



KAPITEL 1 / CHAPTER 1¹

MODERN STATE AND TECHNOLOGIES OF TITANIUM ALLOYS PRODUCTION

DOI: 10.30890/2709-2313.2022-12-01-020

Вступ

Розвиток науки та техніки неминуче призводить до вдосконалення матеріалів і технологічних процесів їх отримання та обробки для створення нових конструкцій.

Титанові сплави мають унікальний комплекс фізико-механічних, хімічних та експлуатаційних властивостей, які роблять їх незамінними у багатьох галузях промисловості. Останніми роками найбільшим споживачем титанових сплавів є аерокосмічна галузь, далі йдуть суднобудування, хімічна промисловість, медицина, цивільне будівництво, індустрія розваг та ін. Широку потребу в титанових сплавах та високу ефективність їх застосування визначили такі властивості титану, як висока питома міцність, унікальна корозійна стійкість у різних середовищах, у тому числі в організмі людини, більшості органічних і мінеральних кислот, лугах, мінімальний серед металів температурний коефіцієнт лінійного розширення, досить висока температура плавлення.

До недоліків титанових сплавів слід віднести їх високу ціну, надзвичайно низькі триботехнічні властивості, що унеможливує застосування титану у вузлах тертя, високу хімічну активність титану при нагріванні вище температури 500 °С, що призводить до його окрихкнення внаслідок розчинення газів (O₂, N₂, H₂). До того ж високоміцні титанові сплави є чутливими до якості поверхні та концентрації напруг [1-3].

Як і раніше, дорогі титанові сплави переважно використовують для виготовлення військової техніки. Так, заміна сталевих гарматної вежі на титанову дозволить знизити вагу танка M1 Abrams на 4 т [4]. Фахівці з ВМФ США вивчають можливість знизити вагу наступальних амфібій заміненням деяких найважчих їх сталевих елементів на титанові. За прогнозами японських виробників, якщо лише 10 % автомобілів матиме титанову вихлопну систему, тоді світовий ринок збуту титану збільшиться на 48 тис. т [5]. Вперше у світовій практиці застосовані титанові елементи кріплення надпровідних

¹Authors: Nesterenko Tetiana Mykolaivna



магнітів Великого андронного колайдера, виготовлені з титанових сплавів VT6 та VT5-1 [6].

Потребу цивільних галузей промисловості в титанових виробках можна задовольнити зниженням витрат за виробництво сплавів створенням нових сплавів методом економного легування, вдосконаленням існуючих та запровадженням нових технологій отримання титанових сплавів, злитків і виробів.

1.1. Класифікація, структура, властивості та застосування титанових сплавів

Переваги титану як конструкційного матеріалу загальновідомі. Легування титану дозволяє вдвічі-втричі підвищити його міцність, тому в сучасному машинобудуванні основну роль відіграють титанові сплави.

Титанові сплави можна класифікувати за способом їх виробництва, призначенням, властивостями та структурним складом. Однак наведені класифікації є досить умовними.

За способом виробництва титанові сплави поділяють на деформовані, ливарні та порошкові (гранульні).

За призначенням титанові сплави класифікують на конструкційні, жароміцні, криогенні, корозійностійкі, функціональні.

За механічними властивостями (величиною межі міцності) титанові сплави класифікують на високопластичні (межа міцності до 700 МПа), середньої міцності (межа міцності 750-1000 МПа), високоміцні [7]. Високопластичні титанові сплави допускають значну деформацію у холодному стані. Високоміцні титанові сплави, що термічно зміцнюються, є матеріалами майбутнього, оскільки вже сьогодні вдається отримати межу міцності 1800-2000 МПа при щільності 1,7 разів меншої, ніж у сталі.

Поліморфізм титану є основою класифікації титанових сплавів за структурним принципом. У зв'язку з наявністю поліморфного перетворення та впливом на стабільність α - та β -фаз легуючих елементів титанові сплави відрізняються між собою фізико-механічними властивостями та можуть зміцнюватися термічною обробкою.

Елементи, що використовують для легування титану, за характером впливу



їх на фазовий склад сплавів поділять на: α -стабілізатори (Al, Ga, In, O, N, C); β -стабілізатори (Mo, W, V, Nb, Ta, Cr, Fe, Si, Mn та ін.); нейтральні зміцнювачі (Zr, Hf, Sn, Ge, Th). Всі β -стабілізатори поділяють на ізоморфні (Mo, W, V, Nb, Ta) та евтектоїдоутворюючі (Si, Cr, Mn, Fe, Cu, Ni, Co, H).

У сплавах титану з ізоморфними β -стабілізаторами твердий β -розчин може зберігатися до кімнатної температури, не зазнаючи евтектоїдного розпаду. У сплавах титану з евтектоїдоутворюючими β -стабілізаторами при досить низькій температурі відбувається евтектоїдний розпад β -фази за реакцією $\beta \rightarrow \alpha + \gamma$, де γ – проміжні фази Ti_5Si_3 , $TiCr_2$, $TiMn$, $TiFe$ та ін. [8]. Наявність евтектоїдоутворюючих β -стабілізаторів у титанових сплавах, що працюють при підвищених температурах, може призвести до евтектоїдного розпаду β -фази, що спричинить різке зниження пластичності.

