості виливків: методи спрямованої кристалізації та методи лиття монокристалів.

9.1 Методи спрямованої кристалізації

9.1.1 Спрямована кристалізація зв рахунок зниження потужності нагрівача

Ливарна форма встановлюється у нагрівачі на водоохолоджуваній холодильнику і щільно закріплюється на ньому спеціальним пристроєм (рис. 9.3).



1 – ливарна форма; 2 – двозонний нагрівач; 3 – холодильник; 4 – пристрій для закріплення форми до холодильника; 5 – термопари

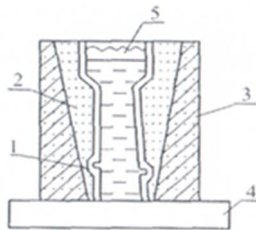
Рисунок 9.3 – Схема спрямованої кристалізації шляхом зниження потужності

Для покращення тепловідводу від залитого металу форму виготовляють з відкритим дном, а утримуючий пристрій служить для перешкоджання витіканню розплаву. Після вакуумування робочої камери включається нагрівач, що має дві окремо керовані секції, і ливарна форма розігрівається до необхідної температури. Режим нагрівання встановлюється таким, щоб у момент заповнення ливарна форма мала температуру, близьку до температури розплаву.

Зразу після заливання металу нижня секція нагрівача вимикається, а на верхній починається плавне зниження температури. Процес спрямованої кристалізації починається під лією холодильника у нижній частині форми з утворення стовпчастої структури та її зростання вгору. За рахунок планового зниження потужності верхньої секції нагрівача поступово відбувається утворення стовпчастої структури аж до верхньої частини ливарної форми.

9.1.2 Екзотермічний спосіб спрямованої кристалізації

Ливарна форма встановлюється у керамічну оболонку. Між формою і оболонкою створюється прошарок, заповнений екзотермічною сумішшю, товщина якого поступово збільшується до її верхньої частини. (рис. 9.4). При горінні екзотермічної суміші створюється температурний градієнт по висоті форми, який і забезпечує спрямовану кристалізацію.



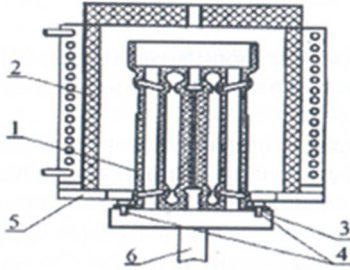
1 – форма; 2 – екзотермічна суміш; 3 – керамічна оболонка; 4 – холодильник;
5 – теплоізолююча засипка

Рисунок 9.4 – Схема виливниці для спрямованої кристалізації із застосуванням екзотермічної суміші

Тепловідвід здійснюється переважно холодильником, і в міру переміщення фронту кристалізації вгору швидкість тепловідводу сповільнюється, що сприяє формуванню якісної структури виливка.

9.1.3 Спрямована кристалізація шляхом витягування виливка з нагрівача

Ливарні форми поміщаються у нагрівач установки на мідному водоохолоджуваному кристалізаторі і щільно закріплюється спеціальним пристроєм (рис. 9.5.)



1 – формв; 2 – нагрівач; 3 – рухомий кристалізатор; 4 – пристрій для кріплення форми; 5 – тепловий екран; 6 – шток

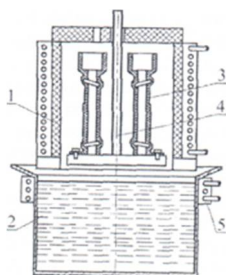
Рисунок 9.5 – Схема установки для спрямованої кристалізації методом витягування з нагрівача

Блок ливарних форм розігрівається у вакуумі $0,133\text{Па}$ до температури на $100...150^{\circ}\text{C}$ більше температури плавлення даного металу, після чого проводиться заливання металу. Спочатку кристалізація відбувається на холодильнику. В міру витягування форм з нагрівача тепловідвід у нижній частині форми зменшується, а фронт кристалізації поступово переміщується у верхню частину ливарних форм. При спрямованій кристалізації важливо мати чітке розділення зон нагрівання і охолодження. Для цього служить тепловий екран у нижнього зрізу нагрівача.

9.1.4 Спрямована кристалізація з охолодженням у розплавленому теплоносії

При охолодженні у розплавленому теплоносії тепловіддача форм випромінюванням замінюється на конвективну тепловіддачу у рідкому теплоносії, яким служать металеві розплави з коефіцієнтом тепловіддачі у сотні разів більшим, ніж при тепловіддачі випромінюванням.

В установці для спрямованої кристалізації (рис. 9.6) з охолодженням у розплавленому теплоносії ливарні форми спочатку встановлюються на рухомій підставці у нагрівачі.



1 – нагрівач; 2 – розплавлений теплоносій; 3 – форма; 4 – підставка форми;
5 – кільцевий холодильник

Рисунок 9.6 – Схема установки для спрямованої кристалізації з охолодженням у розплаві легкоплавкого металу

Після нагрівання форми до необхідної температури і заливання металу починається процес кристалізацією шляхом занурення (опускання) форми у розплавлений теплоносій. При поступовому зануренні форми відстань від фронту кристалізації до рівня теплоносія буде постійною протягом всього циклу спрямованої кристалізації.

Для виключення перегрівання рідиннометалевого теплоносія у верхній частині ванни встановлений кільцевий водоохолоджуваний холодильник.

9.2 Методи отримання монокристалічних виливків

9.2.1 Затравочний метод отримання моновиливків

Ливарна форми без дна встановлюється на водоохолоджуваному холодильнику, в якому зроблено спеціальне заглиблення для затравки циліндричної форми (рис. 9.7). Над затравкою є діафрагма, що з'єднується з конусом.

При заливанні металу торець затравки підплавлюється, і її мікрокристалічна структура передається виробу. Зростання кристалів починається одночасно від затравки і поверхні холодильника. Кристал, що зростає від затравки, входить у діафрагму, а решта відсікається. Цим досягається переважний контакт торця затравки з розплавом.

Ливарна форма заздалегідь нагрівається до температури, що перевищує на 150...200⁰С температуру плавлення сплаву. Надійна передача структури від затравки виробу здійснюється лише тоді, коли

її верхній торець плавиться, а решта частини залишається твердою. Тому для успішної роботи затравки створюється певний осьовий температурний градієнт.

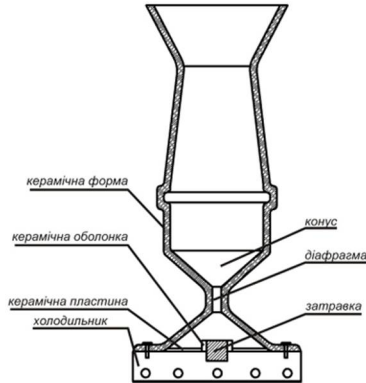
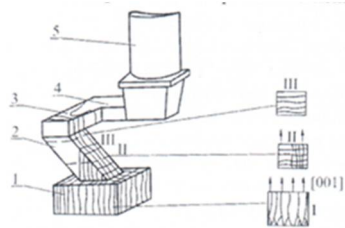


Рисунок 9.7 - Схема ливарної форми для отримання монокристалічного виливка від затравки

9.2.2 Беззатравочний метод отримання моновиливків

У цьому випадку у ливарній формі застосовується спеціальна ливникова система з кристаловідбірником (рис. 9.8).



1 – стартер; 2...4 – ливникова система; 5 – виріб;
I – стовпчаста структура у стартері; II і III – стовпчаста структура у перерізах ливникової системи

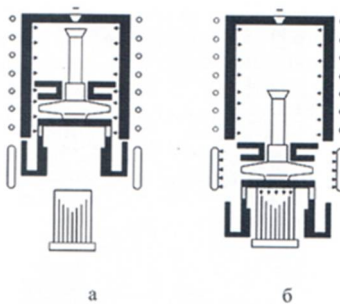
Рисунок 9.8 – Схема ливникової системи для отримання монокристалічного виробу

Перегрітий метал заливають в оболонкову форму без дна, яка встановлена на мідному водоохолоджуваному кристалізаторі. Внаслідок інтенсивного охолодження при контакті з поверхнею кристалізатора у стартері зароджується безліч дрібних зерен з довільною орієнтацією кристалів у них. Далі ці зерна зростають в умовах спрямованого тепловідводу і набувають стовпчастої структури. Сформована у стартері стовпчаста структура починає проростати у спеціально спроектовану систему ливникових ходів. За рахунок геометрії, розмірів і нахилу окремих ходів ливникової системи відносно напрямку тепловідводу й здійснюється відбір одного моноспрямованого зерна. За рахунок створення оптимальної конструкції ливникових ходів і забезпечення додаткового тепловідведення у виробі можна створити таке орієнтування монокристала, яке найкраще відповідає навантаженням на виріб у процесі експлуатації.

9.2.3 Метод радіально-спрямованого затвердіння

Метод радіально-спрямованого затвердіння використовується для виготовлення точних крильчаток, роторів, особливістю конструкції яких є те, що вироби дископодібної форми поєднують у собі тонкостінні і масивні вузли. Тобто окремі елементи виробу вимагають різної швидкості кристалізації.

Прогрівання ливарної форми (рис.9.9, а) відбувається в індукційному нагрівачі на опорному кільці, встановленому на механізмі підйому. У зоні нагрівання донний холодильник виведений з опорного кільця.



а – прогрівання форми; б – кристалізація виливка
Рисунок 9.9 – Схема радіально-спрямованого затвердіння

Після заливання металу форма за допомогою механізму підйому переміщається із зони нагрівання у зону бічного і донного охолодження з одночасним підігріванням додаткової частини виливка (рис. 9.9, б). У процесі охолодження спочатку охолоджується торець диска, потім маточина, а в останню чергу – стояк, що додатково підігрівається у зоні нагрівання.

Мікроструктура таких виливків виходить стовпчастою, причому макрозерна можуть мати змінну спрямованість у різних частинах виливка.

10 СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ КОВАЛЬСЬКО-ШТАМПУВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

Кування – один з найстаріших способів оброблення металів, напевне старіший за ливарне виробництво й металургію. Недаремно коваль був шанованою людиною і у місті, і у селі принаймні до кінця XIX століття. Його майстерня мала просте обладнання: горн для нагрівання металу, ковадло, молот і набір деяких додаткових інструментів. Працювали дві людини – коваль і молотобоець (рис. 10.1).



Рисунок 10.1 – Середньовічна кузня

Головну роль відігравав майстер – коваль. Він тримав у руці молоток – ручник і ним вказував, куди бити. А роль молотобійця зводилася до того, щоб бити молотом з усієї сили.

Робилися спроби замінити молотобійця якимось механізмом, щоб бити молотом більшої маси. Певний час використовувалися лобові (важільні) молоти (рис. 10.2).



