

669.2/8  
Н 561

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Запорізька державна інженерна академія

---



**Т.М. Нестеренко**

## **ВИРОБНИЦТВО СПЛАВІВ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ**

**Методичні вказівки до самостійної роботи та тестування**

*для студентів ЗДІА  
спеціальності 6.090402 “Металургія кольорових металів”  
денної та заочної форм навчання*

**Запоріжжя  
2012**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
Запорізька державна інженерна академія

**ВИРОБНИЦТВО СПЛАВІВ  
КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ**

**Методичні вказівки до самостійної роботи та тестування**

*для студентів ЗДІА  
спеціальності 6.090402 “Металургія кольорових металів”  
денної та заочної форм навчання*

*Рекомендовано до видання  
на засіданні кафедри МКМ,  
протокол № 10 від 27.12.11 р.*

УДК 669.2/8

ББК

*Т.М. Нестеренко, к.т.н., доцент*

*Відповідальний за випуск: зав. кафедрою МКМ  
професор І.Ф. Червоний*

**Рецензент:**

*В.П. Грицай, к.т.н., професор, декан механіко-технологічного факультету Запорізької державної інженерної академії*

**Н 561 Нестеренко Т.М.**

**Виробництво сплавів кольорових металів:** Методичні вказівки до самостійної роботи та тестування для студентів ЗДІА спеціальності 6.090402 “Металургія кольорових металів” денної та заочної форм навчання / Нестеренко Т.М. – Запоріжжя: ЗДІА, 2012. – 121 с.

Методичні вказівки призначені для студентів спеціальності “Металургія кольорових металів”, які виконують контрольну роботу та готуються до тестування з дисципліни “Виробництво сплавів кольорових металів”. Вказівки містять теоретичні відомості про класифікацію та виробництво сплавів кольорових металів, питання для самоконтролю і тестування, індивідуальні завдання і довідкові відомості для виконання контрольних робіт, перелік рекомендованої літератури.

## ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	4
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СПЛАВИ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ.....	5
1.1 Основні терміни. Класифікація і вимоги до сплавів кольорових металів.....	5
1.2 Основні властивості сплавів кольорових металів.....	8
1.3 Ливарні властивості сплавів кольорових металів.....	10
1.3.1 Рідкоплинність.....	10
1.3.2 Лінійна усадка.....	15
1.3.3 Об'ємна усадка.....	23
Питання для самоконтролю.....	31
2 ВИРОБНИЦТВО ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ.....	32
2.1 Класифікація, склад і властивості титанових сплавів.....	32
2.2 Особливості плавки титанових сплавів.....	37
2.3 Плавка у вакуумно-дугових печах.....	40
2.4 Плавка в печі з гарнісажем.....	53
2.5 Плавка в електрошлаковій печі.....	56
2.6 Плазмово-дугова плавка.....	56
2.7 Індукційна плавка.....	57
2.8 Електронно-променева плавка.....	58
2.9 Магнітокерована електрошлакова плавка.....	63
Питання для самоконтролю.....	64
3 ВИРОБНИЦТВО МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ.....	65
3.1 Склад і властивості магнієвих сплавів.....	65
3.2 Особливості плавки, дегазація і модифікування магнієвих сплавів.....	69
3.3 Способи виплавки магнієвих сплавів.....	73
3.4 Переробка вторинної магнієвої сировини в печах з сольовим обігрівом.....	77
Питання для самоконтролю.....	80
4. ВИРОБНИЦТВО МІДНИХ СПЛАВІВ.....	83
4.1 Склад, властивості і використання мідних сплавів.....	83
4.2 Особливості плавки і рафінування мідних сплавів.....	86
4.3 Плавка латуней і бронз.....	90
Питання для самоконтролю.....	93
5 ВИРОБНИЦТВО НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ.....	94
5.1 Склад і властивості нікелевих сплавів.....	94
5.2 Виплавка нікелевих сплавів.....	97
Питання для самоконтролю.....	103
6 ТЕСТОВІ ЗАПИТАННЯ.....	104
7 ЗАВДАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ.....	110
Перелік рекомендованої літератури.....	120

## ВСТУП

Розвиток сучасної техніки висуває все більш високі вимоги до якості металів і сплавів. Потреби атомної енергетики, авіації, ракето- і суднобудування, електроніки і хімічного машинобудування в металах і сплавах, здатних працювати при високих і низьких температурах, у високому вакуумі і агресивних середовищах, тривалий час витримувати статичні і динамічні навантаження, можна задовольнити лише вдосконаленням існуючих технологічних процесів, а також дослідженням і розробкою нових, найбільш прогресивних процесів виробництва сплавів кольорових металів.

Дисципліна “Виробництво сплавів кольорових металів” є одною з фахових дисциплін, яка спрямована на цільову підготовку фахівця за спеціальністю “Металургія кольорових металів”.

**Мета дисципліни** – навчити студентів теоретичним основам і практичному здійсненню сучасних способів виробництва сплавів кольорових металів, необхідних для пошуку оптимальних технологічних схем та обладнання для отримання сплавів, а також оцінювати різні способи удосконалення відповідних процесів.

**Завдання дисципліни** – ознайомити студентів з технологіями отримання сплавів кольорових металів, принципами проведення технологічних розрахунків металургійних процесів, а також аналізу технологічних схем виробництва сплавів.

Методичні вказівки містять теоретичні відомості про класифікацію, склад, будову, властивості й особливості виплавки сплавів кольорових металів, плавильне обладнання і технологію отримання титанових, магнієвих, мідних і нікелевих сплавів (глави 1...5), питання для самоконтролю знань і тестування (глава 6), індивідуальні завдання і довідкові відомості для виконання контрольних робіт (глава 7), перелік рекомендованої літератури.

Методичні вказівки призначені для студентів спеціальності “Металургія кольорових металів”, також будуть корисними студентам, які опановують інженерні спеціальності з галузі знань “Металургія та матеріалознавство”.

# 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТВИ ПРО СПЛАВИ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ

## 1.1 Основні терміни. Класифікація і вимоги до сплавів кольорових металів

**Сплав** – це речовина, яку одержують поєднанням (сплавлянням, спіканням, електролізом) двох або більше елементів. Однак, зазвичай, сплави одержують розплавлянням двох або більше елементів (металів або неметалів) з наступною їх кристалізацією (твердінням). Зокрема, неметалевими сплавами є природні гірські породи – граніт, гнейс, базальт та інші, силікатні стекла, деякі неметалеві продукти металургійних виробництв – шлаки, штейни, флюси та інші. Найбільше практичне значення в техніці мають металеві сплави, що розглядаються нижче. Сплави кольорових металів мають, порівнянно з чистими металами, нові цінні властивості і відповідають потребам техніки, що безперервно зростають.

Структура і властивості сплавів значною мірою відрізняються від структури і властивостей елементів, що їх утворюють. Сплав, виготовлений переважно з металів, який має металеві властивості, називають *металевим сплавом*. Порівняно з чистими металами сплави мають більш цінний комплекс механічних, фізичних і технологічних властивостей. Залежно від кількості металів (компонентів), що входять до складу розплаву, розрізняють двокомпонентні, трикомпонентні або багатоконпонентні сплави (системи). У розплаві всі компоненти сплаву знаходяться в атомарному стані, утворюючи рідкий однорідний розчин з однаковим хімічним складом. Під час твердіння (кристалізації) атоми компонентів розташовуються у певному порядку, утворюючи кристалічну речовину – сплав.

Сплави можна класифікувати: 1) по числу компонентів; 2) по структурі – на гомогенні (однофазні) системи і гетерогенні (суміші), що складаються з декількох фаз; останні можуть бути стабільними (у рівноважних сплавах) і метастабільними (у нерівноважних сплавах); 3) за природою металу, що є основою сплаву, – на чорні (сталь,

чавун) і кольорові (на основі кольорових металів – алюмінієві, титанові, мідні, нікелеві та ін.); 4) по характерних властивостях – на тугоплавкі, легкоплавкі, високоміцні, жароміцні, тверді, антифрикційні, корозійностійкі, зносостійкі, з високим електроопором, магнітні та ін.; 5) за способом виготовлення виробів – на ливарні сплави (для виготовлення деталей методом лиття) і деформівні (що піддаються куванню, штампуванню, плющенню, протяжці, пресуванню і іншим видам обробки тиском).

**Базовий компонент** (основа сплаву) – переважаючий в сплаві елемент. За основним компонентом сплав отримує свою назву. Так, розрізняють алюмінієві, магнієві, титанові й інші сплави. Деякі сплави мають спеціальні назви, наприклад бронзи, латуні, силуміни, магналії. Окрім металу-основи, до складу сплавів входять легуючі елементи та домішки.

**Легуючі елементи** (добавки) – компоненти, що спеціально вводяться в сплав для отримання потрібного комплексу властивостей. Їх поділяють на *основні* (вводяться в кількості від 2...5 до 20...35 %), *допоміжні* (зазвичай вводяться в кількості менше 2...5 %) і такі, що *мікролегують* (менше 0,1...0,3 %). Віднесення легуючих елементів до основних або допоміжних проводиться не тільки за їх концентрацією в сплаві, але перш за все по впливу на фазовий склад і комплекс властивостей сплаву. Базовий компонент з основними легуючими елементами утворює основу сплаву, що визначає особливості механічних і технологічних властивостей. Допоміжні легуючі елементи підсилюють дію основних або додають сплаву особливі властивості.

**Модифікуючі добавки** – це невеликі (0,05...0,2 %) добавки модифікаторів I і II роду або комплексні добавки у вигляді готових лігатур. **Домішки** – елементи, що потрапляють в сплав або з шихтою, або протягом плавки з футеровки печі, пічної атмосфери та ін. Розрізняють домішки *постійні* і *випадкові*. За типом дії на комплекс властивостей сплаву домішки поділяють на *шкідливі* (їх кількість строго обмежується); технологічні, що позитивно впливають на властивості сплаву (розкислювачі або інші добавки), і *нейтральні*.

Хімічний склад сплаву визначається властивостями і

регламентується державними стандартами (ДСТУ), технічними умовами (ТУ), а також різними галузевими стандартами. Вміст основного компонента в сплаві знаходиться зазвичай в широких межах. Вміст легуючих елементів визначається нижнім і верхнім рівнями. Вміст домішок обмежується верхньою межею, перевищення якої виводить сплав у брак.

За технологічним призначенням сплави можна поділити на наступні групи: робочі сплави, лігатури, вторинні сплави.

**Робочі сплави** – сплави стандартного складу, що йдуть безпосередньо на виготовлення фасонних виливок (ливарні) і напівфабрикатів (деформовані). Ці сплави мають певний хімічний склад і мають задані фізичні та механічні властивості.

**Лігатури** – проміжні (допоміжні) сплави, призначені для введення тугоплавких і легкоплавких (летких) елементів у робочі сплави. Застосування лігатур дозволяє отримати сплави з точнішим вмістом заданого компонента. До лігатур не висувають вимог відносно механічних і фізико-хімічних властивостей. Проте вони повинні мати специфічні властивості – крихкість, однорідність хімічного складу, хорошу розчинність при введенні в сплав.

**Вторинні сплави** – сплави стандартного складу, отримані в результаті переплавлення відходів власного виробництва і металевого брухту. Залежно від забрудненості домішками ці сплави використовують як робочі, проміжні і як лігатури.

До сплавів кольорових металів висувають наступні вимоги:

- забезпечення у вилівках заданих механічних, фізичних, хімічних та інших властивостей, що забезпечують їх якість, надійність і довговічність;
- забезпечення заданих ливарних властивостей для отримання якісних виливок вільних від ливарних дефектів;
- можливість застосування маловідхідних і безвідходних технологій при мінімальній витраті дорогих компонентів шихти.

Залежно від призначення сплаву, необхідного ступеня чистоти, економічних міркувань і характеру початкових шихтових матеріалів сплави виготовляють наступними способами:

- безпосереднім сплавлянням чистих металів;



- сумісним відновленням компонентів сплаву з руд в процесі руднотермічної плавки;
- електролізом розплавлених середовищ і водних розчинів;
- заміщенням одного елемента іншим в будь-якій сполуці (металотермія);
- дифузійним способом з використанням твердих, рідких і газоподібних речовин;
- металокерамічним способом (метод порошкової металургії);
- комбінованим способом з застосуванням двох або трьох вищезгаданих.

## 1.2 Основні властивості сплавів кольорових металів

Всі властивості металевих сплавів можна розділити на чотири групи: фізичні, хімічні, технологічні та механічні.

**Фізичні властивості** – колір, щільність, плавкість, електро- і теплопровідність, теплоємність, коефіцієнт лінійного розширення, магнітні та ін.

Щільність має велике значення для вибору матеріалів при проектуванні машин, апаратів і ін.

Коефіцієнт лінійного розширення визначає величину, на яку змінюються лінійні розміри тіла при зміні температури. Його слід враховувати при конструюванні апаратів.

**Хімічні властивості** – окислюваність, розчинність, корозійна стійкість.

**Технологічні властивості** – рідкоплинність, ковкість, зварюваність, оброблюваність ріжучим інструментом. Знання технологічних властивостей допомагає грамотно вибрати спосіб виготовлення деталей.

Ковкість визначає схильність металів і сплавів до обробки тиском (прокатування, пресування, волочіння, кування і штампування).

Зварюваність визначає можливість виготовлення зварних конструкцій, виправлення браку литва й ін.

Оброблюваність різанням дозволяє визначити можливість отримання точних розмірів і високої чистоти деталей.

Рідкоплинність – здатність розплавів заповнювати ливарну форму. Мідь навіть при перегріванні густо і погано заповнює форми, тоді як бронза, латунь та інші сплави мають високу рідкоплинність.

**Механічні властивості** – міцність, в'язкість, пружність, пластичність.

Міцність. Чим міцніше метал, тим менше розмір деталі, її маса і тим менша витрата металу на її виготовлення.

В'язкість – здатність металу чинити опір ударним навантаженням.

Пружність – властивість металу відновлювати свою форму після дії зовнішніх сил.

Пластичність – властивість металу деформуватися без руйнування при дії зовнішніх сил.

Особливо слід виділити **ливарні властивості** сплавів. Найважливішими ливарними властивостями сплавів є рідкоплинність, усадка, схильність до утворення напруги, ліквіація.

Рідкоплинність – здатність розплаву заповнювати ливарну форму і точно відтворювати контури порожнини форми. Рідкоплинність залежить від інтервалу кристалізації сплаву. Для широкоінтервальних сплавів рідкоплинність менша, ніж для вузькоінтервальних.

Усадка характеризує процес зменшення лінійних розмірів і об'єму рідкого сплаву у формі при охолодженні. Розрізняють об'ємну і лінійну усадку сплавів.

Напруга. Внаслідок нерівномірної усадки різних частин виливка в ньому виникає термічна напруга у зв'язку зі зміною кристалічної будови виливка – фазова напруга. В процесі простого охолодження виливка у формі виникає ливарна напруга.

Напруга у виливках (злитках) знімається термообробкою. Напруга може спричинити тріщиноутворення у виливках. Гарячі тріщини утворюються при високих температурах, коли сплави мають низькі механічні властивості. Достатньо невеликих перешкод усадці, щоб у виливках утворилися тріщини. Гарячі тріщини мають темну,

окислену поверхню.

Холодні тріщини утворюються при порівняно низьких температурах. Вони мають менші розміри і чисту неокислену поверхню. Усунення як гарячих, так і холодних тріщин досягається створенням рівномірних перерізів, без різких переходів між їх окремими частинами.

Ліквация. При твердінні сплаву, залитого у форму, відбувається процес вирівнювання хімічного складу по всьому перерізу виливка. Проте цей процес відбувається повільно, і в окремих частинах виливка, і навіть в окремих зернах сплаву спостерігається хімічна неоднорідність – ліквация. Причин для цього багато (різна щільність компонентів сплаву, різна температура твердіння та ін.).

Типи ліквациї: за щільністю, внутрішньзерена (дендритна), зональна (зворотна і пряма).

Ліквация зменшується при пониженні температури лиття і зниженні швидкості заливання, а також при підвищенні швидкості твердіння.

## **1.3 Ливарні властивості сплавів кольорових металів**

### **1.3.1 Рідкоплинність**

Якість виливок, їх придатність оцінюють за багатьма ознаками. Обов'язковою з них є відповідність по геометрії. Для забезпечення цієї відповідності необхідно, щоб рідкий метал, який заливається у ливарну форму, заповнив всі її порожнини. Тільки за цієї умови виливок повністю і точно відтворюватиме внутрішні контури форми.

Розплави кольорових металів і сплавів є типовими ньютонівськими рідинами. У каналах ливникових систем розплави течуть як у трубопроводах, а у порожнинах ливарних форм можуть отримати розвиток також течія відкритим струменем і напірна течія у відкритих каналах (руслах). Тому багато параметрів заповнення ливарної форми можна встановити за законами гідравліки. Використовуючи рівняння Д. Бернуллі, наприклад, при відомих розмірах елементів ливникової системи, визначають тривалість

заповнення (залиття). Або, навпаки, по заданих металостатичному натиску і тривалості заповнення знаходять швидкість перебігу металу в порожнинах ливарної форми і площі перетинів елементів ливникової системи.

Проте заповнення ливарної форми не є чисто гідравлічним процесом. Перебіг металу у формі завжди супроводжується його охолодженням. При температурі нижчій за температуру ліквідуса в розплаві утворюються кристали. У міру накопичення твердої фази швидкість течії зменшується, потім течія припиняється. Отже, можливість заповнення ливарної форми обмежена часом, протягом якого розплав, знаходячись в рідкому і рідкотвердому станах, зберігає здатність текти. Цей час для одного і того ж сплаву за однакових гідравлічних умов заповнення визначається тепловими умовами – початковими температурами рідкого металу і ливарної форми, їх теплофізичними властивостями, особливостями передавання теплоти через межу розділу метал–форма і тепловипромінюванням в порожнині ливарної форми. Його можна приблизно розрахувати за теплофізичними законами.

Разом з тим різні сплави за порівнянних теплових і однакових гідравлічних умов мають різну здатність текти і заповнювати ливарну форму. Це обумовлено перш за все особливостями їх кристалізації. Сплави з великим інтервалом кристалізації тверднуть з утворенням розгалужених дендритів. Останні ростуть перпендикулярно поверхні охолодження, тобто упоперек перетину заповнюваного каналу. При цьому його «живий» перетин зменшується і текти металу стає важко. Тому такі сплави заповнюють форму гірше, ніж чисті метали і сплави (евтектичні і хімічні сполуки), які кристалізуються при постійній температурі з утворенням кристалів компактної форми.

Окрім заповнення форми важливою є точність відтворення виливом рельєфу поверхні форми. У цьому велика роль належить капілярним силам. Зазвичай ливарна форма не змочується рідким металом, тому капілярні сили перешкоджають відтворенню тонкого рельєфу. Чим більший поверхневий натяг розплаву і краєвий кут змочування поверхні ливарної форми і чим менше розміри виступів і западин на поверхні, тим важче забезпечити точне відтворення

випликом рельєфу форми. Цьому також перешкоджають оксидні плівки, що утворюються на поверхні розплавів. Здатність сплаву відтворювати рельєф поверхні форми називають **формозаповнюваністю**.

Таким чином, заповнення рідким металом порожнини ливарної форми є складним процесом. На повноту заповнення ливарної форми впливають три групи чинників. До першої групи відносяться властивості сплаву: поверхневий натяг, теплопровідність, теплоємність, теплота і інтервал кристалізації, схильність до поверхневого окислення та ін. Другу групу чинників складають властивості ливарної форми: теплоакумулююча здатність, газопроникність, шорсткість поверхні та ін. До третьої групи відносяться умови заливання: металостатичний натиск, надмірний зовнішній тиск на розплав, перегрівання розплаву, температура ливарної форми та ін. Якщо стабілізувати другу і третю групи чинників, то повнота заповнення ливарної форми цілком залежить від властивостей сплаву. Здатність сплаву текти і заповнювати стандартну ливарну форму називається **рідкоплинністю**.

Рідкоплинність визначають експериментально за спеціальними технологічними пробами, які отримують за однакових умов заливання. Для забезпечення ідентичних умов заповнення проб при порівнянні рідкоплинності різних сплавів Ю.А. Нехендзі запропонував розрізняти дійсну, умовно-дійсну і практичну рідкоплинність.

**Дійсна рідкоплинність** сплавів визначається при їх однаковому перегріванні вище температури **нульової рідкоплинності**, при якій сплав втрачає рухливість. Нульова рідкоплинність настає при температурі, яка знаходиться між ліквідусом і солідусом сплаву, при певній кількості твердої фази. Цю температуру визначити складно, тому визначають не дійсну, а **умовно-дійсну рідкоплинність** при однаковому перегріванні сплавів вище за температуру ліквідусу.

Під **практичною** розуміють рідкоплинність сплавів при постійній температурі заливання. В цьому випадку перегрівання над температурою ліквідусу для різних сплавів неоднакове.

Для оцінки рідкоплинності застосовують проби постійного і змінного перетинів. До проб постійного перетину відносяться пруткова, спіральна, U-подібна і лабіринтна. Змінний перетин мають клинова і кулькова проби. За допомогою проб постійного перетину оцінюють здатність сплаву заповнювати протяжні порожнини форм (рідкоплинність), а за допомогою кулькових і клинових проб – здатність сплаву заповнювати тонкі канали і порожнини у формі (формозаповнюваність).

Для визначення рідкоплинності за допомогою проб постійного перетину довжину і площу перетину порожнини форми встановлюють такими, щоб метал до моменту зупинки не заповнив всю порожнину до кінця. Мірою рідкоплинності при використанні цих проб є довжина отриманого прутка у вибраних умовах заливання і охолодження (рис. 1.1). За допомогою проб постійного перетину виявляють зв'язок рідкоплинності сплаву з його розташуванням на діаграмі стану. Рідкоплинність у більшості випадків збільшується зі зменшенням інтервалу кристалізації, хоча пряма пропорційна залежність відсутня.

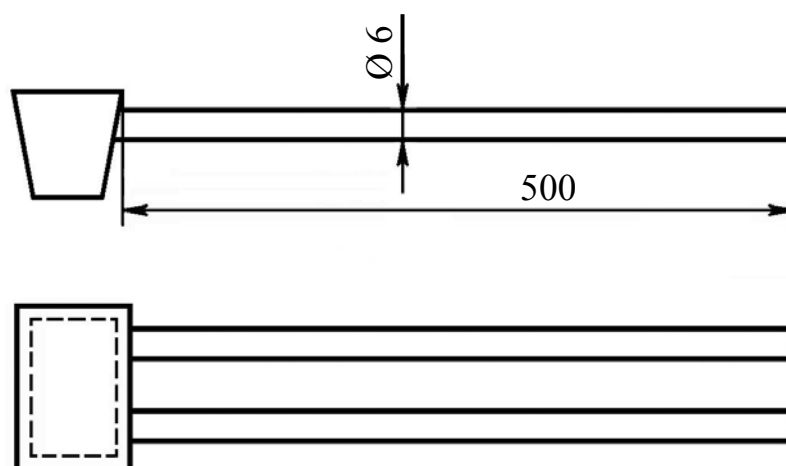


Рисунок 1.1 – Пруткова проба на рідкоплинність з прямими каналами (проба Руффа)

Найширше застосовують спіральні проби (рис. 1.2). Моделі цієї проби і ливникової системи для неї повинні відповідати ГОСТ 16438–70. Спіральний канал має трапецієвидний перетин. Під заливання

форму встановлюють точно горизонтально за рівнем. У нижній півформі розташовують спіральні канали проби і металоприймач, у верхній – ливникову чашу і стояк. Для забезпечення однакового металостатичного натиску стояк заздалегідь перекривають пробкою, яку видаляють після наповнення чаші металом. Для спрощення вимірів у спіральних каналах виконують поглиблення через кожних 50 мм. Вони відтворюються на пробі у вигляді виступів. По цих виступах визначають довжину спіралі.

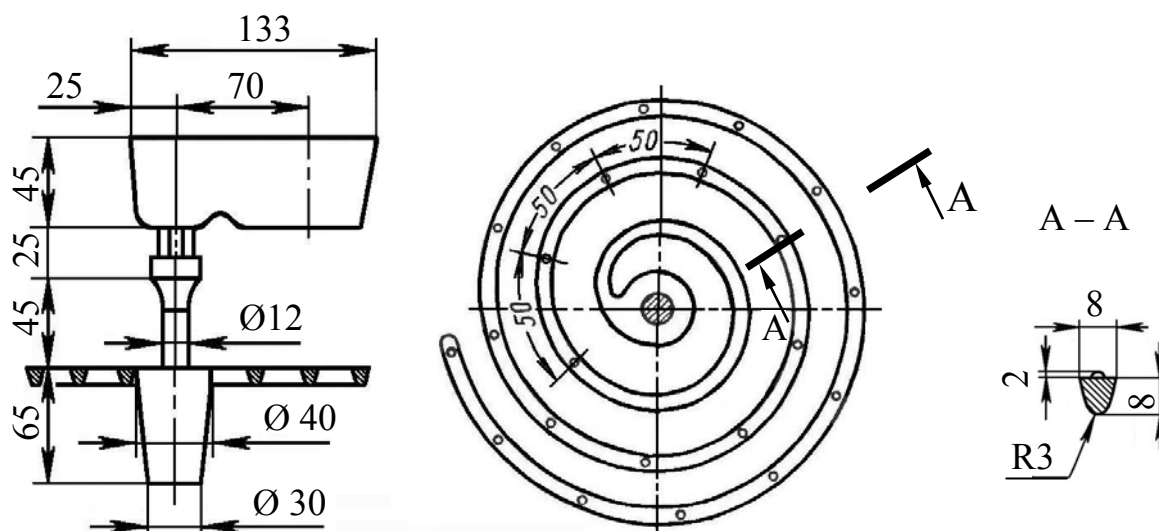


Рисунок 1.2 – Модель для отримання спіральної проби на рідкоплинність (проба Кюрі)

У-подібну пробу отримують у металевій формі з вертикальним рознімом (рис. 1.3). Мірою рідкоплинності є довжина прутка, отриманого у вертикальному каліброваному каналі діаметром 8 мм.

Для оцінки здатності сплаву заповнювати дуже тонкий рельєф використовують клинову або кулькову проби. У цих пробах розплав повинен проникнути в гостру вершину клиноподібної порожнини або затекти під кульку, прилеглу до плоскої стінки. Мірою рідкоплинності є довжина незаповненої гострої вершини у клиновій пробі і діаметр незалитого отвору в кульковій пробі. Ці показники залежать в основному від міцності оксидних плівок на поверхні розплаву і поверхневого натягу. Показники рідкоплинності по прутковим пробах і по клиновій або кульковій пробах ніяк між собою не зв'язані.

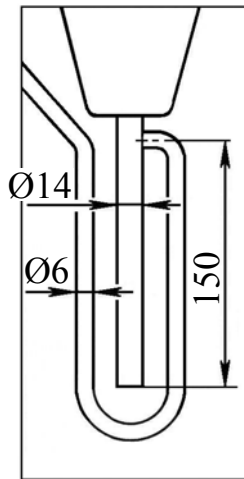


Рисунок 1.3 – Вигляд розніму кокілю для отримання U-подібної проби на рідкоплинність

Кулькову пробу А.Г. Спаського можна отримувати як у піщаній, так і в металевій формі (рис. 1.4). Металева форма має вертикальний рознім і складається з двох половин і клинової вставки, дотичної з кулькою діаметром 20 мм, укріпленою в одній з половин форми. Мірою рідкоплинності металу в даній пробі є площа або середній діаметр отвору, утвореного біля точки зіткнення кульки з клинковою вставкою. Чим менше площа цього отвору або його середній діаметр, тим більш тонкостінний вилівок може заповнити сплав в аналогічних умовах лиття.

На рідкоплинність, що визначається по кульковій пробі, впливає поверхневий натяг розплаву. Чим він більший, тим менша рідкоплинність.

### 1.3.2 Лінійна усадка

**Усадка** – властивість металів або сплавів зменшувати об'єм при твердінні і охолодженні. Розрізняють лінійну і об'ємну усадки.

**Об'ємною усадкою** вилівка називають різницю між об'ємом порожнини ливарної форми  $V_{\phi}$  і об'ємом вилівка  $V_{вил}$  після повного його охолодження:

$$\varepsilon_V = \frac{V_{\phi} - V_{вил}}{V_{вил}} \cdot 100, \quad (1.1)$$

де  $\varepsilon_V$  – об'ємна усадка вилівка, %.



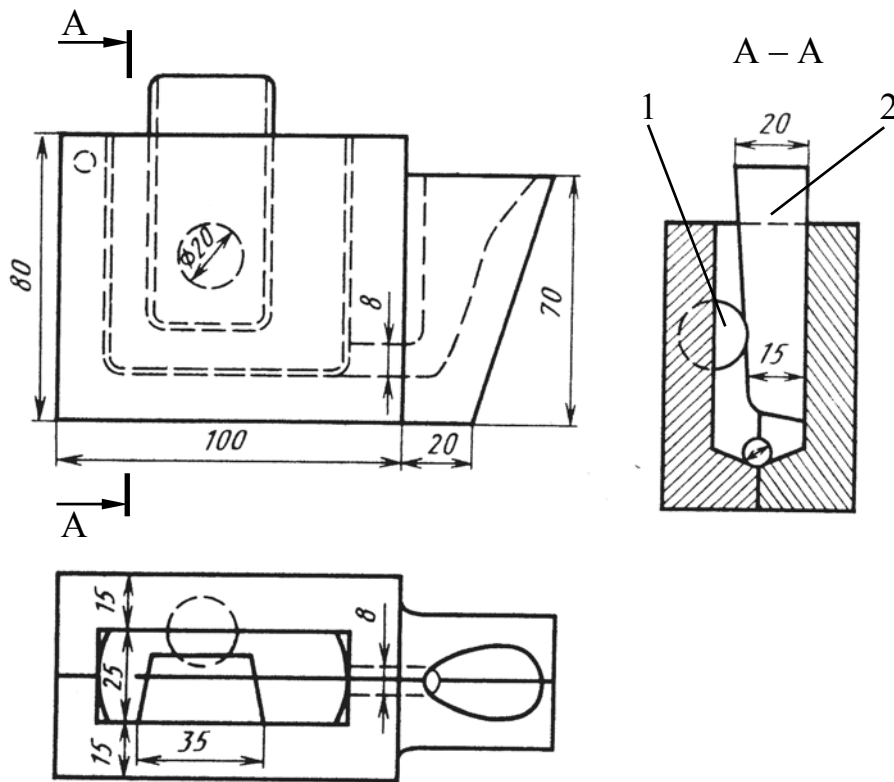


Рисунок 1.4 – Металева форма для отримання кулькової проби на рідкоплинність

Різниця між лінійними розмірами порожнини форми  $l_{\phi}$ , заповненої рідким металом, і розмірами виливка  $l_{вил}$  після охолодження до  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  називається **лінійною усадкою**:

$$\varepsilon_{л} = \frac{l_{\phi} - l_{вил}}{l_{вил}} \cdot 100, \quad (1.2)$$

де  $\varepsilon_{л}$  – лінійна усадка, %.

Об’ємна усадка виявляється у вигляді концентрованих раковин і пористості в теплових вузлах. Лінійна усадка зумовлює відмінність лінійних розмірів форми і виливок.

Лінійна усадка сплавів належить до основних ливарних властивостей, що визначають можливість отримання виливок заданих розмірів і конфігурації. Усадку сплаву обов’язково враховують при конструюванні виливка і розробці технології його отримання.

Лінійна усадка обумовлена термічним стисненням сплаву як твердого тіла при його охолодженні. Відомо, що величина термічного стиснення  $\Delta l$  визначається залежністю:

$$\Delta l = l_0 - l = l_0 - l_0 \cdot [1 - \alpha \cdot (t_0 - t)] = l_0 \cdot \alpha \cdot (t_0 - t), \quad (1.3)$$

де  $l_0$  – лінійний розмір зразка у вихідному стані при температурі  $t_0$ ;

$l$  – розмір зразка, що охолоджується, при температурі  $t < t_0$ ;

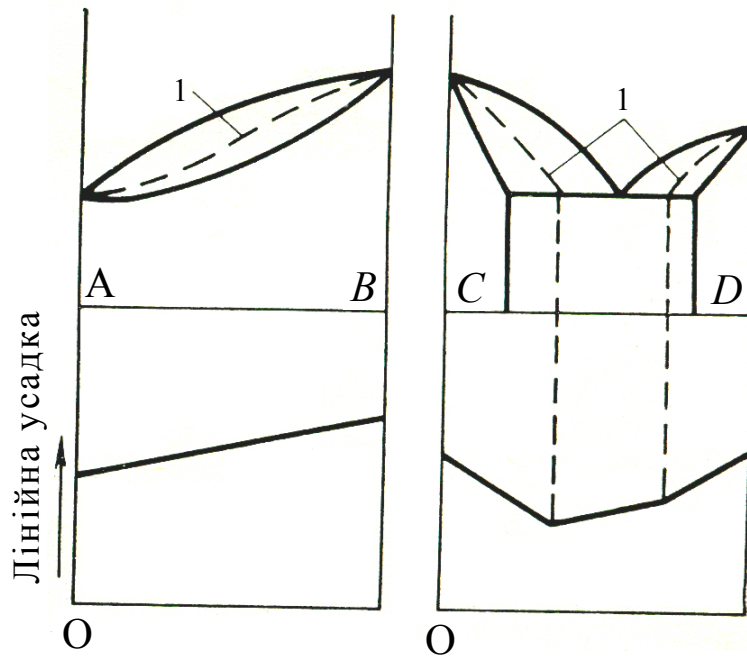
$\alpha$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення (стиснення) матеріалу зразка.