Сучасні промислові титанові сплави засновані, як правило, на α - та β -твердих розчинах або сумішах. Винятком є жароміцні сплави, які часто легують елементами в кількостях, дещо більших їх розчинності в α - та β -титані. Це, насамперед, стосується таких легуючих елементів як алюміній та евтектоїдоутворюючі β -стабілізуючі елементи з високою швидкістю евтектоїдного перетворення.

За структурним принципом визнаним є, запропонований Глазуновим С. Г., поділ промислових титанових сплавів за фазовим складом на α -, $(\alpha+\beta)$ - та β -сплави з інтерметалідами і без них [9,10].

Оскільки промислові титанові сплави з $(\alpha+\beta)$ -структурою відрізняються різним співвідношенням α - та β -фаз у стабільному стані, виникла потреба у більш детальній класифікації сплавів усередині кожного класу на: псевдо- α -сплави, сплави мартенситного класу, сплави перехідного класу та псевдо- β -сплави [11].

Для визначення за хімічним складом класу $(\alpha+\beta)$ -титанового сплаву необхідно знати ступінь стабілізації β -фази у сплаві, що характеризується критичною концентрацією β -стабілізуючого елемента. Оскільки ця критична концентрація для більшості подвійних сплавів титану добре відома, вона прийнята за основу визначення дії легуючих елементів як умовний коефіцієнт стабілізації β -фази (K_β). Його визначають як відношення дійсної кількості β -стабілізуючого елемента у сплаві до його критичного вмісту у подвійному сплаві з титаном [10-12]. Отже, сплави критичного складу матимуть $K_\beta=1$, докритичного – $K_\beta<1$, закритичного – $K_\beta>1$. У багатокомпонентних сплавах K_β



знаходять за формулою:

$$K_{\beta} = C_1/C_{1кр} + C_2/C_{2кр} + C_3/C_{3кр} + \dots + C_i/C_{ікр},$$

де $C_1, C_2, C_3, \dots, C_i$ – дійсний вміст i -ого β -стабілізуючого елемента; $C_{1кр}, C_{2кр}, C_{3кр}, \dots, C_{ікр}$ – критичний вміст i -ого β -стабілізуючого елемента у подвійному сплаві з титаном.

За величиною коефіцієнта K_{β} промислові титанові сплави поділяють на шість груп: α -сплави (не містять β -стабілізаторів, $K_{\beta} = 0$); псевдо- α -сплави ($K_{\beta} = 0,09-0,25$); $(\alpha+\beta)$ -сплави мартенситного типу ($K_{\beta} = 0,27-0,83$); $(\alpha+\beta)$ -сплави перехідного типу ($K_{\beta}=1,0-1,1$); псевдо- β -сплави ($K_{\beta}=1,7-2,5$); β -сплави ($K_{\beta} \geq 3$).

До α -сплавів відносять сплави з переважним вмістом α -твердого розчину титану (BT1-0, ПТ-7М). Ці сплави, як правило, легуються α -стабілізаторами і нейтральними зміцнювачами. В області температури фазового перетворення $\alpha \rightarrow \beta$ гексагональна α -фаза має вищу жароміцність, ніж кубічна β -фаза. Додавання в сплав елементів, що стабілізують α -фазу, дозволяє підвищити його жароміцність. Ці сплави чутливі до водневої крихкості [13,14].

Для підвищення міцності і жаростійкості α -сплави можуть легуватися також розчинними в α -фазі металами V, Nb, Ta, Ag, які стабілізують β -фазу і підвищують жароміцність цих сплавів. α -сплави з добавкою β -стабілізаторів називають псевдо- α -сплавами (OT4-1, OT4, BT20). Структура таких сплавів представлена α -фазою і невеликою кількістю β -фази (до 5 %) або інтерметалідів [1,15]. Сплави практично не сприймають термічну обробку, що зміцнює.

Основою для створення промислових α -сплавів є система Ti–Al. Алюміній, за рідкісним виключенням, присутній практично у всіх сплавах титану. Тому ця система для титанових сплавів має таке саме значення, як система залізо–вуглець для сплавів на основі заліза. Алюміній є єдиним широко вживаним металом, що стабілізує α -фазу. Додавання алюмінію в кількості до 13 % дозволяє отримувати сплави з хорошою жароміцністю [16,17]. Крім того, алюміній знижує щільність сплавів і їх вартість.

В цілому α -сплави мають високу жароміцність. Такі сплави є термічно стабільними при тривалому нагріванні, добре чинять опір газовій корозії і зварюються. Проте пластичність сплавів цього класу і, отже, здатність до холодної деформації нижча, ніж у β -сплавів і титану технічної чистоти. α -сплави не зміцнюються термічною обробкою, що є істотним їх недоліком. Ці сплави піддають тільки відпалу для зняття напруги і нагартування.

$(\alpha+\beta)$ -сплави отримують легуванням титану елементами, що утворюють α -



і β -тверді розчини з різним співвідношенням цих фаз, і елементами, що розширюють температурну область фазових перетворень титану. Двофазна структура сплавів виникає при нагріванні під гартування і фіксується різким охолодженням. Термообробка ($\alpha+\beta$)-сплавів дозволяє помітно підвищити їх міцність при відносно невеликому погіршенні пластичності. Такі сплави мають обмежену зварюваність, після зварювання необхідна термообробка зварних швів [9,14,15,18].