Рисунок 10.2 – Робота лобового молота

На одному кінці важеля, насадженого на горизонтальну вісь, закріплювався бойок молота, а інший виходив за межі кузні і впирався у диск з виступами (кулаками) на його зовнішній поверхні. Диск урухомлювався водяним колесом. Кожен кулак по чергово натискав на зовнішній кінець важеля, і бойок підіймався. А коли кулак сходив з важеля, бойок падав і деформував заготовку, покладену на ковадло.

Справжній переворот у обробленні металів тиском зробив Дж.Несміт у 1839 р., розробивши конструкцію парового молота аркового типу (рис. 10.3). Завдяки простій конструкції та ефективності молоти, які принципово не відрізняються від молота Несміта, і сьогодні використовуються для кування і штампування.

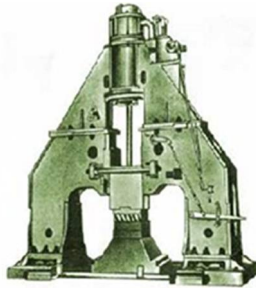


Рисунок 10.3 – Ковальський пароповітряний молот

10.1 Сучасне обладнання для кування

Кування – це спосіб оброблення металів тиском шляхом багаторазових ударів по нагрітій заготовці універсальним інструментом – *плоским бойком*. Внаслідок цього метал плине необмежено вбік і, деформуючись, поступово набуває задані форму і розміри. Розрізняють кування ручне і машинні. Машинне може здійснюватися як безпосередньо бойками, так і із застосуванням підкладних штампів.

Куванням виготовляють поковки масою від 0,1 кг до 300 т. Перевагою кування є можливість виготовлення достатньо складних за формою і великих за масою поковок за допомогою невеликого набору простих ковальських інструментів. У низці випадків кування є єдиною можливим способом виготовлення крупних заготовок, наприклад, гребних валів для морських суден, роторів потужних турбін тощо.

Головним недоліком кування є: низька продуктивність, невисока точність поковок, складність його автоматизації та

механізації. Куванням виготовляють всі крупні поковки і частину середніх і дрібних (у дрібносерійному та одиничному виробництвах). При збільшенні серійності переходять до кування у підкладних штампах або до штампування.

10.1.1 Ковальські молоти

Для кування використовують ковальські молоти і гідравлічні преси.

Праця молотів полягає у тому, що метал деформується під динамічною дією ударів верхнього бойка. Молоти бувають пароповітряні, пневматичні, механічні, газові та ін.

У *пароповітряному молоті* (рис. 10.3) підйом та опускання баби з верхнім бойком здійснюється при подачі у робочий циліндр стисненого повітря або пари під тиском 0,7...0,9 МПа із заводської магістралі. Пароповітряні молоти виготовляються з масою частин, що падають, від 1 до 8 т; при цьому можна виготовляти поковки масою від 20 до 350 кг. Зараз пара практично не використовується, ковальсько-штампувальні цехи при наявності пароповітряних молотів мають центральну компресорну станцію.

У майстернях, невеликих підприємствах використовують *пневматичні молоти* (рис. 10.4).



Рисунок 10.4 – Пневматичний молот

Пневматичний молот має два циліндри: компресорний і робочий. Компресорний циліндр має привід від електродвигуна і служить для створення стисненого повітря. Стиснене повітря за допомогою клапанів (золотників) по чергово подається у порожнини над або під поршнем робочого циліндра. Завдяки цьому верхній боек здійснює зворотньо-поступальний рух і деформує заготовку. Частоту і енергію ударів можна регулювати. Молот може працювати як у

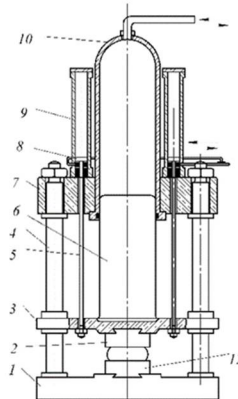
ручному, так і в автоматичному режимах. Пневматичні молоти мають масу частин, що падають, від 50 до 1000 кг. На них можна отримувати поковки масою до 20 кг.

Одна з важливих переваг пневматичних молотів – можливість працювати від заводської електромережі.

9.1.2 Ковальські гідравлічні преси

Преси відрізняються від молотів тим, що тривалість деформування при куванні пресами може становити десятки секунд, а швидкість деформування – 0,3...0,5 м/с.

У гідравлічному пресі (рис. 10.5) плунжер робочого циліндра переміщує рухому траверсу із закріпленим на ній верхнім бойком.



1 – нижня плита; 2 – верхній боек; 3 – рухома траверса; 4 – напрямні колонки; 5 – тяга; 6 – плунжер; 7 – верхня плита; 8 – поршень; 9 – циліндри підйому; 10 – робочий циліндр; 11 – трубопровід; 12 – нижній боек.

Рисунок 10.5 - Схема ковальського гідравлічного преса

Зусилля деформування створюється тиском рідини (мінеральні масла, водні емульсії), яка подається у робочий циліндр під тиском 20...30 МПа. Нижній боек кріпиться на нижній плиті.

Гідравлічні преси виготовляються з максимальним зусиллям 5...150 МН і їх використовують для кування щонайважчих поковок.

10.2 Сучасне обладнання для штампування

Штампування - це процес виготовлення виробів шляхом пластичного деформування спеціального інструмента – *штампа*. Вихідна заготовка поміщається у нижню половину штампа і

деформується верхню половиною. Якщо при цьому відбувається значний перерозподіл металу по довжині поковки (тобто товщина її на різних ділянках стає різною), таке штампування називається *об'ємним*, якщо ні – *листовим*.

За температурою деформування розрізняють гаряче і холодне штампування. При гарячому деформуванні зменшується зусилля деформування, але виникають витрати на нагрівання, при якому на поверхні поковки утворюється окалина. При холодному штампуванні забезпечується висока якість поверхні і точність розмірів, але вимагається потужніше обладнання і швидше зношуються штампи.

У порівнянні з куванням об'ємне штампування має переваги: значно вища продуктивність, виключення великих напусків для складних за формою поковок, припуски на наступне механічне оброблення менші у 3...5 разів. Проте процес штампування має й недоліки: обмеження маси поковок (0,5...30 кг, рідше – до 300кг), більші зусилля деформування, великі кошти і час на виготовлення штампів. Це робить об'ємне штампування нерентабельним в одиничному і дрібносерійному виробництвах.

10.2.1 Штампувальні пароповітряні молоти

Штампувальні пароповітряні молоти за конструкцією подібні до ковальських (рис. 10.3), але на відміну від них мають жорсткішу станину, напрямні, по яким рухається верхня половина штамп, і масивніший шабот. Напрямні спираються не на фундамент, а на шабот. Все це повинно забезпечити точніше співпадіння половин штампа в момент удару, а також підвищення коефіцієнта корисної дії удару. Маса частин, що падають, у штампувальних пароповітряних молотів становить від 630 кг до 25 т.

10.2.2 Кривошипні гарячештампувальні преси (КГШП)

Робота кривошипних гарячештампувальних пресів ґрунтується на тому, що від електродвигуна обертається маховик, пов'язаний з коленвалом (рис.10.6). Від коленвала через шатунний механізм рух передається верхній половинці штампа. Співпадіння верхньої і нижньої половинок штампа забезпечується напрямними колонками. Під час процесу, що установився, маховик обертається безперервно, а отже й верхня половинка штампа також безперервно здійснює зворотньо-поступальні рухи. Це дозволяє підвищити продуктивність, але одночасно вимагає точного розрахунку об'єму вихідної заготовки, щоб вона відповідала об'єму ривчаків штампа.

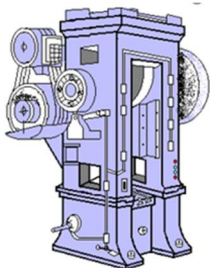


Рисунок 10.6 – Кривошипний гарячештампувальний прес

КГШП розвиває зусилля від 6,3 до 100МН і здійснює від 35 до 90 ходів за хвилину. Наявність виштовхувачів дозволяє зменшити штампувальні нахили, а точне співпадіння частин штампа забезпечує високу точність поковок.

10.2.3 Горизонтально-кувальні машини

Горизонтально-кувальні машини – кривошипні преси, повзун яких рухається у горизонтальному напрямку. На відміну від молотів і пресів штамп ГKM має дві площини розніму: горизонтальну між двома половинками матриці і вертикальну між пуансоном і матрицею.

Поковки, що виготовляються на ГKM, звичайно мають форму тіл обертання з прямою віссю, спрямованою по осі вихідної заготовки, якою може бути пруток або труба. ГKM часто застосовують для виготовлення заготовок, що не вимагають деформування по всій довжині або для виконання кінцевої операції типу висаджування фланця чи потовщення з обох кінців заготовки.

Максимальне зусилля штампування на ГKM – 5...125 МН, найбільший діаметр оброблюваних вихідних заготовок – до 270 мм, робочий хід повзуна – 200...700 мм, кількість робочих ходів – 20...95 за хвилину. Продуктивність близька до продуктивності КГШП, а за точністю поковки, виготовлені на ГKM, ближче до поковок, виготовлених на молотах.

Недоліками штампування на ГKM є: обмежені форма і маса (до 150 кг) штампованих поковок, необхідність використання як вихідного матеріалу точного, а іноді каліброваного прокату, підвищені витрати металу за рахунок хвостовиків (для закріплення прокату у матриці).

10.3 Перспективи розвитку ковальсько-штампувального виробництва.

Ковальсько-штампувальне виробництво є однією з основних заготівельних баз машинобудування. Сучасне машинобудування сьогодні відчуває потребу у ковальсько-штампувальному виробництві, яке ґрунтується на прогресивних високопродуктивних обладнанні та технологіях.

Кожний зі згаданих вище видів оброблення металів тиском знаходить свої технічно та економічно виправдані галузі застосування; удосконалення та технічний розвиток кожного з методів також має, з одного боку, свої особливості та можливості, але й спільні закономірності, з іншого.

У зв'язку з тим, що *кування* застосовується в одиничному та дрібносерійному виробництві, економічно виправдано використання додаткових засобів механізації певних операцій у робочій зоні коваля. З цією метою застосовуються маніпулятори, роботи та промислові роботи.

Маніпулятор – пристрій для захоплення й переміщення заготовок у просторі. За типом приводу поділяються на механічні, електричні та гідравлічні. Вони становлять шарнірно з'єднані балки, які можуть обертатися навколо осі або центра маніпулятора. Характеристикою маніпулятора є його вантажопідйомність та кількість ступенів рухомості. Ковальським маніпулятором керує людина.

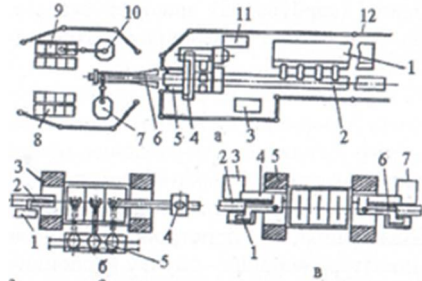
Робот – це машина з антропоморфною поведінкою. Розрізняють такі види роботів: з жорсткою програмою, такі, що керуються оператором, та зі штучним інтелектом. Їхня особливість полягає у тому, що вони мають датчики контролю зовнішнього середовища та можуть діяти цілеспрямовано з урахуванням реальних обставин без участі людини.