Стосовно лінійної усадки вилівка розмір порожнини форми  $l_{\phi} = l_0$ , початкова температура  $t_0$  рівна температурі, при якій сплав починає поводитися як тверде тіло, температура  $t = 20$  °С, розмір вилівка  $l_{отл} = l_0 \cdot [1 - \alpha \cdot (t_0 - 20)]$ . Отже,

$$\varepsilon_{л} = \alpha \cdot (t_0 - 20) / [1 - \alpha \cdot (t_0 - 20)], \quad (1.4)$$

Розрахунок лінійної усадки металів і сплавів за формулою (1.4) не може дати правильних результатів з ряду причин: а) температурний коефіцієнт лінійного розширення не є величиною постійної; він істотно змінюється з температурою; б) лінійна усадка литих зразків залежить від умов твердіння і охолодження, які не враховуються формулою; в) лінійна усадка сплавів, що мають інтервал кристалізації, починається не при температурі ліквідусу і не при температурі солідусу, а при деякій проміжній температурі, яка називається *температурою початку лінійної усадки*.

Температура початку лінійної усадки характеризується тим, що кількість кристалів, які випали, така, що вони утворюють єдиний каркас, отже зразок даного сплаву починає поводитися як тверде тіло, незважаючи на існування досить великої кількості рідини (до 30 %). Її прояв добре видно на діаграмах залежності лінійної усадки сплавів від складу в подвійних системах з простою евтектикою (рис. 1.5). На кривій лінійної усадки спостерігаються два переломи, які приблизно відповідають точці перетину лінії початку лінійної усадки з евтектичною горизонталлю на діаграмі стану.



1 – лінії температури початку лінійної усадки

Рисунок 1.5 – Лінійна усадка сплавів систем А–В і С–D

Температуру початку лінійної усадки неможливо визначити заздалегідь яким-небудь розрахунком. Вона залежить від умов охолодження, величини кристалів, розгалуженості дендритів. За цих причин лінійну усадку сплавів визначають експериментально на спеціально відлитих зразках. Однакові початкові розміри і форма зразків і постійність умов лиття і твердіння дозволяють отримувати результати, якими можна характеризувати сплави залежно від їхнього складу і стану.

Лінійну усадку сплавів визначають на зразках, що мають вид прямих брусків або прутків, що відливаються в горизонтальному положенні. Спочатку вимірюють лінійний розмір форми  $l_{\phi}$ , потім заливають її розплавом, вилівок виймають і після повного охолодження до нормальної температури вимірюють його розмір  $l_{вил}$ .

У багатьох сплавів спостерігається тимчасове розширення, яке передуює усадці. Це явище називають **передусадковим розширенням**. Воно складає 0,1...0,3%. Його пов'язують з виділенням газів, розширенням кристалічного каркаса із-за розігрівання вилівка у

момент відходу від стінок форми, капілярним тиском рідини в каналах між осями дендритів.

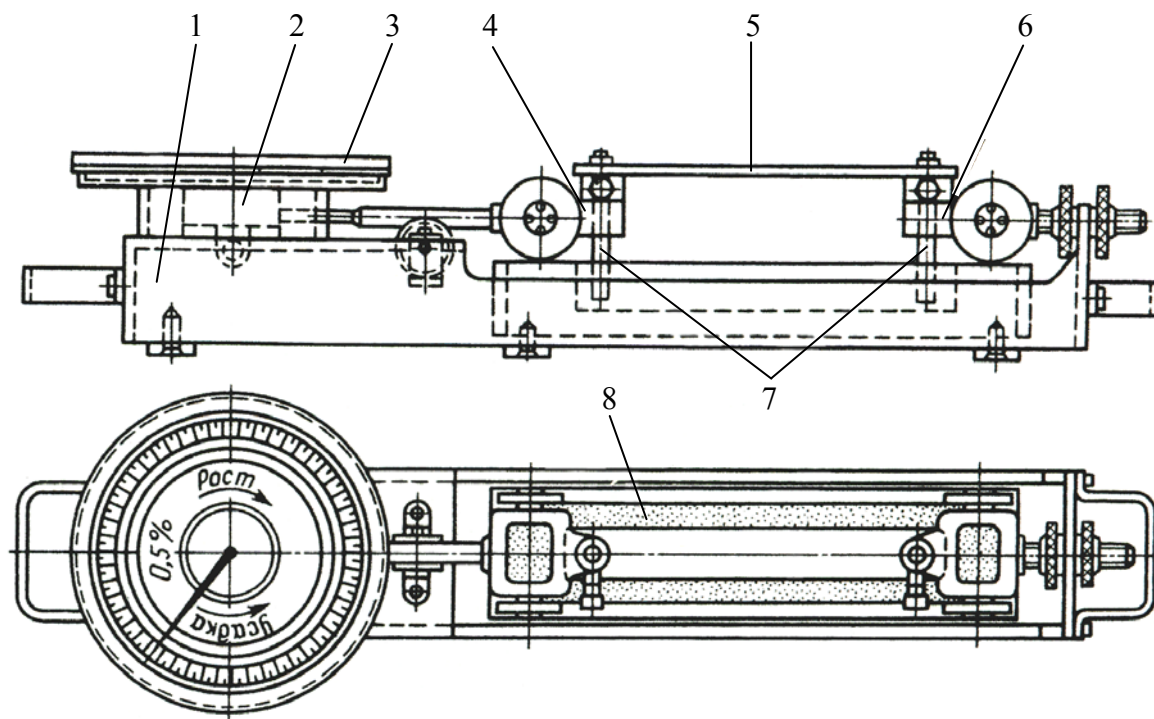
Слід розрізняти лінійну усадку сплаву і лінійну усадку вилівка. Якщо при визначенні лінійної усадки сплавів зразок має таку форму і відлився таким чином, що скорочення розмірів проходить безперешкодно, то знайдене значення лінійної усадки називають також *вільною лінійною усадкою*.

У реальних умовах скороченню розмірів виливок перешкоджають форма внаслідок тертя вилівка об її стінки, стрижні, виступаючі частини. Окрім механічного утруднення усадки, для більшості виливок спостерігається утруднення, пов'язане з відмінністю швидкостей охолодження її окремих частин. Раніше затверділі частини вилівка (тонкі ребра, виступи) перешкоджають усадці в тих місцях, де твердіння відбувається пізніше. Крім того, із-за різночасності твердіння і охолодження внутрішніх і зовнішніх шарів у зовнішніх шарах масивних виливок виникає температурна напруга стиснення. Це приводить до збільшення лінійної усадки даної ділянки вилівка, тому лінійна усадка різних частин вилівка в загальному випадку неоднакова. Як правило, лінійна усадка фасонних виливок рівна або менше лінійної усадки сплаву, а крупних масивних виливок (злитки і т.п.) більше лінійної усадки сплаву.

Для оцінювання лінійної усадки при утрудненні скорочень розмірів виступаючими частинами форми відливають спеціальні зразки з розширеннями на кінцях. Таку усадку називають *утрудненою*.

Для визначення лінійної усадки використовують прилад І.Ф. Большакова або прилад ЦНПТмаша. На рис. 1.6 показана схема приладу І.Ф. Большакова. На металевому каркасі змонтована індикаторна головка з циферблатом. Прилад проградуирований так, що кожна риска шкали відповідає змінненню лінійного розміру зразка завдовжки 200 мм на 0,002 мм, тобто на 0,001 %. У каркас приладу встановлюють форму з порожниною розмірами 30x25x250 мм. Над формою поміщають дві рухомі каретки, одна з яких штоком сполучена з голкою індикатора, а інша закріплена в торцевій стінці каркаса. У кожній з кареток закріплюють шпильки. Нижні кінці

шпильок входять в порожнину форми на глибину 18...20 мм, а верхні виступають на 3...10 мм над каретками. Відстань між центрами шпильок 200 мм встановлюють з точністю до 0,1 мм за допомогою контрольної планки.



1 – металевий каркас; 2 – індикаторна головка; 3 – циферблат; 4, 6 – рухомі каретки; 5 – контрольна планка; 7 – шпилька; 8 – форма

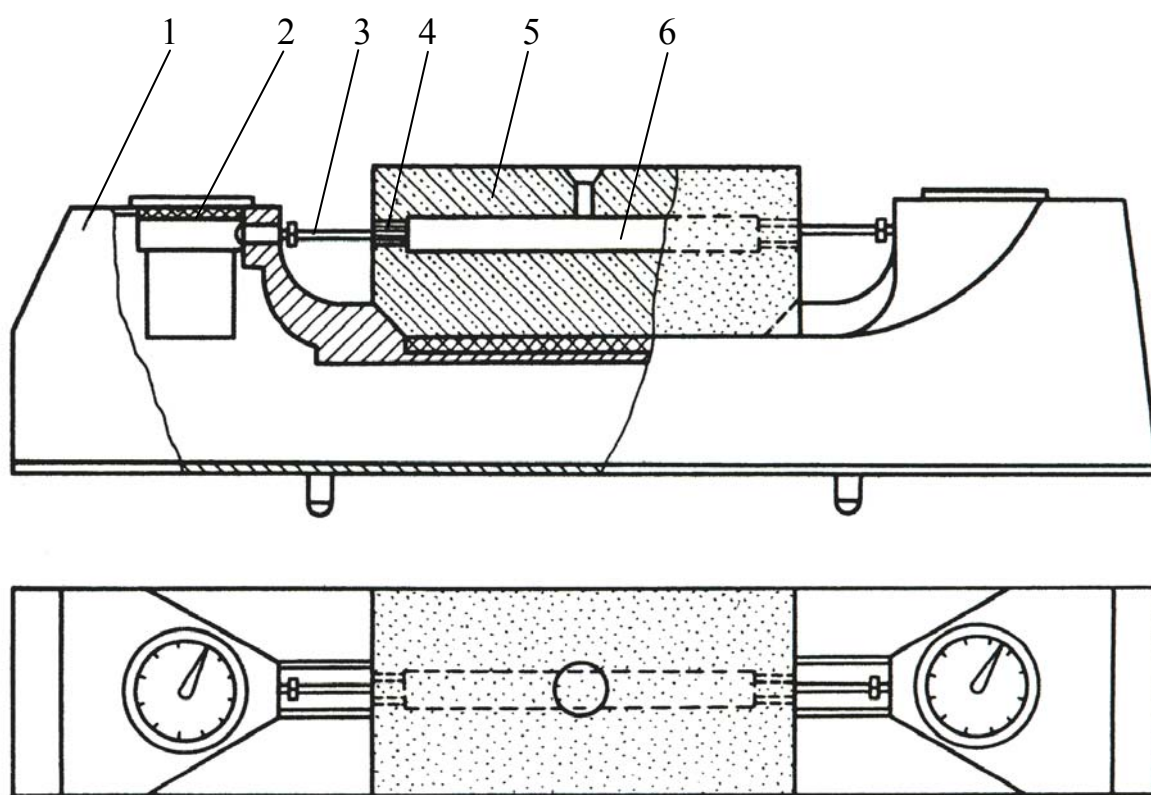
Рисунок 1.6 – Схема приладу І.Ф. Большакова

Перед зняттям контрольної планки з шпильок прилад приводять в початкове положення. Для цього штоком передньої каретки натискають на голку індикатора так, щоб його стрілка, зробивши п'ять обертів по циферблату вправо, зупинялася точно на нулі шкали. У такому положенні задня каретка кріпиться до торцевої стінки каркаса, а передня після зняття контрольної планки залишається у вільному стані, фіксуючи початкове положення.

Після збирання приладу в порожнину форми заливають метал і записують показання індикатора. Одночасно за допомогою термомпари, поміщеної в центрі зразка, вимірюють температуру. По результатах, отриманих за допомогою приладу І.Ф. Большакова,

будують графічну залежність усадки від температури зразка. Шляхом екстраполяції до  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  знаходять величину лінійної усадки сплаву, що вивчається.

Схема приладу ЦНІТмаша для дослідження вільної лінійної усадки представлена на рис. 1.7. Прилад збирають у порожнистій станині, в якій розташована форма з порожниною для заливання зразка і індикатори для вимірювання усадки. Для зменшення теплового потоку до станини приладу під форму підкладають листовий азбест. Теплоізоляція станини має важливе значення для збільшення точності вимірювання.



1 – станина; 2 – індикатор; 3 – патрони; 4 – кварцовий наконечник; 5 – форма; 6 – порожнина для заливання сплаву

Рисунок 1.7 – Схема приладу ЦНІТмаша

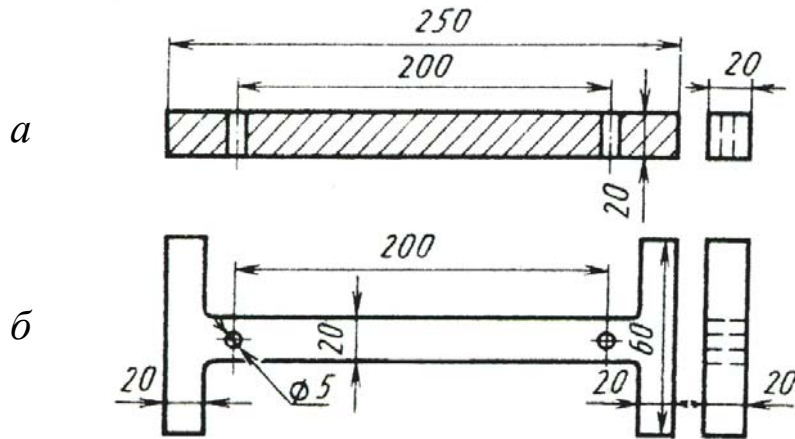
Реєстрація переміщення проводиться одночасно з двох сторін зразка за допомогою двох індикаторів. Індикатор зібраний на базі стандартної головки годинникового типу, в яку вбудована пружина у вигляді кільця. На пружину наклеюють два дротяні датчики

відповідно на розтягнуту і стислу сторону. Датчики сполучені послідовно. Запис показників датчиків проводиться електронним потенціометром КСП-4. Передача переміщень зразка здійснюється через патрони, встановлені у формі і кварцові наконечники, які підтискаються до патронів пружинками, що знаходяться в індикаторних головках. На установці вимірюється усадка зразків завдовжки 200 мм. Градування приладу здійснюється зіставленням показників індикатора і потенціометра КСП-4. Для цього досить зробити одним або обома індикаторами по черзі два-три оберти стрілки по циферблату, тобто перемістити шток на 2...3 мм із зупинкою після кожного переміщення штока. Реєструючий прилад запише ці переміщення у відповідному масштабі на стрічці. Подібне градування проводять перед кожним zalиванням зразка.

Одночасно із записом лінійної усадки проводиться вимірювання температури зразка в процесі твердіння і подальшого охолодження. Термопара встановлюється в центрі зразка. По кривим, записаним на діаграмній стрічці КСП-4 при роботі на приладі ЦНІТмаша, будують графічні залежності лінійної усадки від температури і часу. Шляхом екстраполяції до  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  знаходять величину лінійної усадки сплаву, що вивчається.

На приладах І.Ф. Большакова і ЦНІТмаша визначають вільну лінійну усадку. Вільну і утруднену лінійну усадку визначають також на окремо відлитих зразках. Зразок для визначення вільної усадки має вигляд прутка (рис. 1.8, а).

Кінці зразка для визначення утрудненої усадки (рис. 1.8, б) мають Т-подібну форму за рахунок поперечних полиць. Ці полиці перешкоджають усадці зразка в подовжньому напрямі. На моделі кожного зразка передбачені отвори, які використовують для замірювання розмірів  $l_{\phi}$  и  $l_{вил}$ , необхідних для розрахунку лінійної усадки за формулою (1.2).



*a* – вільна усадка; *б* – утруднена усадка

Рисунок 1.8 – Моделі зразків для визначення усадки

### 1.3.3 Об'ємна усадка

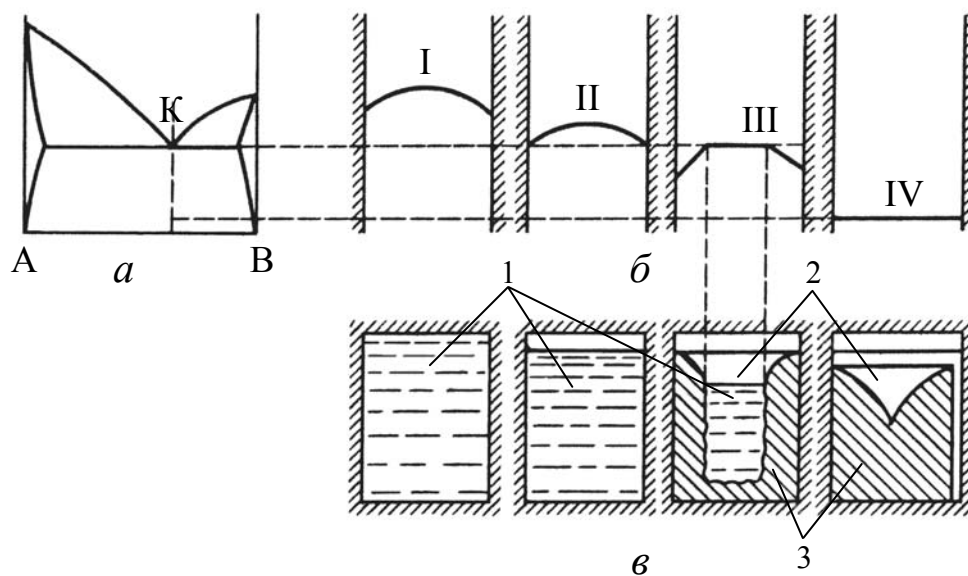
Щільність більшості металів і сплавів при охолодженні зростає, відповідно зменшується питомий об'єм – величина, зворотна щільності. У зв'язку з цим спостерігається безперервне зменшення об'єму розплаву, залитого в ливарну форму, вилівка, що поступово твердіє, і твердого вилівка при зміні температури від температури заливання до нормальної. Якщо прийняти, що охолодження заданої маси розплаву в ливарній формі відбувається тільки по бічній і донній поверхнях, та зміна об'єму супроводжуватиметься пониженням рівня розплаву у формі. Рівень розплаву після утворення твердої кірки на поверхні майбутнього вилівка до моменту повної кристалізації може знижуватися тільки в глибинних шарах, де ще не почалося твердіння. Зміна об'єму в цей період виявляється в утворенні концентрованих усадкових раковин і усадкових пор. Зміна об'єму, що відбувається при охолодженні затверділого вилівка, виявляється в зменшенні її лінійних розмірів. Таким чином, загальна об'ємна усадка металу складається з усадки в рідкому стані, усадки в процесі кристалізації і усадки в твердому стані.

Кількість раковин і пор (усадка в процесі кристалізації) у вилів-



ках залежить від характеру кристалізації сплаву, передусім інтервалу кристалізації, і умов твердіння.

Розглянемо твердіння вилівка зі сплаву К, що кристалізується при постійній температурі (рис. 1.9). Приймемо, що заповнення форми закінчене до кристалізації сплаву в будь-якому місці вилівка і що після заповнення додаткової кількості сплаву у форму не поступає, а охолодження йде рівномірно з усіх боків, окрім верху. Приймемо також, що об'ємна усадка в рідкому і твердому станах пропорційна температурі і що при кристалізації об'єм сплаву зменшується.



1 – рідкий сплав; 2 – усадкова раковина; 3 – твердий шар

*a* – діаграма стану; *б* – діаграми розподілу температури по перетину вилівка; *в* – вилівок у процесі охолодження

Рисунок 1.9 – Схема твердіння сплавів, що не мають інтервалів кристалізації

Відповідно до розподілу температури по перетину вилівка сплав тверднудиме і його об'єм змінюватиметься. У момент закінчення заливання (крива I) форма повністю заповнена рідким сплавом. Охолодження сплаву до температури, розподіл якої характеризується кривою II, супроводжується зменшенням об'єму розплаву, яке виявляється в пониженні його рівня у формі. З цієї миті починається кристалізація сплаву. Досягши температури, розподіл

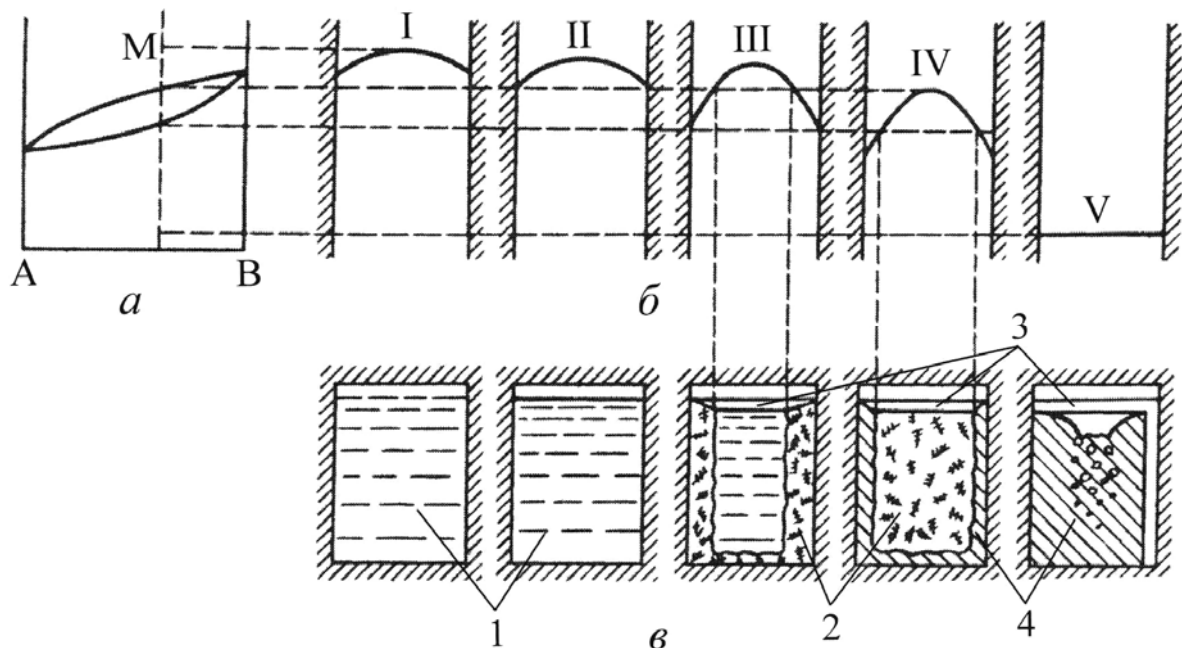
якої характеризується кривою III, на поверхні виливка утворюється твердий шар, а в центральній частині зберігається розплав. Зменшення об'єму під час переходу сплаву з рідкого у твердий стан обумовлює пониження рівня розплаву. У виливка утворюється усадкова раковина, розміри якої збільшуються в міру охолодження до повного твердіння. Досягши розподілу температури, показаного кривою IV, виливок матиме остаточні розміри. Об'ємна усадка в твердому стані виявиться в зменшенні лінійних розмірів виливка пропорційно величині лінійної усадки сплаву.

Отже, якщо сплави не мають інтервалів кристалізації, виливки за будь-яких умов охолодження тверднуть пошарово шляхом поступового наростання твердого шару. Тому об'ємна усадка при кристалізації виявляється у вигляді зосередженої усадкової раковини.

Твердіння виливка зі сплаву, що має інтервал кристалізації, відрізняється від твердіння виливка зі сплаву, що кристалізується при постійній температурі.

Розглянемо твердіння виливка зі сплаву M (рис. 1.10) за умов заливання і охолодження, які були прийняті для сплаву K, що кристалізується при постійній температурі (рис. 1.9). У момент закінчення заливання (крива I) форма повністю заповнена рідким сплавом. Охолодження розплаву до температури, розподіл якої відповідає кривій II, приводить до об'ємної усадки розплаву, що виявляється в пониженні рівня розплаву у формі. З цієї миті починається кристалізація сплаву. Досягши розподілу температури, що відповідає кривій III, у виливку утворюється двофазна область. У міру утворення і зростання кристалів в цій області знижується рівень розплаву у виливка, утворюється усадкова раковина, глибина якої збільшується аж до досягнення температури, розподіл якої відповідає кривій IV. У інтервалі між кривими III і IV на поверхні виливка росте твердий шар сплаву, а в центральній частині зберігається розплав, який живить двофазну область. Досягши температури, розподіл якої відповідає кривій IV, двофазна область доходить до центру виливка, а на поверхні виливка утворюється шар твердого сплаву. При цьому росте глибина усадкової раковини. Подальше охолодження виливка до нормальної температури (крива V) приводить до зникнення

двофазної області, деякого збільшення об'єму усадкової раковини, утворення усадкової пористості і скорочення розмірів виливка.



1 – рідкий сплав; 2 – двофазна область; 3 – усадкова раковина; 4 – твердий сплав

*a* – діаграма стану; *б* – діаграми розподілу температури по перетину виливка; *в* – виливок у процесі охолодження

Рисунок 1.10 – Схема твердіння сплаву з інтервалом кристалізації

Можна відзначити, що якщо сплав має інтервал кристалізації, у виливка, що твердіє, з'являється двофазна область. Поки в середній частині виливка є рідкий сплав, об'ємна усадка при кристалізації виявляється в утворенні усадкової раковини. Коли ж рідина зникає і двофазна область розповсюджується на всю центральну частину виливка, усадкова раковина перестає заглиблюватися і починається утворення пористості (рихлість) в серединній частині виливка. Пористість утворюється, по-перше, в результаті відтоку розплаву на заповнення усадки (на живлення) периферійних шарів двофазної області, що твердіють, по-друге, внаслідок усадки при кристалізації розплаву між гілками дендритів в самій двофазній області.

Об'єм усадкової пористості у виливка визначається розмірами двофазної області на кінцевій стадії твердіння, кількістю розплаву, що є там, і величиною об'ємної усадки. Отже, у загальному випадку об'єм усадкової пористості у виливка повинен залежати від величини інтервалу кристалізації сплаву, розподілу температури по перетину виливка, швидкості кристалізації сплаву (інтенсивності наростання твердої фази в межах інтервалу кристалізації), величини об'ємної усадки сплаву.

Якщо простежити за проявом об'ємної усадки в процесі кристалізації одного і того ж виливка, що отримується в однакових умовах з різних сплавів системи з простою евтектикою, то виявляється залежність, представлена на рис. 1.11. У виливка з чистих металів і сплавів евтектичного складу об'ємна усадка при кристалізації виявляється тільки у вигляді зосередженої усадкової раковини. У виливках зі всіх інших сплавів, що мають інтервал кристалізації, є усадкова раковина і усадкова пористість. Найбільший об'єм усадкової пористості виявляється у виливках зі сплавів, розташованих між чистими металами і евтектичним складом.

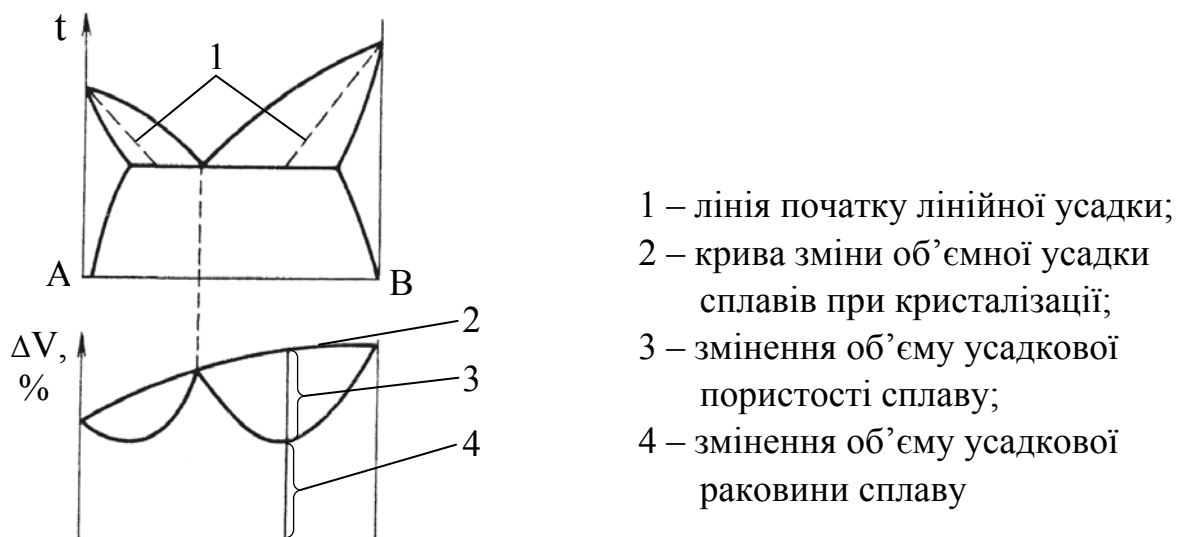


Рисунок 1.11 – Вплив складу сплаву на усадку в процесі кристалізації

На характер залежності, представленій на рис. 1.11, істотно впливають умови охолодження. Збільшення інтенсивності

охолодження виливка в ході твердіння викликає скорочення двофазної області, внаслідок чого об'єм пористої області скорочується, об'єм усадкової пористості зменшується, а об'єм усадкової раковини збільшується. Зменшення інтенсивності охолодження виливка викликає зворотні зміни: об'єм усадкової пористості зростає, а усадкової раковини зменшується. У разі достатньо малої інтенсивності охолодження двофазна область розповсюджується на всі перетини виливка, і тому усадкова раковина взагалі не утворюється, а об'ємна усадка виявляється тільки у вигляді розсіяної по всьому об'єму виливка усадкової пористості.

Подібне зустрічається і у виливках з широкоінтервальних сплавів, отримуваних у формах з матеріалів з малою теплопоглинальною здатністю: у виливках зі сплавів на основі алюмінію з інтервалом кристалізації більше 80 °С і виливках з олов'яних бронз з 5...10 % олова, отримуваних в піщаних формах.

Експериментальне визначення об'ємної усадки сплавів проводиться на спеціальних виливках-зразках простої форми (куля, куб, конус, циліндр). Об'ємну усадку  $\varepsilon_V$  обчислюють за формулою:

$$\varepsilon_V = \frac{V_\phi - V_{зр}}{V_\phi} \cdot 100, \quad (1.5)$$

де  $V_\phi$  – об'єм форми, см<sup>3</sup>;

$V_{зр}$  – об'єм зразка, см<sup>3</sup>.

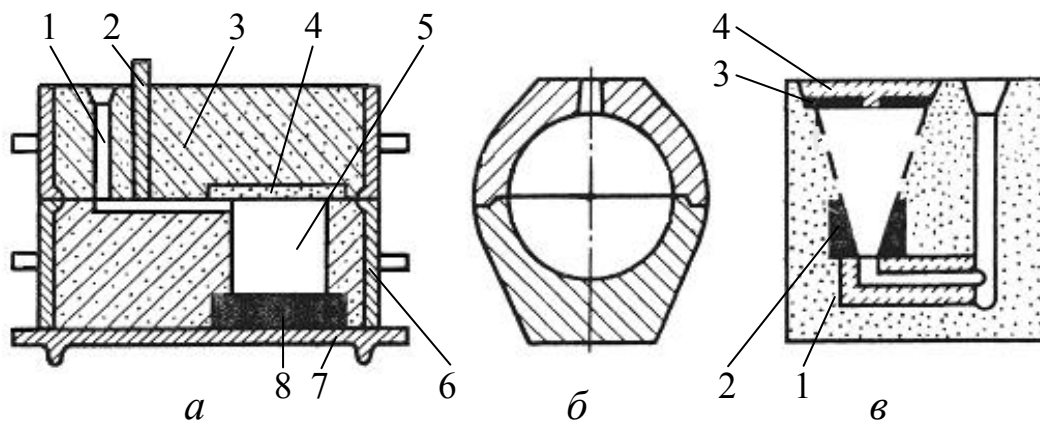
Оскільки умови отримання зразків витримуються постійними, значення об'ємної усадки, що отримують, можна вважати характеристикою сплаву і визначати, наприклад, закономірності об'ємної усадки сплаву у зв'язку з його розташуванням на діаграмі стану.

Для визначення об'ємної усадки сплавів використовують зразки у формі куба, циліндра, конуса або кулі. Куб відливають в піщаній формі, кулю і циліндр – в кокілях. Модель куба для зручності формування має формувальні ухили і, по суті, є усіченою пірамідою.

У піщану форму метал заливають через стояк і тонкий живильник, який після заповнення порожнини форми швидко твердне, запобігаючи тим самим надходженню металу зі стояка в порожнину форми, у міру усадки розплаву. Часто для припинення

надходження розплаву у форму живильник перекривають металевою пластиною (рис. 1.12, *а*). Заливання кулі ведуть через низький стояк, об'єм якого дорівнює біля 1 % об'єму кулі (рис. 1.12, *б*).

Конусний зразок отримують заливкою роз'ємної оболонкової форми, в яку встановлюють холодильники і піщані стрижні для створення направлено охолодження з метою виведення відкритої усадкової раковини на верхню поверхню (рис. 1.12, *в*).



1 – стояк; 2 – сталева пластина; 3 – формувальна суміш; 4 – азбест; 5 – порожнина форми; 6 — опока; 7 – підпочна плита; 8 – холодильник; 9, 11 – піщані стрижні; 10 – кільцевий холодильник

*а* – кубічної проби; *б* – кульової проби; *в* – конусної проби

Рисунок 1.12 – Форми для отримання проб на об'ємну усадку

Оскільки усадка при кристалізації виявляється у вигляді усадкових раковин неправильної форми і усадкової пористості, визначити об'єм твердого зразка шляхом геометричних вимірювань не представляється можливим. Тому цей об'єм знаходять діленням маси зразка на щільність сплаву.