Окрім алюмінію, найбільш важливими легуючими елементами титанових сплавів є ванадій і молібден. Система Ti–Al–V є основою більшості високоміцних титанових сплавів, а система Ti–Al–Mo є основою 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. У виробництві титанових сплавів цей сплав зіграв таку саму роль, як дуралюміній у виробництві алюмінієвих сплавів. При виробництві титанових сплавів як легуючі компоненти, окрім Al, V, Mo, використовують також Cr, Mn, Fe, Cu, Sn, Zr, W і рідше Nb, Ta [8]. Для підвищення корозійної стійкості, зокрема в мінеральних кислотах, до чистого титану додають Pt і Pd.

До титанових сплавів мартенситного класу (BT6, BT16, BT3-1) відносять ($\alpha+\beta$)-сплави, що містять у стабільному стані від 5 % до 25 % β -фази і утворюють при різкому охолодженні з β -області мартенсит у вигляді α' - або α'' -фази [1].

До титанових сплавів перехідного класу (BT22, BT30) відносять сплави з ($\alpha+\beta$)-структурою. Такі сплави у стабільному стані містять від 25 % до 50 % β -фази, а при різкому охолодженні з температур β -області зберігають β -структуру, яка може в деяких умовах зазнавати ω -перетворення. Такі сплави мають високу гетерогенність структури (висока дисперсність суміші α - та β -фаз), відрізняються максимальним ефектом зміцнення під час термічної обробки, прожарюються у досить великих перерізах і не такі чутливі до якості структури, як титанові сплави мартенситного класу. Сплави перехідного класу доцільно застосовувати для виготовлення масивних великогабаритних поковок, штампувань та інших напівфабрикатів, для яких питання міцності, прожарювання та якості структури є найважливішими [7].

Псевдо- β -сплави (BT15, BT32, TC6) є високолегованими титановими сплавами, у яких загальний вміст легуючих елементів становить близько 20 %.



У структурі таких сплавів переважає β -фаза та наявна невелика кількість α -фази. Гартуванням цих сплавів або їх нормалізацією з β -області отримують однофазну β -структуру. Псевдо- β -сплави застосовують як болти та заклепки, отримані методом холодної висадки, пружини [2,3]. Оскільки термічною обробкою можна досягти високого рівня міцності, доцільно застосовувати псевдо- β -сплави у вигляді листів та фольги для стільникових панелей.

До β -сплавів відносять сплави, у структурі яких переважає твердий розчин на основі β -модифікації титану. Основними легуючими елементами є β -стабілізатори. До складу таких сплавів (наприклад, сплав 4201) майже завжди входить алюміній, який їх зміцнює. β -сплави завдяки кубічним решіткам легше піддаються холодній деформації, ніж α - і $(\alpha+\beta)$ -сплави. Ці сплави добре зміцнюються термообробкою, що полягає в гартуванні і старінні, задовільно зварюються. β -сплави мають достатньо високу жароміцність, проте при легуванні їх тільки β -стабілізаторами жароміцність зі зростанням температури вище 400 °С помітно знижується [8,18]. Опір повзучості і термічна стабільність сплавів цього класу нижчі, ніж у сплавів на основі α -твердого розчину.

Ливарні властивості сплавів залежать від величини їх температурного інтервалу кристалізації. Для промислових ливарних титанових сплавів ця величина 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 припустимий більший вміст домішок.

До конструкційних сплавів відносять нелегований титан (BT1-0), сплави потрійної системи Ti–Al–Mn (OT4) з гарантованою міцністю 500 МПа, 600 МПа і 700 МПа, сплави BT5-1 і BT20 з гарантованою міцністю 750 МПа і 950 МПа відповідно [7,8]. До високоміцних відносять сплави (BT6, BT14, BT16, BT22) з межею міцності понад 1000 МПа при кімнатній температурі. Всі вони,



окрім алюмінію, містять в своєму складі V або Mo і V. До жароміцних відносять сплави (BT3-1, BT9), леговані Al, Mo і Zr (або Cr). У групу сплавів зі спеціальними властивостями (корозійностійкі, для криогенних температур) входять сплави з Mo, Pd і сплави BT5-1 і BT6 підвищеної чистоти.

Сплави на основі інтерметалідів у недалекому майбутньому можуть створити ще один клас промислових титанових сплавів. В даний час відбуваються лабораторні та дослідно-промислові дослідження сплавів з «ефектом пам'яті» (відтворення форми) на основі еквіатомного інтерметаліду Ti-Ni (торгова марка «Нітінол») і високожароміцних сплавів на основі інтерметалідів Ti-Al (γ -фаза) та Ti₃Al (α' -фаза) [19-22]. Ефект відтворення форми проявляється в тому, що матеріал нижче за певну температуру легко деформується, а після нагрівання відновлює свою вихідну форму. Під час відновлення форми в матеріалі генерується реактивна напруга, яка може виконувати роботу. На такому ефекті в даний час розроблено багато варіантів конструкцій, які виконують роль термомеханічних з'єднань (муфти для складання трубопроводів), термочутливих датчиків і виконавчих елементів (термостати, протипожежні системи), конструкцій, що трансформуються, медичних імплантатів та ін. Освоєння виробництва сплавів типу нітінол стримується необхідністю підтримувати хімічний склад сплавів у надзвичайно вузьких межах.