Промислові роботи (ПР), які застосовуються у ковальсько-пресовому виробництві, фактично є роботи-маніпулятори з переналаджуваною програмою дій. Основними характеристиками промислових роботів є також вантажопідйомність, кількість ступенів свободи маніпулятора і точність позиціонування при виконанні робіт. Вони звільняють людину від нудної й одноманітної роботи, підвищують продуктивність і якість продукції.

При штампуванні достатньо добре механізовані такі операції, як подавання заготовок зі складу, завантажування і розвантажування нагрівальних пристроїв, подавання заготовок до молотів або пресів. Для цього широко використовуються конвеєри, рольганги, поворотні столи, монорейки та інше. Складнішою є проблема комплексної механізації всього процесу штампування. Вона вирішується застосуванням роботизованих технологічних комплексів.

Роботизованим технологічним комплексом (РТК) називається сукупність одиниць технологічного обладнання (наприклад, преси, молоти, роботи), яка функціонує автоматично і багаторазово здійснює певні цикли роботи. У склад РТК можуть входити швидкохідні преси або молоти та ПР, оснащені системою числового програмного керування (ЧПК). Система ЧПК керує рухами маніпулятора ПР, рухами бойка преса (молота). Звичайно ЧПК дозволяє чергування автоматичного режиму з ручним, оскільки повна автоматизація технологічного процесу викликає значні труднощі.

На рис. 10.7 наведена схема типового РТК у штампувальному виробництві.

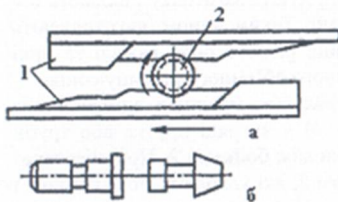


- а: 1 – стелаж; 2 – рольганг; 3 – пульт; 4 – ножиці; 5 – бункер; 6 – транспортер;
7, 10 – промислові роботи; 8, 9 – тара; 11 – шафа; 12 – огорожа
б: 1 – завантажувач; 2 – транспортер; 3 – прес; 4 – автооператор;
5 – промисловий робот
в: 1, 6 – промислові роботи; 2, 7 – транспортери; 3 – тара; 4 – штовхач;
5 – прес

Рисунок 10.7 – типові РТК у штампувальному виробництві на базі сортових ножиць (а); КГШП (б, в)

При виготовленні деяких виробів, типових звичайно для штампування, використовується прокатування.

Так, *поперечно-клинове прокатування* (рис. 10.8) служить для виготовлення заготовок валів, осей діаметром до 100 мм і довжиною до 700 мм.



а – прокатування; б – типові вироби
Рисунок 10.8 – Схема поперечно-клинового прокатування

Заготовку (найчастіше пруток) після нагрівання розташовують у робочій зоні між клинами у їхньому вихідному положенні. Один з інструментів залишається нерухомим, а інший здійснює поступальний рух, заготовка прокочується між двома клинами, деформується зразу по всій довжині одночасно і набуває задану форму. Повне прокатування заготовки здійснюється за 1,25 оберти заготовки і триває секунди.

У деяких випадках індивідуальну заготовку авіаційних лопаток для подальшого точного штампування отримують з переходом на групову за допомогою періодичного прокатування.

Суть *періодичного прокатування* полягає у тому, що пруток певного діаметра і довжини нагрівають у печі до необхідної температури, і подають у проводку кувальних валків стану. Кувальні валки на робочій поверхні мають профільний рівчак, який при прокатуванні заготовки утворює необхідну геометрію. За один оберт валків профілюється 4...5 і більше заготовок, зв'язаних перемичками (рис. 10.9).



Рисунок 10.9 – Стрічка періодичного прокату заготовок лопаток компресора

Важливе удосконалення ковальсько-штампувального виробництва полягає у заміні кування штампуванням, а гарячого штампування - холодним. Ці процеси, з одного боку, сприятимуть підвищенню продуктивності, а з іншого – вимагатимуть потужнішого обладнання, досконаліших інструментів (штампів). Тому заміна одного процесу іншим має відбуватися з урахуванням техніко-економічної доцільності цієї зміни.

Важливим напрямком удосконалення штампування можна вважати максимальне наближення поковки за розмірами і якістю поверхні до готової деталі, щоб уникнути подальшого механічного оброблення. Тут може стати на пригоді холодне оброблення тиском.

В останні роки розроблені так звані «методи точного гарячого штампування», які за рахунок модернізації КГШП, застосування спеціальних штампів та зміни технології штампування дозволяють знизити витрати металу у 1,5...2 рази, а також отримувати складні деталі, наприклад, поковки компресорних лопаток.

11 ВИРОБНИЦТВО ЗВАРНИХ І КОМБІНОВАНИХ ЗАГОТОВОК

Винахідник *електричного дугового* зварювання (1882 р.) Микола Миколайович Бенардос народився у 1842 р. у селі Бенардосівка Херсонської губернії (нині Миколаївська область) і умер у 1905 р. у м. Фастові. Не маючи базової технічної освіти, він завдяки своїм розуму, таланту і енергії створив один з найважливіших сучасних технологічних процесів. Лише у 1889 році вчена рада Петербурзького електротехнічного інституту присвоїла Бенардосу почесне звання інженера-електрика.

Своїми працями Бенардос накреслив головні напрями розвитку зварювання, розробив основні принципи багатьох сучасних способів зварювання. Зокрема, у 1886 р. Е.Томпсон і М.Бенардос практично одночасно розробили основи і обладнання контактного зварювання.

У 1929-1934 р.р. електротехнічна лабораторія АН України під керівництвом Євгена Оскаровича Патона розробила спосіб автоматичного дугового зварювання *під флюсом*, під час якого у зону зварювання окремо подаються безперервний електрод – дріт і захисна порошкоподібна речовина – флюс. Дуга горить під шаром флюсу.

Продовжуючи роботи у галузі зварювання, у 50-х роках ХХ століття, уже Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона АН України розробив новий *бездуговий* спосіб зварювання деталей великої товщини – електрошлакове зварювання.

11.1 Основні способи зварювання

Наявні зараз різноманітні способи зварювання відрізняються видом енергії, що використовується при зварюванні, розмірами зони зварювання, де власне й створюється міжатомний контакт частин, що з'єднуються, температурою у зоні зварювання, способом захисту металу від окиснення тощо.

На сьогодні нараховується до 60 способів зварювання. Найпоширеніші з них поділяться на способи зварювання

- | | | |
|--------------------|---|------------------|
| плавленням: | і | тиском: |
| - електродугове | | - контактне; |
| - газове; | | - холодне; |
| - електрошлакове; | | - ультразвукове; |
| - плазмово-дугове; | | - тертям; |

- електронно-променеве; - дифузійне;
- лазерне.

Кожен з цих способів може мати декілька різновидів залежно від вимог до зварного з'єднання і умов зварювання. Їх удосконалення йде головним чином за рахунок використання нових матеріалів, досконаліших пристроїв та технологій.

11.2 Зварні і комбіновані заготовки

Зварні заготовки – це заготовки, які складаються з окремих частин, виконаних різними способами (литтям, обробленням тиском, холодним штампуванням та ін.) як правило з однакових матеріалів і з'єднані зварюванням. Зварні заготовки доцільно використовувати, якщо виготовлення їх суцільними пов'язане з великими виробничими труднощами (відсутність обладнання, ускладнення механічного оброблення, великий відсоток браку та ін.).

Багато зварних заготовок виготовляють з листового прокату, фасонних і гнутих профілів, що забезпечує можливість одержання легких деталей підвищеної жорсткості і стійкості. До таких заготовок належать рами, станини, барабани, корпуси редукторів, зубчасті колеса штанги, тяги підшипникові опори різних систем тощо. Всі вони виготовляються головним чином з листового прокату з підсиленням корпусів привареними ребрами жорсткості. Залежно від товщини листового матеріалу найчастіше використовують газове, контактне і дугове зварювання.

Іноді зварювання використовується для підвищення технологічності конструктивного рішення виробу. Наприклад, якщо піввісь трактора (рис. 11.1) поділити на дві частини, то внутрішні шліці можна легко обробити протягуванням, а потім уже зварити з валом.



Рисунок 11.1 Зварна піввісь трактора

Економічна доцільність використання зварних заготовок та конструкцій зростає зі збільшенням їхньої маси та габаритних розмірів.

Комбінованими заготовками називаються заготовки, які складаються з елементів, одержуваних різними технологічними методами (литтям, куванням, штампуванням та ін.), з'єднаних зварюванням.

У сучасному машинобудуванні при виготовленні крупних заготовок нерідко йдуть на заміну литих заготовок комбінованими, які одержують поєднанням кування і лиття зі зварюванням одночасно. Це дозволяє підійти диференційовано до різних частин деталі, зокрема, використовувати в одній конструкції різноманітні матеріали, які найбільше відповідають умовам роботи різних елементів, зменшити масу і металомісткість конструкцій. Комбіновані заготовки мають високу технологічність. Їх впровадження знижує строки освоєння виробництва, скорочує витрати на ливарне і штампувальне оснащення.

Зварно-литі заготовки використовують при виробництві станин пресів, прокатних станів, верстатів, корпусів редукторів, картерів тепловозних двигунів, товстостінних посудин, різних деталей вагонів тощо. Розділення крупногабаритних суцільнолитих заготовок на окремі елементи дозволяє використати точніші способи лиття (кокільне, під тиском), застосування яких різко знижує обсяг механічного оброблення.

Штампо-зварні заготовки (рами, кожухи, ободи, шківні, ємності та ін.) виготовляють з листового матеріалу. Вони дозволяють замінити литі або штамповані заготовки, які потребують у подальшому досить дорогого механічного оброблення. Конструкція штампо-зварної заготовки повинна одночасно відповідати умовам технологічності і листового штампування, і зварювання. Штампо-зварні заготовки зварюють в основному контактними способами зварювання.

Зварно-ковано-литі заготовки виготовляють зварюванням литих елементів з поковками або заготовками з прокату. Такі конструкції часто застосовують у важкому і енергетичному машинобудуванні: ротори турбін, масивні вали, великі зубчасті колеса, рами тощо. Порівняно з литими (або кованими) зварно-ковано-литі заготовки мають такі переваги: значне зниження маси заготовки, спрощення ливарної і ковальської технології виготовлення відповідальних

елементів, підвищення якості і точності виготовлення окремих елементів, скорочення виробничого циклу.

З'єднання елементів зварно-ковано-литих заготовок провадиться в основному електрошлаковим або контактним стиковим зварюванням і рідше – дуговими способами зварювання.