Для визначення щільності невелику порцію досліджуваного сплаву заливають в металеву виливницю для отримання злитка розміром 10x10x60 мм. Швидке охолодження сплаву у виливниці дозволяє отримати нижню частину злитка щільною, без усадкових пор. Від нижньої частини злитка відрізують зразок заввишки 10 мм; обробляють його поверхню наждачним папером. Зважуючи зразок на повітрі і в рідині, визначають щільність сплаву за формулою:

$$\rho_{\text{спл}} = \frac{\gamma_p \cdot m_n}{m_n - m_p}, \quad (1.6)$$

де  $\gamma_p$  – щільність рідини, г/см<sup>3</sup>;

$m_n$  – маса зразка на повітрі, г;

$m_p$  – маса зразка в рідині, г;

$m_n - m_p$  – маса витисненої рідини, г.

Для зручності зважування зразок підвішують на капроновій нитці, маса і об'єм якої не вносять великої погрішності в результати визначення щільності сплаву. По знайденому значенню щільності сплаву і масі зразка  $m_{зр}$  (куба, кулі, циліндра) знаходять об'єм сплаву в цьому зразку за формулою:

$$V_{зр} = m_{зр} / \rho_{\text{спл}}. \quad (1.7)$$

Початковий об'єм порожнини форми  $V_{\phi}$  при відливанні куба обчислюють по розмірах моделі (усіченої піраміди):

$$V_{\phi} = H \cdot (S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 \cdot S_2}) / 3, \quad (1.8)$$

де  $H$  – висота моделі, см;

$S_1, S_2$  – площі основ піраміди, см<sup>2</sup>.

При відливанні кулі об'єм порожнини форми визначають за формулою:

$$V_{\phi} = 4 \cdot \pi \cdot R^3 / 3 \quad (1.9)$$

де  $R$  – радіус кулі, см.

Об'єм відкритих усадкових раковин визначають шляхом їх заповнення рідиною з мірного посуду.

Для визначення пористості зразок зважують у воді. Заздалегідь його поверхню покривають тонким шаром парафіну для запобігання попаданню вологи в пори. По різниці мас зразка на повітрі і у воді

визначають його об'єм. Різниця об'ємів зразка і сплаву в ньому і є об'єм пор.

### **Питання для самоконтролю**

1. Що таке сплав? Що таке металевий сплав?
2. Які елементи сплавів називаються легуючими?
3. Що таке лігатури?
4. Як класифікують сплави кольорових металів?
5. Які вимоги висувають до сплавів кольорових металів?
6. Які властивості мають металеві сплави?
7. Перелічить фізичні властивості металевих сплавів.
8. Які властивості сплавів відносяться до технологічних?
9. Що таке рідкоплинність сплаву? Які є види рідкоплинності?
10. Яку особливість вносить процес кристалізації сплаву в заповнення ливарних форм?
11. Перерахуйте властивості ливарної форми, які впливають на заповнення її розплавом.
12. Які проби застосовують для оцінки рідкоплинності сплавів?
13. Який зв'язок між рідкоплинністю сплаву та його розташуванням на діаграмі стану? Яка природа цього зв'язку?
14. Як збільшити рідкоплинність розплаву?
15. Яка основна причина лінійної усадки?
16. У чому відмінність вільної і утрудненої лінійної усадки?
17. Чому не можна визначати величину лінійної усадки сплавів розрахунковим методом?
18. У чому полягає відмінність між лінійною усадкою сплаву і лінійною усадкою вилівка?
19. Які фізичні явища лежать в основі об'ємної усадки вилівок?
20. Як впливає інтервал кристалізації сплаву на прояв об'ємної усадки?
21. Як впливають умови охолодження вилівка на прояв об'ємної усадки?
22. Які умови впливають на ширину пористої зони у вилівка?
23. Яка мета дегазації розплаву при визначенні об'ємної усадки вилівок?



## 2 ВИРОБНИЦТВО ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

### 2.1 Класифікація, склад і властивості титанових сплавів

Чистий титан і його сплави мають цінний комплекс фізико-хімічних і механічних властивостей: високу питому міцність, задовільну пластичність при кімнатній, підвищеній і мінусовій температурах, хорошу зварюваність, малий коефіцієнт лінійного розширення, високу корозійну стійкість у ряді агресивних середовищ та ін. У зв'язку з цим титанові сплави знаходять широке застосування в авіабудуванні, суднобудуванні, хімічному машинобудуванні й інших галузях техніки.

Нелегований титан має недоліки, що обмежують застосування його в чистому вигляді. До вказаних недоліків відносяться порівняно невисока міцність і досить швидке розупорядкування металу зі зростанням температури, а також схильність металу до повзучості, знижені втомна міцність і корозійна стійкість в деяких агресивних середовищах.

Вказані недоліки можуть бути значною мірою усунені за рахунок легування титану, в результаті якого його міцнісні характеристики можуть бути доведені до рівня легованих сталей і істотно підвищена корозійна стійкість.

*Елементи, що використовують для легування титану*, за характером впливу їх на фазовий склад сплавів поділяють на:

- $\alpha$ -стабілізатори – алюміній, галій, індій, кисень, азот, вуглець;
- $\beta$ -стабілізатори – молібден, вольфрам, ванадій, ніобій, тантал, хром, залізо, кремній, манган;
- нейтральні зміцнювачі – цирконій, гафній, олово, германій.

З використанням вказаних стабілізаторів можна отримувати сплави трьох основних типів –  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $(\alpha+\beta)$ , кожен з яких має свої характерні властивості. Крім основних типів титанових сплавів, є сплави типу  $\alpha+x$ , де  $x$  – фаза, що складається зі сполук типу  $TiAl_3$ ,  $TiFe$ ,  $TiMn$ ,  $TiCr$ ,  $TiC$ .

У промисловості використовують ливарні та деформівні титанові сплави. Незалежно від призначення по класифікації С. Г.

Глазунова їх поділяють за структурою на п'ять груп:  $\alpha$ -сплави; псевдо- $\alpha$ -сплави;  $\beta$ -сплави; псевдо- $\beta$ -сплави;  $(\alpha+\beta)$ -сплави.

До  **$\alpha$ -сплавів** відносяться сплави з переважним вмістом  $\alpha$ -твердого розчину титану (більше 95 %). До цієї групи відноситься, зокрема, титан технічної чистоти. Ці сплави, як правило, легуються  $\alpha$ -стабілізаторами і нейтральними зміцнювачами. В області температури фазового перетворення  $\alpha \rightarrow \beta$  гексагональна  $\alpha$ -фаза має вищу жароміцність, ніж кубічна  $\beta$ -фаза. Введення в сплав елементів, стабілізуючих  $\alpha$ -фазу, дозволяє підвищити його жароміцність.

Для підвищення міцності і жаростійкості  $\alpha$ -сплави можуть легуватися також розчинними в  $\alpha$ -фазі  $\beta$ -стабілізуючими металами, наприклад, ванадієм, ніобієм, танталом і сріблом, які підвищують жароміцність цих сплавів.  $\alpha$ -сплави з добавкою  $\beta$ -стабілізаторів називають **псевдо- $\alpha$ -сплавами** або мартенситними сплавами (оскільки при різкому охолодженні вони утворюють мартенситну структуру), структура яких представлена  $\alpha$ -фазою і невеликою кількістю  $\beta$ -фази (до 5 %) або інтерметалідів.

Основою для створення промислових  $\alpha$ -сплавів є система Ti-Al. Алюміній, за рідкісним виключенням, присутній практично у всіх сплавах титану. Тому система алюміній-титан для титанових сплавів має таке ж значення, як система залізо-вуглець для сплавів на основі заліза.

Алюміній є єдиним широко вживаним металом, що стабілізує  $\alpha$ -фазу. Введення алюмінію в кількості до 13 % дозволяє отримувати сплави з хорошою жароміцністю. Крім того, алюміній знижує щільність сплавів і їх вартість.

В цілому  $\alpha$ -сплави характеризуються високою жароміцністю. Вони термічно стабільні при тривалому нагріві, добре чинять опір газовій корозії і зварюються. Але пластичність сплавів цього типу і, отже, здатність до холодної деформації нижча, ніж у  $\beta$ -сплавів і титану технічної чистоти.  $\alpha$ -сплави не зміцнюються при термічній обробці, що є істотним їх недоліком. Ці сплави можуть піддаватися тільки відпалу для зняття напруги і нагартовування.

До  **$\beta$ -сплавів** відносяться сплави, у структурі яких переважає твердий розчин на основі  $\beta$ -модифікації титану. Основними

легуючими елементами є  $\beta$ -стабілізатори. До складу цих сплавів майже завжди входить алюміній, який їх зміцнює.

$\beta$ -сплави завдяки кубічним решіткам легше, ніж  $\alpha$ - і  $(\alpha+\beta)$ -сплави, піддаються холодній деформації. Вони добре зміцнюються під час термообробки, що полягає в гартуванні і старінні, і задовільно зварюються.  $\beta$ -сплави мають достатньо високу жароміцність, проте при легуванні їх тільки  $\beta$ -стабілізаторами жароміцність зі зростанням температури вище 400 °С помітно знижується. Опір повзучості і термічна стабільність сплавів цього типу нижчі, ніж у сплавів на основі  $\alpha$ -твердого розчину.

Структура *псевдо- $\beta$ -сплавів* у відпаленому стані представлена  $\beta$ -фазою і невеликою кількістю  $\alpha$ -фази. У цих сплавах гартуванням або нормалізацією з  $\beta$ -області можна легко отримувати однофазну  $\beta$ -структуру.

*$(\alpha+\beta)$ -сплави* отримують шляхом легування титану елементами, створюючими  $\alpha$ - і  $\beta$ -тверді розчини з різним співвідношенням цих фаз, і елементами, що розширюють температурну область фазових перетворень титану. Двофазна структура сплавів виникає при нагріві під гартування і фіксується різким охолодженням.

Термообробка  $(\alpha+\beta)$ -сплавів дозволяє помітно підвищити їх міцність при відносно невеликому погіршенні пластичності. Вони мають обмежену зварюваність, після зварки необхідна термообробка зварних швів.

Окрім алюмінію, найбільш важливими легуючими елементами титанових сплавів є ванадій і молібден. Система Ti-Al-V покладена в основу більшості високоміцних титанових сплавів, а система Ti-Al-Mo – в основу жароміцних титанових сплавів. Найбільш поширеним титановим сплавом загального призначення є розроблений Хансеном сплав, що містить 6 % Al і 4 % V, названий умовно “сплавом 6-4”. Цей сплав в розвитку виробництва титанових сплавів зіграв таку ж роль, як дуралюміній у виробництві алюмінієвих сплавів.

Окрім алюмінію, ванадію і молібдену, при виробництві титанових сплавів як легуючі компоненти використовуються ще, принаймні, сім металів – хром, манган, залізо, мідь, олово, цирконій, вольфрам і рідше ніобій і тантал. Паладій і платину додають до

чистого титану для підвищення його корозійної стійкості, зокрема в мінеральних кислотах.

Хімічний склад вітчизняних промислових ливарних титанових сплавів приведений в табл. 2.1, граничний вміст домішок в цих сплавах – в табл. 2.2.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад ливарних титанових сплавів

Марка сплаву	Вміст*, %					
	Al	Mo	V	Zr	Si	інші
$\alpha$ -сплави						
BT1Л	–	–	–	–	–	–
BT5Л	4,1...6,2	< 0,5	< 0,5	–	–	–
Псевдо- $\alpha$ -сплави						
BT20Л	5,5...7,5	0,5...2,0	0,8...1,8	1,5...2,5	–	–
( $\alpha+\beta$ )-сплави						
BT3-1Л	5,3...7,0	2,0...3,0	–	–	0,15...0,40	0,8...2,3 Cr 0,2...0,7 Fe
BT6Л	5,0...6,5	–	3,5...4,5	–	–	–
BT9Л	5,6...7,0	2,8...3,8	–	0,8...2,0	0,20...0,35	–
BT14Л	4,3...6,3	2,5...3,8	0,9...1,9	–	–	–
Примітка: * Ti – основа						

Таблиця 2.2 – Граничний вміст домішок у ливарних титанових сплавах

Сплав	Вміст, % не більше*							
	C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Fe	Si	Zr	W
$\alpha$ -сплави								
BT1Л	0,07	0,20	0,04	0,010	0,30	0,10	–	–
BT5Л	0,20	0,20	0,05	0,015	0,35	0,20	0,80	0,20
псевдо- $\alpha$ -сплави								
BT20	0,15	0,15	0,05	0,015	0,30	0,15	–	–
( $\alpha+\beta$ )-сплави								
BT3-1Л	0,15	0,18	0,05	0,015	–	–	0,50	0,20
BT6Л	0,10	0,15	0,05	0,015	0,30	0,15	0,30	0,20
BT9Л	0,15	0,15	0,05	0,015	0,30	–	–	0,20
BT14Л	0,12	0,15	0,05	0,015	0,60	0,15	0,30	0,20
Примітка: * Сума інших домішок – не більше 0,30 %.								

Ливарні властивості сплавів залежать від величини їх температурного інтервалу кристалізації. Для промислових ливарних титанових сплавів ця величина невелика. Вона не перевищує 50...70 °С, тому з ливарних титанових сплавів отримують складні за конфігурацією і тонкостінні виливки відповідального призначення.

Титан і сплави на його основі мають хорошу рідкоплинність. Лінійна усадка їх складає 1,5 % під час лиття в керамічні форми і 2,0...2,3 % під час заливання в металеві форми. Об'ємна усадка при кристалізації не перевищує 3 %. Титанові сплави мають малу схильність до утворення усадкових тріщин.

Міцнісні властивості ливарних титанових сплавів близькі до властивостей сплавів, що пройшли гарячу пластичну обробку. В той же час значення відносного подовження, відносного звуження, ударної в'язкості і характеристики втоми нижчі, ніж у деформівних сплавів.

За хімічним складом деформівні і ливарні сплави однакові. Відмінність полягає в тому, що в ливарних сплавах допускається більший вміст домішок.

Залежно від призначення титанові сплави поділяють на чотири групи: 1) зварювані конструкційні; 2) високоміцні; 3) жароміцні; 4) сплави зі спеціальними властивостями (корозійностійкі, для криогенних температур).

До першої групи відносять нелегований титан (BT1-0), сплави потрійної системи Ti-Al-Mn (OT4) з гарантованою міцністю 500, 600 і 700 МПа, сплави BT5-1 і BT20 з гарантованою міцністю 750 і 950 МПа відповідно.

До другої групи відносять сплави з межею міцності понад 1000 МПа при кімнатній температурі: BT6, BT14, BT16, BT22. Всі вони, окрім алюмінію, містять в своєму складі ванадій або молібден і ванадій.

До третьої групи відносять сплави, леговані алюмінієм, молібденом і цирконієм (або хромом): BT3-1, BT9.

У четверту групу входять сплави з молібденом і паладієм і сплави BT5-1 і BT6 підвищеної чистоти.

До *недоліків* титанових сплавів відносяться: висока хімічна активність титану при високих температурах, особливо в рідкому стані; низькі антифрикційні властивості; утруднена оброблюваність різанням; вища вартість виробництва титанових сплавів порівняно з алюмінієвими, магнієвими або мідними сплавами.

## **2.2 Особливості плавки титанових сплавів**

При нагріві на повітрі титан активно вступає у взаємодію зі всіма газами. При взаємодії з киснем на поверхні титану утворюється зовнішній щільний шар оксиду титану  $TiO_2$ . Дифузія кисню в глиб титану приводить до утворення під шаром  $TiO_2$  рихлого прошарку з  $TiO_2$  і  $TiO$  та шару титану з підвищеним вмістом кисню, який називають газонасиченим. При кристалізації в системі  $Ti-O$  утворюється ряд хімічних сполук:  $TiO$ ,  $Ti_2O_3$ ,  $TiO_2$  та ін. Зі збільшенням вмісту кисню підвищуються міцність і твердість титану, а ударна в'язкість, відносне подовження – різко зменшуються. У зв'язку з цим вміст кисню в титанових сплавах не має перевищувати 0,15...0,20 %.

В межах до 0,2 % кожна сота частка відсотка кисню підвищує межу міцності на 12 МПа, твердість – на 40 МПа і знижує відносне подовження і відносне звуження на 1...2 %.

Азот утворює з титаном розчини вкорінення, стабілізує  $\alpha$ -фазу і зміцнює його. Кожна сота частка відсотка азоту підвищує межу міцності титану на 19,6 МПа і твердість – на 59 МПа. При вмісті 0,2 % азоту титан стає крихким.

Розчинення кисню і азоту в титані є необоротним процесом.

Вуглець з титаном утворює стійкий карбід  $TiC$ , підвищує температуру його поліморфного перетворення, і в області малих концентрацій кожна сота частка відсотка вуглецю збільшує межу міцності на 7 МПа і твердість – на 19 МПа.

Висока реакційна здатність, схильність до активної хімічної взаємодії з киснем, азотом, вуглецем і іншими елементами не дозволяють плавити титан і його сплави у звичайних металургійних печах. Плавлення титану необхідно проводити в умовах, що

запобігають насиченню рідкого металу газами і іншими шкідливими домішками.

Висока температура плавлення титану ( $1668 \pm 5$  °C) в поєднанні з високою хімічною активністю створює великі труднощі під час плавлення і лиття сплавів на основі титану. Для запобігання окрихлювання титану внаслідок забруднення газами, плавку і лиття проводять у високому вакуумі або в атмосфері інертного газу (аргону і гелію) високої чистоти, а також не допускають зіткнення металу з вогнетривкими матеріалами. У практиці вітчизняних заводів переважно використовують вакуумну плавку при залишковому тиску в печі  $1,33 \dots 0,13$  Па.

В даний час розроблено декілька методів отримання титану, що запобігають забрудненню металу газами або вогнетривкими матеріалами: вакуумна дугова плавка; плавка в печі з гарнісажем; плавка в електрошлаковій печі; плазмово-дугова плавка; індукційна плавка в графітовому тиглі; електронно-променева плавка.

Для всіх видів плавок, за винятком індукційної, для формування злитка при плавленні титану застосовують водоохолоджуваний мідний кристалізатор, а під час гарнісажної плавки – також графітовий тигель.

Основним методом одержання титану в даний час є вакуумна дугова плавка. Під час вакуумної дугової плавки процес плавлення металу відбувається в результаті “горіння” електричної дуги між розплавленим металом і електродом. Процеси плавлення і кристалізації злитків протікають одночасно.

Спосіб гарнісажної плавки дозволяє наплавляти рідкий метал відразу на весь злиток, фасонний вилівок або заготівку, наприклад, електрод, що витрачається, для другого переплавлення. Ця плавка характеризується наявністю на внутрішній поверхні плавильного тигля шару твердого титану або “гарнісажу”, з яким стикається розплавлений метал. Під час плавки весь метал розплавляється електричною дугою в металевому або графітовому тиглі з титановим “гарнісажем”, звідки рідкий титан зливається у форму, а гарнісаж або відокремлюють від металевого тигля і використовують під час подальшої плавки як електрод, що витрачається, або залишають

(наприклад, в графітовому тиглі) для захисту від забруднення вуглецем чергових плавок титану. Спосіб гарнісажної плавки дозволяє переплавляти будь-яку кількість відходів, отриманий метал має високу однорідність, тугоплавкі включення “вмерзають” у гарнісаж і не переходять у злиток.

Для електрошлакової плавки джерелом нагріву є джоулева теплота, що виділяється при проходженні струму через шар флюсу (фториду кальцію), який є елементом опору. Процес здійснюється за схемою електрода, що витрачається. Під час плавки параметри процесу легко регулюються, поверхня злитків виходить такою, що злитки можна використовувати для подальших переробок без обточування. Крім того, можна отримувати злитки плоского і квадратного перетину, що дуже зручно для прокатування.

Спосіб плазмово-дугової плавки дозволяє переплавити сипку шихту, що містить будь-яку кількість відходів. Як джерело теплоти в цьому процесі використовують потік іонізованого газу-плазми, що надходить у зону плавлення спеціальними пристроями – плазмотронами. Під час плазмової плавки, яка може здійснюватися також і за схемою електрода, що витрачається, підвищується безпека процесу, поверхня злитків краща, ніж під час дугової плавки.

Спосіб індукційної плавки передбачає використання головним чином графітового тигля, при цьому весь метал, що переплавляється, знаходиться в розплавленому стані на відмінність, наприклад, від вакуумної дугової плавки, коли формування злитка з рідкої ванни металу в мідному водоохолоджуваному кристалізаторі відбувається поступово.

Щільний графіт є одним з тих небагатьох речовин, які витримують дію рідкого титану. В результаті реакцій між графітом і розплавленим титаном на поверхні графіту утворюється шар стійкого карбіду титану, який запобігає безпосередньому зіткненню розплавленого металу з графітом. Оскільки вуглець переходить в титан тільки в результаті дифузії через шар карбіду, розчинення вуглецю в розплавленому титані відбувається повільно. При використанні як тигель вогнетривких матеріалів титан сильно ними забруднюється.



Окрім перерахованих способів, випробувані і знаходяться в стадії розробки нові способи плавлення, які розглянуті нижче.

### **2.3 Плавка у вакуумно-дугових печах**

Плавка у вакуумі має істотну перевагу порівнянно з плавкою в захисній атмосфері. Титанова губка містить деяку кількість домішок, зокрема летких: водень, хлористий магній, магній, воду та ін. Процес видалення летких домішок під час плавлення відбувається значно швидше у вакуумі, ніж в нейтральному середовищі, оскільки тиск газу пригнічує процеси випаровування. Але навіть у вакуумі домішки не видаляються повністю за одну переплавку, тому злитки титанових сплавів обов'язково піддають другому переплавленню. Це робиться також для повнішого усереднювання хімічного складу злитків, оскільки під час одноразового переплавлення не забезпечується достатньо рівномірний розподіл легуючих компонентів в злитку.

Найбільшого поширення набула технологія виробництва злитків, що складається з приготування шихти, пресування електрода, що витрачається, першої вакуумної дугової плавки у водоохолоджуваному кристалізаторі, другої вакуумної дугової плавки в кристалізаторі більшого діаметру, механічної обробки злитків, контролю хімічного складу, механічних властивостей і наявності внутрішніх дефектів.

Шихта (суміш титанової губки, легуючих компонентів і зворотних відходів у заданих кількостях) після усереднювання формується в електроди, що витрачаються, на спеціальних пресах горизонтального або вертикального типу. Найкращі результати дає безперервний метод пресування на вертикальних пресах, який забезпечує отримання одноріднішого у поперечному перетині і достатньо довгого електрода. Можливе отримання електродів, що витрачаються, діаметром 350...650 мм.

Першу і другу переплавки здійснюються в однакових за конструкцією печах, що розрізняються тільки розмірами кристалізатора і джерелами струму. Печі, що використовуються в даний час в промисловості, дозволяють отримувати злитки першого

переплавлення діаметром 560...850 мм, завдовжки 2000...2600 мм і масою 2,5..5,0 т. Діаметр злитків другого переплавлення дорівнює 650...950 мм, маса близько 2,5...10 т. Для першого переплавлення використовують джерела з силою струму 25 кА, для другого – 37 кА.

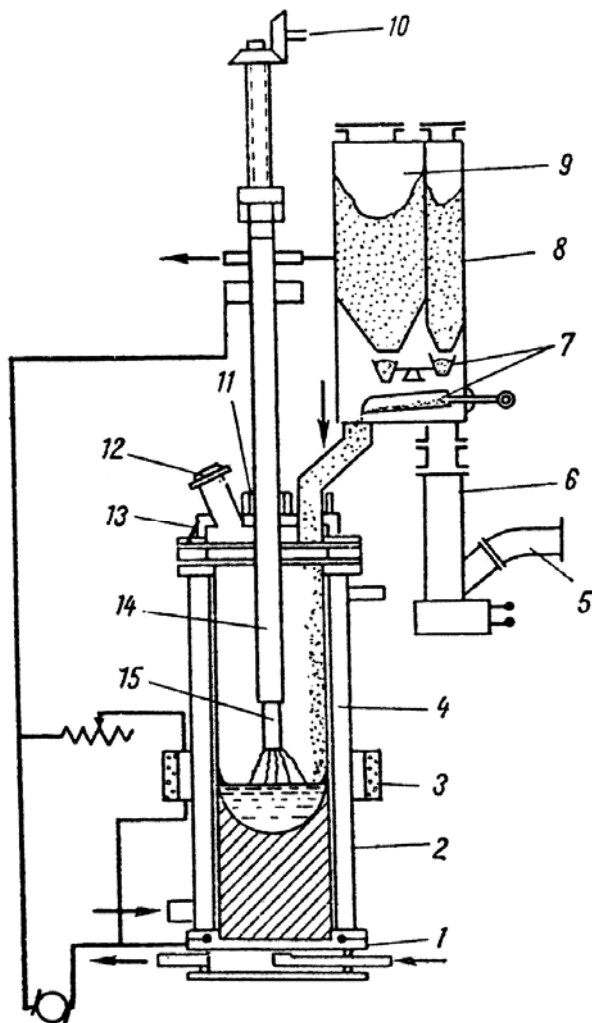
Тенденція розвитку плавильного виробництва полягає в збільшенні маси злитків до 5...8 т. Істотний недолік цієї технології – обмежена можливість додавання відходів титанових сплавів в шихту (близько 30 %). Залучення відходів в більшій кількості зменшує міцність електродів, що витрачаються, і створює небезпеку їх руйнування під час транспортування і плавлення. Деякі пічні агрегати дозволяють під час плавлення з електродом, що витрачається, періодично додавати кускові відходи з бункера.

Висока активність титану по відношенню до кисню і азоту повітря, а також практично до всіх вогнетривких матеріалів, зумовила створення спеціальної вакуумної плавки для отримання злитків.

Найбільш прийнятним виявилось плавлення дугою в металевій охолоджуваній формі – кристалізаторі. Під час плавлення на поверхні кристалізатора утворюється шар твердого металу, який не вступає у взаємодію з матеріалом форми. У практиці набули поширення два основні типи вакуумних дугових печей: печі з електродом, що не витрачається (графітовим), і печі з електродом, що витрачається (титановим).

Під час плавки з електродом, що не витрачається, титанову губку засипають в бункер, приєднаний до виливниці за допомогою патрубку (рис. 2.1). З бункера губку подають у виливницю, в зазор між електродотримачем і стінкою кристалізатора. У бункері розміщується дозатор, за допомогою якого витримується задане співвідношення між титаном і легуючими компонентами.

Як електрод зазвичай використовують графітовий стрижень, який під час плавки не витрачається. Перед плавкою на дно виливниці засипається невелика кількість губки, електрод переміщається в нижнє положення до виникнення дугового розряду між електродом і піддоном. В міру плавлення металу губку і легуючі компоненти подають з бункера у виливницю. Злиток поступово наростає, а електрод піднімається вгору.



- 1 – піддон;
- 2 – кожух;
- 3 – соленоїд;
- 4 – виливниця;
- 5 – патрубок до вакуумного насоса;
- 6 – бустерний насос;
- 7 – дозатор;
- 8 – бункер для легуючих компонентів;
- 9 – бункер для шихти;
- 10 – подаючий механізм;
- 11 – рухоме ущільнення;
- 12 – оглядове скло;
- 13 – кришка;
- 14 – електродотримач;
- 15 – графітовий електрод

Рисунок 2.1 – Схема вакуумно-дугової печі з електродом, що не витрачається

Отриманий у такий спосіб злиток має незадовільно проплавлену поверхню і нерівномірний хімічний склад, тому його потрібно переплавити вдруге за способом електрода, що витрачається. Отже, спосіб вакуумної дугової плавки в печі з електродом, що не витрачається, опинився непридатний внаслідок забруднення металу, що переплавлявся, матеріалом електрода. Тоді почали застосовувати електрод, що витрачається, з титанової губки.

Сучасна технологічна схема виробництва злитків титанових сплавів складається з наступних основних операцій: підготовка шихти; пресування електродів, що витрачаються; перше переплавлення; обробка злитків першого переплавлення; друге переплавлення;

механічна обробка злитків; контроль їх якості.

Шихта для виплавлення злитків складається з губчастого титану, лігатур і легуючих елементів в чистому вигляді, відходів.

Додавання легуючих елементів у чистому вигляді або у вигляді лігатур визначається, в основному, можливістю їх розчинення в металі протягом плавки. Лігатури вибирають так, щоб їх температура плавлення і щільність найбільшою мірою були близькі до відповідних показників титану.

У чистому вигляді застосовують наступні легуючі компоненти титанових сплавів: алюміній, манган, цирконій, залізо, силіцій, іноді хром. Ванадій, молібден додають у вигляді лігатур з алюмінієм. Застосовують також комплексні лігатури, наприклад, для виплавки сплаву ВТЗ–1, який містить у відповідній пропорції і інші легуючі елементи (хром, залізо та інші). Ці лігатури отримують алюмотермічним способом. Олово вводять у вигляді лігатури Al–Sn, яку виготовляють сплавлянням чистих компонентів в індукційних печах.

Перед використанням в шихті легуючі компоненти подрібнюють, крихкі метали і лігатури (Cr–Mn, Al–Mo, Al–V та ін.) подрібнюють на щоккових або молоткових дробарках. Злитки (чушки) алюмінію та лігатури Al–Sn переводять у стружку на стругальних верстатах.

У шихті використовують наступні види відходів: листову обрізь, кускові відходи від кованих або пресованих виробів, стружку. Заздалегідь відходи потрібно подрібнити і видалити з їх поверхні шар, що містить підвищену кількість газових домішок. Для цього листові відходи заздалегідь протравлюють, подрібнюють на механічних ножицях і ексцентрикових пресах до розмірів 60x50 мм і потім знежирюють. Кускові відходи кують і рубають у нагрітому стані на куски розміром не більше 60x60x80 мм, а потім очищають у галтувальних барабанах для видалення шару оксидів.

Для переплавлення використовують стружку без видимих колярів мінливості. Стружку подрібнюють до розмірів менше 70 мм і піддають магнітній сепарації для видалення осколків твердосплавних різців, які потрапляють у стружку під час токарної обробки титанових сплавів і, не розплавившись, можуть утворити в злитку чужорідні

включення.

При шихтуванні сплавів розраховують наважку легуючих компонентів і потрібну твердість губчастого титану, що забезпечує необхідну міцність сплаву. Розрахунок наважок легуючих компонентів, відповідно до їх вмісту в сплавах, виконують з урахуванням їх надходження з відходів і угару під час плавлення.

Для отримання електродів, що витрачаються, застосовують порційне пресування у прохідну конічну матрицю круглого перетину. Пресування проводять на могутніх горизонтальних або вертикальних гідравлічних пресах. Застосування вертикальних пресів переважно, оскільки в цьому випадку розподіл компонентів шихти за горизонтальним і вертикальним перетином електродів більш рівномірний. Шихту засипають з бункера по шихтопроводу в лоток-приймач шихти. Прес-штемпель (пуансон) за допомогою прес-шайби (надставки) штовхає шихту в конусну матрицю, яка встановлена в направляючій втулці. Порція шихти спресовується, прес-штемпель відводять у початкове положення, і завантажують чергову порцію шихти. Для зменшення зусиль пресування матриця підігрівається до 250...300 °С. Для поєднання порцій шихти в електроді між собою передбачена фігурна поверхня торця прес-шайби.

Одна з основних умов отримання міцного електрода – досягнення достатнього питомого тиску пресування – близько 294...343 МПа, а в кінці циклу пресування – не менш 137 МПа.

Склад кожної порції пресування за співвідношенням компонентів має відповідати розрахунковому складу шихти. Розмір порції визначається діаметром пресованого електрода. За розрахунковими і практичними даними встановлено, що маса порції не має бути більше 1/2 маси ванни рідкого металу під час виплавки злитка першого переплавлення.

Дозування і подавання порції на пресування здійснюється зазвичай автоматичними пристроями.

Виплавку злитків першого і другого переплавлення виконують у однотипних печах. Схема вакуумної дугової печі приведена на рис. 2.1. Піч складається з виливниці, піддону, електродотримача, робочої камери, вакуумної системи.

*Виливниця* — найважливіша частина печі. У ній відбувається горіння дуги, плавлення електрода, кристалізація злитка. Вона складається з корпусу, що виконується зазвичай з нержавіючої сталі, і кристалізатора – мідної труби круглого або квадратного перетину, що утворює внутрішню стінку виливниці. Воду для охолодження подають у виливницю під тиском в зазор між стінкою корпусу і кристалізатором. Висока теплопровідність і пластичність міді забезпечують тривалу роботу кристалізаторів в умовах великої термічної напруги, що виникає при безпосередній дії розплавленого металу і дугового розряду на кристалізатор.

Робоча частина водоохолоджуваного піддона також виконується з міді, оскільки в перший період плавки піддається безпосередній дії рідкого металу. Кришка і електродотримач сприймають тільки теплове випромінювання і тому схильні до менших теплових навантажень. Тому їх зазвичай виготовляють зі сталі.

На корпус виливниці зазвичай намотується *соленоїд*, який використовується для стабілізації дугового розряду і обертання рідкої ванни. Змінюючи струм на соленоїді, можна “стискати” або “розгортати” дугу, підсилювати або зменшувати обертання рідкої ванни.

*Електродотримач* призначений для вертикального переміщення електрода, що витрачається, в печі і подачі напруги на дугу. Його зазвичай виготовляють зі сталі. Він складається з двох коаксіально розташованих труб, у внутрішню трубу подається вода для охолодження. Електродотримач вводять в робочий простір через кільцеве ущільнення в кришці. Знизу до зовнішньої труби приварений хвостовик з різьбою. На хвостовик нагвинчують титановий недогарок, який призначений для кріплення (приварювання) електрода, що витрачається.