1.2. Особливості технологій виробництва титанових сплавів

При нагріванні на повітрі титан активно вступає у взаємодію зі всіма газами. Під час взаємодії з киснем на поверхні титану утворюється зовнішній щільний шар оксиду титану TiO₂. Дифузія кисню в глиб титану спричинює утворення під шаром TiO₂ рихлого прошарку з TiO₂ і TiO та шару титану з підвищеним вмістом кисню, який називають газонасиченим. При кристалізації в системі Ti-O утворюється низка хімічних сполук: TiO, Ti₂O₃, TiO₂ та ін. [16,17,23-25]. 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 α -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 [26].

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. Титан необхідно плавити в умовах, що запобігають насиченню рідкого металу газами і іншими шкідливими домішками.

Висока температура плавлення титану (1668 ± 5 °C) в поєднанні з високою хімічною активністю створює великі труднощі під час плавлення і лиття сплавів на основі титану [14]. Для запобігання окрихлення титану внаслідок забруднення газами, плавлення і лиття проводять у високому вакуумі або в атмосфері інертного газу (Ar, He) високої чистоти, а також не припускають зіткнення металу з вогнетривкими матеріалами. Переважно використовують вакуумне плавлення при залишковому тиску в печі 1,33–0,13 Па [27].

В даний час розроблено декілька технологій виплавлення злитків титану та його сплавів, що запобігають забрудненню металу газами або вогнетривкими матеріалами та забезпечують виробництво більшості титанових сплавів: вакуумно-дугове переплавлення (ВДП); гарнісажне плавлення з електродом, що витрачається (ГРЕ); плавлення в електрошлаковій печі; плазово-дугове плавлення з холодним черенем; індукційне плавлення з секційним водоохолоджуваним тиглем; електронно-променеве плавлення та їх різновиди. Для більшості видів плавлення для формування злитка при плавленні титану застосовують водоохолоджуваний мідний кристалізатор, а під час гарнісажного плавлення – також графітовий тигель.

Основними промисловими технологіями виплавлення злитків титану в даний час є вакуумно-дугове переплавлення та електронно-променеве плавлення. В час вакуумно-дугових печах плавлення металу відбувається внаслідок «горіння» електричної дуги між розплавленим металом і електродом. Перебіг процесів плавлення і кристалізації злитків відбувається одночасно.



Спосіб гарнісажного плавлення дозволяє наплавляти рідкий метал відразу на весь злиток, фасонний виливок або заготовку, наприклад, електрод, що витрачається, для другого переплавлення. Під час плавлення на внутрішній поверхні плавильного тигля наявний шар твердого титану або «гарнісажу», з яким стикається розплавлений метал. 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 подальшого плавлення як електрод, що витрачається, або залишають (наприклад, в графітовому тиглі) для захисту від забруднення вуглецем наступних плавок титану. Технологія гарнісажної плавки дозволяє переплавляти будь-яку кількість відходів, отриманий метал має високу однорідність, тугоплавкі включення «вмерзають» у гарнісаж і не переходять у злиток [27-29].

Для електрошлакового плавлення джерелом нагрівання є джоулева теплота, що виділяється при проходженні струму через шар флюсу (фториду кальцію), який є елементом опору. Процес відбувається за схемою електрода, що витрачається. Під час плавлення параметри процесу зручно регулювати, 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 плазово-дугового плавлення дозволяє переплавити сипку шихту, що містить будь-яку кількість відходів. Як джерело теплоти в цьому процесі використовують потік йонізованого газу-плазми, що надходить у зону плавлення спеціальними пристроями – плазмотронами [30,31]. Під час плазового плавлення, що може здійснюватися також і за схемою електрода, який витрачається, підвищується безпека процесу, поверхня злитків поліпшується порівнянно з дуговим плавленням.

Спосіб індукційної плавлення передбачає використання графітового тигля. Весь метал, що переплавляють, знаходиться в розплавленому стані на відмінність, наприклад, від ВДП, при якому 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. Внаслідок взаємодії графіту з 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. У разі використання як тигель вогнетривких матеріалів титан ними забруднюється.

Окрім перелічених способів виплавлення титанових сплавів відбувається дослідно-промислове випробування нових технологій: індукційне плавлення з секційним водоохолоджуваним тиглем, дугошлакове переплавлення, дискове донне зливання (ДДЗ) та ін. [32-35].

1.3. Технології виплавлення титанових сплавів

Плавлення у вакуумно-дугових печах. Вакуумно-дугові печі є одними з основних електрометалургійних плавильних агрегатів, які застосовують у спеціальній металургії для виплавлення злитків високо реакційних і тугоплавких металів, зокрема титану.

Плавлення у вакуумі має істотну перевагу порівняно з плавленням у захисній атмосфері. Титанова губка містить деяку кількість домішок, зокрема летких: H_2 , $MgCl_2$, Mg , H_2O та ін. Процес видалення летких домішок під час плавлення відбувається значно швидше у вакуумі, ніж в нейтральному середовищі, оскільки тиск газу пригнічує процеси випаровування. Проте навіть у вакуумі домішки не видаляються повністю за одне переплавлення, тому злитки титанових сплавів обов'язково піддають другому переплавленню. Це дозволяє також для повніше усередити хімічний склад злитків, оскільки під час по одиночного переплавлення не забезпечується достатньо рівномірний розподіл легуючих компонентів у злитку.

Найбільшого поширення набула технологія виробництва злитків, що складається з приготування шихти, пресування електрода, що витрачається, першого вакуумно-дугового плавлення у водоохолоджуваному кристалізаторі, другого вакуумно-дугового плавлення в кристалізаторі більшого діаметру, механічної обробки злитків, контролю хімічного складу, механічних властивостей і наявності внутрішніх дефектів [14,26].