Переваги комбінованих зварних конструкцій, в яких використовуються одночасно вихідні заготовки, одержані різними способами (вилівки, поковки, листовий і сортовий прокат), насамперед проявляються при виготовленні тонкостінних видовжених деталей.

Ефективним напрямком є використання в різних частинах комбінованих конструкцій різнорідних матеріалів, які найповніше відповідають вимогам експлуатації. Прикладом може бути ротор газової турбіни. По ободу диск ротора піддається дії високих температур і порівняно невеликих навантажень, а центральна частина працює в умовах невисоких температур при великих навантаженнях. Підібрати матеріал, який однаково добре працює в таких різних умовах, дуже важко. Тому доцільно виготовити зварний ротор: центральну частину з високоміцної сталі перлітного класу, а обід – з жароміцної аустенітної сталі (рис. 11.2).

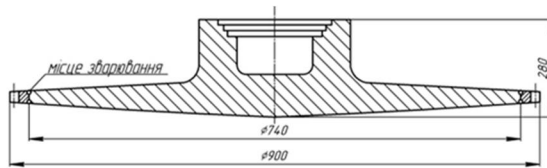
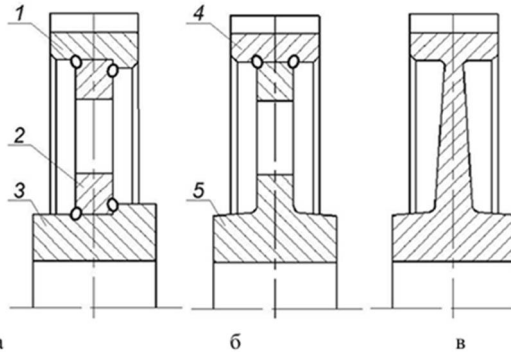


Рисунок 11.2 Зварний ротор газової турбіни

Вибір виду зварної чи комбінованої конструкції заготовки здійснюється з урахуванням експлуатаційних вимог, які ставляться до готової деталі. При наявності декількох можливих варіантів питання вирішується на основі техніко-економічних розрахунків. Техніко-економічне порівняння варіантів виготовлення суцільних литих або штампованих заготовок, з одного боку, і зварно-литих або зварно-штампованих, з іншого, проводиться за зменшенням (або збільшенням) маси заготовки; витратами на виготовлення модельного оснащення, штампів та інших пристроїв; часом циклу підготовки і освоєння виробництва; собівартістю виготовлення заготовки.

При оцінюванні різних варіантів у кожному конкретному випадку слід враховувати особливості даної конструкції, технологічні властивості матеріалу, тип виробництва, потрібну точність виготовлення та інші фактори. Як приклад розглянемо три варіанти виготовлення заготовки шестерні великого розміру (рис 11.3).



а – зварно-кований: 1 – обід кований; 2 – ребро з листового прокату;
3 – маточина з товстостінної труби;
б – зварно-литий: 4 – обід катаний; 5 – маточина лита;
в – литий

Рисунок 11.3. Конструктивні варіанти заготовки шестерні

Порівняння наведених на рис. 11.3 варіантів проводиться головним чином за витратами на виготовлення технологічного оснащення, за часом підготовки та освоєння виробництва. Одночасно слід враховувати особливості даної конструкції, технологічні властивості матеріалу, тип виробництва, потрібну точність виготовлення тощо.

Якщо перевага комбінованої (зварної) заготовки перед суцільною (ливою, кованою, штампованою) не очевидна, тобто якщо собівартість суцільної заготовки менше собівартості комбінованої, при техніко економічному порівнянні можливих варіантів доцільно визначити критичний розмір партії N , що визначає ту максимальну кількість заготовок, для якої зварний варіант буде вигіднішим. При більшому розмірі партії слід переходити до суцільної заготовки.

$$N = B_0 / (C_k - C_c),$$

де V_0 – вартість оснащення, необхідного для виготовлення суцільної заготовки (модельного комплекту, штампів та ін. пристроїв); C_k – собівартість однієї комбінованої заготовки; C_c – собівартість однієї суцільної заготовки.

Переваги комбінованих зварних конструкцій, перед усім проявляються при виготовленні тонкостінних видовжених деталей, коли з'являється можливість широкого використання прокату, поковок, виливків, які з'єднуються в єдиний конструктивний блок за допомогою зварювання.

Найраціональніший технологічний процес виробництва зварної заготовки треба обирати на основі аналізу декількох можливих варіантів її виготовлення, при оцінюванні яких необхідно звертати увагу як на технічний, так і на економічний бік технології, інакше обраний технологічний процес може виявитися неоптимальним.

11.3 Основні напрямки удосконалення зварювального виробництва

Сучасні технології та інноваційні розробки значно змінюють обличчя галузі зварювання. Одним з таких напрямків є використання автоматизованого зварювального обладнання.

Автоматизоване зварювальне обладнання, яке базується на програмних засобах керування, дозволяє значно підвищити продуктивність та якість зварювання. Точність та стабільність процесу зварювання забезпечується шляхом використання спеціальних програм та датчиків. Таке обладнання дозволяє досягти високої якості зварних з'єднань та зменшити відсоток браку.

Незважаючи на те, що даний вид зварювання застосовується, головним чином, у масовому виробництві, де суттєвими факторами є ефективність та якість, можна створити програми, які підходять для інших типів виробництва.

Використання *роботів* робить зварювальне обладнання гнучкішим та потужнішим. Роботизоване зварювання — найбільш високотехнологічний варіант автоматизованого процесу, при якому зварювання здійснюють машини, але ця робота все ж таки відбувається під наглядом і управлінням зварювальників. Технологія із застосуванням роботів дозволяє отримувати швидкі та точні результати, а також сприяє скороченню відходів та підвищенню безпеки. Роботи можуть дістатися таких місць, куди неможливо

проникнути ніякими іншими способами, і в цих точках вони виконують складні зварні шви швидше, ніж при ручному зварюванні, забезпечуючи точність ліній сплавлення. Це дозволяє звільнити час для виробництва продукції та забезпечує більшу гнучкість.

Роботи можуть також виконувати рутинні операції зі зварювання, значно зменшуючи час виконання тих чи інших робіт та ризик виникнення помилок.

При масовому виробництві використовуються *бездротові технології* для зв'язку між різними видами зварювального обладнання, що забезпечують зручність та мобільність у процесі зварювання. Вони дозволяють підключати різне обладнання безпосередньо до зварювальної системи, забезпечуючи швидкий обмін даними та керування процесом зварювання з високою точністю. Це також дозволяє здійснювати бездротовий моніторинг та віддалене керування зварювальним обладнанням. Деякі заводи впроваджують автоматизовані лінії зварювання, які на базі бездротових технологій дозволяють значно збільшити обсяги виробництва та підвищити якість готової продукції.

Розробляються спеціальні технології та зварювальне обладнання, при використанні яких усіма процесами зможе керувати автоматичний диспетчерський центр або робот.

Очікується, що нові технології приведуть до подальшого зростання продуктивності та якості зварювальних робіт. Використання штучного інтелекту, інтегральні системи керування, автоматизоване регулювання параметрів зварювання, впровадження наноматеріалів стануть новими засобами для досягнення максимальної ефективності зварювання.

12 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА І ПРОБЛЕМИ ОБРОБЛЕННЯ РІЗАННЯМ

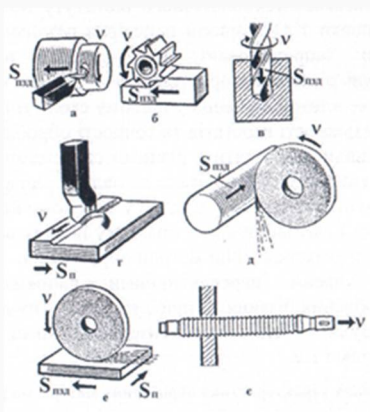
За ДСТУ 2391-94: *оброблення різанням* — вид механічного оброблення, яке полягає в утворенні нових поверхонь шляхом відділення поверхневих шарів матеріалу з утворенням *стружки*.

12.1 Основні способи оброблення різанням

Оброблення різанням при виготовленні деталей машин, як правило, є завершальною операцією перед складанням. Воно може забезпечити будь-яку необхідну точність розмірів і шорсткість поверхні. У той же час цей вид оброблення є складним і дорогим процесом, на нього припадає понад 90% трудомісткості виготовлення більшості деталей. До того ж оброблення різанням супроводжується значними втратами металу: при масовому виробництві втрачається 5...15% металу, а при дрібносерійному і одиничному - до 25%.

За способом зняття стружки оброблення різанням поділяється на *лезове* (різцями, фрезами, свердлами та ін.) і *абразивне* (абразивними кругами, брусками, стрічками і т.п.).

За характером і послідовністю операцій зі зняття стружки оброблення різанням поділяється на вісім основних груп (рис. 12.1).



а – точіння; б – фрезерування; в – свердління; г – стругання; д – кругле шліфування; е – плоске шліфування; є – протягування

Рисунок 12.1 – Схеми оброблення заготовок різанням

Якщо необхідно забезпечити вищу точність і меншу шорсткість поверхні відповідальних деталей, використовуються *оздоблювальні* (чистові) методи оброблення. Вони відзначаються малими силами різання, невеликими глибинами різання і незначним тепловиділенням. До них відносять полірування, притирання, хонінгування та суперфінішування.

Полірування – це оброблення абразивними порошками, нанесеними на м'яку основу (сукно, фетр, повсть). Застосовується для зменшення висоти мікронерівностей, отриманих при шліфуванні. Розмірна точність не підвищується.

Притирання здійснюється абразивними порошками, нанесеними на твердий притир заданої форми з чавуну, бронзи, міді або деревини. Абразив наносять у вигляді відповідної пасти. Притирання застосовується для усунення хвилястості, неплоскостності та інших похибок, що виникають на деталях під час оброблення.

Хонінгування становить процес оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь дрібнозернистими абразивними брусками, встановленими у спеціальну циліндричну головку – *хон*.

Суперфінішування – процес чистового оброблення за допомогою дрібнозернистих абразивних брусків, закріплених у головці. Між абразивними брусками і заготовкою вводиться мастило. Процес використовується для отримання особливо гладкої зовнішньої поверхні внаслідок зрізання мікровиступів.

Існує також велика група електрофізичних і електрохімічних методів оброблення, про які мова буде йти нижче.

12.2 Режим різання при обробленні заготовок

Для відокремлення стружки інструмент і заготовка повинні виконувати робочі рухи, які поділяються на головний рух і рух подачі. *Головним рухом* називається рух заготовки або інструмента, який здійснюється з найбільшою швидкістю серед робочих рухів. Він забезпечує безпосереднє знімання стружки і визначає швидкість оброблення. *Рух подачі* має меншу швидкість і забезпечує безперервність процесу різання по всій оброблюваній поверхні.