Робоча камера призначена для розміщення частини електрода, що витрачається, який зазвичай довший за кристалізатор, і для з'єднання кристалізатора з вакуумною системою. У верхній частині камери розташовані оглядові вікна, через які за допомогою перископів виконують візуальне спостереження протягом плавки. Камеру виготовляють з корозійностійкої сталі, вона витримує віднос-

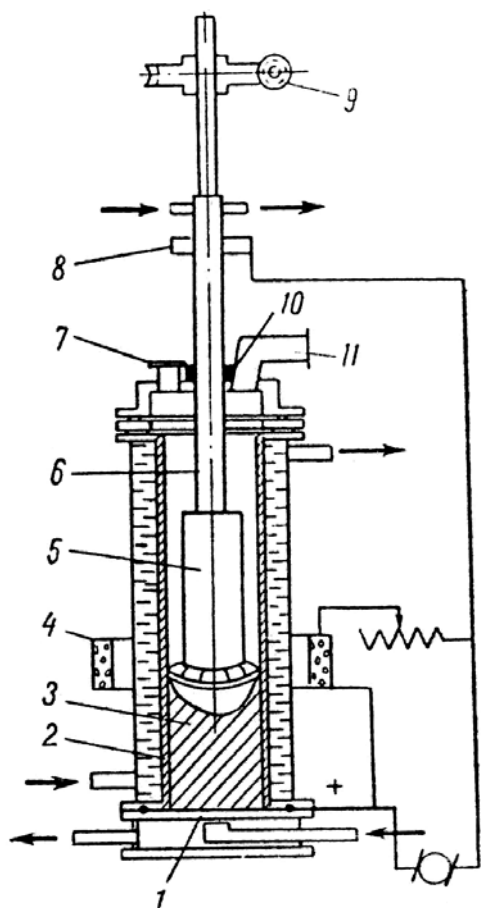
но невеликі теплові навантаження.

Вакуумна система складається з вакуумних насосів, вакуумпроводів, запірної арматури і приладів контролю. Система має забезпечувати швидке відкачування повітря з печі перед плавленням до тиску 13,3 Па і підтримувати під час плавки тиск до 26,6 Па. Для відкачування використовують один або декілька механічних форвакуумних насосів типу ВН-6Г і механічних бустерних насосів типу 2ДВН-1500 або 2ДВН-3000.

Плавлення металу відбувається під дією теплоти, що виділяється електричною дугою, яка горить між електродом, що витрачається, і поверхнею ванни рідкого металу. Для плавлення титану використовують постійний струм: негативним полюсом є електрод, що витрачається, позитивним – злиток, що наплавляється. Як джерела живлення використовують машинні генератори або вентильні силіцієві випрямлячі. У сучасних промислових печах використовують силу струму до 37,5 кА при напрузі 30...80 В.

Плавлення злитків відбувається таким чином. Електрод, що витрачається, поміщають в піч і зварюють з недогарком (рис. 2.2). Потім, піднявши електрод, запалюють дугу між нижнім торцем електрода і піддоном. Під час виплавки крупних злитків другого переплавлення на піддон зазвичай кладуть темплет з того ж сплаву для захисту піддона від прямої дії дуги. Кінець електрода розігрівається дугою до температури, що перевищує температуру плавлення, на торці утворюються краплі рідкого металу. Коли маса краплі перевищить сили поверхневого натягіння, крапля відривається і падає на піддон. Поступово електрод подають вниз, а злиток наростає вгору, при цьому у верхній частині злитка утворюється ванна рідкого металу. Таким чином, одночасно відбуваються процеси плавлення і кристалізації злитка.

Основні фізико-хімічні процеси, що відбуваються протягом плавлення титанової губки, схематично зображені на рис. 2.3. На початку плавлення з пресованого електрода внаслідок його розігрівання джоулевою теплотою видаляються вода і адсорбовані гази (азот, кисень). У зоні вищих температур ближче до нижнього кінця електрода виділяються пари магнію і хлориду магнію, які в



- 1 – піддон;
- 2 – виливниця;
- 3 – злиток;
- 4 – соленоїд;
- 5 – електрод, що витрачається;
- 6 – електродотримач;
- 7 – оглядове скло;
- 8 – контакт, що підводить струм;
- 9 – подаючий механізм;
- 10 – рухоме ущільнення;
- 11 – патрубок до насоса

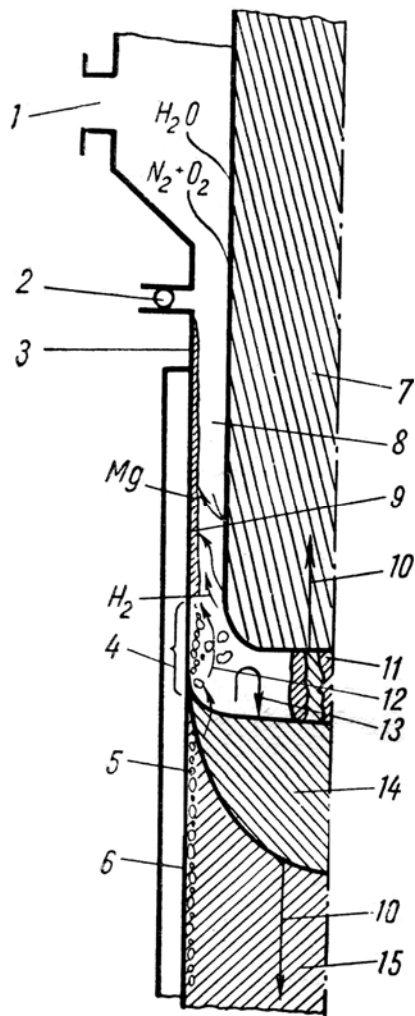
Рисунок 2.2 – Схема вакуумно-дугової печі з електродом, що витрачається

основному конденсуються над розплавом на стінці кристалізатора і на електроді. Частина цієї пари захоплюється газами, що відходять, до камери печі і до вакуумної системи.

Легколеткі легуючі компоненти поведуться аналогічно, з тією лише відмінністю, що їх випаровування відбувається в основному з поверхні рідкого металу на електроді і у ванні. На холодній стінці кристалізатора пари металів і солей конденсуються відповідно до значення тиску насиченої пари: спочатку алюміній, потім хром, манган, магній і хлорид магнію.

Метал, що піднімається в кристалізаторі, покриває осаджений на стінці конденсат, частина його розчиняється у поверхневих шарах злитка, збагачуючи їх. Особливо помітно це явище у найбільш легко-го легуючого компонента – мангана, вміст якого може підвищуватися у поверхневому шарі злитків першого переплавлення до 12...17 %.





- 1 – вакуум;
- 2 – ущільнення;
- 3 – виливниця;
- 4 – розбризканий метал;
- 5 – хлорид;
- 6 – кірка злитка;
- 7 – електрод з пресованої губки;
- 8 – туман і газ;
- 9 – конденсат магнію;
- 10 – дифузія;
- 11 – електрична дуга;
- 12 – вторинна дегазація хлоридів;
- 13 – вторинна конденсація;
- 14 – ванна рідкого металу;
- 15 – злиток

Рисунок 2.3 – Схема процесів, що відбуваються під час вакуумної дугової плавки губчастого титану

Частина конденсату, нерозчинна в титані, залишається у вигляді включень і поверхневих плівок на злитку; частина перегрівається, проривається крізь розплавлений метал, розбризкуючи його. Бризки металу осідають на кристалізаторі і утворюють так звану корону. Все це приводить до забруднення поверхні злитка і утворення на ньому кірки (шорсткої поверхні) з порами і раковинами.

Протягом плавлення важлива поведінка водню і натікаючих активних газів (кисню і азоту). Розчинність водню в титані з підвищенням температури зменшується, тому найактивніше він виділяється з розплавленого шару на торці електрода. Основна частина його видаляється через вакуумну систему. Частина водню дифундує в холодніші частини електрода, що витрачається, і злитка,

де розчинність його більша.

Натікаючі активні гази (азот, кисень) потрапляють у робочий простір печі крізь нещільності конструкції, головним чином з верхньої частини. Вони незворотно вступають у взаємодію з рідким титаном, знижуючи якість злитків. Проте їх дифузії в зону плавлення перешкоджає зустрічний потік водню, тому правильно підібравши значення допустимого вакууму і натікання, можна створити такі умови, які забезпечать практично повну відсутність забруднення киснем і азотом протягом плавки.

Описані вище фізико-хімічні процеси відбуваються і при другому переплавленні, але вони виявляються у меншому ступені. Оскільки основна кількість домішок видаляється при першому переплавленні, тому в технології виробництва перше переплавлення є рафінуючим.

Злитки першого переплавлення, вивантажені з печі гарячими (400...450 °С), очищують у проточній воді металевими щітками для видалення перегонів солей з їх поверхонь. Далі на токарному верстаті відрізають корону.

Злитки першого переплавлення зварюють один з іншим позапічним аргано-дуговим зварюванням і використовують як електрод, що витрачається, для другого переплавлення. Останнім часом велике розповсюдження набуває технологія плавки “злиток у злиток”, яка полягає у використанні для другого переплавлення одного довгого злитка першого переплавлення. Ця технологія виключає шкідливий вплив зварного шва, який приводить до утворення неоднорідності у злитках, що виплавляються.

Основне завдання другого переплавлення – отримання однорідного злитка з якісною поверхнею. Досягається це застосуванням значних щільностей струму; підтримкою протягом плавки невеликого тиску інертного газу (10...25 кПа), що особливо важливе для отримання однорідних злитків зі сплавів, що містять манган; виведенням усадкової раковини шляхом зниження сили струму в кінці плавки.

Застосування вакууму і високих температур вимагає дотримання жорстких вимог обережності протягом процесу. Під час пропалю-

вання водоохолоджуваних вузлів печі і надходження води у робочий простір рідкий титан реагує з нею, поглинаючи кисень і виділяючи водень. Якщо при цьому через нещільності конструкції, які можуть утворитися внаслідок різкого підвищення тиску, в піч потрапляє повітря, то утворюється гримуча суміш і може відбутися вибух.

Злитки, що отримані дворазовим плавленням, обточують до видалення поверхневого шару, який має незлитини і пори. Механічну обробку виконують на токарних верстатах різцями з напайками твердого сплаву ВК8. Зону різання охолоджують стислим повітрям, щоб при подальшому використанні стружки у шихті її не доводилося знежирювати. Високоміцні сплави ВТ9, ВТЗ–1, ВТ15 та ін. для зменшення зусиль при обточуванні обробляють в гарячому стані, безпосередньо після вивантаження з печі.

*Контроль якості злитків* складається з визначення хімічного складу виплавленого металу, випробування його механічних властивостей і ультразвукового контролю, що виявляє внутрішні дефекти у металі. Проби на хімічний аналіз у вигляді стружки відбирають з бічної поверхні та з торців злитків.

Твердість визначають на бічній поверхні злитка за допомогою приладу Польді. При визначенні інших механічних властивостей від злитка відрізають темплет завтовшки 25...30 мм, з якого кують технологічні проби для виготовлення зразків на розрив і на ударну в'язкість.

Ультразвуковий контроль виявляє наявність несучільностей (усадкових раковин, пір) і сторонніх включень (кусочки лігатур, що не проплавилися, осколки твердосплавних пластин). Дефектні частини злитків відрізають і направляють у відходи.

Вакуумно-дугова плавка з електродом, що витрачається, має ряд істотних недоліків. Основні з них наступні:

1. Використання обмеженої кількості відходів в шихті внаслідок зниження міцності пресованих електродів при додаванні відходів понад 30 %.

2. Недостатня однорідність злитків і утворення в них тугоплавких дефектів у зв'язку з тим, що під час плавки тільки мала частина злитка знаходиться в рідкому стані.

3. Вибухонебезпека процесу.

4. Втрати металу під час обробки злитків, що пов'язані з недостатнім проплавленням поверхні.

Фасонно-ливарні вироби з титану та його сплавів отримують у вакуумних дугових гарнісажних печах. Плавку проводять з електродом, що витрачається. Метал наплавляють у тигель, з якого його потім виливають у форми з вогнетривких матеріалів.

Найбільше розповсюдження набули тиглі з графітовою футеровкою. Під час першої плавки на поверхні тигля утворюється гарнісаж, який при подальших плавках захищає рідкий метал від зіткнення з графітом і насичення вуглецем. Застосовують також мідні водоохолоджувані тиглі і неохолоджувані масивні титанові тиглі.

Точні невеликі виливки з титанових сплавів зазвичай виготовляють литтям за моделями, що виплавляються. Як матеріал форми використовують вуглеграфітні матеріали: оксид цирконію, корунд. Крупні виливки отримують литтям у магнезитові форми. Для виливок відносно простої конфігурації, що виготовляються крупними серіями, застосовують також металеві (сталеві) форми – кокілі.

У Росії розроблений процес отримання титанових виливок у відновному середовищі водню, що здійснюється у формах з воденьвмісним покриттям. В новому процесі не використовуються дефіцитні матеріали, і в той же час вдається значно підвищити якісні показники як самих виливок, так і литого металу.

Джерелом водню є гідридні порошки титану, які розкладаються під дією теплоти виливок з виділенням водню. Розкладання гідридів титану, супроводжується поглинанням теплоти. Водень, що видаляється, на межі з виливком створює захисне середовище.

Оскільки печі для плавки титану є вибухонебезпечними агрегатами, тому для їх нормальної роботи слід ретельно дотримуватися вимог техніки безпеки.

Основна небезпека протягом вакуумної дугової плавки – пропалювання стінки кристалізатора електричною дугою. Це приводить до надходження води в плавильний простір і її взаємодії з рідким або розжареним титаном з утворенням водню (кисень води поглинається титаном). Проте сам водень ще не спричиняє вибуху.

Якщо ж внаслідок бурхливого паротворення в стінці водоохлоджуваного кристалізатора або в інших місцях (плавильній камері, піддоні, гумових вакуумних ущільненнях) з'являються розриви або нещільності, тріщини і через них в піч проникає повітря, то утворюється гримуча суміш (джерелом теплоти є рідкий або розжарений титан), при вибуху якої може бути зруйнована вся піч, оскільки тиск вибухової хвилі може досягати понад 1000 МПа.

З метою забезпечення безпечної роботи обслуговуючого персоналу на випадок пропалювання і можливого вибуху, печі для плавлення титану розташовують в броньових камерах і оснащують запобіжними зворотними клапанами для випускання газів при підвищенні тиску в плавильному просторі, а сам процес плавлення автоматизують, щоб не допустити переміщення дуги на стінку кристалізатора.

Вивчення вибухів дугових печей показало, що не завжди їх причиною є пропалювання стінки кристалізатора. Недостатня подача води або припинення подачі її в охолоджувальну сорочку (кесон кристалізатора) може спричинити розплавлення мідного кристалізатора. Причиною вибуху може бути попадання в піч мастила з вакуумних насосів при їх випадковій зупинці (відключенні), а також попадання вуглеводневої пари внаслідок розкладання гумових ущільнень під впливом місцевого перегріву. На випадок раптової зупинки вакуумних насосів на вакуумпроводах встановлюють запобіжні клапани, які запобігають попаданню вакуумного мастила з насоса в піч.

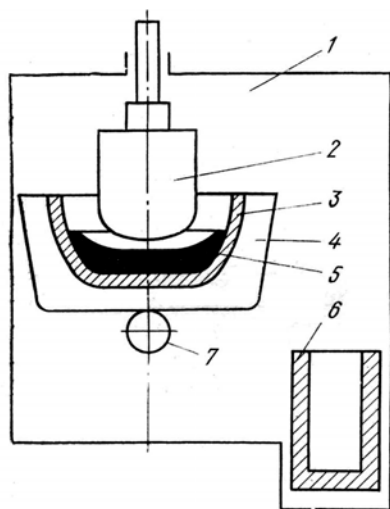
Вибухонебезпечну суміш з повітрям можуть утворювати і пилоподібні осадження титану і магнію, що утворюються під час плавки внаслідок конденсації їх пари на внутрішніх холодних поверхнях кристалізатора і вакуумної камери. Щоб уникнути цього розкривання печі після чергової плавки проводять з операцією повільного (невеликими порціями) впускання повітря в піч. Внаслідок цього відбувається поступове окиснення дисперсних перегонів титану і магнію киснем повітря.

За останні роки здійснений цілий комплекс технічних заходів, який дозволив практично повністю виключити випадки вибухів

вакуумних дугових печей для виплавки титану. Основні з них – надійна автоматика, що управляє електричною дугою, оригінальна конструкція соленоїдів, надійне і інтенсивне охолодження кристалізатора водою, установка на печах вакуум-насосів, що мають високу швидкістю відкачування, продуктивність яких зростає з підвищенням тиску у відкачуваному просторі та ін.

## 2.4 Плавка в печі з гарнісажем

Гарнісажна плавка титану відрізняється від вакуумної дугової плавки тим, що зона плавлення відокремлена від зони кристалізації злитка (рис. 2.4). Метал наплавляється в графітовому або водоохолоджуваному тиглі. Для виключення взаємодії розплавленого металу з матеріалом тигля процес здійснюється таким чином, що зі стінками форми завжди стикається затверділа скориночка (гарнісаж) титану і його сплаву.



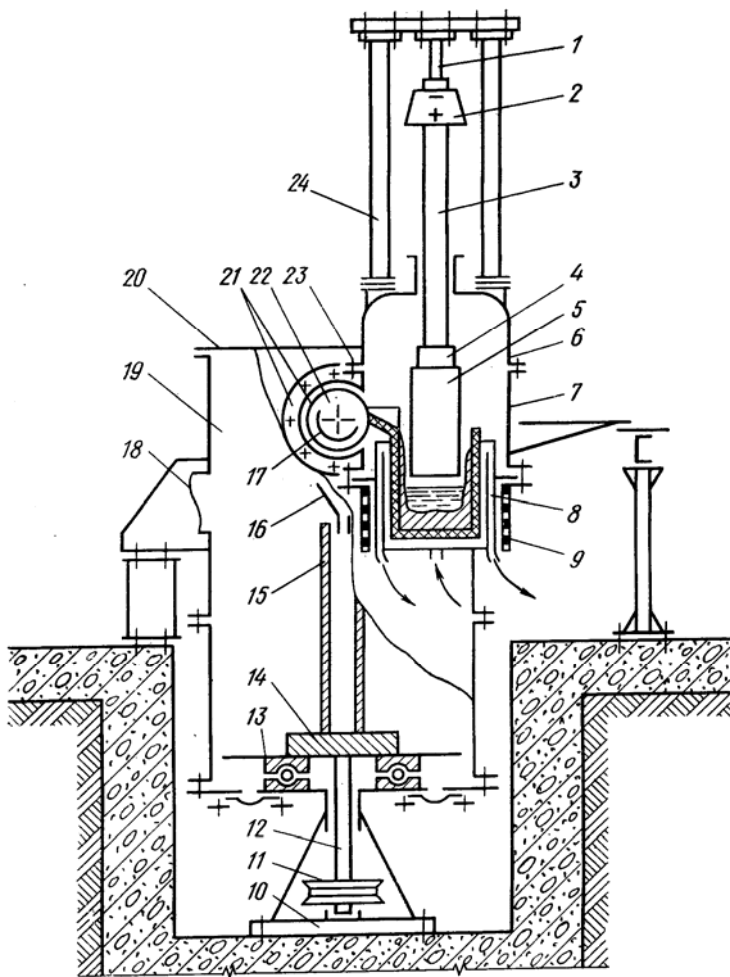
- 1 – камера печі;
- 2 – електрод, що витрачається;
- 3 – гарнісаж;
- 4 – охолоджуваний тигель;
- 5 – ванна рідкого металу;
- 6 – виливниця;
- 7 – поворотний механізм

Рисунок 2.4 – Схема плавки у гарнісажному тиглі

Впровадження гарнісажної плавки дозволяє відливати злитки різної форми перетину, забезпечує кращу гомогенність складу сплаву. Запобігання надходженню в злиток тугоплавких включень дає можливість вводити у шихту значну кількість відходів без трудомісткого їх подрібнення. Печі такого типу дозволяють отримувати високогомогенні злитки навіть таких складних у литті

сплавів, як  $Ti + 3\% Mo$ ;  $Ti + 5,5\% Ni$  та інші.

Особливістю конструкції вакуумно-дугової гарнісажної печі для плавки титану є те, що заливальна камера в період заливання обертається навколо своєї осі (рис. 2.5). Електрод, що витрачається, плавиться у водоохолоджуваному тиглі, футерованому графітовими плитами. Подача електроду здійснюється вантажо-підйомником, плунжер якого жорстко закріплений на каркасі, а циліндр змонтований усередині електродотримача. Рідкий метал з тигля зливається шляхом нахилу плавильної камери відносно осі в лоток, по лотку передається в заливальну камеру і через воронку – у виливницю, яка встановлена на піддоні на столі, що обертається.



- 1 – щиток гідроциліндра;
- 2 – електроконтактна плита;
- 3 – електродотримач;
- 4 – недогарок електрода;
- 5 – електрод, що витрачається;
- 6 – кришка плавильної камери;
- 7 – корпус плавильної камери;
- 8 – водоохолоджуваний тигель;
- 9 – соленоїд; 10 – станина відцентрового столу;
- 11 – шків; 12 – вал;
- 13 – відцентровий стіл;
- 14 – піддон; 15 – виливниця;
- 16 – заливальна лійка;
- 17 – жолоб-лоток;
- 18 – патрубок вакуум-проводу;
- 19 – заливальна камера;
- 20 – кришка заливальної камери;
- 21 – опорна порожниста цапфа;
- 22 – вісь нахилу плавильної камери;
- 23 – вісь повороту кришки плавильної камери;
- 24 – каркас приводу електродотримача

Рисунок 2.5 – Схема вакуумно-дугової гарнісажної печі

Основні напрями розвитку гарнісажної плавки: фасонне литво, фасонно-заготовче литво (кільцеві і трубні заготовки для подальших розкочування, штампування, пресування), заготовче литво складних форм для прокатування і пресування.

Найбільш ефективним вважається спосіб гарнісажної плавки з використанням як електрод, що витрачається, гарнісажу, який утворився при попередньому плавленні в тому ж тиглі. Такий спосіб не вимагає спеціального приготування електрода, що витрачається, окрім первинного плавлення. Як шихту для плавки можна використовувати брикети, стружку і куски довільної форми, розміри яких не перевищують габаритних розмірів робочого простору тигля. Плавлення електрода-гарнісажу, що витрачається, здійснюється електричною дугою постійного струму у вакуумі або у середовищі нейтрального газу. Після закінчення плавки потрібна частина розплаву зливається у виливницю; гарнісаж з затверділими залишками металу, що не злився, витягується з тигля і використовується у вигляді електрода, що витрачається, при наступному плавленні даного сплаву. При масовому виробництві застосовують змінний гарнісаж, спеціалізований за найбільш розповсюдженими сплавам або групам сплавів, що виключає брак за хімічним складом при оплавленні гарнісажу протягом кожної плавки.

Печі гарнісажного типу застосовують для фасонного литва різних виливок з титану з вельми високими коефіцієнтами використання металу і необроблюваною поверхнею, тобто виливок, максимально наближених формою і геометричними розмірами до готової деталі. Ванну рідкого металу наплавляють в графітовому тиглі з гарнісажем з титану. Розплавлений метал зливають в задалегідь зібрану і встановлену заливальну камеру – форму. Установки такого типу дозволяють отримувати виливки масою в декілька десятків кілограмів. Цим способом відливають корпуси відцентрових насосів, вентилів і засувок, робочі колеса насосів та інші вироби.

Гарнісажна плавка є оптимальною технологією першого переплавлення, проте висока швидкість заповнення форми не забезпечує отримання крупних злитків без усадкових раковин і



ликвационної неоднорідності, такі злитки не використовуються безпосередньо для обробки тиском.

Для другого переплавлення, крім існуючого процесу дугової плавки з електродом, що витрачається, дуже перспективне електрошлакове переплавлення або безперервне лиття з розплавленням електродом плазмою або електронним променем.

## **2.5 Плавка в електрошлаковій печі**

Під час електрошлакової плавки прогрівання розплавленого шлаку (фториду кальцію) електричним струмом над поверхнею металу в кристалізаторі дозволяє перегрівати метал вище за температуру його плавлення. При цьому вирівнюється теплове поле по поверхні металу, заглиблюється ванна рідкого металу, що покращує однорідність злитка. Як електроди, що витрачаються, використовують литі злитки або штанги діаметром близько 220 мм і завдовжки 2300 мм.

Способом електрошлакової плавки можливо отримання злитки прямокутного перетину, що зручно для подальшого прокатування. Головним недоліком електрошлакової переплавки є відсутність дегазації металу в процесі плавлення, тому його доцільно використовувати у поєднанні з одним зі способів першого переплавлення у вакуумі, що забезпечує достатньо повне видалення водню.

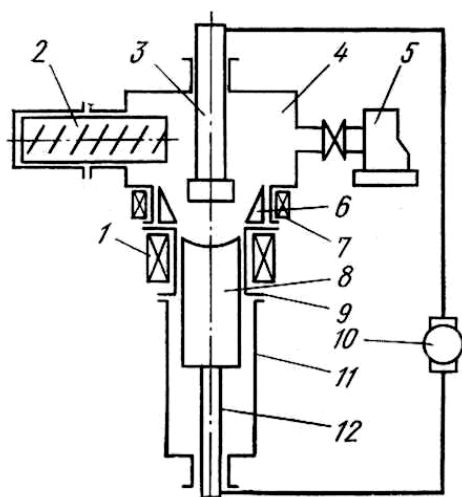
У стадії розробки знаходиться один з різновидів електрошлакової плавки – індукційна електрошлакова плавка в мідному кристалізаторі, яка дозволяє отримувати однорідний метал і використовувати необмежену кількість кондиційних відходів. Роль гарнісажа в цьому випадку виконує шлаковий прошарок.

## **2.6 Плазмово-дугова плавка**

Використання плазмотронів при переплавленні титану привертає стабільністю газового розряду, можливістю регулювання потужності, великою концентрацією енергії, можливістю отримання високих температур і підвищеною вибухобезпечністю процесу

плавки. Як газ, що утворює плазму, використовують аргон. Недоліками плазмових печей є обмежена дегазація під час плавлення і можливість забруднення титану домішками, що містяться в газі, який утворює плазму. Тому великий інтерес має вакуумна плазмово-дугова плавка, яка порівнянно з вакуумно-дуговою плавкою забезпечує можливість переплавлення кускової некомпактної шихти, регулювання швидкості плавлення, можливість використання простішого вакуумного устаткування і низьковольтних джерел струму.

Використання плазмових печей перспективно для плавлення відходів титанових сплавів. Один з можливих варіантів конструктивного оформлення такої печі приведений на рис. 2.6. Плавку здійснюють в мідному кристалізаторі з витягуванням злитка.



- 1 – соленоїд;
- 2 – бункер для кускової шихти зі шнековим живильником;
- 3 – плазмотрон; 4 – камера печі;
- 5 – вакуумний насос;
- 6 – кільце-екран;
- 7 – магнітна система, що відхиляє;
- 8 – злиток; 9 – кристалізатор;
- 10 – джерело живлення;
- 11 – камера-холодильник;
- 12 – механізм витягування злитка

Рисунок 2.6 – Плазмово-дугова піч ПДО–300

В США для плазмово-дугової плавки титанових відходів також використовують плазмові печі, наприклад, на заводі в м. Кантон (штат Огайо) печі фірм Galt Alloy та RMI мають річну продуктивність 3,2 тис. т.

## 2.7 Індукційна плавка

На ранній стадії розвитку виробництва титанових сплавів значного поширення набув спосіб плавки у вакуумних індукційних печах. Як вогнетривкий матеріал для виготовлення тиглів

використовували міцний високоякісний графіт. Вакуум або атмосфера інертного газу (частіше за все аргон) досить надійно оберігали метал від взаємодії з киснем і азотом повітря. Проте метал в процесі плавлення сильно насичувався вуглецем (0,7...2,0 %). Такий титан і сплави на його основі практично повністю втрачали пластичність і в литому стані сильно нагадували чавун. Куванням вдавалося лише трохи поліпшити їх властивості.

## 2.8 Електронно-променева плавка

Суть процесу електронно-променевої плавки полягає в горизонтальній подачі заготовки, що витрачається, із заданою швидкістю в зону плавки, її плавлення електронними променями над проміжною ємкістю. В міру наповнення проміжної ємкості рідкий метал зливають в кристалізатор, де відбувається формування злитка необхідної довжини.

Під час електронно-променевої плавки потужність електронних променів витрачається на оплавлення торця заготовки, що переплавляється, і на підтримку в кристалізаторі ванни рідкого металу. Теплове поле, що встановлюється на поверхні рідкої ванни металу в кристалізаторі, є в основному наслідком розподілу потужності електронних променів. На рис. 2.7 а показаний розподіл потужності електронного променя для систем з кільцевим катодом, для яких характерні відносно “холодна” середина і “гарячі” краї ванни. У системах з чотирма аксіальними гарматами (рис. 2.7 б) досягається досить велике розігрівання центральної зони ванни і в той же час є зони з низькою температурою на краях ванни. На рис. 2.7 в, г показаний розподіл потужності в системах з трьома плоскопроменевими гарматами для двох різних положень променів. Тут також можна відзначити нерівномірність нагріву поверхні рідкої ванни металу. Тому найбільш рівномірного розподілу потужності, а отже, і температури, можна досягти за допомогою багатогарматних електронно-променевих нагрівачів.

На рис. 2.8 показано дві характерні траєкторії руху електронного променя (фокальної плями) по поверхні рідкої ванни в кристалізаторі:

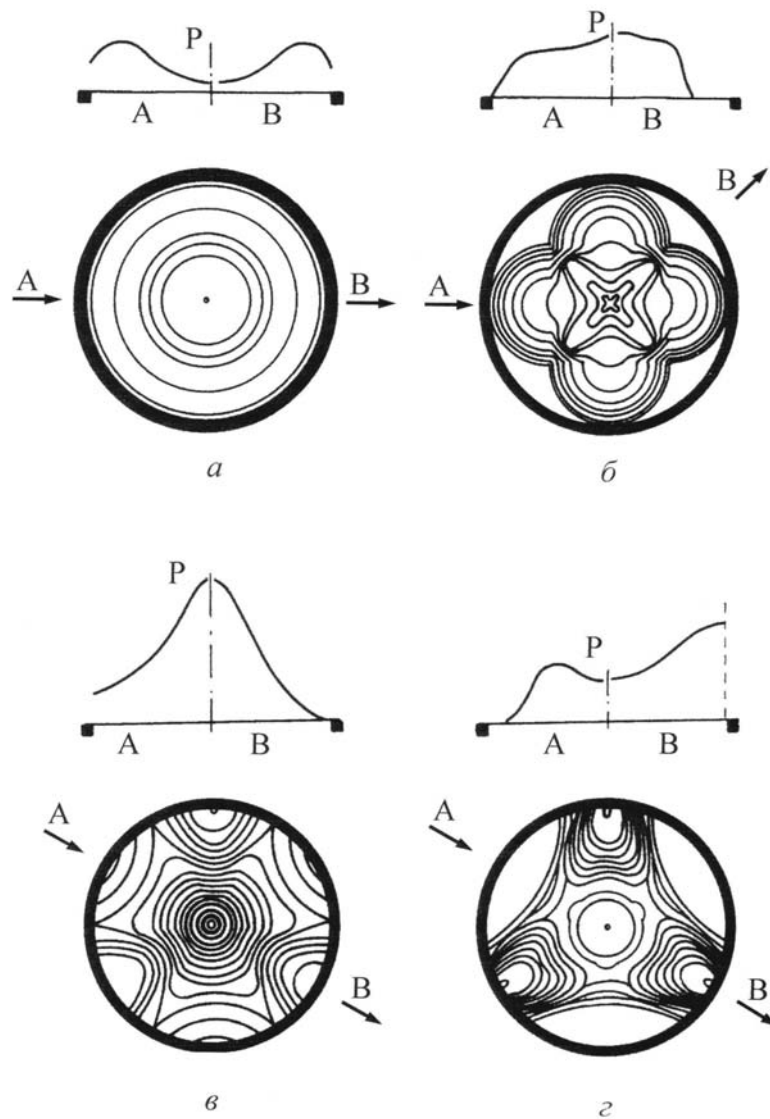


Рисунок 2.7 – Розподіл потужності електронних променів на поверхні рідкої ванни металу для систем з кільцевим катодом (а), з чотирма аксіальними гарматами (б), з трьома плоскопроменевими гарматами (в, г)

круговий рух з частотою 50 Гц і запрограмоване ведення променя з частотою 1 Гц в напрямі  $X$  і 50 Гц у напрямі  $Y$ . При круговій розгортці променя кожна точка поверхні рідкої ванни, що знаходиться в зоні дії електронного променя, піддається серії послідовних теплових імпульсів, частота і тривалість яких залежать від діаметра фокальної плями, діаметра і частоти розгортки електронного променя, тому отримати рівномірне температурне поле дуже важко.