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 0,35–0,65 м.

Перше і друге переплавлення здійснюють в однакових за конструкцією печах, що розрізняються тільки розмірами кристалізатора і джерелами струму. Печі, що використовуються тепер в промисловості, дозволяють отримувати злитки першого переплавлення діаметром 0,56–0,85 м, завдовжки 2,0–2,6 м і масою 2,5–5,0 т. Діаметр злитків другого переплавлення дорівнює 6,5–9,5 м, маса близько 2,5–10 т. Для першого переплавлення використовують джерела з силою струму 25 кА, для другого – 37 кА [26].

Тенденція розвитку плавильного виробництва полягає в збільшенні маси злитків до 5–8 т [26,31]. Істотним недоліком цієї технології є 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 щодо кисню і азоту повітря, а також практично до всіх вогнетривких матеріалів, зумовила створення спеціального вакуумного плавлення для отримання злитків.

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

Під час плавлення з електродом, що не витрачається, титанову губку засипають в бункер, приєднаний до виливниці за допомогою патрубку. 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 плавлення не витрачається. Перед плавленням на дно виливниці засипають невелику кількість губки, електрод переміщається в нижнє положення до виникнення дугового розряду між електродом і піддоном. В міру плавлення



металу титанову губку і легуючі компоненти подають з бункера у виливницю. Злиток поступово наростає, а електрод піднімається вгору.

Отриманий у такий спосіб злиток має незадовільно проплавлену поверхню і нерівномірний хімічний склад, тому його потрібно переплавити вдруге за способом електрода, що витрачається. Однак спосіб ВДП в печі з електродом, що не витрачається, мало поширений внаслідок забруднення металу, що переплавлявся, матеріалом електрода. Тому отриманий злиток ще раз потрібно переплавляти методом ВДП з витратним електродом.

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. Перевагою ВДП є можливість переплавлення титанових відходів.

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 плавлення. 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: Al, Mn, Zr, Fe, Si, іноді Cr. У вигляді лігатур з алюмінієм додають V, Mo. Застосовують також комплексні лігатури, наприклад, для виплавлення сплаву ВТЗ-1, який містить у відповідній пропорції і інші легуючі елементи (Cr, Fe та ін.). Такі лігатури отримують алюмотермічним способом. Sn вводять у вигляді лігатури Al–Sn, яку виготовляють сплавленням чистих компонентів в індукційних печах.

До використання в шихті легуючі компоненти подрібнюють. Для подрібнення крихких металів і лігатур (Cr–Mn, Al–Mo, Al–V та ін.) застосовують щоківі або молоткові дробарки. Злитки (чушки) алюмінію та лігатури Al–Sn переводять у стружку на стругальних верстатах.

У шихті використовують такі види відходів: листові обрізки, кускові відходи від кованих або пресованих виробів, стружку. Заздалегідь відходи потрібно подрібнювати і видаляти з їх поверхні шар, що містить підвищену кількість газових домішок. Тому 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 кольорів мінливості. Стружку подрібнюють для отримання фрагментів розміром до 70 мм і піддають магнітній сепарації для видалення уламків твёрдосплавних різців, що потрапляють у стружку під час токарної обробки титанових сплавів і, не розплавившись, можуть утворити в злитку включення.

При шихтуванні сплавів розраховують масу наважки легуючих компонентів і потрібну твердість губчастого титану, що забезпечує необхідну міцність сплаву. Розрахунок наважки 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 потужних горизонтальних або вертикальних гідравлічних пресах. Переважно застосовують вертикальні преси, оскільки в цьому випадку розподіл компонентів шихти за горизонтальним і вертикальним перетином електродів більш рівномірний. Для зменшення зусиль пресування матрицю підігрівають до 250–300 °С. Для поєднання порцій шихти в електроді між собою передбачена фігурна поверхня торця прес-шайби.

Одною з основних умов отримання міцного електрода є досягнення достатнього питомого тиску пресування – близько 294–343 МПа, а в кінці циклу пресування – не менше 137 МПа [30].

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 виплавлення злитка першого переплавлення. Дозування і подавання порції на пресування здійснюється зазвичай автоматичними пристроями.

Виплавлення злитків першого і другого переплавлення виконують у однотипних печах. Вакуумно-дугова піч складається з виливниці, піддону, електродотримача, робочої камери, вакуумної системи.

Найважливішою частиною печі є виливниця, в якій 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 виготовляється з міді, оскільки в перший період плавки вона безпосередньо зазнає дію рідкого металу. Кришка і електродотримач сприймають тільки теплове випромінювання, тому схильні до менших теплових навантажень, їх зазвичай виготовляють зі сталі.

На корпус виливниці намотується соленоїд, що призначений 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 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 і зазвичай є довшим 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 під час плавлення. Камеру виготовляють з корозійностійкої сталі, вона витримує відносно 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 плавлення 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 [28-30].

Плавлення злитків відбувається таким чином. Електрод, що витрачається, поміщають у піч і зварюють з недогарком. Далі, піднявши електрод, запалюють дугу між нижнім торцем електрода і піддоном. Під час виплавлення крупних злитків другого переплавлення на піддон кладуть темплет з того самого 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.