Кількісними характеристиками робочих рухів, які визначають як якість обробленої поверхні, так і продуктивність оброблення, є швидкості різання і подачі та глибина різання.

Швидкість різання V , м/хв. (м/с) – це лінійна швидкість переміщення інструмента відносно точки на поверхні заготовки, найвіддаленішої від осі заготовки (інструмента). При точінні, фрезеруванні, свердлінні та шліфуванні швидкість різання

$$V = \pi \cdot D \cdot n / 1000,$$

де D – діаметр заготовки (фрези, свердла, круга), мм, n - частота обертання заготовки або інструмента, об/хв.

Від швидкості різання, з одного боку, залежить продуктивність оброблення, а з другого – нагрівання леза різального інструмента. Чим більше теплостійкість різального інструмента, тим з більшою швидкістю можна вести оброблення, а отже й більше його продуктивність.

Швидкість подачі S , мм/об. (мм/хв.) визначає відстань, пройдену точкою різальної кромки інструмента або заготовки уздовж руху подачі за певний цикл руху (наприклад, за один оберт або за одиницю часу). Швидкість подачі визначає час оброблення даної поверхні, але обмежується міцністю механізму подачі, заданою якістю поверхні та іншими чинниками.

Глибина різання t , мм, - це відстань між оброблюваною та обробленою поверхнями, виміряна перпендикулярно до останньої. Вона визначає товщину шару металу, який знімається одночасно з поверхні заготовки. Чим більше глибина різання, тим менше проходів потрібно для остаточного оброблення заготовки. Але вона обмежується міцністю інструмента і потужністю обладнання, що використовується.

12.3 Сучасні інструментальні матеріали

Різальні інструменти працюють в умовах значних силових навантажень, високих температур і тертя. Потрібно, щоб матеріал робочої частини інструменту мав високу твердість, значно більшу, ніж твердість матеріалу оброблюваної заготовки, високу теплостійкість, тобто зберігав високу твердість за значних температур нагрівання і

високу зносостійкість. Чим вище зносостійкість, тим повільніше спрацьовується інструмент і тим довше можна його використовувати.

На сьогодні найчастіше використовуються наступні інструментальні матеріали.

Вуглецеві інструментальні сталі вміщують 0,9...1,3% вуглецю. Для виготовлення інструментів застосовують якісні сталі У10А, У11А, У12А. Після термічного оброблення вони мають твердість HRC 60...62, теплостійкість 200...250 °С. Допустимі швидкості різання інструментом з таких сталей не перевищує 15...18 м/хв. Вони мають обмежене застосування. З них виготовляють мітчики, плашки, ножівкові полотна.

Швидкорізальні сталі типу Р9, Р12, Р18, Р6М3, Р18,Ф2, Р9К5, Р9К10 та ін. містять від 9 до 19% вольфраму та інші легувальні елементи. Різальний інструмент з такої сталі після термічного оброблення має твердість HRC 62...65, теплостійкість 600...630 °С, підвищену зносостійкість і може працювати зі швидкостями різання до 80 м/хв. Зі швидкорізальних сталей виготовляють різці, фрези, зенкери, протяжки, розвертки, довб'яки, шевери тощо.

Тверді сплави ВК2, ВК3М, ВК10, Т15К12В, Т5К12В, ТТ7К12, ТТ29К9 та ін. застосовують у вигляді пластинок певної форми й розмірів, виготовлених методом порошкової металургії. Пластинки твердого сплаву мають твердість HRA 86...90, високу зносостійкість і теплостійкість 800...1000 °С, що дозволяє вести оброблення зі швидкостями різання до 800 м/хв.

Мінералокераміка – синтетичний матеріал на основі глинозему (Al_2O_3), з якого методом порошкової металургії пресують і спікають за температури 1720...1750 °С пластинки, що прикріплюють до державок різців чи корпусів інструментів. Вони мають твердість HRA 91...93, теплостійкість до 1200 °С і зносостійкість, що дозволяє працювати зі швидкостями різання до 1000 м/хв.

Абразивними називаються матеріали, які використовуються для виготовлення абразивного інструменту – шліфувальних кругів, брусків тощо. У промисловості застосовують переважно штучні абразивні матеріали: електрокорунд (Al_2O_3), карборунд (SiC), синтетичні алмази, ельбор (кубічний нітрид бору). Вони використовуються, переважно, для оброблення загартованої і

термічно необробленої сталі, ковкого чавуну, бронзи та інших матеріалів високої твердості або для особливо тонкого чистового оброблення.

12.4 Вибір способу оброблення заготовок різанням

Вибір способу оброблення заготовок залежить головним чином від продуктивності та собівартості процесу.

Продуктивність оброблення визначається кількістю виробів Q , шт., виготовлених за певний період часу T , хв. (місяць, зміну, годину):

$$Q = T/t_{шт.},$$

де $t_{шт.}$ - норма штучного часу, хв.

Норма штучного часу – це час виконання технологічної операції. Вона складається з основного (машинного) часу безпосереднього оброблення заготовки і допоміжного часу, який витрачається на виконання допоміжних дій, таких, як необхідна зміна інструменту, поточні вимірювання розмірів, корегування режиму різання тощо. Чим менше норма штучного часу, тим вище продуктивність.

Технологічна собівартість C_t охоплює всі види витрат, пов'язані безпосередньо з процесом виготовлення деталі, починаючи від зарплати основних робітників і до витрат на допоміжні матеріали.

Зі збільшенням складності верстатів, ступеня автоматизації оброблення, вартості інструмента частка цих витрат у технологічній собівартості суттєво зростає, особливо при збільшенні розмірів оброблюваної партії.

Слід відзначити, що швидкість різання неоднозначно впливає на продуктивність і собівартість оброблення. Зі збільшенням швидкості різання норма штучного часу і собівартість оброблення спочатку знижуються, а потім зростають (рис. 12.2) у зв'язку зі збільшенням зносу інструмента та витрат часу на його заміну.

При чому швидкість різання, оптимальна за собівартістю V_c^o , завжди менше оптимальної швидкості за продуктивністю V_T^o . Чим дешевше інструмент і менше частка витрат на нього у загальній

вартості оброблення, тим вище оптимальна швидкість різання за собівартістю і тим ближче вона до оптимальної швидкості різання за продуктивністю.

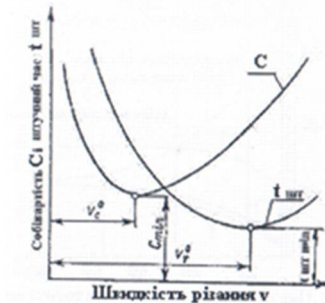


Рисунок 12.2 – Залежність собівартості оброблення різанням C та норми штучного часу $t_{шт}$, від швидкості різання V

Правильний вибір технології та режимів різання залежить перш за все від вимог до оброблюваної поверхні. А з цим пов'язаний вибір обладнання та інструментів. Використання високопродуктивних верстатів та високоякісних інструментів окупаються при достатньо великому розмірі виробничої партії. Отже, в міру збільшення виробничої партії з'являється можливість використання все коштовнішого і складнішого обладнання.

12.5 Механізація оброблення на універсальних верстатах

Ступінь механізації та автоматизації виробництва залежить від типу виробництва (одиничне, серійне, масове).

При одиничному і дрібносерійному виробництвах використовується універсальне обладнання, яке дозволяє виконувати різноманітні роботи. Продуктивність таких верстатів низька, і першим кроком автоматизації при обробленні на них заготовок є автоматизація самого циклу оброблення. Для цього використовуються деякі порівняно прості пристрої.

Пневматичний патрон суттєва скорочує час на закріплення заготовок та зняття готової деталі. Застосовується на токарних верстатах при використанні як заготовок прутків або труб.

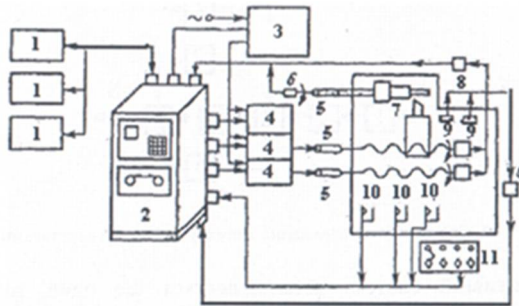
Копіри різних систем дозволяють без проміжних вимірювань отримувати поверхні складної конфігурації. Застосовуються на токарних і фрезерних верстатах при достатньо великих розмірах виробничої партії або у випадках, коли виготовлення деталі іншим способом практично неможливо.

Упори застосовуються на токарно-револьверних, фрезерних і шліфувальних верстатах. Вони скорочують час для вимірювання поточних розмірів і контролювання рухів подачі.

У крупносерійному і масовому виробництвах раціональним є використання *верстатів-автоматів*, здатних виконувати самостійно всі поточні операції технологічні операції від початку і до кінця оброблення. Роль людини при таких верстатах зводиться до вчасного прибирання стружки.

Важливими представниками цієї групи верстатів є *верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК)*.

Верстат з ЧПК складається з трьох блоків: керуюча програма, пристрій ЧПК і управління автоматикою та власне верстата (рис. 12.3).



1 – пристрій вводу/виводу даних; 2 – процесор; 3, 11 – допоміжні блоки; 4 – двигун подачі; 5 – механізм подачі; 6 – вимірювальний перетворювач; 7 – заготовка; 8 – блок вимірювальних каналів; 9 – датчики контролю; 10 – сигнальні датчики

Рисунок 12.3 – Структура верстата з ЧПК

Керуюча програма містить програму-алгоритм виконання всіх операцій з геометричного і технологічного формування виробу. Програма записується у процесор верстата і може легко змінюватися при переході до оброблення іншої деталі.

Пристрій ЧПК перетворює задану програму в оперативні команди, які реалізують оброблення заготовки у масштабі машинного часу верстата.

Верстат є головним споживачем керуючої інформації, за якою змонтовані механізми керування виконують ті чи інші рухи. Команди впливають у першу чергу на механізми координатних подач, напрямки яких залежать як від конструкції верстата, так і від поставленої задачі на оброблення.

Точність оброблення на верстатах з ЧПК залежить від характеру системи керування, яка може бути прямою, із зворотнім зв'язком і адаптивною.

При прямій системі керування сигнал зчитується з програмоносія, перетворюється і поступає на кроковий двигун, який надає певному робочому органу верстата рух.

При системі із зворотнім зв'язком верстат має додатковий пристрій, який контролює фактичну величину переміщення, порівнює її із заданою і проводить необхідне підналагоджування.

При адаптивній системі спеціальний пристрій автоматично враховує зміну режиму оброблення в ході виготовлення деталі. Реагуючи на можливі відхилення, верстат підналагоджується у самому процесі оброблення. Адаптивними є такі системи, що самі себе налагоджують, організовують і навчають.