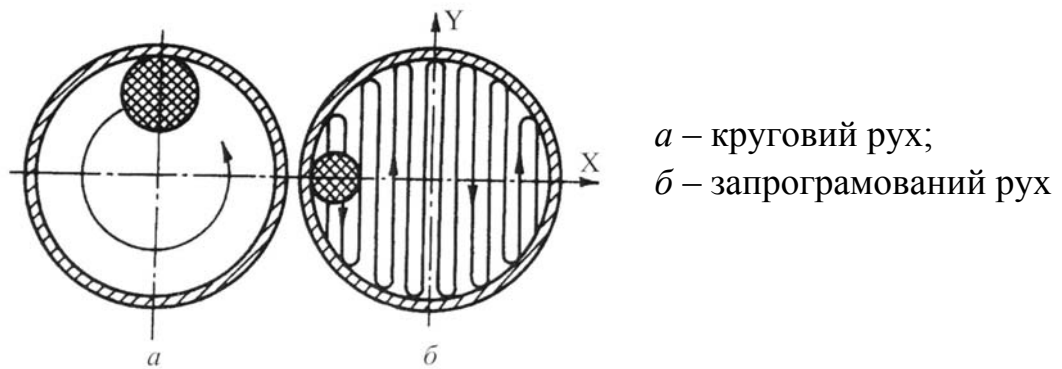


Рисунок 2.8 – Траєкторія руху електронного променя по поверхні рідкої ванни металу в кристалізаторі

При програмованому веденні променя енергія розподіляється більш рівномірно, завдяки чому в певних умовах уникають нерівномірності температурного поля. Порівняння температурних полів при круговому і програмному веденні променя в процесі плавлення в кристалізатор діаметром 230 мм показало відносно високу нерівномірність в розподілі енергії при круговій розгортці з частотою 50 Гц.

Для підтримання оптимального теплового режиму електронно-променевої плавки (рівномірний нагрів поверхні ванни, мінімальний угар) нагрівання необхідно здійснювати розгорткою променів з частотою більше 100 Гц.

Електронно-променева виплавка титанових сплавів в останні роки набула промислового використання. Технологія цього способу в даний час є найбільш перспективним процесом отримання злитків титану та його сплавів. До її переваг відноситься висока ефективність рафінування, обумовлена високим вакуумом в камері електронно-променевої установки. Незалежне джерело теплоти під час плавлення дає можливість в широких межах регулювати швидкість плавлення злитка і, відповідно, тривалість перебування металу в рідкому стані. Як шихтові матеріали можуть використовуватися титанова губка різних фракцій, яка, на відміну від технології вакуумної дугової плавки, не вимагає попереднього пресування в електрод, що витрачається, а також використовувати грудкові відходи титанового виробництва.

Як сировина (шихтові заготовки, що витрачаються), що переплавляється, можуть бути використані як насипні шихтові матеріали (брухт, губчасті напівфабрикати), так і цілісна зварна заготовка (у разі отримання титанового сплаву).

Після завантаження шихтової заготовки установку вакуумують до залишкового тиску 0,10...0,01 Па, потрібного для стійкої роботи електронно-променевих гармат (рис. 2.9). Далі заготовку сплавляють в проміжну ємкість до її заповнення і періодично зливають рідкий метал в кристалізатор. В процесі плавлення застосовують кристалізатор і циліндрової, і прямокутної форми, оснащений піддоном з поглибленням у вигляді “ластівчиного хвоста” або із задалегідь встановленими “заставами”, який вертикально переміщується.

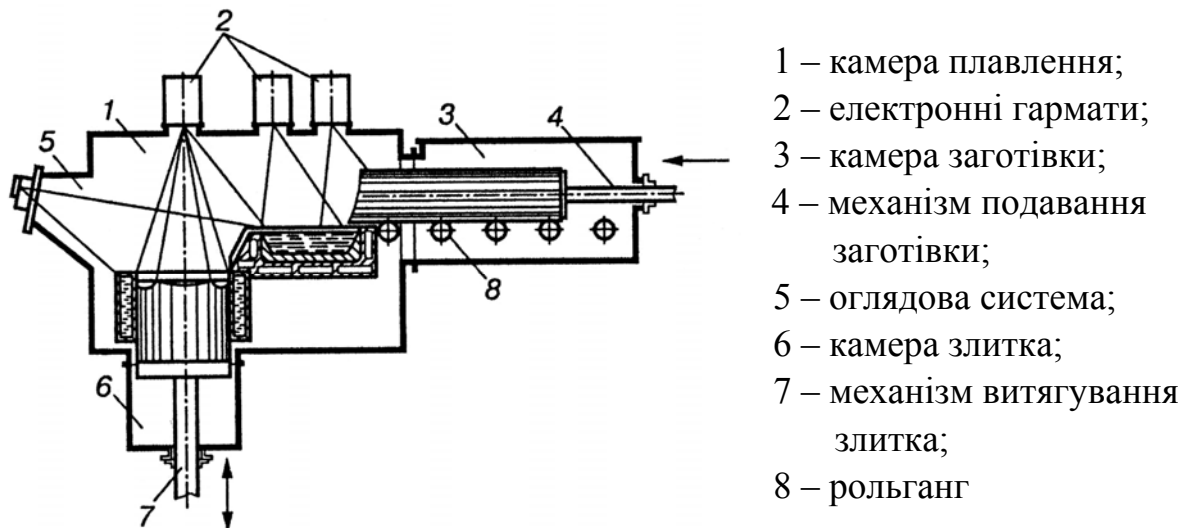


Рисунок 2.9 – Схема електронно-променевого агрегату

Першими порціями зливу формують заправку майбутнього злитка до висоти, рівної внутрішньому діаметру кристалізатора, на якій плавка переходить в квазістаціонарний режим. Потім на досягнутому технологічному режимі виплавляють злиток потрібної висоти. Обігрівання злитка в кристалізаторі проводиться шляхом сканування по його поверхні променя однієї або декількох електронних гармат. Після плавки злиток знаходиться в камері в умовах вакууму до повного його охолодження.

У Росії, Україні, країнах ближнього і дальнього зарубіжжя зна-

ходять застосування електронно-променевої плавильні агрегати (рис. 2.9). У таких печах можливе плавлення титану без спеціальної попередньої підготовки (наприклад, пресування) з отриманням великогабаритних злитків масою 3 т і розмірами 245x1125x2450 мм, а також масою до 10 т. Можливо отримання придатних злитків під час одноразової плавки, оскільки первинне і вторинне плавлення можна проводити в безперервному режимі за допомогою електронних гармат, що встановлюються на черевній частині та під тиглем. За даною технологією отримують плоскі злитки, готові для безпосереднього прокатування.

Конструкція електронно-променевої установки УЕ-5812 (рис. 2.10) відрізняється від раніше розроблених і експлуатованих в промисловості України установок в основному тим, що штокові механізми подавання сировини на плавку і витягування злитка замінено ланцюговими. Це дозволило збільшити масу злитків, що виплавляються, в 2 рази.

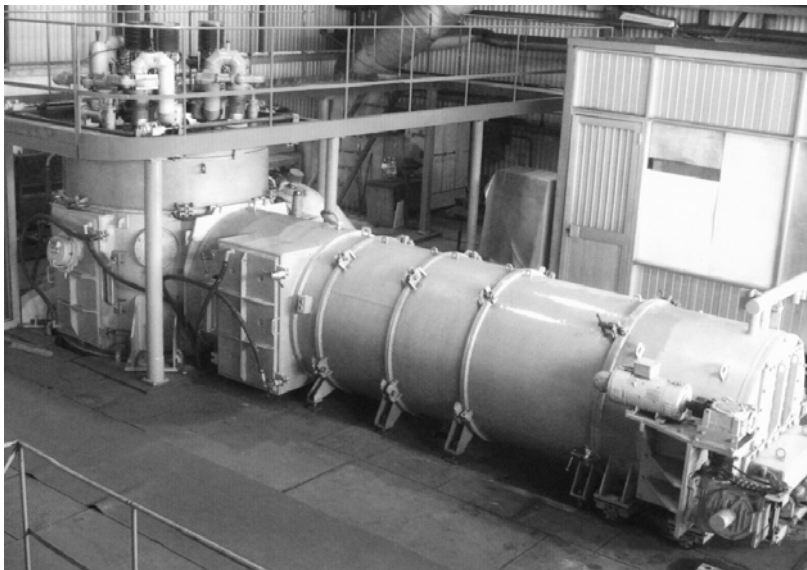


Рисунок 2.10 – Загальний вид установки УЕ-5812

Установка УЕ-5812 характеризується високою технологічністю при виконанні різних процесів плавки, яка досягається шляхом заміни одного оснащення іншим, що дозволяє виготовляти злитки круглого перерізу від 100 до 600 мм, злитки прямокутного перерізу розміром від 80x400 до 200x1250 мм і завдовжки до 4 м. Установка

оснащена п'ятьма електронними гарматами (прискорююча напруга 28 кВ; максимальний струмом променя 10 А).

До складу електронно-променевої установки УЕ-5812 входить наступне устаткування: електронно-променеві гармати; плита гармат; плавильна камера; камера злитка; камера заготівки; проміжна ємкість; мідний водоохолоджуваний піддон; система охолодження; кристалізатор круглого перерізу (400 або 600 мм); кристалізатор прямокутного перерізу; вакуумна система.

Одна з найбільш сучасних електронно-променевих печей з річною продуктивністю 9,1 тис. т введена в експлуатацію в 1998 р. на заводі Лайенсвілл (шт. Пенсільванія, США) фірми Titanium Metals Corporation (Timet).

## **2.9 Магнітокерована електрошлакова плавка**

Магнітокерована електрошлакова плавка (МЕП) призначена для виробництва круглих і плоских злитків багатокомпонентних високоміцних і жароміцних сплавів титану. Відмітними особливостями технології магнітокерованої електрошлакової плавки, порівняно з традиційною вакуумною дуговою плавкою, є використання хімічно активної шлакової ванни і електромагнітного управління рухом розплаву в шлаковій і металевій ваннах, а також захист металургійної ванни і електрода, що витрачається, камерою з інертним газом від взаємодії металу зі шкідливими атмосферними газами.

Технологія магнітокерованої електрошлакової плавки економічно ефективніше за технологію вакуумної дугової плавки. Це пов'язано з дешевшим устаткуванням технології МЕП, ніж вакуумної дугової плавки і меншою кількістю повторних переплавок металу при технології МЕП. Новизною і основними перевагами технології магнітокерованої електрошлакової плавки, порівняно з традиційними технологіями плавки, зокрема, з вакуумною дуговою плавкою, є те, що вона забезпечує у 1,5...2,0 рази вищий експлуатаційний ресурс титанових сплавів завдяки таким перевагам: дрібнозерниста структура злитків, аналогічна структурі поковок; висока хімічна і фізична однорідність металу; малий вміст шкідливих



домішок (атмосферних газів) в металі; щільний метал, повна відсутність пір і шкідливих включень; жароміцні сплави технології магнітокерованої електрошлакової плавки з інтерметалідним зміцненням зберігають жароміцність при температурах 750...800 °С.

Багатокомпонентні високоміцні і жароміцні сплави, що отримані за технологію магнітокерованої електрошлакової плавки, призначені для виготовлення деталей і вузлів, які працюють в умовах складних знакозмінних навантажень при нагріві до температур 700...750 °С. Найбільш ефективно використання жароміцних сплавів з інтерметалідним типом зміцнення при виготовленні лопаток, дисків і інших деталей газотурбінних авіадвигунів. В той же час високоресурсні сплави можуть бути успішно використані в силових вузлах літаків. В даний час технологія магнітокерованої електрошлакової плавки набула промислового використання в авіаційному моторобудуванні.

### **Питання для самоконтролю**

1. На які групи поділяють титанові сплави?
2. Які властивості характерні для титанових сплавів?
3. Які метали є легуючими елементами титанових сплавів?
4. Чим відрізняються за складом ливарні і деформівні сплави титану?
5. Які особливості характерні для виплавки титанових сплавів?
6. На які групи за типом електрода поділяють печі для вакуумної дугової виплавки титанових сплавів?
7. З яких конструктивних елементів складається вакуумно-дугова піч з електродом, що витрачається?
8. Які основні фізико-хімічні процеси відбуваються протягом плавлення титанової губки в вакуумно-дугових печах?
9. В чому сутність гарнісажної плавки титанових сплавів?
10. У яких випадках використовують плазово-дугову плавку?
11. Які особливості має електронно-променева плавка?
12. Що є продукцією електронно-променевої плавки?
13. Які особливості характерні для магнітокерованої електрошлакової виплавки жароміцних титанових сплавів?
14. Як контролюють якість титанових злитків?

## 3 ВИРОБНИЦТВО МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ

### 3.1 Склад і властивості магнієвих сплавів

Близько половини всього отриманого магнію використовується для легування алюмінієвих сплавів, решта магнію витрачається для виготовлення магнієвих сплавів. Чистий магній має недостатньо високий комплекс механічних властивостей, тому в техніці використовують в основному магнієві сплави. Застосування магнієвих сплавів завдяки їх великій питомій міцності дозволяє зменшити масу деталей машин. У літакобудуванні з магнієвих сплавів виготовляють колеса і вилки шасі, різні важелі, корпуси приладів, насосів, коробок передач, ліхтарі і двері кабін, деталі планера літака. Магнієві сплави успішно використовують у конструкціях вертольотів. З магнієвих сплавів виготовляють корпуси ракет, обтічники, корпуси насосів, паливні і кисневі баки, опорні вузли, стабілізатори. Широко також використовують в електронних і оптичних виробках – ноутбуках, плеєрах, стільникових телефонах, кінокамерах і фотоапаратах.

Із-за високої демпфуючої здатності з магнієвих сплавів виготовляють кожухи для розміщення електронної апаратури керованих снарядів. Із-за малої здатності поглинати теплові нейтрони і практично повної відсутності взаємодії з ураном магнієві сплави застосовують для виготовлення оболонок тепловиділяючих елементів в атомних реакторах.

Магнієві сплави за способом виробництва з них напівфабрикатів і виробів поділяють на дві основні групи: а) деформівні сплави – для виробництва напівфабрикатів різними методами обробки тиском; б) ливарні сплави – для отримання деталей методами фасонного литва.

Магнієві сплави деформівні і ливарні маркують відповідно літерами МА і МЛ (табл. 3.1).

**Деформівні сплави.** Для виготовлення листів, поковок, штамповок, профілів, прутків і смуг в промисловості застосовують наступні групи деформівних магнієвих сплавів:

Таблиця 3.1 – Хімічний склад магнієвих сплавів

Марка	Основні компоненти, % (магній – основа)		
	Al	Zn	Mn
МА2	3,0...4,0	0,2...0,8	0,15...0,5
МА2–1	3,8...5,0	0,8...1,5	0,3...0,7
МА3	5,5...7,0	0,5...1,5	0,15...0,5
МА5	7,8...9,2	0,2...0,8	0,15...0,5
МЛ4	5,0...7,0	2,0...3,5	0,15...0,5
МЛ5	7,5...9,0	0,2...0,8	0,15...0,5
МЛ6	9,0...10,2	0,6...1,2	0,1...0,5

- 1) на основі системи магній – манган (МА1, МА8, МА8пч);
- 2) на основі системи магній – алюміній – цинк (МА2, МА2–1, МА3, МА2–1пч, МА5);
- 3) на основі системи магній – цинк – цирконій (МА14, МА15, МА19, МА20);
- 4) на основі системи магній – рідкісноземельний метал (РЗМ) – манган (МА11, МА12, МА17);
- 5) на основі систем магній – ітрій та магній – ітрій – кадмій (ВМД10);
- 6) на основі системи магній – літій (МА18, МА21).

*Сплави першої групи.* Сплави системи магній – манган (МА1, МА8, МА8пч) відрізняються високою корозійною стійкістю, високою пластичністю в гарячому стані, задовільно зварюються; їх застосовують у відпаленому або нагартованному стані для виготовлення виробів, що не несуть високих навантажень.

*Сплави другої групи.* Сплави системи магній – алюміній – цинк (МА2, МА2–1, МА2–1пч, МА3, МА5) залежно від вмісту алюмінію мають високу міцність або пластичність. Зі збільшенням вмісту алюмінію зростає міцність сплавів і знижується пластичність.

*Сплави третьої групи.* Сплави системи магній – цинк – цирконій (МА14, МА15, МА19, МА20) відрізняються від інших високою міцністю; вони мають хорошу пластичність в гарячому стані і задовільну корозійну стійкість. Їх застосовують для виготовлення

середньонавантажених деталей. Ефективність дії цирконію різко знижується у присутності алюмінію, силіцію, мангану, нікелю або сурми. Тому домішки цих елементів допускаються в малих кількостях.

*Сплави четвертої групи.* Сплави системи магній – РЗМ – манган (МА11, МА12, МА17) відрізняються від інших вищими жароміцними властивостями. Так, сплави з церієм достатньо стійко працюють при температурах до 200 °С, а з неодимом – при 250...300 °С.

До *п'ятої групи* відносяться сплави, леговані ітрієм, зокрема, сплав ВМД10, який відноситься до системи магній – ітрій – кадмій. Сплав відрізняється високою технологічністю і з нього можна отримувати всі види деформівних напівфабрикатів. Сплав ВМД10 належить до високоміцних магнієвих сплавів. Напівфабрикати з цього сплаву за рівнем механічних властивостей перевершують поширені серійні магнієві сплави. Сплав ВМД10 знаходить достатньо широке застосування для виготовлення масивних виробів, до яких пред'являються підвищені вимоги по тріщиностійкості.

*Сплави шостої групи.* Легування магнію літієм дозволяє створити сплави із щільністю 1,3...1,6 г/см<sup>3</sup>, що приводить до значного збільшення питомих характеристик механічних властивостей. Так, жорсткість конструкцій з магнієво-літієвих сплавів вище за жорсткість конструкцій з інших матеріалів, в тому числі сталь і титан. До того ж рівень міцності сплавів системи магній–літій можна підвищити додатковим легуванням алюмінієм, цинком, кадмієм, РЗМ. Сплав МА18 відрізняється найменшою щільністю (1,6 г/см<sup>3</sup>) серед магнієвих сплавів. Він має високу пластичність і ударну в'язкість, найвищу технологічність; листове штампування, гнуття і витягування можуть проводитися в холодному стані.

*Ливарні сплави.* За хімічним складом ливарні магнієві сплави поділяють на три групи:

- 1) на основі системи магній – алюміній – цинк (МЛ3, МЛ4, МЛ4пч, МЛ5пч, МЛ5он, МЛ6);
- 2) на основі системи магній – цинк – цирконій (МЛ8, МЛ12, МЛ15, МЛ17, МЛ18);
- 3) на основі системи магній – РЗМ (МЛ9, МЛ10, МЛ11, МЛ19).

*Сплави першої групи.* Сплави системи магній–алюміній–цинк (МЛ3, МЛ4, МЛ5, МЛ6) призначені для виробництва високонавантажених виливок, що працюють в атмосфері з великою вологістю. Для підвищення корозійної стійкості в сплави вводять 0,1...0,5 % мангану, а для зниження окислюваності 0,001...0,002 % берилію або 0,5...0,1 % кальцію. Сплави цієї групи відносять до високоміцних. Основним зміцнювачем в них є алюміній, розчинність якого в магнії при евтектичній температурі складає 17,4 %, а при нормальній температурі 2,8 %. Цинк також зміцнює магній, але менш ефективно, ніж алюміній.

*Сплави другої групи.* Сплави системи магній–цинк–цирконій (МЛ8, МЛ12) також відносять до високоміцних. Вони відрізняються від інших груп магнієвих сплавів підвищеними механічними властивостями і доброю оброблюваністю різанням. Легування їх лантаном покращує ливарні властивості, дещо підвищує жароміцність і зварюваність, але знижує міцність і пластичність при нормальній температурі. Ці сплави мають задовільні ливарні властивості, мають подрібнене цирконієм зерно, здатні зміцнюватися при термічній обробці. З них можна отримувати виливки з однорідними властивостями в різних по товщині перетинах.

Сплави другої групи використовують для виготовлення виливок, що працюють при 200...250 °С і високих навантаженнях.

*Сплави третьої групи.* Сплави системи магній–РЗМ–цирконій (МЛ10, МЛ11, МЛ19) мають високу жароміцність і добру корозійну стійкість. Вони призначені для тривалої роботи при 250...350 °С і короткочасної роботи при 400 °С. Ці сплави мають хороші ливарні властивості, високу герметичність, малу схильність до утворення мікрорихлості і усадкових тріщин, високі і однорідні механічні властивості в перетинах різної товщини. Сплави з РЗМ застосовують для виготовлення виливок, що працюють під впливом статичних і утомних навантажень.

Для виготовлення виливок частіше за інших використовують сплави першої групи. З них кращі ливарні властивості мають сплави МЛ5 і МЛ6. З них виготовляють високонавантажені виливки, що працюють у важких атмосферних умовах (висока вологість).

### 3.2 Особливості плавки, дегазація і модифікування магнієвих сплавів

Виплавка магнієвих сплавів зв'язана з рядом труднощів. Сплави легко окислюються і поглинають багато водню. На відміну від алюмінієвих сплавів на поверхні магнієвих розплавів утворюється рихла оксидна плівка, що не захищає його від подальшого окиснення і загоряння. Окиснення сповільнюється в атмосфері сірчастого і вуглекислого газів. Протягом плавки магній і його сплави вступають у взаємодію з азотом, утворюючи нітрид, та інтенсивно поглинають водень. Оксиди і нітрид, знаходячись у зваженому стані, не розчиняються в металі і є причиною погіршення механічних властивостей сплаву і утворення мікропористості у виливках. Вміст водню в магнієвих сплавах (МЛ4, МЛ5, МЛ6) досягає  $34 \text{ см}^3$  на 100 г металу.

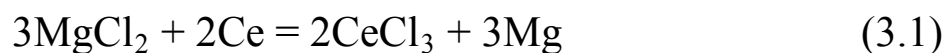
Легування магнію церієм, лантаном, неодимом, літієм або ітрієм підсилює окиснення. Різде зниження окислюваності досягається введенням в розплав 0,002...0,005 % берилію. При вищому вмісті берилію в сплавах другої групи спостерігається зростання зерна і зниження технологічних властивостей.

Для захисту від окиснення при плавці застосовують флюси, що складаються з хлоридних і фторидних солей лужних і лужноземельних металів. Основою більшої частини флюсів є карналіт ( $\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl}$ ). Хлорид барію вводять у флюс як обважнювач, сприяючий кращому відділенню флюсу від сплаву. Фторид кальцію підвищує в'язкість і збільшує рафінуючу здатність флюсу. Оксид магнію додають як загусник, що полегшує утворення кірки при перегріві.

На металургійних заводах широко застосовують флюси ВІ2 і ВІ3 (табл. 3.2). Вони мають хороші захисні та рафінуючі властивості при плавці більшості магнієвих сплавів. Флюс, що складається з хлориду і фториду літію, використовують при виплавці магнієво-літієвих сплавів. Під час плавки сплавів з рідкісноземельними металами і ітрієм використовують флюси, що не містять хлориду магнію, оскільки в результаті обмінних реакцій:

Таблиця 3.2 – Склад флюсів для виплавки магнієвих сплавів

Флюс	Хімічний склад, %							
	MgCl <sub>2</sub>	KCl	NaCl	CaCl <sub>2</sub>	BaCl <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>	AlF <sub>3</sub>	інші елементи
ВИ2	38...46	32...40	–	10	5...8	3...5	–	до 1,5 MgO; до 3 H <sub>2</sub> O
ВИ3	30...40	25...35	–	до 7	–	15–20	–	7...10 MgO; до 3 H <sub>2</sub> O
1	–	–	–	–	–	–	–	20 LiF; 80 LiCl
2	–	–	14...21	47...51	26...29	2...5	–	до 2 H <sub>2</sub> O
3	–	22...26	17...20	35...39	19...23	2...5	–	до 2 H <sub>2</sub> O
4	–	55	–	28	15	2	–	–
ФЛ1	–	–	–	–	–	13	40	32 MgF <sub>2</sub> ; 15 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
ФЛ5	25...42	20...36	–	–	4...8	0,5...10	3...14	3...11 MgF <sub>2</sub> ; 1,8 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
ВИАМ1	–	–	–	–	–	3,5	23,5	40 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 33 Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>
ВИАМ5	–	–	–	–	–	17,5	15,0	17,5 MgF <sub>2</sub> ; 50 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Примітка	Покривно-рафінуючий флюс ВИ2 застосовується для плавлення у стаціонарних печах і тиглях; покривно-рафінуючий флюс ВИ3 – для плавлення у виймальних тиглях; флюс покривний №1 – для сплавів магнію з літєм; покривні флюси №2 і №3 – для сплавів магнію з РЗМ; покривний флюс №4 – для сплавів магнію з торієм і цирконієм; ФЛ1 і ФЛ5 – безхлоридні покривно-рафінуючі флюси; ВИАМ1 і ВИАМ5 – рафінуючі флюси.							



та



мають місце значні втрати (до 20 %) рідкісноземельних елементів і ітрію.

Надходження флюсів в розплав (а згодом і у виливок) приводить до утворення вогнищ інтенсивної корозії через їх високу гігроскопічність. Тому в даний час розроблена технологія безфлюсового плавлення. Захист розплавів від інтенсивного окиснення при цьому здійснюється введенням в пічну атмосферу 0,1 %  $\text{SF}_6$ .

Для підвищення корозійної стійкості і механічних властивостей магнієвих сплавів розроблено декілька способів обробки їх в рідкому стані, наприклад спосіб послідовної обробки ванни рідкого сплаву кальцієм і гексахлоретаном. Вказану обробку здійснюють за наступною технологією. Кальцій в кількості 0,1 % додають у сплав після його рафінування при температурі 750 °С. Наважку кальцію за допомогою “дзвоника” занурюють у розплав на 2/3 глибини тигля. Через 10 хвилин після завантаження кальцію сплав обробляють гексахлоретаном при температурі 750...780 °С. Наважку гексахлоретану в кількості 0,07...0,10 % від маси шихти завертають в алюмінієву фольгу або тонкий папір і накривають “дзвоником”, який занурюють також на 2/3 глибини тигля. Після закінчення реакції з поверхні сплаву знімають шлак, сплав покривають шаром флюсу залежно від титу тигля, що застосовується (стаціонарний або виймальний). Послідовна обробка магнієвого сплаву кальцієм і гексахлоретаном підвищує щільність виливок і дозволяє підвищити їх механічні властивості.

Магнієві сплави протягом плавлення і розливання поглинають більшу кількість водню порівняно з будь-яким зі сплавів кольорових металів. Наприклад, якщо в алюмінієвих сплавах вміст водню складає 1...5  $\text{см}^3$  на 100 г сплаву, то в магнієвих сплавах вміст водню може досягати 20...30  $\text{см}^3$  на 100 г сплаву.

Найбільш поширеним способом дегазації магнієвих сплавів є продування через розплав інертних газів (гелію, аргону), а також хі-



мічно активних газів (хлору, азоту).

*Дегазація інертним газом.* Продування сплаву інертним газом проводять при температурі 740...750 °С. Швидкість продування встановлюється такою, щоб досягти інтенсивного перемішування розплаву та уникнути виплесків сплаву на стінки печі. Тривалість продування для зменшення вмісту водню в магнієвому сплаві до 8...10 см<sup>3</sup> на 100 г сплаву складає 15...30 хвилин. Витрата газу складає 0,3..0,5 м<sup>3</sup>/т сплаву.

*Дегазація активними газами.* Дія азоту при дегазації магнієвих сплавів аналогічна дії інертного газу. Проте під час проходження бульбашок азоту через сплав відбувається часткова взаємодія сплаву з газом і утворюється нітрид магнію, що приводить до деякого забруднення сплаву неметалевими включеннями. Продування магнієвих сплавів азотом здійснюється при температурі 660...685 °С. Під час продування сплаву в цьому інтервалі температур не відбувається інтенсивної хімічної реакції. При більших температурах (понад 700 °С) відбувається активне утворення нітриду магнію. Після закінчення дегазації сплав переливають в роздавальні тиглі, очищують дзеркало сплаву, рафінують і модифікують. Перед операцією модифікування можливе проведення додаткової дегазації сплаву при температурі 740...760 °С продуванням хлору зі швидкістю, що спричиняє невелике перемішування сплаву. Продування здійснюють протягом 3...5 хвилин при невеликому надлишку хлору.

Іноді дегазація хлором поєднується з операцією модифікування сплаву. В цьому випадку через сплав при температурі 690...710 °С продувають газову суміш, що містить 1,0...1,5 % хлору і 0,25 % чотирьохлористого вуглецю.

Для подрібнення зерна і підвищення механічних властивостей магнієві сплави, що містять алюміній, модифікують перегрівом, додаванням речовин, що містять вуглець, і хлорного заліза.

Для подрібнення зерна перегріванням розплав після рафінування нагрівають в сталевому тиглі до 850...925 °С, витримують при цій температурі 10...15 хвилин і потім швидко охолоджують до температури розливання 680...720 °С. Припускають, що утворення

великої кількості тонкодисперсних частинок  $\text{FeAl}_3$ , які є центрами кристалізації, приводить до подрібнення зерна сплавів у виливках. Недоліком способу є зниження продуктивності печей, підвищений угар металу, велика витрата тиглів і палива. Модифікування перегріванням відбувається успішно, якщо в сплаві міститься не менше 0,001 % заліза і 0,2 % мангана.

### **3.3 Способи виплавки магнієвих сплавів**

Магнієві сплави плавлять у тигельних, відбивних і індукційних печах промислової частоти, футерованих магнезитом. Широко використовують сталеві тиглі. Залежно від масштабу виробництва і маси виливок застосовують три способи виплавки магнієвих сплавів: у стаціонарних і виймальних тиглях, дуплекс-процес (відбивна і тигельна печі або індукційна і тигельна печі).

*Плавку в стаціонарних тиглях* використовують в масовому або великосерійному виробництві дрібних виливок. Сталевий литий тигель нагрівають до 500 °С і завантажують в нього флюс ВІ2 до 10 % від маси шихти. Флюс розплавляють, а потім невеликими порціями завантажують підігріті до 150 °С шихтові матеріали. Після розплавлення шихти розплав нагрівають до 700...720 °С і проводять рафінування і модифікування. Після витримки розплаву протягом 10...15 хвилин відбирають проби на злам, хімічний і спектральний аналізи, а потім невеликими ковшами метал розливають по формах. Залишок металу (25...30 % об'єму розплаву в тиглі), забруднений неметалевими включеннями і флюсом, зливають після кожної плавки і використовують для приготування підготовчих сплавів. Під час переплавлення сплав рафінують флюсом.

При виготовленні крупних виливок плавку проводять під шаром флюсу ВІ3 у виймальних зварних сталевих тиглях з перегородкою і дуплекс-процесом. Цей флюс має меншу щільність, ніж флюс ВІ2, тому спливає на поверхню розплаву і під час заливки форм утримується в тиглі перегородкою. Для заповнення форм використовують 2/3 об'єму розплаву. Залишок розплаву, забруднений флюсом і неметалевими включеннями, направляють на переплавку і

рафінування. Після проведення всіх операцій рафінування і модифікування тигель виймають з печі і транспортують до місця заливання.

Інтенсивна взаємодія магнієвих розплавів з пічними газами, футеровкою і вологою супроводжується збагаченням їх оксидами і воднем, тому їх завжди піддають рафінуванню.

Найпростіший спосіб відділення неметалевих включень – відстоювання. Основою його є процес седиментації. Стосовно магнієвих сплавів відстоювання зазвичай проводять при 750 °С. Зі збільшенням температури і часу витримки ефективність очищення зростає. Проте цей спосіб малопродуктивний, особливо у разі відділення дрібних включень. Ефективнішим способом очищення є обробка розплаву флюсами. Основою цього способу є процес адсорбції включень рідкими солями. Ефективність очищення визначається величиною поверхні контакту металу з флюсом і зростає у міру погіршення змочуваності включень металом в середовищі флюсу і зменшення міжфазного натягу на межі метал–флюс.

При плавці в стаціонарному тиглі для рафінування використовують флюс ВІ2, при *плавці у виймальному тиглі* – легший флюс ВІ3. Перед рафінуванням розплав нагрівають до 700 °С, видаляють покривний флюс і вводять в сплав 0,001...0,002 % берилію або 0,5 % кальцію для захисту від загоряння. Рафінування здійснюють засипкою на поверхню розплаву порції флюсу (близько 1 % маси розплаву), розплавленням і замішуванням його в розплав на 2/3 висоти тигля протягом 5...6 хвилин. Після цього видаляють використаний флюс і наносять свіжий. Хлорид магнію, що входить до складу флюсу, змочує неметалеві включення, збільшує їх розміри і сприяє їх осадженню або спливанню.

Повніше видалення оксидних плівок може бути досягнуто пропусканням розплаву через рідкі флюси (табл. 3.2).

Найбільш високого рівня очищення від неметалевих включень досягають фільтруванням магнієвих розплавів через зернисті фільтри з магнезиту. Досвід тривалого використання магнезитових фільтрів показав, що фільтрування дозволяє майже повністю ліквідувати

брак виливок по оксидних плівках і флюсових включеннях. Ефективність очищення зростає у міру зменшення розміру зерен фільтру і збільшення товщини шару, що фільтрує. Технологію фільтрування і розташування фільтрів при литті магнієвих сплавів приймають такими ж, як і при литті алюмінієвих сплавів.

Якість рафінування оцінюють відношенням площі зламу технологічної проби  $F_m$ , зайнятої неметалевими (темними) включеннями, до загальної площі зламу  $F_{зл}$ , тобто коефіцієнтом ураженості зламу  $K_n$ :

$$K_n = F_m / F_{зл}. \quad (3.3)$$

Первинні магнієві сплави переважно готують в *електричних печах опор* СМТ. Тигель з рідким магнієм-сирцем поміщають в піч, захищають його поверхню свіжим покривним флюсом і розігрівають магній до 760...770 °С. Далі встановлюють механічну мішалку-турбінку, що забезпечує при її роботі інтенсивну циркуляцію в товщі розплавленого металу. З легуючих компонентів першим вводять манган. Для цього при безперервному перемішуванні магнію наважку роздрібненого мангана, що розрахована за верхню межею вмісту в сплаві, змішують з флюсом у співвідношенні 1:1, і вводять невеликими порціями протягом 5...7 хвилин. Далі метал інтенсивно перемішують протягом 20 хвилин, присипаючи його поверхню флюсом. Далі вводять розраховану кількість алюмінію і цинку, і знов перемішують розплав у тиглі протягом 10 хвилин без відключення печі. Потім відбирають пробу сплаву на експрес-аналіз. У разі задовільних даних аналізу додають на поверхню покривного флюсу в тиглі приблизно 250...300 г борної кислоти для створення твердішої кірки флюсу. Піч вимикають, тигель зі сплавом витримують (відстоюють) в печі до 710...690 °С, після чого направляють на розливання.