Протягом плавлення титанової губки відбувається перебіг таких основних фізико-хімічних процесів. На початку плавлення з пресованого електрода внаслідок його розігрівання видаляються вода і адсорбовані гази (N_2 , O_2). У зоні вищих температур, ближче до нижнього кінця електрода виділяються пари Mg і $MgCl_2$, які в 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 в такій послідовності: Al , Cr , Mn , Mg і $MgCl_2$.

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 леткого легуючого компонента – Mn , вміст якого може підвищуватися у поверхневому шарі злитків першого переплавлення до 12–17 %.



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 H_2 і натікаючих активних газів (N_2 , O_2). Розчинність H_2 в титані з підвищенням температури зменшується, тому найактивніше він видаляється з розплавленого шару на торці електрода. Основна частина його видаляється через вакуумну систему. Частина H_2 дифундує в холодніші частини витратного електрода і злитка, де розчинність його більша.

Натікаючі активні газы (N_2 , O_2) потрапляють у робочий простір печі крізь нещільності конструкції, переважно 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 плавлення.

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

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

Отримані злитки першого переплавлення зварюють один з одним позапічним аргоно-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.

Основним завданням другого переплавлення є отримання однорідного злитка з якісною поверхнею. Досягається це застосуванням значних щільностей



струму; підтримкою протягом плавлення невеликого тиску інертного газу (10–25 кПа), що особливо важливе для отримання однорідних злитків зі сплавів, що містять Mn; виведенням усадкової раковини зниження сили струму наприкінці плавлення.

Застосування вакууму і високих температур вимагає дотримання жорстких вимог обережності протягом процесу. Під час пропалювання водоохолоджуваних вузлів печі і надходження води у робочий простір рідкий титан реагує з нею, поглинаючи O_2 і виділяючи H_2 . У разі потрапляння в піч повітря через нещільності конструкції внаслідок різкого підвищення тиску, утвориться гримуча суміш і може відбутися вибух.

Злитки, що отримані дворазовим плавленням, обточують для 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, ВТ3-1, ВТ15 та ін. для зменшення зусиль при обточуванні обробляють в гарячому стані, безпосередньо після вивантаження з печі [26,28].

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, пор) і сторонніх включень (частинки лігатур, що не проплавилися, уламки твердосплавних пластин). Дефектні частини злитків відрізають і направляють у відходи.

Вакуумно-дугова плавка з електродом, що витрачається, має низку істотних недоліків, основними з яких є:

- використання обмеженої кількості відходів у шихті внаслідок зниження міцності пресованих електродів при додаванні відходів понад 30 %;
- недостатня однорідність злитків і утворення в них тугоплавких дефектів у зв'язку з тим, що під час плавлення тільки мала частина злитка знаходиться в



рідкому стані;

- вибухонебезпека процесу;
- втрати металу під час обробки злитків, що пов'язані з недостатнім проплавленням поверхні.

Фасонно-ливарні вироби з титану та його сплавів отримують у вакуумно-дугових гарнісажних печах. Плавлення 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 першого плавлення 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 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 матеріалу, 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.

Основною небезпекою під час вакуумно-дугового плавлення є пропалювання стінки кристалізатора електричною дугою. Це приводить до надходження води в плавильний простір, 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 водоохолоджуваного 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.

Для 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 спричинює пропалювання стінки кристалізатора. Недостатня подача води або припинення подачі її в охолоджувальну сорочку (кесон кристалізатора) може спричинити розплавлення мідного кристалізатора. Причиною вибуху може бути потрапляння в піч мастила з вакуумних насосів при їх випадковій зупинці (відключенні), а також проникнення вуглеводневої пари внаслідок розкладання гумових ущільнень під впливом місцевого перегрівання. 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 пилоподібні осадження титану і магнію, що утворюються під час плавлення внаслідок конденсації їх пари на внутрішніх холодних поверхнях кристалізатора і вакуумної камери. Щоб уникнути цього розкривання печі після чергового плавлення проводять з операцією повільного (невеликими порціями) випускання 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 вакуумно-дугових печей для виплавлення титану. Основними з них є надійна автоматика, що управляє електричною дугою, оригінальна конструкція соленоїдів, надійне і інтенсивне охолодження кристалізатора водою, установка на печах вакуум-насосів, що мають високу швидкість відкачування, продуктивність яких зростає з підвищенням тиску у відкачуваному просторі та ін.

Технологія ВДП характеризується широкими технологічними



можливостями за значно менших витрат на виробництво сплавів порівняно з електронно-променевим плавленням.

Плавлення в печі з гарнісажем. Гарнісажне плавлення титану відрізняється від ВДП тим, що зона плавлення відокремлена від зони кристалізації злитка. 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 гарнісаж – кірка титану і його сплаву, що затвердів на внутрішній поверхні стінки тигля.

Впровадження гарнісажного плавлення 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. Теплота від дуги у печах такого типу забезпечує отримання високогіомогенних злитків навіть таких складних у литті сплавів, як $Ti + 3 \% Mo$; $Ti + 5,5 \% Ni$ та ін. [14,26,31].

Особливістю конструкції вакуумно-дугової гарнісажної печі для плавлення титану ємкістю 600 кг є те, що заливальна камера в період заливання обертається навколо своєї осі. Електрод, що витрачається, плавиться у водоохолоджуваному тиглі, футерованому графітовими плитами. Подача електрода 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.

Основними напрямками розвитку гарнісажного плавлення є фасонне лиття, фасонно-заготовче лиття (кільцеві і трубні заготовки для подальших розкочування, штампування, пресування), заготовче лиття складних форм для прокатування і пресування.