12.6 Проблеми оброблення різанням

Проблеми, які виникають при обробленні заготовок різанням, багатогранні і часто взаємопов'язані. Як основні з них можна назвати наступні:

- точність розмірів і якість обробленої поверхні;
- якість і зношування інструменту;
- правильний вибір режиму різання;
- деформування деталі і вібрації під час оброблення.

Точність розмірів і якість обробленої поверхні може залежати від багатьох надзвичайно різноманітних чинників. Перш за все залежить від правильно вибраної послідовності виконання технологічних операцій. Кожний верстат і спосіб оброблення має свої можливості. Вибір технологічної схеми оброблення, а значить й верстатів та інструментів, залежить від типу виробництва. Верстат для кожного виду обладнання повинен відповідати сучасному рівню за конструкцією та якістю виготовлення. Звичайно, за економічної можливості треба обирати верстати того чи іншого рівня механізації та автоматизації. Очевидно, що використання штучного інтелекту при програмуванні верстатів з ЧПУ, автоматичних ліній може сприяти досягненню вищої точності і якості поверхні виробу при тих же економічних витратах.

Якість і зношування інструмента залежать від вибору його матеріалу, правильної геометрії різальної кромки та створення необхідних умов різання (наприклад, використання мастильно-охолоджувальних рідин або інших способів охолодження і змащування). Сьогодні для створення досконаліших інструментальних матеріалів йдуть двома шляхами. Перший – створення абразивного матеріалу високої твердості та теплостійкості. На сьогодні це ельбор (кубічний нітрид бору) та гексаніт-Р (вюцітоподібний нітрид бору). За твердістю вони близькі до алмаз, але мають вищу теплостійкість. Другий шлях – виготовлення лезового інструмента з інструментальної кераміки на базі нітридів бору (ЦМ 332, ВО 13, ВОК 60). Змінні різальні пластини з цих матеріалів дозволяють обробляти заготовки зі значно більшими швидкостями різання.

Правильний вибір режиму різання полягає у обґрунтованому виборі параметрів режиму різання та їх взаємному впливі. Завищена швидкість різання впливає на твердість матеріалу інструмента і одночасно може призвести до розм'ягчення оброблюваної поверхні, що не дозволить отримати низьку шорсткість поверхні.

Завищення швидкості подачі і глибини різання створює додаткові навантаження на механізми верстата і не сприяє отриманню якісного виробу.

Деформування деталі і вібрації під час оброблення виникає найчастіше при неточному або нежорсткому закріплення інструмента або заготовки. На токарних верстатах деформування деталі може виникнути при завищеному поперечному навантаженні (наприклад, за рахунок завищеної глибини різання). У різців це може бути пов'язано з їх неправильною (нежорсткою) конструкцією. Перед початком оброблення треба оцінити величину навантаження на різець і вжити заходи, щоб уникнути його деформуванню і вібрації.

13 ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ І ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ МЕТОДИ ОБРОБЛЕННЯ

Електрофізичні та електрохімічні методи розмірного оброблення ґрунтуються на процесах безпосередньої енергетичної дії на поверхні заготовок. Вони використовуються для оброблення матеріалів, які мають дуже високу твердість (тверді сплави, спечені магнітні матеріали, рубін, алмази та ін.); матеріалів, які піддаються значному зміцненню під час звичайного оброблення різанням (жароміцні, нержавіючі сталі, деякі спеціальні сплави); заготовок, які мають малу жорсткість (наприклад, труди діаметром 200...300 мм з товщиною 1...2 мм.

Іноді ці методи дозволяють виконувати такі види робіт, які неможливо або важко зробити традиційними методами (наприклад, виготовлення отворів з криволінійною віссю або некруглого перерізу або діаметром у декілька мікрометрів.

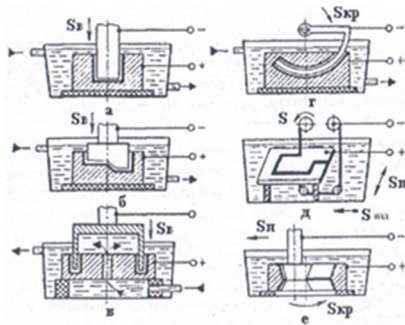
13.1 Електрофізичні методи оброблення

Електрофізичне оброблення ґрунтується на тому, що між інструментом-електродом і заготовкою виникає іскровий розряд або інша взаємодія, внаслідок чого її матеріал поступово руйнується. Поступово електрод рухається згідно із закладеною програмою, залишаючи після себе порожнину, яка повторює його контур або профіль, заданий програмою.

Електроіскровий метод полягає у тому, що електрод і заготовка зближуються один з одним у діелектричній рідині. Коли відстань між ними стане достатньою, відбувається імпульсний розряд тривалістю у мільйонні частки секунди з густиною струму 8...10 кА/мм². Метал

поверхні під електродом миттєво випаровується, викидаючи продукти плавлення назовні. Під електродом утворюється лунка глибиною 1...5 мкм. За допомогою системи стеження між електродом і лункою знову встановлюється відстань, достатня для нового імпульсу. Такий процес повторюється регулярно, і поступово електрод занурюється далі у порожнину, яка відтворює його контур.

На рис. 13.1 наведені деякі види робіт при електроіскровому обробленні.

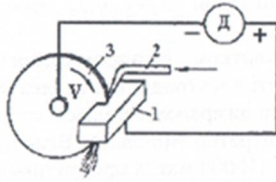


а – прошивання отвору; б – оброблення фасонної порожнини штампа;
 в – прошивання отвору по контуру; г – прошивання отвору з криволінійною віссю; д – вирізання заготовки з листа; е – шліфування внутрішньої поверхні
 Рисунок 13.1 – Схеми деяких видів електроіскрового оброблення

Електроди-інструменти виготовляються з м'яких мідних, алюмінієвих та міднографітових сплавів. Режим оброблення обирається таким, щоб руйнувалася головним чином заготовка, а не електрод.

Електроерозійне оброблення у деяких випадках має незаперечні переваги перед механічним обробленням. Тривалість оброблення на електроіскрових верстатах значно менша, а коефіцієнт корисної дії досягає 80...90% при 30...40% для механічних.

При *анодно-механічному обробленні* через рухомий електропровідний інструмент проходять імпульси електричного струму (рис. 13.2).



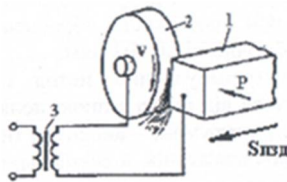
1 – заготовка; 2 – підведення електроліту; 3 – інструмент
Рисунок 13.2 – Схема анодно-механічного оброблення

У зону між електродом і заготовкою подається електроліт – водний розчин рідкого скла. Внаслідок електроіскрової ерозії і анодного розчинення метал заготовки видаляються із зони контакту.

Інструмент виготовляється з м'якої сталі у вигляді тонкого диска або нескінченної стрічки (дроту).

При м'яких режимах оброблення (густина струму до 15 кА/см^2) можна проводити анодно-механічне шліфування, отримуючи параметр шорсткості поверхні $R_a = 0,32 \dots 0,04 \text{ мкм}$. При жорстких режимах найчастіше здійснюють різання важкооброблюваних і надтвердих сплавів.

Електроконтактне оброблення ґрунтується на локальному нагріванні заготовки у місці контакту з електродом-інструментом та видаленні розм'якшеного або розплавленого металу заготовки механічним способом – за рахунок поступального переміщення або обертання (рис. 13.3).



1 – заготовка; 2 – інструмент; 3 – трансформатор
Рисунок 13.3 – Схема електроконтактного оброблення

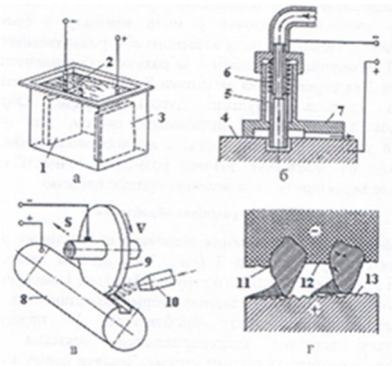
Джерелом тепла у зоні оброблення служать імпульсні дугові розряди. Оброблення застосовується для відрізання ливникових

систем, для очищення виливків та зливків з важкооброблюваних сплавів. Метод не забезпечує значної розмірної точності та якості поверхні, але характеризується високою продуктивністю.

13.2 Електрохімічне оброблення

Електрохімічне оброблення засновано на анодному розчиненні поверхневого шару заготовки, яка знаходиться в електроліті під дією постійного струму. Металевий катод (інструмент) має форму, яка відповідає майбутній обробленій поверхні. Продукти анодного розчинення видаляються з рухом електроліту.

На рис. 13.4 наведені декілька видів робіт, які виконуються електрохімічним обробленням.



1 – катод; 2 – електроліт; 3 – заготовка; 4 – пластина; 5 – трубка-катод; 6 – пружина; 7 – кришка ванни; 8 – вал; 9 – диск-катод; 10 – підведення електроліту; 11 – абразивні зерна; 12 – електропровідна зв'язка; 13 – поверхня заготовки

Рисунок 13.4 – Схема електрохімічного оброблення

При електролітичному *поліруванні* (рис. 13.4, а) катод - це пластина, яка має конфігурацію поверхні, що обробляється. Метод дозволяє отримати шорсткість поверхні R_a від 0,63 до 0,04 мкм. Він застосовується для оброблення складних за профілем заготовок (лопатки турбін, вимірювальні інструменти та ін.).

Електрохімічне «свердління» (рис.13.4, б) здійснюється за допомогою трубки-катода, через яку подається електроліт. Зазор між

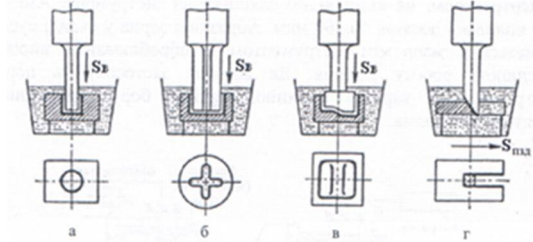
анодом і катодом створюється тиском електроліту і регулюється пружиною.

Електрохімічне «фрезерування» (рис. 13.4, в) здійснюється металевим диском-катодом, який одночасно і обертається, і рухається поступово. З сопла у зону оброблення подається електроліт.

При електроабразивному шліфуванні (рис. 13.4, г) інструментом служить абразивний круг-катод з електропровідною зв'язкою. Продукти розчинення видаляються зернами абразиву. У порівнянні зі звичайним шліфуванням цей процес забезпечує вищу продуктивність, меншу шорсткість ($R_a = 0,16...0,04$ мкм), менше зношування шліфувальних кругів.