Дуже трудомісткою операцією при приготуванні сплавів системи Mg–Zn–Zr є легування цирконієм. Додавання металевого цирконію в магній приводить до великих втрат і цирконію, і магнію внаслідок спалаху магнію. Труднощів вдається уникнути при завантаженні цирконію у вигляді магнієво-цирконієвої лігатури,

приготованої заздалегідь.

Технологія виробництва лігатури Mg–Zr складається з такої послідовності операцій: завантаження кристалевого фторцирконату калію  $K_2ZrF_6$  в розплав карналіту при перемішуванні з певною швидкістю; додавання рідкого магнію для відновлення цирконію з утворенням в сольовому середовищі осаду лігатури Mg–Zr, що містить 50...70 % цирконію; зливання рідкої солі з осаду “багатої” лігатури; розбавлення “багатої” лігатури розплавом магнію до отримання складу, що містить 10...20 % цирконію; усереднююче перемішування і розливання в чушки на ливарному конвеєрі.

Хороші результати отримують також при використанні цирконієвого флюсу – розплаву хлоридів лужних і лужноземельних металів, що містять  $ZrCl_4$  і нижчі хлориди цирконію. Протікання металотермічних реакцій в товщі металу при його інтенсивному перемішуванні забезпечує швидке і рівномірне легування сплаву цирконієм.

Сплави системи Mg–Al–Zn–Mn можна приготувати в печі безперервного рафінування дзвонового типу. В магній-сирець, залитий в “дзвін” печі, завантажується рідкий сплав системи Al–Zn, приготований окремо, а потім завантажується манган у вигляді чушкової лігатури Mg–Mn, що містить 2 % мангана. Кондукційний електромагнітний насос здійснює перемішування сплаву, перекачуючи метал з ливарної камери в рафінувальну. Щільність сольового розплаву, що використовується, при 700 °C має бути декілька вищою за щільність сплаву, що готується. Основними труднощами при приготуванні сплавів в печі дзвонового типу є дуже тривале перемішування розплаву, що знаходиться в “дзвону” печі, необхідність частого очищення печі від шламу і металевих осадів і ін.

*Дуплекс-процес.* Приготування магнієвих сплавів дуплекс-процесом передбачає застосування тигельних печей для виплавки сплаву без флюсу (або з мінімальною його витратою) і багатокамерної сольової печі для рафінування і відстоювання сплаву. Таким чином, при дуплекс-процесі технологічний цикл отримання сплавів розділяється на два процеси, що здійснюються в різних печах. Такий спосіб отримання сплавів забезпечує сприятливіші

температурні й інші умови здійснення процесів плавлення та рафінування, і одночасно збільшує продуктивність агрегату.

Плавильний агрегат складається з 2...3 тигельних печей місткістю 0,5...5,0 т і багатокамерної сольової печі місткістю 10...25 т для безперервного рафінування сплавів, забезпечує виготовлення до 100 т чушок магнієвих сплавів за добу.

Рідкий магній-сирець при температурі 680...700 °С вакуумним ковшом витягується з електролізерів і зливається в тигель шахтної електропечі опору (СМТ), де тверда шихта (Al, Zn, Mn) сплавається з рідким магнієм-сирцем за участю захисного флюсу. Отриманий попередній сплав при температурі 660...680 °С з тигля печі СМТ подається в заливальну камеру печі безперервного рафінування сплавів (ПНРС). В печі ПНРС сольовий розплав, що складається з хлоридів натрію і калію з додаванням 5...10 %  $MgCl_2$  і 25...35 %  $CaCl_2$ , є одночасно гріючим і рафінуючим середовищем для магнію. По пересувних каналах печі ПНРС розплав послідовно перетікає із заливальної камери в рафінувальну і далі у ливарну камери. При цьому сплав очищається від неметалевих домішок (оксидів, нітридів, галогенідів) і тугоплавких інтерметалідів ( $Fe_xMn_y$ ,  $Fe_xTi_y$  і т.п.). З ливарної камери рафінований магнієвий сплав за допомогою насоса-дозатора подається на розливання.

### **3.4 Переробка вторинної магнієвої сировини в печах з сольовим обігрівом**

Магнієві відходи та брухт, що надходять на переробку, залежно від вмісту магнію розділяють на чотири сорти:

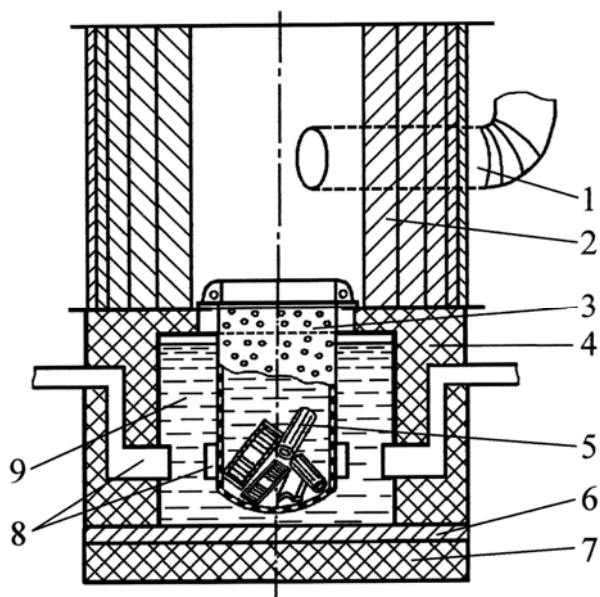
- 1 сорт – відходи магнієвих сплавів, які утворюються при виготовленні деталей, з вмістом магнію та магнієвих сплавів не менше 98 %;
- 2 сорт – брухт з вмістом магнію і магнієвих сплавів не менше 85 %;
- 3 сорт – брухт з вмістом магнію та магнієвих сплавів не менше 55 %;
- 4 сорт – брухт і відходи з вмістом магнію та магнієвих сплавів не менше 40 %.

Відходи першого сорту (обрізки листового магнію і сплавів, стружка, брак прокату та ін.) безпосередньо переплавляють на відповідні марки магнієвих сплавів. Магнієві відходи інших сортів попередньо відокремлюють від приробок інших металів спільним переплавленням у печах з сольовим обігрівом. Спільне переплавлення відходів 2-го, 3-го, 4-го сортів приводить до деякого завищення собівартості вторинного сплаву, що отримується, наприклад, з відходів 4-го сорту. Під час переплавки мідь, нікель та інші метали встигають частково розчинитися в магнієвому сплаві та забруднити його. Тому одержані вторинні магнієві сплави використовуються як проміжні сплави для підшихтування до рідкого магнію для виробництва стандартних магнієвих сплавів.

У відходах, що поступають на заводи, нерідко переважає 4-й сорт, отже, простим переплавленням або підшихтуванням до магнію вдається переробити лише частину відходів. Потрібно з вторинної сировини отримувати сплави, що близькі по складу і властивостям до первинних сплавів, використовуючи для підшихтування тільки той брухт і відходи магнієвих сплавів, які дозволяють отримувати саме високоякісні сплави.

Брухт і відходи магнієвих сплавів переплавляють в печі з сольовим обігрівом, що являє собою сталевий циліндричний кожух, футерований шамотом (рис. 3.1). У кладці ванни встановлено шість сталевих електродів: три працюючих і три резервних. На електроди подається напруга 26...61 В від трифазного трансформатора потужністю 485 кВА, сила струму до 4630 А. Розплавлений електроліт, що містить 29...34 %  $MgCl_2$ , 35...40 %  $KCl$ , 5...8 %  $NaCl$ , 10..15 %  $BaCl_2$ , є опором печі.

Вторинну магнієву сировину завантажують у перфоровану сталеву реторту і після прогріву над дзеркалом електроліту протягом 15...20 хвилин занурюють у розплав, що має температуру 700...720 °С. Після розплавлення деталей з магнієвих і алюмінієвих сплавів реторту зі сталевими деталями (приробками), що не розплавилася, швидко витягають мостовим краном з ванни, охолоджують і очищують. Магнієвий сплав з поверхні електроліту вичерпують спеціальним ковшем зі стопорним пристроєм і переливають у



- 1 – вентиляційне відсмоктування;
- 2 – сталеві штори;
- 3 – сталевий перфорований контейнер;
- 4 – шамотна футеровка;
- 5 – сольовий розплав;
- 6 – сталеві електроди змінного струму;
- 7 – брухт магнієвих сплавів;
- 8 – черинь печі;
- 9 – сталевий кожух

Рисунок 3.1 – Піч з сольовим обігрівом

тигельні печі СМТ–3.

На черені печі з сольовим обігрівом збирається алюмінієвий сплав, що періодично видаляють відцентровим насосом у короби. Приблизний склад “донного металу”, %: 25...30 Al; 1,0...1,2 Zn; 0,2...0,3 Mn; до 2 Si; 4...6 Cu; 0,15...0,25 Ni. Донний метал містить багато корисних складових. Однак у даний час відсутні технічно і економічно доцільні способи його переробки.

Надалі за даними хімічного аналізу розраховують шихту. На підставі вмісту в розплавах вторинного сплаву шкідливих домішок, а також цинку, алюмінію і мангана, певну кількість твердого вторинного сплаву підшихтовують до рідкого магнію для одержання стандартних сплавів МА8Ц, МА8Цон або М85, а також сплавів МГЦ–1 і МГЦ–2 за технічними умовами деяких заводів-споживачів. Магнієві сплави, що йдуть на невідповідальні деталі (внаслідок їх зниженої опірності корозії і знижених механічних властивостей), містять, %: 12 Al; 1 Mn; 1,5 Zn; домішки (0,4...0,5 Si; 0,3...0,5 Cu; до 0,1 Fe; до 0,01 Ni), решта Mg. Для підшихтування вдається використовувати (з врахуванням випуску стандартних сплавів) близько половини вторинного сплаву.

Сплав у тигельних печах нагрівають до 720 °С, рафінують, пере-



мішуючи 10 хвилин з добавкою барієвого флюсу (10...15 кг на 1 т сплаву), відстоюють протягом 20 хвилин і розливають на конвейері. При цьому порядок виконання технологічних операцій той же, що і при розливанні магнію і первинних сплавів.

В зв'язку з розширенням сфер застосування магнієвих сплавів ускладнюються деталі, що виготовляються з них, і збільшується кількість приробок з інших металів, а отже, знижується сортність брухту і відходів цих деталей. Ручне розбирання відходів для розділення різнорідних металів і сплавів економічно не вигідне. Все це вимагає пошуку раціональних шляхів переробки (крім підшихтування) майже половини брухту і відходів магнієвих сплавів.

Найбільш перспективні наступні способи переробки магнієвого брухту і відходів: застосування вторинних сплавів для десульфурзації чавуну, виробництво протекторних сплавів технічної чистоти, створення нових композицій сплавів для конструкційних цілей з підвищеним вмістом цинку, міді і силіцію.

***Комплексна переробка вторинної магнієвої сировини.*** В зв'язку з високими безповоротними втратами магнію під час переробки відходів магнієвих сплавів у печах з сольовим обігрівом виникла необхідність розробки технології комплексної переробки брухту і відходів магнієвих сплавів (рис. 3.2).

Раціональна переробка брухту і відходів магнієвих сплавів забезпечить видалення всіх шкідливих домішок і отримання такого продукту переробки, який можна направляти на приготування стандартних магнієвих сплавів без витрати первинного магнію на підшихтування

### **Питання для самоконтролю**

1. Де застосовують і як класифікують магнієві сплави?
2. На які групи поділяють деформівні магнієві сплави?
3. Які групи магнієвих сплавів застосовують для виготовлення фасонних виливок?
4. Як взаємодіють магній і його сплави з газами пічної атмосфери?
5. Які флюси використовують для захисту магнієвих розплавів від окислення і загоряння?

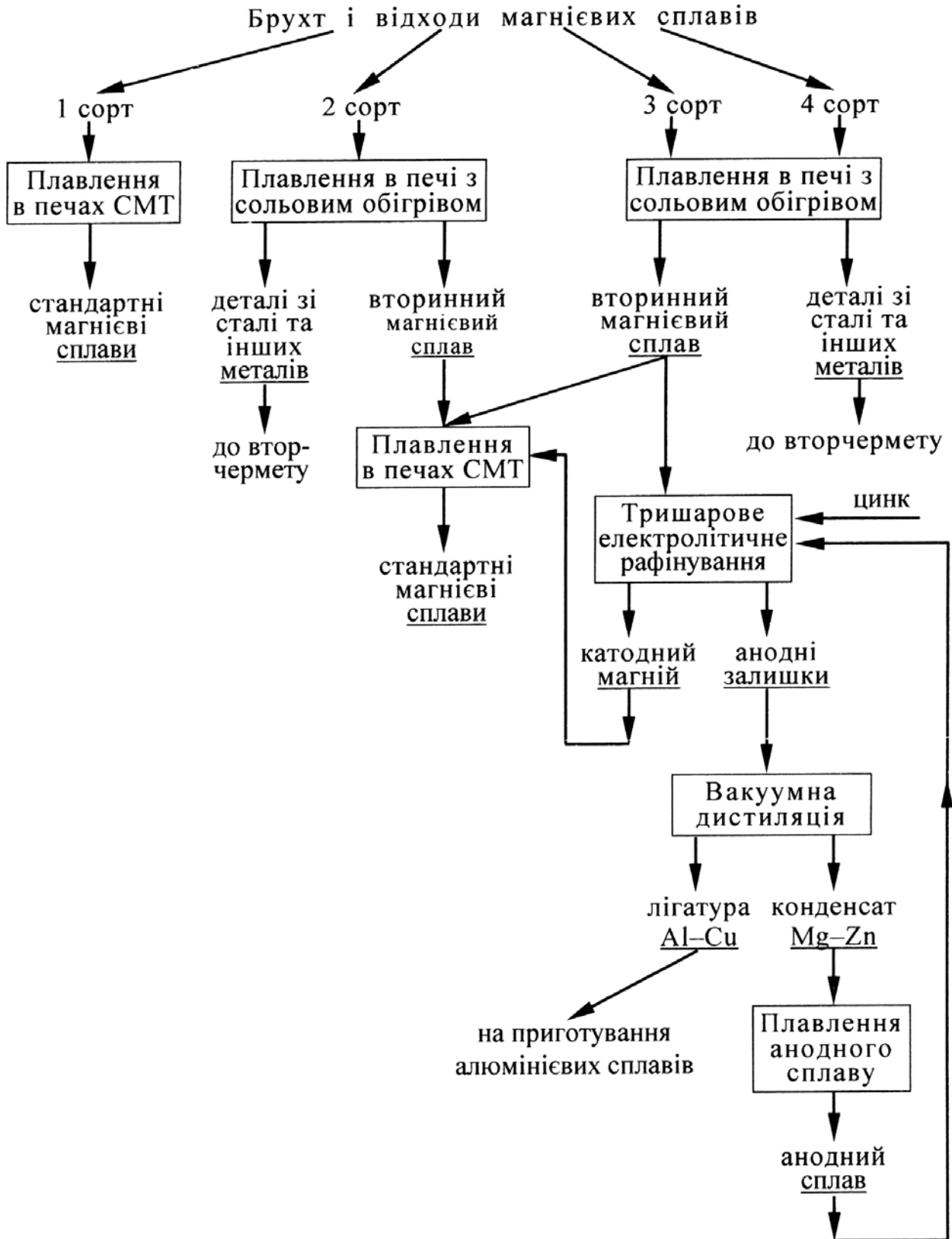


Рисунок 3.2 – Технологічна схема комплексної переробки вторинної магнієвої сировини

6. Чому для виплавки магнієвих сплавів з рідкісноземельними елементами використовують флюси, що не містять хлорид магнію?
7. Як забезпечується захист від окислення під час безфлюсової виплавки магнієвих сплавів?
8. У якому вигляді і в якій послідовності здійснюють завантаження шихтових матеріалів при виплавці магнієвих сплавів?
9. Якими способами здійснюють рафінування магнієвих розплавів від неметалевих включень?
10. Який з методів очищення магнієвих розплавів найбільш ефективний?
11. Які флюси використовують для рафінування магнієвих сплавів? У чому їх відмінність від покривних флюсів?
12. Які матеріали використовують для виготовлення зернистих фільтрів?
13. Назвіть кращий режим рафінування магнієвих розплавів флюсами.
14. Які параметри зернистих фільтрів забезпечують кращі умови очищення магнієвих сплавів від оксидних плівок і шлакових включень?
15. У чому суть очищення магнієвих розплавів зернистими фільтрами?
16. Які методи контролю використовують для оцінки вмісту неметалевих включень в магнієвих сплавах?
17. Які методи використовують для дегазації магнієвих розплавів?
18. При яких температурах здійснюють продування магнієвих розплавів азотом, гелієм, хлором або сумішшю гелію з хлоридами?

## 4 ВИРОБНИЦТВО МІДНИХ СПЛАВІВ

### 4.1 Склад, властивості і використання мідних сплавів

Основна перевага мідних сплавів полягає в тому, що вони мають високу корозійну стійкість, тепло- і електропровідність, хороший опір зносу, низький коефіцієнт тертя, хорошу притираємість в парі з іншими твердішими металами, добре працюють при негативних температурах до  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Недоліком мідних сплавів є висока щільність і низькі властивості при підвищених температурах.

Для виготовлення виробів застосовують мідні ливарні та деформівні сплави. Мідні сплави поділяють на бронзу і латунь.

Для виготовлення фасонних виливок використовують три групи мідних сплавів: олов'яні бронзи (сплави міді з оловом), безолов'яні бронзи (сплави міді з алюмінієм, залізом, манганом, нікелем та ін.) і латуні.

Олов'яні і безолов'яні бронзи, латуні мають високі механічні і антифрикційні властивості, добре протистоять корозії в морській воді, парі і інших середовищах, зберігають високу пластичність при низьких температурах. Мідні сплави немагнітні, легко поліруються і обробляються різанням.

Латуні – сплави на основі міді з цинком (вміст цинку не перевищує 50 %), в яких можуть міститися також і інші елементи (силіцій, алюміній, залізо, манган, свинець).

**Ливарні сплави.** Склад найбільш поширених бронз і латуней приведений в табл. 4.1.

*Олов'яні бронзи* широко застосовують при виготовленні арматури, підшипників, шестерень, втулок, що працюють в умовах стирання, підвищеного тиску води і водяної пари. Характерною особливістю цієї групи сплавів є широкий інтервал між температурами ліквідусу і солідусу ( $150\text{...}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), що зумовлює утворення у вилівках розсіяної усадкової пористості. Олов'яні бронзи мають хороші ливарні властивості, що дозволяють отримувати при литті в землю складні по конфігурації виливки.

Таблиця 4.1 – Хімічний склад мідних ливарних сплавів

Марка	Вміст основних елементів, %					
	Sn	Pb	Al	Mn	Cu	інші
Бронзи олов'яні						
БрО10Ф1	9,0...11,0	–	–	–	основа	0,4...1,1 P
БрО10Ц2	9,0...11,0	–	–	–	основа	1,0...3,0 Zn
БрО5Ц5С5	4,0...6,0	4,0...6,0	–	–	основа	4,0...6,0 Zn
БрО3Ц12С5	2,0...3,5	3,0...6,0	–	–	основа	8,0...15,0 Zn
Бронзи безолов'яні						
БрА9Мц2Л	–	–	8,0...9,5	1,5...2,5	основа	–
БрА9Ж3Л	–	–	8,0...10,5	–	основа	2,0...4,0 Fe
БрА10Ж3Мц2	–	–	9,0...11,0	1,0...3,0	основа	2,0...4,0 Fe
БрС30	–	27,0...31,0	–	–	основа	–
Латуні						
ЛЦ40С	–	0,8...2,0	–	–	57,0...61,0	–
ЛЦ40Мц1,5	–	–	–	1,0...2,0	57,0...60,0	–
ЛЦ30А3	–	–	2,0...3,0	–	66,0...68,0	–
ЛЦ16К4	–	–	–	–	78,0...81,0	3,0...4,5 Si

Бронзи з високим вмістом олова (БрО17, БрО10Ц2, БрО10Ф1) враховуючи його високу вартість і дефіцитність застосовують лише для виготовлення виробів відповідального призначення. Для рядових виливків використовують малоолов'яні бронзи.

З домішок, присутніх в бронзах, найбільш шкідливо впливають на властивості алюміній і силіцій. Соті частки відсотка цих елементів знижують механічні властивості бронзи і сприяють посиленню поглинання ними водню під час плавлення.

*Безолов'яні бронзи* використовують як замітники олов'яних. По механічних, корозійних і антифрикційних властивостях безолов'яні бронзи перевищують олов'яні. Серед сплавів цієї групи найширше застосовують алюмінієві бронзи. Вони мають хорошу корозійну стійкість в прісній і морській воді, добре протистоять руйнуванню в умовах кавітації, мають менший, ніж олов'яні бронзи антифрикційний знос. Алюмінієві бронзи застосовують для

виготовлення грібних гвинтів крупних суден, важконавантажених шестерень і зубчатих коліс, корпусів насосів і інших виливок. Механічні, технологічні і експлуатаційні властивості алюмінієвих бронз поліпшуються під час легування залізом, манганом, нікелем і іншими елементами.

Свинцева бронза БрС30 має низький коефіцієнт тертя і високу зносостійкість під час тертя в умовах великих питомих навантажень і швидкостей ковзання. Тому вона застосовується як заміник олов'яних бронз при виготовленні вкладишів підшипників. Особливість свинцевої бронзи – сильна ліквация свинцю. Дисперсний розподіл свинцю в бронзі може бути досягнутий великими швидкостями охолодження.

*Латуні.* Латунь за хімічним складом поділяється на подвійну (просту), що складається з міді і цинку, і спеціальну, що містить легуючі компоненти: залізо, манган, нікель, силіцій, олово і свинець.

Для фасонного лиття застосовують складнолеговані мідноцинкові сплави. Прості латуні використовують порівняно рідко.

Легування подвійних латуней алюмінієм і силіцієм підвищує рідкоплинність, корозійну стійкість сплавів і механічні властивості і зменшує угар цинку під час плавлення. Разом з тим алюміній і силіцій підвищують схильність латуней до газонасичення і утворення пористості. Залізо і манган збільшують значення механічних властивостей сплавів, але знижують рідкоплинність. Олово в кількості до 2...2,5 % помітно не впливає на ливарні властивості латуней, підвищує їх корозійні і механічні властивості. Домішки алюмінію і олова шкідливо впливають на ливарні властивості кременистої латуні ЛЦ16К4, знижуючи рідкоплинність і збільшуючи схильність до газопоглинання і утворення газової пористості.

*Деформівні сплави.* Для отримання деформованих напівфабрикатів використовують велике число різних мідних сплавів, які поділяють на чотири групи: олов'яні бронзи, безолов'яні бронзи, латуні і міднонікелеві сплави.

Більшість деформівних сплавів має однофазну структуру і високу пластичність в гарячому і холодному стані. Деякі з них (алюмінієві і олов'яні бронзи, складнолеговані латуні) по складу

близькі до ливарних сплавів.

Особливу групу складають міднонікелеві сплави, які широко застосовуються для виготовлення посуду (мельхіор, нейзільбер), дроту для термопар (константан, копель) і інших цілей. Ці сплави мають високі корозійні властивості.

## 4.2 Особливості плавки і рафінування мідних сплавів

Плавку мідних сплавів проводять в тигельних і шахтних індукційних і відбивних печах, футерованих шамотом або кварцом.

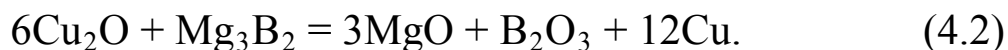
Плавку мідних сплавів здійснюють на повітрі, в середовищі захисних газів і у вакуумі. Найбільш важливим для якості металу під час плавки є контроль за протіканням фізико-хімічних процесів взаємодії металу з киснем, воднем, сіркою, футеровкою печей, шлаками і флюсами.

При плавці на повітрі мідні сплави окислюються і насичуються воднем. Окислюються в першу чергу елементи, що мають вищий, ніж мідь, ізобарний потенціал утворення оксиду. З цієї причини легуючі елементи мідних сплавів (алюміній, берилій, олово, цинк та ін.) розкислюють мідь, утворюючи тверді, рідкі і газоподібні оксиди. Тверді оксиди повільно спливають в розплавах і можуть потрапити у вилівок.

За винятком латуней, розчиненню водню в яких перешкоджає високий тиск пари цинку, мідні сплави інтенсивно поглинають водень і при кристалізації схильні до утворення газової пористості. Більшою мірою до цього схильні сплави з широким інтервалом кристалізації. Залежно від складу бронз і умов їх плавлення вміст водню в 100 г металу може складати від 1,5 до 20 см<sup>3</sup>. З підвищенням температури інтенсивність взаємодії з газами збільшується. До взаємодії з газами найбільш схильні алюмінієві і силіцієві бронзи та латуні.

Під час плавлення міді на повітрі широко застосовується видалення кисню за допомогою розкислювачів. Для цього до розплаву додають речовини, що мають більшу спорідненість до кисню, ніж мідь. Як поверхневі розкислювачі використовують карбід

кальцію  $\text{CaC}_2$ , борид магнію  $\text{Mg}_3\text{B}_2$ , вуглець і борний шлак ( $\text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ ). Витрата поверхневих розкислювачів складає 1...3 % від маси розплаву. Відновлення міді може відбуватися за реакціями:



З розчинних розкислювачів найчастіше застосовують фосфор, який вводять у вигляді лігатури мідь–фосфор (9...13 % P). Залежно від вмісту кисню в міді кількість фосфору приймають в межах 0,1...0,15 % від маси розплаву. Відновлення міді, що знаходиться при температурах рафінування в рідкому стані, може супроводжуватися утворенням пари  $\text{P}_2\text{O}_5$  і одночасно сполуки  $2\text{Cu}_2\text{O} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ , тобто оксид і сполука, що утворюються, легко видаляються з розплаву. Мідь, що використовується для електротехнічних цілей, розкислюють літієм (0,1 % від маси розплаву), оскільки надлишок фосфору різко знижує її електропровідність. Використання для розкислення міді вугільних фільтрів засновано на взаємодії  $\text{Cu}_2\text{O}$  з вуглецем за реакцією:



Для захисту від окиснення плавку мідних сплавів проводять під покривом деревного вугілля або флюсів на основі фторидів, скла або соди (2...3 % від маси розплаву). Для запобігання утворення твердих нерозчинних оксидів, мідь перед додаванням легуючих елементів розкислюють 0,1...0,15 % фосфору. Після розкислювання в розплав послідовно вводять легуючі елементи (силіцій, алюміній, манган, олово, свинець, цинк та ін.) в чистому вигляді або у вигляді лігатур.

Щоб уникнути сильного окиснення і насичення воднем не рекомендується сильно перегрівати розплави. Особливо це стосується алюмінієвих бронз і кременистих латуней, оскільки оксиди алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і силіцію  $\text{SiO}_2$ , що утворюються, важко видаляються з розплавів і, потрапляючи у виливки, знижують їх властивості. Перегрівання алюмінієвих бронз може бути обумовленим виділенням



теплоти змішування при додаванні алюмінію в розплав. Щоб уникнути цього рекомендується вводити алюміній невеликими порціями одночасно з міддю.

Для очищення розплавів від розчиненого водню і твердих неметалевих включень їх піддають продуванню газами, вакуумуванню, обробці флюсами або фільтруванню. Найбільш глибоке очищення розплавів від неметалевих включень дає фільтрування через зернисті фільтри з фторидів кальцію і магнію. Фільтри перед використанням підігрівають до 800 °С.

Мідні сплави *модифікують* з метою подрібнення зерна і нейтралізації шкідливих домішок. Для подрібнення зерна в сплави вводять тугоплавкі елементи (титан, ванадій, цирконій, бор, вольфрам, молібден) у кількості 0,15...0,2 %. Для нейтралізації шкідливого впливу домішок вісмуту, сурми, миш'яку і свинцю в подвійну латунь вводять присадки кальцію (до 0,2 %), церію (до 0,3 %) або цирконію (0,4 %).

*Рафінування* мідних розплавів здійснюють для зниження вмісту газів і видалення зважених неметалевих включень. Дегазацію мідних розплавів здійснюють продуванням інертними газами (аргон, азот), обробкою хлоридами і флюсами, вакуумуванням. Ці ж способи, разом з фільтруванням, застосовують і для очищення розплавів від зважених неметалевих включень. Оскільки більша частина рафінуючих засобів в тій чи іншій мірі гігроскопічна, необхідною умовою їх застосування є попередня сушка або переплавлення.

Рафінування інертними газами проводять при температурі розплаву 1150...1200 °С, витрата газу 0,25...0,5 м<sup>3</sup> на 1 т розплаву, тривалість продування при тиску газу 19,6...29,4 кПа складає 5...10 хв.

Хлорид мангана завантажують в кількості 0,1...0,2 % від маси розплаву при 1150...1200 °С за допомогою "дзвоника". Для видалення бульбашок рафінуючого газу розплав перед розливанням витримують протягом 10...15 хвилин.

Вакуумування застосовують в тих випадках, коли сплав не містить компонентів з високим тиском пари. Стосовно мідних сплавів цей процес здійснюють при 1150...1300 °С і залишковому тиску 0,6...1,3 кПа. Тривалість вакуумування визначається масою розплаву,

що піддається обробці, і висотою стовпа рідкого металу. В більшості випадків тривалість вакуумування не перевищує 25 хв.

Обробку розплавів флюсами (табл. 4.2) застосовують в основному для очищення від зважених неметалевих включень. Найбільш високі рафінуючі властивості мають фторидні флюси, зокрема суміш фторидів кальцію і магнію. Перед рафінуванням розплав нагрівають до 1250 °С, знімають шлак і на дзеркало металу насипають порошок переплавленого флюсу в кількості 1,5...2 % від маси розплаву. Протягом 8...15 хвилин флюс замішують в розплав. Перед заливанням для повнішого відділення крапель флюсу розплав витримують при температурі заливання протягом 10...15 хвилин.

Таблиця 4.2 – Склади рафінуючих флюсів для бронзи

Тип бронзи	Хімічний склад флюсу, %
Олов'яні бронзи	7 Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ; 60 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ; 33 CaF <sub>2</sub>
Алюмінієві бронзи	20 CaF <sub>2</sub> ; 60 NaF; 20 Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>
Алюмінієві бронзи	60 NaCl; 40 Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>
Алюмінієві бронзи	10 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ; 20 CaF <sub>2</sub> ; 30 NaF; 20 Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub> ; 20 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Алюмінієві бронзи	6 Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ; 70 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ; 12 Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub> ; 12 K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>

Оптимальним способом очищення мідних сплавів, що містять елементи, які легко окислюються (алюміній, титан, цирконій, берилій), від неметалевих включень є фільтрування. Для цієї мети використовують зернисті фільтри з магнезиту, алунду, сплаву фторидів кальцію і магнію. Товщину фільтру вибирають від 60 до 150 мм, розмір зерна в поперечнику складає 5...10 мм. Перед фільтруванням зернисті фільтри нагрівають до 800 °С. Фільтрування дозволяє понизити вміст неметалевих включень в 2...3 рази, що приводить до укрупнення зерна, підвищення пластичних і втомних характеристик і зниження вмісту газів.

Вміст неметалевих включень визначають методами хімічного аналізу і відбором технологічних проб. Враховуючи складність і трудомісткість хімічного методу кількісного визначення неметалевих включень для поточного контролю в цехових умовах його не

застосовують. Наявність крупних включень і плівок визначають за допомогою технологічних проб Добаткіна–Зінов'єва. По кількості і площі неметалевих включень у зламі роблять висновок про чистоту розплаву.

### **4.3 Плавка латуней і бронз**

Для плавки мідних сплавів в сучасному виробництві найбільшого поширення набули індукційні печі: каналні печі із залізним сердечником і тигельні печі високої і промислової частоти.

*Подвійні латуні* виплавляють головним чином в індукційних каналних печах, що мають кварцитову або високоглиноземисту футеровку. Особливістю плавки латуней є висока леткість цинку, обумовлена низькою температурою його кипіння (907 °С), що приводить до втрати металу у вигляді угару цинку від 0,5 до 5,0 %. Через сильний перегрів верхніх шарів розплаву нераціональне плавлення латуней в дугових печах. Як захисний покрив використовують деревне вугілля, яке завантажують в піч разом з першою порцією шихти. Додавання невеликої кількості криоліту (0,1 % від маси розплаву) робить шлак “сухим” і сипким, що сприяє кращому відділенню корольків металу. При плавленні кременистої латуні замість деревного вугілля застосовують флюс, що складається з 50 % скла і 50 % плавикового шпату.

Під час виплавки подвійної латуні спочатку під шаром деревного вугілля розплавляють мідь. Потім в розплав додають відходи, що містять цинк, і вторинну латунь. Сплав нагрівають до 1000...1050 °С і перед розливанням в нього додають цинк. Мідь перед зануренням цинку або відходів, що містять цинк, не розкислюють, оскільки цинк сам є хорошим розкислювачем, а оксиди його не розчиняються в розплаві і легко спливають. Складні латуні (ЛМцС, ЛК, ЛАЖМц) виплавляють так само, як подвійні. Відмінність полягає лише в тому, що перед додаванням відходів і легуючих елементів, особливо алюмінію, мідь розкислюють фосфором. Для видалення неметалевих включень складні латуні рафінують хлоридом мангана або фільтрацією через зернисті фільтри.