Найбільш ефективним вважається спосіб гарнісажного плавлення з використанням як електрод, що витрачається, гарнісажу, який утворився при попередньому плавленні в тому самому тиглі. Такий спосіб не вимагає спеціального приготування електрода, що витрачається, окрім первинного плавлення. Як шихту для плавлення 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 плавлення потрібна частина розплаву зливається у виливницю; гарнісаж з затверділими залишками металу, що не злився, витягується з тигля і використовується як електрод, 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 кожного плавлення.

Печі гарнісажного типу застосовують для фасонного лиття різних виливок з титану з достатньо високими коефіцієнтами використання металу і необроблюваною поверхнею, тобто виливок з максимально наближеною формою і геометричними розмірами до готової деталі. Ванну рідкого металу наплавають в графітовому тиглі з гарнісажем із 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 засувки, робочі колеса насосів та інші вироби [26,27].

Гарнісажне плавлення 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 дугового плавлення з електродом, що витрачається, дуже перспективним є електрошлакове переплавлення або безперервне лиття з розплавленням електроду плазмою або електронним променем.

Плавлення в електрошлаковій печі. Електрошлакове переплавлення (ЕШП) є найбільш поширеною технологією отримання злитків. Процес ЕШП характеризується певними параметрами електричного режиму, співвідношеннями між діаметрами електроду і кристалізатора які впливають на якість рафінування металу і кристалізацію злитка. Процес ЕШП є циклічним, складається з періодів простою між плавленнями, наведення шлакової ванни, переплавлення електроду, виведення усадкової раковини та охолодження злитка. Особливістю цього процесу є короткочасність контактування металу з рафінувальним середовищем.

Під час ЕШП прогрівання розплавленого шлаку CaF_2 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 0,22 м і завдовжки 2,30 м [14,26,31].

Способом ЕШП можливо отримання злитки прямокутного перетину, що зручно для подальшого прокатування. Головним недоліком ЕШП є відсутність дегазації металу під час плавлення. Тому цей спосіб 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 ЕШП – індукційне електрошлакове плавлення в мідному кристалізаторі, яке дозволяє отримувати однорідний метал і використовувати необмежену кількість кондиційних відходів. Роль гарнісажу в цьому випадку виконує шлаковий прошарок.

Плазмово-дугове плавлення. Використання методу плазмово-дугового плавлення (ПДП) у плазмотронах для переплавлення титану привертає стабільністю газового розряду, можливістю регулювати потужність та отримати високі температури, великою концентрацією енергії, підвищеною вибухобезпечністю процесу. Як газ, що утворює плазму, використовують аргон [26,31,36].

У плазмовій печі з водоохолодженням кристалізатором заготовку для переплавлення подають зі сталою швидкістю та оплавляють однією чи кількома плазмовими дугами, анодом для яких є поверхня ванни рідкого металу. Стікаючи із витратної заготовки рівномірними краплями, метал прогривається дугою і розтікається по поверхні ванни. Плазмові струмені кожного плазмотрона спрямовані на ванну рідкого металу. Витратна заготовка подається механізмом вниз з обертанням навколо власної осі. Плазмотрони розміщують радіально навколо витратної заготовки і вони можуть переміщуватися за допомогою спеціального механізму. Це зумовлює реактивне обертання металу ванни та рівномірніший розподіл температури по її поверхні. Використання кількох плазмотронів дає змогу розосередити теплове навантаження і регулювати нагрівання різних ділянок ванни рідкого металу. Метал рафінується і, тверднучи завдяки холодним стінкам кристалізатора, витягується з нього зі встановленою сталою швидкістю у вигляді безперервного злитка круглого або прямокутного перерізів. Метал злитка характеризується високою щільністю,



структурною та хімічною однорідністю. За такого плавлення повністю виключається контактування рідкого металу з матеріалом тигля та його забруднення.

Недоліками плазових печей є обмежена дегазація під час плавлення і можливість забруднення титану домішками, що містяться в газі, що утворює плазму. Тому великий інтерес для виплавлення титанових сплавів має вакуумне ПДП, яке порівняно з ВДП забезпечує регулювання швидкості плавлення, можливість переплавлення некомпактної кускової шихти та використання простішого вакуумного устаткування і низьковольтних джерел струму.

Використання плазових печей перспективно для плавлення відходів титанових сплавів. Плавлення здійснюють у водоохолоджуваному мідному кристалізаторі з витягуванням злитка. Так, на заводі в м. Кантон (штат Огайо, США) для ПДП титанових відходів використовують плазові печі фірм Galt Alloy та RMI з річною продуктивністю 3,2 тис. т [30].

Індукційне плавлення. На ранній стадії розвитку виробництва титанових сплавів значного поширення набув спосіб плавлення у вакуумних індукційних печах. Як вогнетривкий матеріал для виготовлення тиглів використовували міцний високоякісний графіт. Вакуум або атмосфера інертного газу (найчастіше Ar) 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 нагадували чавун. Куванням вдавалося лише трохи поліпшити їх властивості.

Новий метод індукційного плавлення в печі з секційним водоохолоджуванним тиглем використовують для виплавлення складнолегованих сплавів на основі титану та його інтерметалідів (TiAl, TiNi) [32]. Плавлення рекомендується проводити у декілька етапів з поступовим підвищенням потужності до 300 кВт для забезпечення інтенсивного перемішування розплаву.