13.3 Фізичні методи оброблення

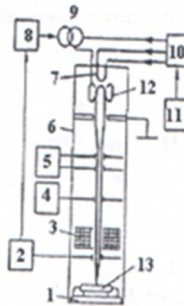
Ультразвукове оброблення матеріалів по суті становить різновид механічного оброблення, оскільки різання здійснюється абразивними зернами, що отримують енергію від інструмента з ультразвуковою частотою 16...30 кГц. Струм високої частоти подається на осердя з магніострикційного матеріалу. Коливання торця вібратора підсилюються концентратором, на кінці якого закріплений інструмент. Інструмент виготовляється із загартованої, але в'язкої сталі достатньої твердості (35...40 HRC). Амплітуда його коливань становить 10...60 мкм. Абразивні зерна (електрокорунд, карбід кремнію, синтетичні алмази) у суспензії подаються у зазор між інструментом і оброблюваним виробом. Ультразвуковим методом оброблюють крихкі тверді матеріали: скло, кераміку, кварц, тверді сплави, вольфрам і т.п. Методами ультразвукового оброблення отримують наскрізні і глухі отвори будь-якого профілю, фасонні внутрішні порожнини, розрізають заготовки тощо (рис. 13.5).



а, б - оброблення глухих отворів; в – оброблення внутрішньої фасонної поверхні; г – розрізання заготовки

Рисунок 13.5 – Схема ультразвукового оброблення

Електронно-променеве оброблення здійснюється у вакуумі електронами, які випромінюються катодом і вузьким пучком спрямовуються на заготовку (рис. 13.6). різниця напруг між катодом і анодом (заготовкою) становить до 50...70 кВ.

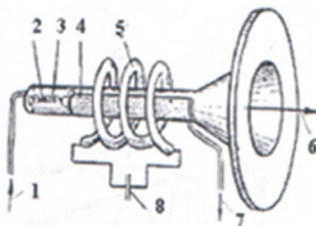


1 – стіл; 2 – магнітний контур; 3 – магнітні лінзи; 4 – коректор;
5 – електромагнітні котушки; 6 – вакуумна камера; 7 – катод; 8 – імпульсний генератор; 9 – імпульсний трансформатор; 10 – генератор напруги; 11 – генератор високої напруги

Рисунок 13.6 – Схема установки для електронно-променевого оброблення

Діаметр пучка може бути сфокусований до діаметра 0,005 мм, температура у місці оброблення досягає 6000⁰С, внаслідок чого навіть найтугоплавкіші метали плавляться і випаровуються. Метод використовується для отримання отворів, щілин або різання рубінів, алмазів, твердих сплавів і металів. Головний недолік – оброблення повинно виконуватися у вакуумі.

Основою *лазерного оброблення* служить рубіновий кристал у вигляді стрижня. Рубіновий стрижень знаходиться у скляній трубці і охолоджується проточною водою (рис. 13.7).



- 1, 7 – підведення і відведення охолоджувальної рідини; 2 – пружина;
3 – оболонка; 4 – рубіновий кристал; 5 – імпульсна лампа; 6 – когерентний промінь; 8 – джерело живлення

Рисунок 13.7 – Схема лазерного оброблення

При спаласі лампи підкачування через напівпрозорий торець стрижня випромінюється когерентний промінь. За допомогою оптичної система промінь може бути сфокусований на площадці оброблювання діаметром до 0,01 мм. На поверхні металу виділяється питома енергія $10^5 \dots 10^7$ Вт/см². Ширина розрізу може бути 0,1...0,5 мм при швидкості різання 3...8 м/хв. Але при цьому коефіцієнт корисної дії (ККД) твердотільного лазера становить близько 1%.

Ведуться роботи над удосконаленням і використанням діодних (напівпровідникових) лазерів. Накачування таких лазерів здійснюється пропусканням електричного струму через напівпровідниковий матеріал. ККД діодних лазерів становить 40...50%.

Технологічні можливості лазерного оброблення вище, ніж у електронно-променевого. Воно може здійснюватися у будь-якому прозорому просторі, не вимагає вакууму. Світловий промінь може бути спрямований за допомогою світловодів у недоступні місця заготовки.

Основне призначення метода – оброблення твердих сплавів, тугоплавких металів і мінералів.

14 АВТОМАТИЧНІ ЛІНІЇ І ГНУЧКІ ВИРОБНИЧІ СИСТЕМИ

14.1 Автоматичні лінії

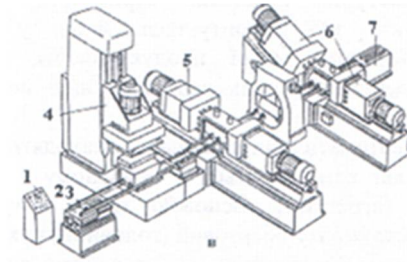
Автоматичне лінії – це система верстатів та інших агрегатів (транспортери, пристрої завантажування/розвантажування, магазини інструментів та ін.), які автоматично, без втручання людини здійснює технологічні операції у встановленій послідовності. Автоматичні лінії поділяються на синхронні (жорсткі) і несинхронні.

У першому випадку заготовка подається від верстата до верстата через рівні проміжки часу, що називається *тактом лінії*. Відмова будь-якого елемента лінії призводить до її зупинення аж до усунення пошкодження. На несинхронних лініях створюється запас заготовок за допомогою накопичувачів. У випадку відмови одного з верстатів всі інші верстати, що йому передують, працюють на накопичувач, а наступні верстати - отримують заготовки з накопичувача верстата, що ремонтується. Якщо у складі лінії використовуються верстати малої продуктивності, організується паралельна робота декількох таких верстатів, щоб не збільшувати тривалість такту лінії.

При створенні автоматичних ліній часто знаходять застосування *агрегатні верстати*. Вони компонуються з уніфікованих (стандартних) вузлів (агрегатів), головним чином силових головок, які надають інструменту обертовий (головний) рух або поступовий (вздовж осі) рух подачі. Використовуючи стандартні силові головки, поворотні робочі столи та інші вузли, створюють такі верстати, на яких за одну установку можна виконати декілька різних операцій (точіння, свердління, фрезерування та ін.) або обробляти з декількох боків (за наявності поворотного стола) складну за формою заготовку.

Застосування в агрегатних верстатах нормалізованих вузлів скорочує час на їх проектування і виготовлення, допускає багаторазове використання цих вузлів при перекомпонуванні верстата на оброблення іншої заготовки. Одночасне багатоінструментальне оброблення забезпечує високу точність і продуктивність.

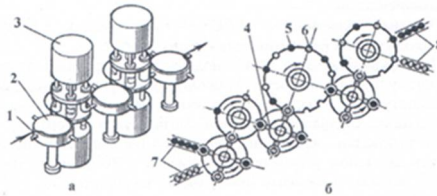
На рис. 14.1 наведений приклад структури автоматичної лінії для оброблення корпусних деталей.



1 – пульт керування; 2 – позиція завантаження; 3 – транспортер; 4, 5, 6 – силові головки; 7 – позиція розвантаження

Рисунок 14.1 – Автоматична лінія для оброблення корпусних деталей

Для оброблення заготовок малого розміру знаходять застосування *роторні* автоматичні лінії (рис. 14.2), які внаслідок поєднання транспортних і робочих рухів мають дуже високу продуктивність.



а - загальний вигляд; б - схема

1 – подача заготовок; 2 – транспортний ротор; 3 – роторний верстат;
4 – захватний пристрій; 5, 6 – заготовки; 7 – завантажувальний пристрій;
8 – вивантажувальний пристрій

Рисунок 14.2 – Роторна автоматична лінія

Лінії складаються з роторних верстатів з декількома шпінделями і транспортних роторів, які обертаються синхронно. Заготовка, рухаючись безперервно, передається з одного блока до іншого за допомогою захватних пристроїв, які знаходяться на транспортних роторах. На лініях цього типу можна одночасно обробляти декілька

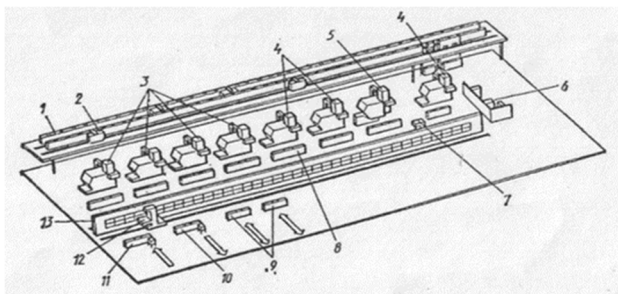
заготовок, для кожної з яких передбачені окремі завантажувальні і розвантажувальні пристрої. Кількість роторів і робочих позицій визначається характером і тривалістю операцій оброблення, що виконуються на роторних верстатах.

Автоматичні лінії доцільно використовувати у крупносерійному та масовому виробництвах.

Застосування автоматичних ліній замість універсальних верстатів забезпечує: скорочення виробничих площ та кількості верстатів у 2...3 рази, зменшення чисельності працюючих у 5...8 разів, зниження собівартості продукції у 3,5...4,5 раз, підвищення якості виробів та ритмічності виробництва.

14.2 Гнучкі виробничі системи

Гнучка виробнича система (ГВС) – це комплекс (рис. 14.3), який складається з автоматичної лінії, у склад якої входять верстати з ЧПК, промислові роботи, автоматизовані склади заготовок і готових деталей, транспортних систем, укладачів-штаблерів та ін. Координація роботи всіх органів здійснюється центральною (диспетчерською) ЕОМ, яка узгоджує роботу всіх ланок системи.



1 – транспортер; 2 – автооператор 3, 4, 5 – групи виконавчих верстатів; 6 – ділянка налагоджування інструментів; 7 – штаблер переміщення; 8 – завантажувач; 9, 10, 11 – позиції розвантажування; 12 – штаблер розвантажування; 13 – стелаж-накопичувач
Рисунок 14.3 - Гнучка виробнича система на основі агрегатних верстатів з ЧПК

Лінія складається з уніфікованих узлів, однакових для всіх ліній даного типу. На платформі, що переміщається по циклу (швидке підведення, робоча подача, швидке відведення), встановлюються

змінні шпіндельні коробки з набором інструментів, силові головки з власним приводом та інші механізми, необхідні для виконання заданого виду робіт.

Головна особливість ГВС – можливість швидкого переналагоджування при переході до виробництва інших виробів.

При функціонуванні ГВС людина безпосередньо не бере участі у виробничому процесі, а виконує роботу з її обслуговування, ремонтування обладнання, слідкує за правильністю виконання всіх операцій. Спеціальні пристрої сигналізують оператору про можливі неполадки з обладнанням, фіксують його простої, постійно слідкують за станом різального інструмента. ГВС успішно працює лише тоді, коли всі її елементи мають високу надійність.

15 ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ПРОВІДНИХ ВИРОБНИЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ

У загальному плані перспективи розвитку будь-якої галузі залежать від багатьох чинників – від стану у галузі на сьогоднішній день до політичної обстановки у світі. На можливість і напрямки можуть вплинути наявні природні ресурси (наприклад, поклади рідкісноземельних металів); наявність шляхів виходу продукції на міжнародні ринки (морські порти, залізниці, автоперевезення); обмін досвідом і технологіями тощо.