*Кременисті латуні* відрізняються великою схильністю до поглинання водню, особливо у присутності домішок алюмінію. Вони дуже чутливі до перегрівання – газонасиченість розплаву різко збільшується при нагріванні більше 1100 °С. В процесі кристалізації розчинений газ виділяється, що приводить до “зростання” виливка і появи ліквацийних випотів на їх поверхні. Плавку кременистих латуней здійснюють в окислювальній атмосфері під шаром флюсу (30 % Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>; 40 % CaF<sub>2</sub>; 30 % SiO<sub>2</sub>), не допускаючи перегрівання розплаву більше 1100 °С. Для перешкодження забрудненню розплаву оксидами силіцію мідь перед додаванням відходів або силіцію розкислюють фосфором. Силіцій вводять лігатурою Cu–Si, що містить 15...20 % Si. Після додавання лігатури розплав перемішують графітовою мішалкою для повного розчинення присадки, потім завантажують цинк і останнім – свинець. Готовність сплаву оцінюють пробами на злам і газонасиченість. Якщо злам дрібнозернистий, а на поверхні проби відсутні ліквацийні напливи, сплав розливають у форми. У тому випадку, коли на поверхні проби утворюються випоти, розплав дегазують перегрівом або продуванням азотом. Розплав розливають при 950...980 °С.

*Плавка бронз.* Олов'яні бронзи виплавляють в різних печах, проте, враховуючи якість і мінімальні безповоротні втрати металу, продуктивність і умови праці плавильників, переважно використовують електричні індукційні тигельні і каналних печі.

Особливістю плавки олов'яної бронзи є утворення SnO<sub>2</sub> при взаємодії олова з киснем. Наявність включень SnO<sub>2</sub> помітно знижує механічні і експлуатаційні властивості олов'яних бронз. Тому перед додаванням олова або відходів, що містять олово, мідь розкислюють фосфором. Плавку ведуть в окислювальній атмосфері під шаром деревного вугілля або флюсу, що містить соду і деревне вугілля. Спочатку під шаром вугілля розплавляють мідь і нагрівають її до 1100...1150 °С. Додавання фосфористої міді, що містить 9...13 % фосфору, проводять розкислювання. Потім завантажують цинк, олово або відходи сплаву і в останню чергу свинець. Розплав нагрівають до 1100...1200 °С, рафінують хлоридом мангана або азотом, модифікують і розливають у форми при 1150...1300 °С.

Плавка складних олов'яних бронз мало чим відрізняється від приведеної технології. Плавку вторинних олов'яних бронз здійснюють під шаром флюсу в окислювальній атмосфері.

*Алюмінієві бронзи* чутливі до перегрівання і більше олов'яних бронз схильні до поглинання газів, тому плавку їх ведуть в окислювальній атмосфері під шаром флюсу, не допускаючи перегрівання розплаву більше 1200 °С. Під час плавлення в індукційних каналних і тигельних печах застосовують покриви з деревного вугілля разом з легкоплавкими солями (кріоліт, бура та інші) у співвідношенні (2...3):1. Для запобігання забрудненню розплаву оксидними плівками мідь перед завантаженням алюмінію і інших легуючих компонентів розкислюють фосфором. Велика різниця в щільності міді і алюмінію сприяє розшаруванню їх в процесі плавки. Тому необхідно дуже ретельно перемішувати розплав перед розливанням.

Алюмінієві бронзи виплавляють в такій послідовності. Спочатку під шаром флюсу розплавляють мідь і розкислюють її фосфором (0,05...0,1 % від маси розплаву). Якщо сплав містить нікель, то його завантажують разом з міддю. Після цього в розплав додають залізо і манган у вигляді відповідних лігатур з міддю. Після розчинення лігатур розплав повторно розкислюють фосфором (0,05 % від маси розплаву) і вводять алюміній або лігатуру Al–Cu. Після закінчення розчинення алюмінію поверхню розплаву засипають флюсом. Неприпустимо завантажувати алюміній перед манганом і залізом. Плівки, що утворюються при цьому, роблять розплав непридатним до розливання. Перед розливанням при 1100...1200 °С розплав рафінують хлоридом мангана або кріолітом, кількість яких беруть в межах 0,1...0,3 % від маси розплаву. Алюмінієві бронзи дуже часто модифікують ванадієм, вольфрамом, бором, цирконієм або титаном. Ці присадки у вигляді лігатур з алюмінієм і міддю вводять в розплав при 1200...1250 °С у кількості 0,05...0,15 % від маси розплаву.

Особливістю плавки *свинцевої бронзи* БрС30 є сильна ліквіація по щільності. Найбільш однорідні розплави вдається отримувати під час плавлення в індукційних печах, що забезпечують інтенсивне перемішування. Для запобігання ліквіації у високосвинцеву бронзу

рекомендується вводити 2,0...2,5 % нікелю, а охолодження виливок здійснювати з великими швидкостями.

### Питання для самоконтролю

1. Як класифікують мідні сплави?
2. Які властивості характерні для мідних сплавів?
3. Які недоліки мають мідні сплави?
4. Як класифікують бронзи?
5. Де використовують безолов'яні бронзи?
6. Які сплави називають латунню?
7. Як класифікують латуні?
8. До якої групи мідних сплавів належать мельхіор, нейзільбер?
9. Де використовують вироби з константану, копелю?
10. Які флюси використовують при виплавленні мідних сплавів?
11. Якими способами можна здійснювати дегазацію мідних розплавів?
12. У чому суть механізму дегазації продуванням розплаву інертними або активними газами?
13. Скільки рафінуючого газу витрачається на 1 т мідного розплаву?
14. У яких випадках можна здійснювати дегазацію мідних сплавів вакуумуванням?
15. У чому суть механізму дегазації вакуумуванням? При яких залишкових тисках здійснюють дегазацію вакуумуванням?
16. Якими газами рафінують мідні розплави?
17. Якими способами рафінують мідні розплави від неметалевих включень? Назвіть найбільш ефективний спосіб очищення мідних розплавів від неметалевих включень.
18. Який зі способів дегазації найбільш ефективний?
19. Які матеріали використовують для модифікування бронз?
20. У яких печах виплавляють мідні сплави?
21. В якій послідовності до мідного розплаву додають легуючі елементи?
22. З яких матеріалів виготовляють футеровку печей для виплавки мідних сплавів?
23. При якій температурі виплавляють латуні?

## 5 ВИРОБНИЦТВО НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

### 5.1 Склад і властивості нікелевих сплавів

Нікель є одним з найважливіших промислових металів. Він широко використовується в сучасній техніці як конструкційний і електротехнічний метал.

Нікель – основа найбільш поширених в даний час жароміцних сплавів, що використовують для виготовлення відповідальних деталей і вузлів газотурбінних двигунів і енергетичних установок. Нікель є також основою сучасних стійких і корозійностійких сплавів.

Промислові нікелеві сплави класифікують по хімічному складу і по області застосування. По області застосування вони поділяються на жароміцні, жаростійкі, корозійностійкі і спеціальні (з особливими фізичними властивостями).

За хімічним складом нікелеві сплави можуть бути розділені на п'ять груп: 1) сплави на основі систем нікель–мідь, нікель–мідь–силіцій, нікель–мідь–олово, нікель–мідь–свинець та інші; 2) ніхроми; 3) сплави на основі системи нікель–молібден; 4) подвійні сплави нікелю з силіцієм, берилієм, алюмінієм і титаном; 5) складнолеговані жароміцні сплави. Хімічний склад деяких нікелевих сплавів приведений в табл.5.1.

*Сплави першої групи* відрізняються високою стійкістю в багатьох реагентах (морська вода, сірчана і органічні кислоти, розчини лугів, атмосфера пари при 350...450 °С), хорошими антифрикційними властивостями і стабільністю механічних властивостей при підвищених температурах. Антифрикційні властивості покращують шляхом легування свинцем, а твердість – додаванням силіцію.

Монель (НМЖМц 28–2,5–1,5) і нікелеві бронзи – найбільш поширені сплави цієї групи. Виливки з монелей застосовують в нафтохімічному машинобудуванні для виготовлення клапанів, робочих коліс і корпусів насосів, втулок, кранів і інших деталей, що працюють в агресивних середовищах, в харчовому машинобудуванні і суднобудуванні. Нікелеві бронзи використовують для виготовлення

Таблиця 5.1 – Хімічний склад деяких нікелевих сплавів

Сплав	Вміст*, %				
	Cr	Fe	C	Co	Ti
1	2	3	4	5	6
НМЖМц 28– –2,5–1,5 (монель)	–	2,0...3,0	–	–	–
Нікелева бронза	–	0,5...1,0	–	–	–
X20H80	20,0...23,0	–	–	–	–
X15H75Ж	15,0	5,0	–	–	–
ЖСЗ	14,0...18,0	–	0,11...0,16	–	1,6...2,3
ЖС6К	10,5...12,5	–	0,13...0,20	4,0...5,0	2,5...3,0
ЖС26	4,3...5,6	–	0,13...0,18	8,0...10,0	0,8...1,2
ВТ36Л	10,0...22,0	–	–	–	0,4...2,7
ХН73МБТЮ (ЕН698)	13,0...16,0	–	0,08	–	2,35...2,75
ХН55ВМТФКЮ (ЕІ929)	9,0...12,0	–	0,12	12,0...16,0	1,4...2,0
Примітка: * Нікель – основа					

Продовження табл.5.1

Сплав	Вміст*, %				
	Cu	Al	W	Mo	інші
1	7	8	9	10	11
НМЖМц 28– –2,5–1,5 (монель)	27,0...29,0	–	–	–	1,2...1,8 Mn
Нікелева бронза	33,0...43,0	–	–	–	5,0...10,0 Sn 1,0 Zn 6,0...10,0 Pb
X20H80	20,0...23,0	–	–	–	0,4...1,5 Si
X15H75Ж	–	–	–	–	–
ЖСЗ	–	1,6...2,2	4,5...6,5	3,0...4,5	0,2...0,8 V
ЖС6К	–	5,0...6,0	4,5...5,5	3,5...4,5	–
ЖС26	–	5,5...6,2	0...12,0	0...2,0	0...1,5 Fe
ВТ36Л	–	3,5...5,2	0...9,0	0...4,5	0...1,1 V
ХН73МБТЮ (ЕН698)	–	1,3...1,7	–	2,8...3,2	1,8...2,2 V
ХН55ВМТФКЮ (ЕІ929)	–	3,6...4,5	4,5...6,5	4,0...6,0	0,1 B



литих втулок, корпусів відцентрових насосів, кілець, що ущільнюють, корозійностійких підшипників і інших деталей. Оптимальне відношення нікелю до олова в цих сплавах, що обмежує втрату пластичності при старінні, дорівнює 10 : 1.

*Для сплавів другої групи* характерні хороша стійкість проти окиснення і високі механічні властивості при підвищеній температурі. Їх широко використовують майже до 1000...1100 °С.

Сплави нікелю з хромом отримали назву **ніхромів** (Х10Н90, Х20Н80, Х30Н70, Х40Н60, Х50Н50 і ін.). Подвійні ніхроми і хромелі застосовують в техніці у вигляді деформованих напівфабрикатів і дуже рідко використовують для фасонного литва. Виливки виготовляють із залістистих ніхромів (ніконелей). Завдяки високій жаростійкості в середовищі окислювальних і відновних газів, виливки з цих сплавів можуть витримувати багаторазове нагрівання і охолодження без тріщин і викривлення. Їх широко застосовують для пічної арматури, захисних трубок пірометрів, деталей цементацийних установок, як нагрівальні елементи електричних печей опору та ін.

*Нікельмолібденові* і більш складнолеговані сплави цієї групи добре протистоять дії неорганічних кислот і рідкого хлору. Деякі зі сплавів (з 30 % Мо і 5 % Fe) дуже стійкі в соляній кислоті будь-якої концентрації при високих температурах. Виливки зі сплавів цієї групи добре заварюються і зварюються електродами того ж складу, мають підвищену жароміцність і стійкість проти ерозії. Їх широко застосовують в хімічному машинобудуванні.

*Подвійні сплави* нікелю з берилієм, алюмінієм, титаном і силіцієм мають хорошу корозійну стійкість у ряді агресивних середовищ, добре чинять опір зносу (Ni–Si і Ni–Be). Виливки зі сплавів Ni–Si можна піддавати зварюванню. Область застосування сплавів цієї групи – виготовлення важко навантажених деталей, що працюють на стирання при високих температурах.

*Жароміцні сплави* – найбільш важлива група сплавів на основі нікелю. До них відносяться складнолеговані **ливарні сплави** серії ЖС, ВЖЛ (ЖС3, ЖС6, ЖС6К, ЖС6У, ВЖЛ12, ЖС26, ЖС32, ЖС40 та ін.) і **деформівні**. Вони широко використовуються в сучасних

газотурбінних двигунах. З жароміцних нікелевих сплавів виготовляють робочі лопатки і диски турбіни, що направляють лопатки, камери згорання газотурбінних двигунів, тобто деталі, що сприймають комплексну дію теплових ударів, великих відцентрових сил, окислювачів, високих температур і навантажень. Використання сучасних складнолегованих жароміцних нікелевих сплавів дозволило підвищити температуру газів на вході в турбіну з 800 до 1100 °С, що привело до значного підвищення потужності, зменшення витрати палива, збільшення ресурсу і надійності роботи двигунів.

За хімічним складом жароміцні сплави (табл. 5.1) відносяться до складнолегованих. Основними легуючими елементами є хром (10...25 %), алюміній (0,5...6,0 %), титан (1,0...3,0 %).

## **5.2 Виплавка нікелевих сплавів**

Нікелеві сплави мають високу температуру плавлення і схильні до інтенсивної взаємодії з газами пічної атмосфери. Рідкий нікель розчиняє при 1600 °С до 0,5 % кисню, близько 2,5 % вуглецю і до 43 см<sup>3</sup> на 100 г водню. Виділення водню при кристалізації – основна причина газової пористості у виливках. При взаємодії з парами води відбувається одночасне забруднення нікелю киснем і воднем.

Плавку нікелю проводять під шаром флюсу, щоб уникнути взаємодії з газами. Як флюс застосовують скло (пляшковий бій), плавиковий шпат, вапно, мелений магнезит зі склом та ін. Неприпустимо застосування деревного вугілля та гіпсу. Флюс беруть в кількості 5...10 % від маси шихти. Він має покривати поверхню розплаву шаром завтовшки 10...15 мм.

В більшості випадків для плавки використовують індукційні каналні і тигельні печі, які дозволяють швидко досягати потрібної температури і форсовано проводити процес. Значно рідше застосовують дугові печі. Для виплавки нікелю, що використовують у вакуумній техніці, застосовують вакуумні індукційні тигельні печі при залишковому тиску 0,66 Па.

Футеровка плавильних печей основна або нейтральна. Черинь індукційних каналних печей із залізним сердечником набивають

вогнетривкою масою, що складається з 98 % плавненого магnezиту і 2 % бури або борної кислоти. Для футеровки індукційних тигельних печей застосовують суміш, яка складається з 80 % магnezиту, 8 % рідкого скла і 12 % води.

Як шихтові матеріали під час плавлення чистого нікелю використовують катодний нікель Н0 і Н1, гранули нікелю і крупні нікелеві відходи власного виробництва в кількості, що не перевищує 50 % від маси шихти. Неприпустимо використовувати катодні листи з наростами на поверхні.

Спочатку в піч завантажують відходи, поверхню яких засипають флюсом. Після розплавлення металу відразу або частями вводять катодний нікель. Листи нікелю заздалегідь розрізають на куски розміром 150x150 мм, просушують, а в деяких випадках (при великому вмісті водню) відпалюють. Плавку проводять у форсованому режимі, не допускаючи перегрівання розплаву.

При температурі розплаву 1500...1600 °С його очищають від кисню і сірки. Для цього в розплав вводять розкислювачі і десульфуризатори. Характерна особливість плавки чистого нікелю – застосування комплексного розкислювача (вуглецю, силіцію, мангана, магнію). Основним розкислювачем є вуглець, який вводять у вигляді графіту (бій) або лігатури Ni–C, що містить 1,5...2 % С. При додаванні вуглецю у вигляді графіту його завантажують одночасно з першою порцією шихти. Для повного видалення кисню потрібний значний надлишок вуглецю. Через надлишок вуглецю нікель набуває крихкість. Тому основну кількість кисню видаляють за допомогою вуглецю, а залишок його – силіцієм і манганом після доведення температури розплаву до 1600 °С. Загальна витрата комплексного розкислювача знаходиться в межах 0,18...0,22 % від маси розплаву. Для розкислення використовують 0,05...0,10 % вуглецю, 0,07...0,15 % силіцію, 0,05...0,20 % мангана, 0,05...0,10 % магнію. Для розкислення нікелю використовують також силікокальцій, що містить до 23 % кальцію. Цей розкислювач вводять з розрахунку на 0,05...0,10 % кальцію.

Після розкислювання розплав перемішують нікелевою мішалкою, витримують протягом декількох хвилин і при

1550...1650 °С заливають у форми. Щоб уникнути попадання флюсу в порожнину форми його згущують. Для цього на поверхню розплаву засипають мелений магнезит в кількості 0,2 % від маси шихти.

Під час плавлення чистого нікелю забруднені і змішані відходи нікелю від різних плавок не використовують в шихті. Ці відходи переплавляють окремо. Перед плавкою всю шихту обдувають повітрям для видалення забруднень. В деяких випадках відходи протирають гасом. Плавку проводять в індукційній каналній печі із залізним сердечником під тонким шаром флюсу (скляного бою). Домішки видаляють шляхом окиснення. Для цього поверхню розплаву частково звільняють від флюсу. Для прискорення окиснення в розплав вводять оксид нікелю або нікель з великим вмістом кисню. Домішки вигорають в наступному порядку: силіцій, магній, манган, цинк і вуглець. Кінець окиснення визначають по іскрінню металу і зламу проби. Подальше розкислення нікелю проводять лігатурою Ni–Mg, а при необхідності силіцієм і лігатурою Ni–C. Лігатуру Ni–Mg в кількості 0,06 % додають загорнутою в нікелеву фольгу при температурі розплаву 1550...1600 °С.

Ступінь розкислення визначають за допомогою технологічної проби. Для цього відливають злиток діаметром 20...22 мм в графітову виливницю. Якщо метал дає нормальну усадку, він готовий для розливання. Якщо метал “зростає”, його додатково розкислюють лігатурою Ni–Mg, кількість якої беруть в два рази меншою, ніж при першому розкислюванні. Далі знову відливають пробу. При сильному окисненні металу киснем повне відновлення його проводять комплексним розкислювачем – вуглецем, силіцієм, магнієм.

Технологія плавки жаростійких і корозійностійких нікелевих сплавів, а також жароміцних сплавів деяких марок, що використовують для виготовлення маловідповідальних деталей, аналогічна технології плавки чистого нікелю. Сплави виготовляють у відкритих індукційних тигельних і каналних печах, електродугових печах.

Плавлення нікелевих сплавів на повітрі супроводжується окисненням і інтенсивним насиченням розплаву воднем. Ці процеси зумовлюють забруднення розплаву твердими нерозчинними включеннями оксидів летких компонентів (TiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BeO та ін.) і

утворення газових раковин і пористості у виливках.

Для захисту розплаву від інтенсивної взаємодії з газами застосовують флюси систем  $\text{CaO}-\text{CaF}_2$ ,  $\text{CaF}_2-\text{MgF}_2$ ,  $\text{MnO}_2-\text{NiO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ , витрата яких складає 2...5 % від маси розплаву. За допомогою флюсів неможливо повністю виключити розчинення водню, тому однієї з найважливіших операцій під час виплавки нікелевих сплавів є рафінування їх від розчинених газів. Цю операцію здійснюють наведенням окислювального шлаку ( $\text{MnO}_2 + \text{CuO} + \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{SiO}_2$ ) або продуванням інертними газами (аргоном або гелієм). При виплавці більшості нікелевих сплавів перевага віддається окислювачам. Необхідну кількість окислювача визначають залежно від вмісту в розплаві водню. Вміст водню рідко перевищує 1...2 % від маси розплаву. Перед додаванням легуючих компонентів, які створюють тверді нерозчинні оксиди, нікель розкислюють манганом, вуглецем, силіцієм і магнієм окремо або спільно. Як розкислювачі використовують також титан і силікокальцій.

Для подрібнення зерна виливок і підвищення рівня їх експлуатаційних властивостей деякі жароміцні сплави модифікують присадками 0,01...0,03 % бору і 0,03...0,10 % цирконію.

*Плавка в електродугових печах.* Під час плавки в дугових печах першим завантажують нікель і кускові відходи. Далі під електроди вводять шлакуючу суміш (вапно з плавиковим шпатом в співвідношенні 1:1) в кількості 3...5 % від маси шихти. Суміш завантажують невеликими порціями (по 3...5 кг) для захисту розплаву від насичення вуглецем і воднем. Після розплавлення вводять лігатури і чисті метали (молібден, ніобій, вольфрам та інші) і нагрівають розплав до повного розчинення тугоплавких елементів. Потім відбирають пробу на хімічний аналіз, і розплав рафінують і розкислюють. Для цього використовують розкислюючі суміші (вапно з алюмінієвим порошком в співвідношенні 1:1), які вводять з розрахунку 3...4 кг/т розплаву, додають невеликими порціями 0,25 % маргана, 0,3...0,5 % алюмінію і 0,01...0,15 % титану. При необхідності здійснюють продування розплаву інертним газом або наводять окислювальний шлак. Перед розливанням в розплав вводять присадки церію і бору.

Ніхромів, в основному, виплавляють в електродугових печах. Для видалення водню, що поглинається розплавом, в кінці плавки наводять окислювальний шлак, який спричиняє кипіння ванни. Розчинений водень може бути видалений також продуванням розплаву аргоном. Відомо, що додавання цирконію (до 1 %) зменшує схильність ніхромів до поглинання водню. Основна умова під час плавлення ніхромів – запобігання забрудненню розплаву сіркою і вуглецем, які різко знижують експлуатаційні властивості сплавів.

Технологія плавки сплавів типу хастеллой (Ni–Mo–Fe, Ni–Mo–Cr–Fe, Ni–Si) аналогічна приготуванню ніхромів. Ці сплави через значний вміст молібдену менш схильні до поглинання водню. Сплави Ni–Si виготовляють за технологією, що використовується під час плавлення монель-металу.

*Плавка в індукційних тигельних печах.* Технологія плавки в індукційних тигельних печах аналогічна технології, що використовують під час плавки в електродугових печах. Як суміш, що шлакує, використовують суміш із 70 % вапна і 30 % плавикового шпату, яку додають на поверхню шихти в кількості 3...4 % від її маси. Розплав розкислюють порошком алюмінію (витрата 2 кг/т) або манганом і титаном.

Монель-метал краще всього плавити в індукційних печах, оскільки в цьому випадку майже повністю можна уникнути насичення розплаву воднем. Як флюс використовують скло або суміш фторидів кальцію і магнію. При виготовленні сплаву з чистих металів і власних відходів спочатку завантажують нікель, мідь, залізо, відходи та ін. Після повного розплавлення завантажених матеріалів температуру розплаву піднімають до 1450...1500 °C і вводять манган. Для розкислювання розплаву використовують лігатуру Ni–C. Вуглець зазвичай вводять в кількості 0,1...0,15 %. Після нетривалої витримки перед початком розливання додають до 0,3 % магнію.

Сплави Ni–Ti і Ni–Be (3 %) виготовляють в індукційних тигельних печах. Спочатку під шаром флюсу (скло, вапно) розплавляють нікель, далі розплав перегрівають до 1600 °C і рафінують силіцієм і манганом в кількості 0,1 % від маси шихти. Титан і берилій додають далі лігатурами або в чистому вигляді.

Розплав ретельно перемішують, витримують протягом 5...10 хвилин і заливають у форми.

Серед усіх сплавів на основі нікелю найбільш складними у приготуванні є термоелектродні сплави – хромель і алюмель. Складність полягає в необхідності дотримувати вузькі інтервали за хімічним складом, оскільки термоелектрорушійна сила (термoe.д.с.) у істотно залежить від хімічного складу. Термоелектродні сплави, як правило, готують в індукційних канальних печах з магнезитовою футеровкою. Для цих сплавів також можна застосовувати й тигельні печі, в тому числі і вакуумні.

Для виготовлення сплаву хромель приймають наступний порядок завантаження і розплавлення шихти. В рідку ванну вводять велику частину хрому, не довантажуючи 1...2 кг для подальшого коректування складу сплаву за результатами визначення термoe.д.с. Потім завантажують нікель і відходи. Одночасно засипають флюс в кількості 10 % від маси металу. Розплавлення шихти здійснюють по можливості у форсованому режимі. Для розкислення сплаву вводять 0,12...0,15 % мангана і 0,06 % магнію. Коректування складу сплаву за вмістом хрому виконують за результатами визначення термoe.д.с.

Виплавлення інших термоелектродних сплавів здійснюють аналогічним чином. Деяка відмінність в технології плавки полягає в порядку завантаження складових шихти і розкислення сплавів. Під час виплавки алюмелю і копелю спочатку завантажують нікель, відходи і флюс, потім алюміній, силіцій і манган. Оскільки всі ці сплави містять манган, розкислювання їх проводять магнієм, який додають в кількості 0,03 % при приготуванні алюмелю і 0,10 % під час виплавлення копелю. Перед розливанням сплави коректують на вміст мангана за результатами визначення термoe.д.с.

Технологія плавки подвійних (Ni–Cr) і потрійних (Ni–Cr–Fe) ніхромів мало чим відрізняється від технології приготування хромелю. Розкислюють ці сплави манганом, титаном і силікокальцієм в кількості 0,1...0,15 %.

## Питання для самоконтролю

1. На які групи за хімічним складом поділяють нікелеві сплави?
2. На які групи по області застосування поділяють нікелеві сплави?
3. Які сплави називають ніхромами?
4. Де використовують жароміцні сплави?
5. Які елементи є основними легуючими елементами жароміцних сплавів?
6. Які особливості має плавлення нікелевих сплавів?
7. В наслідок чого нікелеві розплави потрібно розкислювати?
8. Які флюси використовують для приготування нікелевих сплавів?
9. Яка витрата розкислювачів і флюсів під час приготування нікелевих сплавів?
10. В яких пічних агрегатах виплавляють нікелеві сплави?
11. У вигляді яких речовин використовують вуглець для розкислення нікелевих сплавів?
12. Чому не припустимий надлишок вуглецю під час розкислення?
13. Як готують відходи нікелевих сплавів для переплавлення?
14. Як визначають ступінь розкислення нікелевих сплавів?
15. Які модифікатори використовують для нікелевих виливок?
16. Які особливості має приготування нікелевих сплавів в електродугових печах?
17. Які особливості має приготування сплавів в індукційних печах?
18. За якою технологією виплавляють монель-метал?
19. За якою технологією виплавляють ніхроми?
20. Який порядок операцій під час виплавлення сплавів типу хромель?



## 6 ТЕСТОВІ ЗАПИТАННЯ

### Модуль № 1 “Виробництво алюмінієвих сплавів з рудної сировини”

1. Що таке металевий сплав?
2. Які вимоги висувають до сплавів кольорових металів?
3. Що таке лігатура?
4. Які властивості сплавів кольорових металів відносяться до технологічних?
5. Які види рідкоплинності розрізняють?
6. Які властивості сплаву впливають на заповнення форм?
7. Що таке температура початку лінійної усадки?
8. Чи може лінійна усадка вилівка опинитися більше лінійної усадки сплаву?
9. Які прилади застосовують для визначення лінійної усадки сплавів?
10. Які фізичні явища лежать в основі об’ємної усадки вилівок?
11. Як впливає перегрівання розплаву на величину об’ємної усадки?
12. Що таке ліквация сплаву?
13. На які групи за способом виготовлення виробів поділяють алюмінієві сплави?
14. На які системи залежно від вмісту основних компонентів поділяють ливарні алюмінієві сплави?
15. На які групи можна умовно розділити силуміни за вмістом силіцію?
16. Де використовують вторинні деформівні алюмінієві сплави?
17. Що таке сплави-розкислювачі?
18. Які вимоги висувають до відновника при електротермічному виробництві алюмінієво-силіцієвих сплавів?
19. З яких матеріалів складається шихта для виплавки сплаву в руднотермічній печі?
20. Якими чинниками забезпечується висока реакційна здатність шихти для виплавки первинного алюмінієво-силіцієвого сплаву?
21. З яких елементів складається конструкція руднотермічної печі?

22. В якому пічному агрегаті силікоалюміній доводять до евтектичного складу?
23. Які матеріали використовують як шихтові при отриманні алюмінієвих сплавів способом сплавляння?
24. Які величини потрібно знати для знаходження розрахункового складу шихти під час виплавки алюмінієвого сплаву?
25. Які величини потрібно знати, щоб розрахувати масу кожного компонента шихти з урахуванням втрат окремих елементів від угару під час виплавки алюмінієвого сплаву?
26. Яка максимальна кількість повернень допустима у складі шихти при отриманні алюмінієвих сплавів методом сплавляння?
27. На які показники контролюють рідкий алюміній, що використовується для отримання алюмінієвих сплавів?
28. Які недоліки має поворотна відбивна електропіч САН?
29. Де розміщений магнітопровід в індукційній тигельній печі ІАТ?
30. Яким рівнянням описується залежність розчинності водню в алюмінії від тиску і температури?
31. Що є основним джерелом насичення алюмінію воднем?
32. Чому домішка водню небажана у складі алюмінієвих сплавів?
33. Які методи використовують для кількісного визначення вмісту газів в сплавах?
34. Які методи неруйнуючого контролю використовують для визначення газової пористості виливок?

Відповіді на тестові запитання модуля №1 можна знайти в главі 1 даних методичних вказівок та в роботах [2, 11].

## **Модуль № 2 “Виробництво алюмінієвих сплавів із вторинної сировини”**

1. Як класифікують вторинну алюмінієву сировину?
2. З яких процесів складається первинна обробка вторинної алюмінієвої сировини?
3. Чому плавлення алюмінію є енергоємним процесом?

4. На які групи класифікують печі для отримання сплавів із вторинної алюмінієвої сировини?
5. Яким вимогам має відповідати сучасна плавильна піч для виплавляння алюмінієвих сплавів?
6. Які хімічні взаємодії відбуваються під час плавлення вторинної алюмінієвої сировини?
7. За якими причинами втрачається алюміній під час плавлення?
8. На які групи класифікують домішки, що надходять в алюмінієві розплави?
9. З яких операцій складається технологія плавлення вторинної алюмінієвої сировини?
10. Які флюси використовують під час плавлення алюмінієвої сировини?
11. За яким чинниками розраховують витрату флюсу під час плавлення вторинної алюмінієвої сировини?
12. Що таке шихтування?
13. За якою формулою розраховують середній металургійний вихід під час плавлення вторинної алюмінієвої сировини?
14. За якою формулою розраховують угар шихти під час плавлення, якщо відомий її хімічний склад?
15. За якою формулою розраховують спільну засміченість шихти, якщо відомий вміст окремих компонентів шихти?
16. Яким вимогам має відповідати шихта для плавлення в індукційних печах?
17. Чому після плавлення у тигельній печі слід залишати частину розплавленого металу?
18. В чому суть шлакування?
19. Які особливості має переплавлення стружки у відбивній печі?
20. Які особливості характерні для плавлення зйомів?
21. В яких випадках під час переплавлення вторинної алюмінієвої отримують проміжні сплави?
22. Якими методами контролюють вміст неметалевих домішок у алюмінієвих розплавах?
23. На які групи поділяють методи рафінування алюмінієвих розплавів за видом домішок, що видаляються?

24. Які методи рафінування алюмінієвих розплавів належать до адсорбційних?
25. Від яких домішок можна очистити алюмінієвий розплав відстоюванням?
26. Якими методами рафінують алюмінієві розплави від магнію?
27. Які методи використовують для очищення розплавів від неметалевих включень?
28. В яких випадках доцільно застосовувати вакуумне рафінування алюмінієвих розплавів?
29. Скільки рафінуючого газу і хлоридів витрачається для рафінування 1 т алюмінієвого розплаву?
30. Які параметри зернистих фільтрів забезпечують оптимальні умови очищення алюмінієвих розплавів від великих включень і плівок?

Відповіді на тестові запитання модуля №2 можна знайти в главі 1 даних методичних вказівок та в роботах [2, 12].

### **Модуль № 3“Виробництво титанових сплавів”**

1. Як класифікують титанові сплави?
2. Які метали використовують для легування титанових сплавів?
3. Чому алюміній є основним легуючим елементом у титанових сплавах?
4. Чим відрізняються за складом ливарні і деформівні сплави титану?
5. Які особливості характерні для виплавки титанових сплавів?
6. Чому титанові сплави виплавляють у вакуумі або у інертній атмосфері?
7. Яку величину залишкового тиску підтримують під час вакуумної плавки?
8. Які печі використовують для виготовлення титанових сплавів?
9. Чому титанові сплави виплавляють у графітових тиглях?
10. Яку назву має шар твердого титану, що утворюється на внутрішній поверхні плавильного тигля і стикається з розплавленим металом?
11. З яких конструктивних елементів складається вакуумно-дугова

піч з електродом, що витрачається?