Важливу роль може зіграти конкуренція. Відомо, що виріб починає старіти, як тільки виходить на ринок. Конкурент без сумніву намагатиметься випустити на ринок щось краще. Не дивно, що такі фірми, як Apple, Samsung, Xiaomi, Motorola одна перед однієї намагаються весь час розробити щось краще, ніж конкурент. А це бажання вимагає шукати нові шляхи розвитку відповідного виробництва

Як не дивно, війни також сприяють пошуку і знаходженню нових напрямків у виробничих технологіях. Так, після Першої світової війни з'явилися танки і трактори на гусеничному ході. До цього часу трактори були колісними. Під час Другої світової війни у Лос-Аламосі видатні вчені-фізики працювали над створенням атомної бомби. Але на основі їхніх розробок після війни виникла атомна енергетика. Підчас нинішньої російсько-української війни головною зброєю стали дрони. Їх виробництво і використання сприяло розвитку нових композиційних матеріалів, нових технологій виготовлення малогабаритних двигунів для літальних апаратів, створенню унікальних програм наведення на ціль з використанням штучного інтелекту.

Але для розвитку перспективних напрямків у виробництві необхідні інвестиції. Звичайно, такі фірми, як Rheinmetall AG, мають свої дослідні установи, які працюють над розвитком своїх відповідних технологій. У Кремнієвій долині у Каліфорнії є Стенфордський університет, без нього фірми не змогли б створити свої перспективні

технології. Без вкладення інвестицій у роботу фізиків-теоретиків ми не мали б сьогодні ані наноматеріалів, ані нанотехнологій.

Збільшення інвестицій в освіту окупається шляхом зміцнення людського капіталу, підвищення продуктивності та стимулювання інновацій. Інвестиції повинні забезпечити якісну шкільну освіту, сприяти професійно-технічній освіті з випуском кваліфікованих робітників, які виготовлятимуть вироби за новими технологіями, а вищій освіті надати можливість підготувати таких спеціалістів, інженерів, науковців, які зможуть створити перспективні напрямки у своїх виробничих технологіях у майбутньому.

15.1 Спільні напрямки розвитку виробничих технологій

Провідні виробничі технології мають такі спільну напрямки.

Постійно зростає попит на *надлегкі та надміцні матеріали*. Тому металурги, матеріалознавці працюють над підвищенням якості алюмінієвих, титанових і магнієвих сплавів. Ведуться роботи над створенням і впровадженням у виробництво високоміцних сталей. Останнім часом широке використання отримали композиційні матеріали на полімерній основі з використанням арамідних, скляних і вуглецевих наповнювачів. Вони здатні зменшувати масу виробів при збереженні високої міцності.

В *енергоємних виробництвах* ведуться роботи над зменшенням енерговитрат за рахунок оптимізації процесів нагрівання: перехід від витратних газових пальників на електричне нагрівання, на використання локального нагрівання тощо. Все частіше використовуються джерела відновлювальної енергетики.

У *металообробці* перспективними напрямками є така оптимізація технологічних процесів, яка дозволяє зменшувати обсяг виробничих відходів та енергоспоживання, наприклад, зменшення об'єму ливникових систем при литті, нагрівання під кування без окалини, зменшення об'єму стружки при обробленні різанням тощо.

Все більше використовується цифровізація технологічних процесів. Вона пов'язана з проектуванням (моделюванням) виробів і технологічних процесів, поточним контролем за ходом виробництва та діагностуванням або контролем якості виробів при виготовленні чи в експлуатації.

З цифровізацією безпосередньо пов'язана механізація і автоматизація виробничих процесів. Вони спрямовані головним чином на зменшення обсягів ручної праці, виконання відповідальних операцій без втручання людини аж до створення окремих автоматизованих виробництв.

При формуванні перспективних напрямків розвитку виробничих процесів велика увага приділяється збереженню екології. Роботи ведуться над оптимізацією енергоспоживання плавильних агрегатів і нагрівачів (металургія, ливарне і ковальсько-штампувальне виробництва), зменшення спалювання вуглеводнів разом з одночасним збільшенням використання відновлювальної енергетики. У країнах ЄС, США та Японії активно інвестують у зменшення викидів вуглекислого газу у металургії, на транспорті, теплових електростанціях тощо.

15.2 Перспективні напрямки розвитку окремих виробничих технологій

У металургії передбачається перехід від двостадійного виробництва сталі (доменний + мартенівський процеси) до електродугових печей та використання водню як відновника заліза. Велика увага приділяється вторинному переробленню: все більша частка сталі вироблятиметься з брухту. Це економічно вигідно і відповідає екологічним стандартам. Передбачається створення нанометалургії з метою виробництва матеріалів із заданими властивостями на атомному рівні.

У ливарному виробництві очікується виробництво композитних і багатошарових виливків (метал + кераміка, метал + композит). Є намагання поєднання класичного лиття з 3D-друком металів, наприклад, друк складних об'ємних вузлів. У деяких випадках використовуються наномодифікатори для підвищення зносостійкості та ударної в'язкості матеріалу виробу.

У ковальсько-штампувальному виробництві перспективним є використання нового обладнання: електрогідравлічних та електромеханічних пресів замість класичних пароповітряних молотів, а також автоматизованих пресів і молотів з числовим програмним керуванням (ЧПК). Впроваджуються високошвидкісні преси для масового виробництва деталей автомобільної та військової техніки. Працюють над зменшенням енерговитрат з переходом до

електричного прямого або індукційного нагрівання. Важливим у перспективі є використання цифрового моделювання процесів кутання (штампування) з метою прогнозу розподілу напружень, можливих тріщин, тощо.

У зварювальному виробництві працюють головним чином над покращенням автоматизації зварювальних процесів шляхом використання роботів-зварювальників у серійному виробництві (будівництво автомобілів, вагонів, суден), а також розвиток *коллаборативних роботів* (cobots), які працюватимуть разом з людиною. Передбачається використання програм за участі штучного інтелекту з метою оптимізації параметрів зварювання і зменшення браку.

У металорізальному виробництві у перспективі збільшиться використання роботів-маніпуляторів для завантажування заготовок та розвантажування готових деталей. Можливе створення безлюдного виробництва, де верстати працюють у цілодобовому режимі з мінімальною участю людини. Передбачається все більше використання гібридних верстатів, що поєднуюватимуть 3D-друк з механічним обробленням. Подальший розвиток отримають різці з твердих сплавів і кераміки, стійких до високих температур. Для збільшення ресурсу інструментів на їх поверхню передбачається наносити покриття з наноструктур (наприклад, алмазоподібні вуглецеві плівки).

Що стосується композиційних матеріалів, то найбільший попит на них передбачається в авіакосмічній галузі та транспорті. Уже зараз 50% деталей сучасних літаків Boeing і Airbus виготовлено з композитів. Електромобілі потребують легких композиційних матеріалів для збільшення запасу ходу. Композитна арматура і панелі у будівництві стають альтернативою сталі і бетону. В Україні вже застосовують композитну арматуру при будівництві мостів і доріг. У перспективі зростатиме попит на композитні теплостійкі оболонки в атомній енергетиці. Імпланти, протези, хірургічні інструменти з композитів легші і сумісніші з організмом. Вже активно досліджується використання біосумісних композитів для виготовлення кісткових протезів 3D-друком.

ЛІТЕРАТУРА

Основна

1. Базієвський С.Д., Дмитрик В.Ф. Взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання: підручник. К.: Слово, 2004, 504 с.
2. Богуслаєв В.О., Качан О.Я., Калініна Н.Є., Мозговий В.Ф., калінін В.Т. Авіаційно-космічні матеріали та технології. Запоріжжя: вид. ВАТ «Мотор Січ», 2009. 383 с.
3. Бондаренко С.Г. Основи технології машинобудування: навч. посібник.- Львів: «Магнолія 2006», 2007. -500 с.
4. Волчок І.П., Плескач В.М., Шестаков І.А. Сучасні виробничі технології у машинобудуванні та металургії: навч. посібник / за заг. ред. проф. І.П.Волчка. Запоріжжя: Дике поле, 2006. 360 с.
5. Губін Г.В., Півень В.О. Сучасні промислові способи безкоксової металургії заліза / за ред. Г.В.Губіна – Кривий Ріг, 2010. 336 с.
6. ДСТУ ISO 286-2-2002 Допуски і посадки за системою ISO. Частина 2. Таблиці квалітетів стандартних допусків і граничних відхилів отворів і валів [Чинний від 2004-10-1]. Київ: РВВ ДП «УкрНДНЦ», 2004. 43 с.
7. Ісакович-Лотоцький Р.Д., Манжілевський О.Д. Обладнання автоматизованих виробництв. Частина 2. Автоматичні лінії. Гнучкі виробничі системи. Транспортно-завантажувальні пристрої: навч. посібник. Вінниця : ВНТУ, 2015. – 129 с.
8. Комар Р.В., Паньків М.Р., Сенчишин В.С. Технологія та устаткування машинобудівних виробництв. Виробництво заготовок. Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2023. 152 с.
9. Копань В.С. Композиційні матеріали. К.: унів. вид. «Пульсари», 2004. 198 с.
10. Металознавство: підручник для вузів / Бялік О.М., Черненко В.С., Писаренко В.М., Москаленко Ю.Н. – К.: Політехніка, 2001. – 374 с.
11. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці: підручник / Є.О.Джур, Л.Д.Кучма, Т.А.Манько та ін. К.: Вища освіта, 2003. 399 с.
12. Попович В., Попович В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: підручник. Львів: Світ, 2006. 624 с.

13. Попович В., Дронюк М. Тенденції виробництва виливків у другій половині ХХ ст. // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2001.- №3 – с.133-136.

14. Реп'ях С.І. Технологічні основи лиття за витоплюваними моделями. Дніпропетровськ: Ліра, 2006. – 1056 с.

15. Сизоненко О. М., Івлісв А. І., Баглюк Г. А. Перспективні процеси виготовлення порошкових матеріалів: підручник: Миколаїв: НУК, 2014. 374 с.

16. Солнцев Ю.П., Беліков С.Б., Шейко С.П. Спеціальні конструкційні матеріали: підручник. Запоріжжя: «ВАЛПС-ПОЛІГРАФ», 2010. 536 с.

17. Спорягін Е. О., Варлан К. Є. Теоретичні основи та технологія виробництва полімерних композиційних матеріалів: навч. посібник. –Донецьк: – вид-во ДНУ, 2012. 188 с.

18. Технологічні процеси за факом. Кування і штампування: навч. посібник / В. В. Кухар та ін. – Маріуполь: ПДТУ, 2017. – 144 с.

19. Чернега Д.Ф., Богушевський В.С., Говтвянський Ю.Я. та ін. Основи металургійного виробництва / за ред. Д.Ф.Чернпеги – К.: Вища шк., 2006. 503 с.