12. Яку назву має елемент вакуумно-дугової печі, в якому відбувається горіння дуги, плавлення електроду і кристалізація злитка?
13. З якого матеріалу виготовляють кристалізатор вакуумно-дугових печей?
14. Внаслідок чого злиток титанового сплаву, отриманий у вакуумно-дуговій печі, має шорстку бічну поверхню?
15. Які види вторинної титанової сировини можна використовувати у шихті для вакуумної дугової плавки?
16. З яких операцій складається підготовка титанової стружки до вакуумної дугової плавки?
17. Чому технологічний процес приготування сплавів з титанової губки складається з двох операцій плавлення?
18. Яку функцію виконує соленоїд у конструкції вакуумно-дугової печі?
19. В якій частині вакуумно-дугової печі відбувається плавлення і кристалізація металу?
20. Які переваги має електрошлакова виплавка титанових сплавів?
21. Які титанові відходи можна використовувати для виплавки злитків титанових сплавів?
22. Чим відрізняються вакуумно-дугові печі для виплавки злитків тугоплавких металів від подібних печей для виплавки титанових злитків?
23. У яких випадках використовують плазмово-дугову плавку?
24. Що є продукцією електронно-променевої плавки?
25. Як контролюють якість титанових злитків?

#### **Модуль № 4 “Виробництво магнієвих, мідних і нікелевих сплавів”**

1. В якій послідовності завантажують шихтові матеріали під час виплавлення магнієвих сплавів?
2. Як усунути вогнище загоряння магнієвих сплавів під час плавки?
3. Якими способами рафінують магнієві розплави від неметалевих

домішок?

4. Які методи використовують для дегазації магнієвих розплавів?
5. Які флюси використовують для рафінування магнієвих сплавів?
6. Які флюси використовують для захисту магнієвих сплавів від окиснення?
7. Якими способами виплавляють магнієві сплави?
8. В яких печах виготовляють сплави за дуплекс-процесом?
9. Як класифікують вторинну магнієву сировину?
10. З яких камер складається піч безперервного рафінування сплавів?
11. При якій температурі переплавляють вторинну магнієву сировину в печах з сольовим обігрівом?
12. На які групи за хімічним складом поділяють мідні сплави?
13. В яких печах доцільно виготовляти бронзи?
14. Як класифікують бронзи?
15. Які сплави називають латунню?
16. До якої групи мідних сплавів належать мельхюр, нейзильбер?
17. Де використовують вироби з константану, копелю?
18. В якій послідовності до мідного розплаву додають легуючі елементи?
19. З яких матеріалів виготовляють футеровку печей для виплавки мідних сплавів?
20. Які флюси застосовують при плавці бронз?
21. Якими газами рафінують мідні розплави?
22. Які матеріали використовують для модифікування бронз?
23. При якій температурі виплавляють латуні?
24. Які легуючі елементи входять до складу монель-металу?
25. Які сплави називають ніхромами?
26. Які легуючі елементи входять до складу хромелю?
27. В яких пічних агрегатах виплавляють нікелеві сплави?
28. При якій температурі відбувається виплавлення нікелевих сплавів?
29. Яку кількість модифікатора витрачають під час приготування жароміцних нікелевих сплавів?
30. Який розкислювач використовують для видалення залишку кисню при приготуванні нікелевих сплавів?

## 7 ЗАВДАННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Контрольна робота складається з титульної сторінки, змісту, вступу, розрахунків (завдання № 1 і завдання № 2), висновків, переліку використаної літератури.

Варіанти індивідуальних завдань надано в табл.7.1.

**Завдання 1.** Розрахувати склад шихти для виплавлення сплаву А із вторинної алюмінієвої сировини, якщо шихта складається з  $a_1$  % брухту,  $a_2$  % відходів,  $a_3$  % стружки,  $a_4$  % зйомів (табл.7.1). Розрахунок проводити на 100 кг шихти.

Хімічний склад алюмінієвого сплаву А, для якого складається шихта, надано в табл.7.2.

Складова частина шихти, що розраховується, може бути наступних груп: стружка може бути I, II, IX групи (табл.7.3), брухт I–IX груп (табл.7.3), відходи I–IX груп (табл.7.3). Хімічний склад зйомів відповідає середньому складу сплаву А, для якого складається шихта.

Кожна складова частина шихти складається з декількох сортів у заданих співвідношеннях. Співвідношення між сортами для складових частин шихти: для брухту 1 сорт – 20 %, 2 сорт – 80 %; для відходів 1 сорт – 25 %, 2 сорт – 75 %; для стружки 1 сорт – 50 %, 2 сорт – 20 %, 4 сорт – 30 %; для зйомів 1 сорт – 100 %.

Хімічний склад первинних матеріалів для розшихтування та легування надано в табл.7.4 – табл.7.7.

Приклад розрахунку шихти для виплавлення алюмінієвого сплаву із вторинної сировини наведений в [2 стор.122–134; 12 стор.7–14].

**Завдання 2.** Скласти матеріальний баланс відбивної плавки вторинної алюмінієвої сировини для отримання 1 т сплаву А. Склад шихти для виплавлення сплаву А взяти за результатами виконання завдання 1. Видобування металу і витрату флюсів під час відбивної плавки взяти за даними табл.7.8, угар елементів сплаву – за даними табл.7.9.

Приклад розрахунку матеріального балансу для виплавки 1 т алюмінієвого сплаву із шихти, що містить вторинну сировину, наведений в [2 стор.134–138; 12 стор.15–18].

Таблиця 7.1 – Вихідні дані до розрахунку завдання 1

№ варіанта	Марка сплаву А	Склад шихти, %				№ варіанта	Марка сплаву А	Склад шихти, %			
		$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$			$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
1	AK6M2	44	16	25	15	26	AK5M2	38	20	30	12
2	BAJ8	36	12	34	18	27	AK7Ц9	44	16	25	15
3	AJ5	44	16	25	15	28	AK10Cy	36	12	34	18
4	AJ11	36	12	34	18	29	AK8M3	44	16	25	15
5	DIN226D	44	16	25	15	30	AC4B (JPN)	36	12	34	18
6	AK4M4	36	12	34	18	31	AC2A (JPN)	44	16	25	15
7	AK21M2,5H2,5	44	16	25	15	32	AK5Mч	36	12	34	18
8	A-S5UZ (FRA)	36	12	34	18	33	DIN1725	44	16	25	15
9	AC8B (JPN)	44	16	25	15	34	AK6M7	36	12	34	18
10	AK5M4	36	12	34	18	35	A-S9GU (FRA)	44	16	25	15
11	AK12MMrH	44	16	25	15	36	AJ34	36	12	34	18
12	AJ32	36	12	34	18	37	AK7M3Ц2Mr	38	20	30	12
13	AJ3B	44	16	25	15	38	328 (USA)	44	16	25	15
14	AK7M2	36	12	34	18	39	AJ30	36	12	34	18
15	AK9Ц6	44	16	25	15	40	AJ15B	44	16	25	15
16	AK12M2	36	12	34	18	41	380 (USA)	36	12	34	18
17	AC4B (JPN)	44	16	25	15	42	AK9M2	44	16	25	15
18	AK4M2Ц6	36	12	34	18	43	AJ10B	36	12	34	18
19	AK5M2	44	16	25	15	44	A-S5UZ (FRA)	38	20	30	12
20	AJ17B	36	12	34	18	45	ADC12 (JPN)	36	12	34	18
21	380 (USA)	44	16	25	15	46	AJ25	38	20	30	12
22	AK9M2	36	12	34	18	47	238 (USA)	44	16	25	15
23	AK7M3Ц2Mr	44	16	25	15	48	AJ4	36	12	34	18
24	AK12M2MrH	36	12	34	18	49	DIN226	38	20	30	12
25	AJ30	38	20	30	12	50	AJ3	36	12	34	18



Таблиця 7.2 – Хімічний склад ливарних алюмінієвих сплавів за

Марка сплаву	Основні елементи, %				
	<i>Mg</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cu</i>	інші
1	2	3	4	5	6
АЛ1	1,25...1,75	–	–	3,75...4,50	1,75...2,25 <i>Ni</i>
АЛ3	0,20...0,80	4,50...5,50	0,60...0,90	1,50...3,00	–
АЛ3В	0,35...0,60	4,00...6,00	0,20...0,80	1,50...3,50	–
АЛ4	0,17...0,30	8,00...10,5	0,20...0,50	–	–
АЛ4-1	0,25...0,35	9,00...10,5	0,20...0,35	–	0,08...0,15 <i>Ti</i>
АЛ5	0,35...0,60	4,50...5,50	–	1,00...1,50	–
ВАЛ8	0,20...0,45	7,00...8,50	–	2,50...3,50	0,50...1,00 <i>Zn</i> 0,10...0,25 <i>Ti</i> 0,05...0,25 <i>Be</i>
АЛ9-1	0,25...0,40	7,00...8,00	–	–	0,08...0,15 <i>Ti</i>
АЛ10В	0,20...0,50	4,00...6,00	–	5,00...8,00	–
АЛ11	0,10...0,30	6,00...8,00	–	–	7,00...12,0 <i>Zn</i>
АЛ13	4,50...5,50	0,80...1,30	0,10...0,40	–	–
АЛ15В	–	3,00...5,00	0,20...0,60	3,50...5,00	–
АЛ16В	–	3,00...5,00	0,20...0,50	2,00...4,00	2,00...4,00 <i>Zn</i>
АЛ17В	0,10...0,20	3,50...5,50	0,40...0,70	1,50...3,00	5,00...7,00 <i>Zn</i>
АЛ18В	–	1,50...2,50	0,30...0,80	7,50...9,50	1,00...1,80 <i>Fe</i>
АЛ19	–	–	0,60...1,00	4,50...5,30	0,15...0,35 <i>Ti</i>
АЛ22	10,5...13,0	0,80...1,20	–	–	0,05...0,15 <i>Ti</i> 0,03...0,07 <i>Be</i>
АЛ24	1,50...2,00	–	0,20...0,50	–	3,50...4,50 <i>Zn</i> 0,10...0,20 <i>Ti</i>
АЛ25	0,80...1,30	11,0...13,0	0,30...0,60	1,50...3,00	0,80...1,30 <i>Ni</i> 0,05...0,20 <i>Ti</i>
АЛ29	6,00...8,00	0,50...1,00	0,25...0,60	–	–
АЛ30	0,80...1,30	11,0...13,0	–	0,80...1,50	0,80...1,30 <i>Ni</i>
АЛ32	0,30...0,50	7,50...9,00	0,30...0,50	1,00...1,50	0,10...0,30 <i>Ti</i>
АМГ4К1,5М	4,50...5,20	1,30...1,70	0,60...0,90	0,70...1,00	0,10...0,25 <i>Ti</i>
АЛ34	0,35...0,55	6,50...8,50	–	–	0,15...0,40 <i>Be</i> 0,10...0,30 <i>Ti</i>
АК4М4	–	3,00...5,00	–	3,50...5,00	–
АК4М2Ц6	–	3,50...5,50	0,40...0,70	1,60...3,00	5,00...7,00 <i>Zn</i>
АК5Мч	0,40...0,55	4,50...5,50	–	1,00...1,50	0,08...0,15 <i>Ti</i>
АК5М2	0,20...0,80	4,00...6,00	0,20...0,80	1,50...3,50	0,05...0,20 <i>Ti</i>
АК5М4	0,25...0,55	3,50...6,00	0,20...0,60	3,00...5,00	0,05...0,20 <i>Ti</i>
АК5М7	0,20...0,50	4,50...6,50	–	6,00...8,00	–
АК6М2	0,35...0,50	5,50...6,50	–	1,80...2,30	0,10...0,20 <i>Ti</i>
АК6М7	0,20...0,50	5,00...6,00	0,30...0,50	6,50...7,50	–
АК7	0,20...0,55	6,00...8,00	0,20...0,60	–	–

стандартами України, Росії, Німеччини, Франції, США, Японії

Марка сплаву	Домішки, не більше %								
	<i>Mg</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Fe</i>	<i>Pb</i>	<i>Sn</i>	інші
1	7	8	9	10	11	12	13	14	15
АЛ1	–	0,7	–	–	0,3	0,8	–	–	–
АЛ3	–	–	–	–	0,3	1,2	–	–	–
АЛ3В	–	–	–	–	0,5	1,3	–	–	–
АЛ4	–	–	–	0,3	0,3	0,9	0,05	0,010	0,1 <i>Ni</i> , 0,10 <i>Be</i>
АЛ4-1	–	–	–	0,1	0,3	0,3	0,03	0,005	0,15 <i>Zr</i> , 0,1 <i>Be</i>
АЛ5	–	–	0,5	–	0,3	1,0	–	0,010	0,15 <i>Ti</i> + <i>Zr</i> , 0,1 <i>Be</i>
ВАЛ8	–	–	0,5	–	–	0,4	–	–	0,15 <i>Zr</i> , 0,15 <i>Cd</i>
АЛ9-1	–	–	0,1	0,1	0,2	0,4	0,03	0,005	0,15 <i>Zr</i> , 0,1 <i>Be</i>
АЛ10В	–	–	0,5	–	0,6	1,2	–	–	0,15 <i>Zr</i>
АЛ11	–	–	0,5	0,6	–	1,2	–	–	–
АЛ13	–	–	–	0,1	0,2	0,5	–	–	0,15 <i>Zr</i>
АЛ15В	0,5	–	–	–	2,0	1,3	–	–	–
АЛ16В	0,5	–	–	–	–	1,2	–	–	–
АЛ17В	–	–	–	–	–	2,0	–	–	–
АЛ18В	0,8	–	–	–	0,5	–	–	–	–
АЛ19	0,5	0,3	–	–	0,2	0,3	–	–	0,1 <i>Ni</i> , 0,2 <i>Zr</i>
АЛ22	–	–	–	–	0,1	1,0	–	–	0,20 <i>Zr</i>
АЛ24	–	0,3	–	0,2	–	0,5	–	–	0,10 <i>Be</i> , 0,1 <i>Zr</i>
АЛ25	–	–	–	–	0,5	0,8	0,1	0,02	0,2 <i>Cr</i>
АЛ29	–	–	–	0,1	0,2	0,9	–	–	0,01 <i>Be</i>
АЛ30	–	–	0,2	–	0,2	0,7	0,05	0,01	0,2 <i>Ti</i> , 0,2 <i>Cr</i>
АЛ32	–	–	–	–	0,3	0,8	–	–	0,10 <i>Zr</i>
АМг4К1,5М	–	–	–	–	0,1	0,4	–	–	–
АЛ34	–	–	0,1	0,3	0,3	0,6	–	–	0,20 <i>Zr</i>
АК4М4	0,5	–	0,6	–	2,0	1,1	–	–	0,5 <i>Ni</i>
АК4М2Ц6	0,3	–	–	–	–	1,2	–	–	–
АК5Мч	–	–	0,1	–	0,3	0,5	0,01	–	0,15 <i>Zr</i>
АК5М2	–	–	–	–	1,5	1,0	–	–	0,5 <i>Ni</i>
АК5М4	–	–	–	–	1,5	1,0	–	–	0,5 <i>Ni</i>
АК5М7	–	–	0,5	–	0,6	1,2	–	–	–
АК6М2	–	–	0,1	–	0,06	0,6	–	–	0,05 <i>Ni</i>
АК6М7	–	–	–	–	0,4	0,8	–	–	–
АК7	–	–	–	1,5	0,5	1,0	–	–	0,3 <i>Ni</i>

Продовження таблиці 7.2

Марка сплаву	Основні елементи, %				
	<i>Mg</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cu</i>	інші
1	2	3	4	5	6
AK7M	0,20...0,60	6,50...8,00	0,20...0,60	1,00...2,00	–
AK7M2	0,20...0,60	6,00...8,00	0,20...0,60	1,50...3,00	–
AK7M2П	0,20...0,60	6,00...8,00	0,20...0,60	1,50...3,00	–
AK7M3Ц2Mг	0,30...0,50	6,50...8,00	–	2,50...3,50	1,50...2,00 <i>Zn</i> 0,07...0,20 <i>Cr</i> 0,05...0,20 <i>Ti</i>
AK7Ц9	0,15...0,35	6,00...8,00	–	–	7,00...12,0 <i>Zn</i>
AK8M3	–	7,50...10,0	–	2,00...4,50	–
AK8Л	0,40...0,60	6,50...8,50	–	–	0,10...0,30 <i>Ti</i> 0,15...0,40 <i>Be</i>
AK9	0,20...0,40	8,00...11,0	0,20...0,50	–	–
AK9M2	0,25...0,85	7,50...10,0	0,10...0,40	0,50...2,00	0,05...0,20 <i>Ti</i>
AK9Ц6	0,35...0,55	8,00...10,0	0,10...0,60	0,30...1,50	5,00...7,00 <i>Zn</i> 0,30...1,00 <i>Fe</i>
AK10Cy	0,15...0,55	9,00...11,0	0,30...0,60	–	0,10...0,25 <i>Sb</i>
AK12MMгH	0,85...1,35	11,0...13,0	–	0,80...1,50	0,80...1,30 <i>Ni</i>
AK12M2	–	11,0...13,0	–	1,80...2,50	0,60...0,90 <i>Fe</i>
AK12M2MгH	0,80...1,30	11,0...13,0	0,30...0,60	1,50...3,00	0,80...1,30 <i>Ni</i> 0,05...0,20 <i>Ti</i>
AK21M2,5H2,5	0,30...0,60	20,0...22,0	0,20...0,40	2,20...3,00	2,20...2,80 <i>Ni</i> 0,20...0,40 <i>Cr</i> 0,10...0,30 <i>Ti</i>
<i>A-S5UZ (FRA)</i>	–	5,00...7,00	0,20...0,60	3,00...5,00	–
<i>A-S9GU (FRA)</i>	0,15...0,50	8,00...11,0	0,25...0,60	0,40...1,00	–
<i>DIN226</i>	0,20...0,50	8,00...11,0	0,10...0,50	2,50...3,50	–
<i>DIN226D</i>	0,10...0,50	8,00...11,0	0,10...0,40	2,00...3,50	–
<i>DIN1725</i>	0,10...0,50	5,00...7,50	0,10...0,60	3,00...5,00	–
380 (USA)	–	7,50...9,50	–	3,00...4,00	–
238 (USA)	0,10...0,40	3,00...5,00	0,50...0,70	9,50...10,5	0,80...1,20 <i>Ni</i> 0,20...0,30 <i>Ti</i>
328 (USA)	0,20...0,60	7,00...9,00	0,20...0,60	1,00...2,00	0,10...0,40 <i>Ni</i> 0,20...0,30 <i>Ti</i>
<i>ADC12 (JPN)</i>	–	9,60...12,0	–	1,50...3,50	–
<i>AC4B (JPN)</i>	–	7,00...10,0	–	2,00...4,00	–
<i>AC8B (JPN)</i>	0,50...1,50	8,50...10,5	–	2,00...4,00	0,10...1,00 <i>Ni</i>
<i>AC2A (JPN)</i>	–	4,00...6,00	–	3,00...4,50	–

Марка сплаву	Домішки, не більше %								
	<i>Mg</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Fe</i>	<i>Pb</i>	<i>Sn</i>	інші
1	7	8	9	10	11	12	13	14	15
AK7M	–	–	–	–	1,0	0,8	0,3	<i>Pb + Sn</i>	0,15 <i>Ti + Zr</i> , 0,5 <i>Ni</i>
AK7M2	–	–	–	–	0,5	1,0	–	–	0,3 <i>Ni</i>
AK7M2п	–	–	–	–	0,3	1,0	0,15	–	0,5 <i>Ni</i> , 0,015 <i>As</i>
AK7M3Ц2Mг	–	–	0,25	–	–	0,5	–	–	–
AK7Ц9	–	–	0,5	0,6	–	0,7	–	–	–
AK8M3	0,45	–	0,5	–	1,2	1,3	0,3	<i>Pb + Sn</i>	0,5 <i>Ni</i>
AK8л	–	–	0,1	0,3	0,3	0,5	–	–	0,2 <i>Zr</i>
AK9	–	–	–	1,0	0,5	1,2	–	–	0,3 <i>Ni</i>
AK9M2	–	–	–	–	1,2	0,9	0,15	<i>Pb + Sn</i>	0,5 <i>Ni</i> , 0,1 <i>Cr</i>
AK9Ц6	–	–	–	–	–	–	0,3	<i>Pb + Sn</i>	0,3 <i>Ni</i>
AK10Cy	–	–	–	1,8	1,8	1,1	–	–	0,5 <i>Ni</i>
AK12MMгH	–	–	0,2	–	0,2	0,6	0,05	0,01	0,2 <i>Ti</i> , 0,2 <i>Cr</i>
AK12M2	0,2	–	0,5	–	0,8	–	0,15	0,1	0,2 <i>Ti</i> , 0,3 <i>Ni</i>
AK12M2MгH	–	–	–	–	0,5	0,8	0,1	0,02	0,2 <i>Cr</i>
AK21M2,5H2,5	–	–	–	–	0,2	0,5	0,05	0,01	–
<i>A – S5UZ (FRA)</i>	0,3	–	–	–	2,0	1,0	–	–	0,3 <i>Ni</i> , 0,25 <i>Ti</i>
<i>A – S9GU (FRA)</i>	–	–	–	–	0,5	0,9	–	–	0,2 <i>Ni</i> , 0,2 <i>Ti</i>
<i>DIN226</i>	–	–	–	–	1,2	0,7	0,2	0,1	0,3 <i>Ni</i> , 0,15 <i>Ti</i>
<i>DIN226D</i>	–	–	–	–	1,2	1,0	0,2	0,1	0,3 <i>Ni</i> , 0,15 <i>Ti</i>
<i>DIN1725</i>	–	–	–	–	2,0	1,0	–	–	0,3 <i>Ni</i> , 0,15 <i>Ti</i>
380 (USA)	0,3	–	0,5	–	3,0	1,0	–	0,35	0,5 <i>Ni</i>
238 (USA)	–	–	–	–	1,5	1,5	–	–	–
328 (USA)	–	–	–	–	1,5	1,0	–	–	–
<i>ADC12 (JPN)</i>	0,3	–	0,5	–	1,0	0,9	0,1	0,3	0,5 <i>Ni</i> , 0,15 <i>Ti</i>
<i>AC4B (JPN)</i>	0,5	–	0,5	–	1,0	1,0	–	–	0,35 <i>Ni</i> , 0,2 <i>Ti</i>
<i>AC8B (JPN)</i>	–	–	0,5	–	0,5	1,0	–	–	0,2 <i>Ti</i>
<i>AC2A (JPN)</i>	0,25	–	0,55	–	0,55	0,8	–	–	0,3 <i>Ni</i> , 0,2 <i>Ti</i>

Таблиця 7.3 – Характеристика вторинної алюмінієвої сировини

№ групи	Назва групи	Металургійний вихід в залежності від сорту, %				Вміст домішок <sup>2)</sup> , %, не більше				
		1	2	3	4	<i>Mg</i>	<i>Si</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Fe</i>
I	Алюміній чистий (нелегований)	97	90	85	–	–	0,5	0,05	0,1	0,5
II	Сплави алюмінієві деформовані з низьким вмістом магнію	96	$\frac{90^{1)}$	$\frac{85^{1)}$	75	0,8	0,7	4,8	0,3	0,7
III	Сплави алюмінієві деформовані з підвищеним вмістом магнію					1,8	0,7	4,9	0,3	0,7
IV	Сплави алюмінієві ливарні з низьким вмістом міді					0,6	13,0	1,5	0,5	1,5
V	Сплави алюмінієві ливарні з високим вмістом міді					0,8	8,0	6,0	0,6	1,6
VI	Сплави алюмінієві деформовані з високим вмістом магнію	96	$\frac{85^{1)}$	75	–	6,8	0,8	0,2	0,2	0,5
VII	Сплави алюмінієві ливарні з високим вмістом магнію					13,0	1,3	0,3	0,2	1,5
VIII	Сплави алюмінієві деформовані з високим вмістом цинку					2,8	0,7	2,0	7,0	0,7
IX	Сплави алюмінієві ливарні з високим вмістом цинку					0,3	8,0	5,0	12,0	1,3

Примітки: 1) чисельник – брут, знаменник – відходи;  
2) *Al* – основа .

Металургійний вихід для стружки I–IX груп в залежності від сорту: 1 сорт – 90 %, 2 сорт – 75 %, 3 сорт – 70 %, 4 сорт – 85 %

Таблиця 7.4 – Хімічний склад технічного алюмінію (ГОСТ11069–2001)

Марка	Вміст, %								
	<i>Al</i> , не менше	Домішки, не більше							
		<i>Fe</i>	<i>Si</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Ti</i>	<i>Ga</i>
A8	99,80	0,12	0,10	0,01	0,02	0,02	0,04	0,01	0,03
A7	99,70	0,16	0,15	0,01	0,03	0,02	0,04	0,01	0,03
A6	99,60	0,25	0,18	0,01	0,03	0,03	0,05	0,02	0,03
A5	99,50	0,30	0,25	0,02	0,05	0,03	0,06	0,02	0,03

Таблиця 7.5 – Хімічний склад катодної міді (ГОСТ 859–2003)

Марка	Вміст, %							
	<i>Cu</i> , не менше	Домішки, не більше						
		<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Pb + Sn</i>	<i>Sb + As</i>	<i>Zn</i>	<i>S + O<sub>2</sub></i>	Всього
M0	99,95	0,005	0,002	0,007	0,004	0,005	0,025	0,050
M1	99,90	0,005	0,002	0,007	0,004	0,005	0,086	0,100
M2	99,70	0,050	0,020	0,060	0,150	–	0,110	0,300
M3	99,50	0,050	0,020	0,100	0,100	–	0,110	0,500
M4	99,00	0,100	–	0,300	0,400	–	0,170	1,000

Таблиця 7.6 – Хімічний склад губчатого титану (ГОСТ 17746–96)

Марка	Вміст, %							
	<i>Ti</i> , не менше	Домішки, не більше						
		<i>Fe</i>	<i>Si</i>	<i>Ni</i>	<i>C</i>	<i>Cl<sub>2</sub></i>	<i>N<sub>2</sub></i>	<i>O<sub>2</sub></i>
ТГ–90	99,74	0,05	0,01	0,04	0,02	0,08	0,02	0,04
ТГ–100	99,72	0,06	0,01	0,04	0,03	0,08	0,02	0,04
ТГ–110	99,67	0,09	0,02	0,04	0,03	0,08	0,02	0,05
ТГ–120	99,64	0,11	0,02	0,04	0,03	0,08	0,02	0,06
ТГ–130	99,56	0,13	0,03	0,04	0,03	0,10	0,03	0,08
ТГ–150	99,45	0,20	0,03	0,04	0,03	0,12	0,03	0,10
ТГ–Тв	97,75	1,90	–	–	0,10	0,15	0,10	–

Таблиця 7.7 – Хімічний склад силіцію (ГОСТ 2169–69), марганцю (ГОСТ 6008–90), цинку (ГОСТ 3640–79), магнію (ГОСТ 804–93), нікелю (ГОСТ 849–97)

Марка	Вміст, %						
	Основний елемент, не менше	Домішки, не більше					
		<i>Fe</i>	<i>Ca</i>	<i>Si</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Pb + Cd</i>
	Силіцій						
Кр00	99,0	0,4	0,4	–	0,3	–	–
Кр0	98,8	0,5	0,4	–	0,4	–	–
Кр1	98,0	0,7	0,6	–	0,7	–	–
Кр2	97,0	1,0	0,8	–	1,2	–	–
Кр3	96,0	1,5	1,5	–	1,5	–	–
	Манган						
Мр1	96,50	2,30	–	0,80	0,70	0,03	–
Мр2	95,00	2,80	–	1,80	0,70	0,03	–
Мр1С	93,50	2,80	–	1,8–3,0	0,70	0,03	–
	Цинк						
Ц0	99,96	0,010	–	–	–	0,001	0,025
Ц1	99,95	0,015	–	–	–	0,002	0,030
Ц2	98,70	0,050	–	–	–	0,005	1,200
	Магній						
Мг96	99,96	0,004	–	0,004	0,002	0,002	–
Мг95	99,95	0,004	–	0,004	0,006	0,003	–
Мг90	99,90	0,040	–	0,009	0,006	0,004	–
	Нікель						
Н0	99,80	0,040	–	0,002	–	0,060	–
Н1	99,70	0,100	–	0,005	–	0,100	–
Н2	98,90	0,250	–	0,300	–	0,150	–
Н3	98,60	–	–	–	–	0,610	–
Н4	97,60	–	–	–	–	0,610	–

Таблиця 7.8 – Вплив забрудненості шихти на видобування металу під час відбивного плавлення

Вміст забруднень, %	Оптимальна витрата флюсу, $\frac{\text{кг}}{\text{т шихти}}$	Видобування металу, %	Втрати металу, %			
			внаслідок окиснення	механічні	інші	загальні
1	40	97,5	0,4	1,8	0,3	2,5
4	160	95,6	1,0	3,1	0,3	4,4
8	240	93,4	1,7	4,5	0,4	6,6
12	410	90,9	2,5	6,1	0,4	9,1
16	580	87,8	3,8	7,9	0,5	12,2

Таблиця 7.9 – Угар металів під час виплавлення алюмінієвих сплавів

Метал	Угар металу залежно від типу печі, %	
	відбивна піч	тигельна електропіч
<i>Al</i>	2,0...3,0	0,8...1,0
<i>Mg</i>	3,0...10,0	2,0...3,0
<i>Zn</i>	3,0...5,0	0...2,0
<i>Cu</i>	2,0...3,0	0,5...1,0
<i>Mn</i>	2,0...3,0	1,0...1,5
<i>Si</i>	1,5...2,0	1,0...1,5
<i>Fe</i>	0,5...1,0	0,5...1,0
<i>Ni</i>	1,0...1,2	0,5...1,0
<i>Ti</i>	2,0...5,0	1,0...1,5
<i>Zr</i>	3,0...5,0	1,0...2,0
<i>Be</i>	5,0...7,0	2,0...3,0
<i>Sn</i>	1,5...2,0	0,5...1,0
<i>Cd</i>	5,0...10,0	1,0...2,0



## ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

### *Основна література*

1. Баранов А. А. Технология вторичных цветных металлов и сплавов [Текст] / А. А. Баранов, О. П. Микуляк, А. А. Резняков. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1988. – 163 с. – ISBN 5–11–001273–3.
2. Виробництво алюмінієвих сплавів з рудної та вторинної сировини [Текст]: навч. посіб. / Т. М. Нестеренко, О. М. Нестеренко, Г. О. Колобов, В. П. Грицай. – К.: Вища шк., 2007. – 207 с. – ISBN 978–976–642–354–5.
3. Магниеые сплавы: Технология производства и свойства отливок и деформируемых полуфабрикатов [Текст]: справочник / Е. Г. Антонов, Б. А. Арбузов, В. М. Бабакин и др.; Под ред. И. И. Гурьева, М. В. Чухрова. – М.: Металлургия, 1978. – 295 с.
4. Смирягин А. П. Промышленные цветные металлы и сплавы [Текст]: справочник / А. П. Смирягин, Н. А. Смирягина, А. В. Белова.–3-е изд. – М.: Металлургия, 1974. – 488 с.
5. Тарасов А. В. Производство цветных металлов и сплавов [Текст]. Т.1. Общие вопросы металлургии: справочник / А. В. Тарасов. – М.: Металлургия, 2001. – 344 с. – ISBN 5–229–01265–9.
6. Тарасов А. В. Производство цветных металлов и сплавов [Текст]. Т.2. Кн.1. Производство тяжелых цветных металлов: справочник / А. В. Тарасов. – М.: Металлургия, 2001. – 408 с. – ISBN 5–229–01266–8.
7. Тарасов А. В. Производство цветных металлов и сплавов [Текст]. Т.2. Кн.2. Производство легких, редких цветных и драгоценных металлов: справочник / А. В. Тарасов. – М.: ИКЦ "Академкнига", 2007. – 316 с. – ISBN 978–5–94628–290–1.
8. Тарасов А. В. Производство цветных металлов и сплавов [Текст]. Т.3. Вторичная металлургия тяжелых цветных металлов: справочник / А. В. Тарасов. – М.: ИКЦ "Академкнига", 2008. – 448 с. – ISBN 978–5–901129–41–8.
9. Цветное литье [Текст]: справочник / Н. М. Галдин, Д. Ф. Чернега, Д. Ф. Иванчук и др.; под общ. ред. Н. М. Галдина. – М.: Машиностроение, 1989. – 528 с. – ISBN 5–217–00396–0.

10. Цыганов А. С. Производство вторичных цветных металлов и сплавов [Текст]: учеб. пособие / А. С. Цыганов. – М.: Гос. научно-техн. изд-во по черной и цветной металлургии, 1961. – 302 с.

*Навчально-методична література*

11. Виробництво алюмінієвих сплавів з рудної та вторинної сировини [Текст]: методичні вказівки до практичних занять для студентів ЗДІА спеціальності 7.090402 “Металургія кольорових металів” / Укл. Т. М. Нестеренко. – Запоріжжя: ЗДІА, 2006. – 40 с.
12. Металургія легких металів [Текст]: методичні вказівки до виконання курсової роботи для студентів ЗДІА спеціальності 7.090402 “Металургія кольорових металів”/Укл. Т.М. Нестеренко. – Запоріжжя: ЗДІА, 2004. – 48 с.

Методичне видання

**Нестеренко Тетяна Миколаївна**

*к.т.н., доцент*

**ВИРОБНИЦТВО СПЛАВІВ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ**

**Методичні вказівки до самостійної роботи і тестування**

*для студентів ЗДІА  
спеціальності 6.090402 “Металургія кольорових металів”  
денної та заочної форм навчання*

Підписано до друку .12.2011 р. Формат 60x84 1/32. Папір офсетний.  
Умовн. друк. арк. 6,7. Наклад 50 прим.  
Замовлення №

Запорізька державна інженерна академія  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів  
видавничої справи ДК № 2958 від 03.09.2007 р.

**Віддруковано друкарнею**  
Запорізької державної інженерної академії  
з оригінал-макету авторів

69006, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226  
РВВ ЗДІА, тел. 2238-240