Тигель виготовлений з матеріалу з високою тепло- та електропровідністю і є сегментованим – розділеним на вертикальні, електрично ізольовані одна від одною секції. Кожна секція має систему водяного охолодження, що складається з одного або двох каналів, якими прокачується вода з температурою до 100 °С.

Така конструкція тигля та використання електромагнітного силового впливу, створеного змінним струмом в індукторі, дозволяють мінімізувати



зіткнення розплаву зі стінками холодного тигля і сприяють досягненню високої чистоти виготовленого сплаву.

Технологія, заснована на застосуванні «холодного» тигля, найчастіше є єдиною для виплавлення металу із заданими властивостями, складом і чистотою або для отримання сплаву металів, які не піддаються змішуванню при застосуванні інших технологій. Таким, наприклад, є сплав TiAl, що застосовується в масовому виробництві клапанів для двигунів автомобілів BMW.

Електронно-променеве плавлення. Суть електронно-променевого плавлення (ЕПП) полягає в горизонтальній подачі заготівки, що витрачається, із заданою швидкістю в зону плавки, її плавлення електронними променями над проміжною ємкістю. В міру наповнення проміжної ємкості рідкий метал зливають у кристалізатор, де відбувається формування злитка необхідної довжини [31,37].

Під час ЕПП потужність електронних променів витрачається на оплавлення торця заготівки, 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. Дослідженням розподілу потужності електронного променя для систем з кільцевим катодом виявлено відносно “холодну” середину і “гарячі” краї ванни. У системах з чотирма аксіальними гарматами досягається досить велике розігрівання центральної зони ванни і в той же час є зони з низькою температурою на краях ванни. У системах з трьома плоскопроменевими гарматами виявлено також нерівномірність нагріву поверхні рідкої ванни металу. Тому найбільш рівномірного розподілу потужності, а отже, і температури, можна досягти за допомогою багатогарматних електронно-променевих нагрівачів [37-40].

При програмованому керуванні променем енергія розподіляється рівномірніше, завдяки чому в певних умовах уникають нерівномірності температурного поля. Під час плавлення в кристалізатор діаметром 0,23 м порівнянням температурних полів при круговому і програмному веденні променя виявлено відносно високу нерівномірність в розподілі енергії при круговій розгортці з частотою 50 Гц. Для підтримання оптимального теплового режиму ЕПП з рівномірним нагріванням поверхні ванни і мінімальним угаром нагрівання слід здійснювати розгорткою променів з частотою більше 100 Гц.



Електронно-промене́ве виплавлення титанових сплавів в останні роки набуло 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, зумовлена 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 можна використовувати титанову губку різних фракцій, яка, на відміну від технології ВДП, не вимагає попереднього пресування в електрод, що витрачається, а також можна використовувати грудкові відходи титанового виробництва. Як шихтову заготовку, що витрачається, можна використовувати насипні шихтові матеріали (брухт, губчасті напівфабрикати), цілісні зварні заготовки для отримання титанового сплаву.

Після завантаження шихтової заготовки установку вакуумують до залишкового тиску 0,10-0,01 Па, потрібного для стійкої роботи електронно-променевих гармат. 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», що вертикально переміщується.

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

Для плавлення титану без спеціальної попередньої підготовки (наприклад, пресування) з отриманням великогабаритних злитків масою 3 т і розмірами 0,245x1,125x0,245 м, а також масою до 10 т застосовують електронно-променеві плавильні агрегати [38,39]. Такі агрегати дозволяють отримати придатні злитки під час одноразового плавлення, 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.

Магнітокероване електрошлакове плавлення (МЕП) призначено для виробництва круглих і плоских злитків багатокомпонентних високоміцних і жароміцних сплавів титану. Відмітними особливостями технології магнітокерованої електрошлакового плавлення, порівнянно з традиційним ВДП, 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 МЕП економічно ефективніше за технологію ВДП. Це пов'язано з дешевшим устаткуванням технології МЕП, ніж ВДП і меншою кількістю повторних переплавлень металу при технології МЕП. Новизною і основними перевагами технології МЕП, порівнянно з традиційними технологіями плавлення, зокрема, з ВДП, є те, що така технологія 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 пор і шкідливих включень; жароміцні сплави технології МЕП з інтерметалідним зміцненням зберігають жароміцність при температурах 750-800 °С.

Багатокомпонентні високоміцні і жароміцні сплави, що отримані за технологію МЕП, призначені для виготовлення деталей і вузлів, які працюють в умовах складних знакозмінних навантажень при нагріванні до температур 700-750 °С [7,29,31]. 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 магнітокерованого електрошлакового плавлення набула промислового використання в авіаційному моторобудуванні.



Висновки

1. Потребу цивільних галузей промисловості в титанових виробках можна задовольнити зниженням витрат за виробництво сплавів створенням нових сплавів методом економного легування, вдосконаленням існуючих та запровадженням нових технологій отримання титанових сплавів, злитків і виробів.

2. Поліморфізм титану є основою класифікації титанових сплавів за структурним принципом. Легування титану впливає на структуру титанових сплавів, їх фізико-механічні властивості, визначає вибір технології термічної обробки і напрями подальшого застосування виробів з них.

3. Сплави на основі інтерметалідів титану можуть створити у недалекому майбутньому новий клас промислових титанових сплавів. Практичне освоєння виробництва сплавів типу нітінол стримується необхідністю підтримувати хімічний склад сплавів у надзвичайно вузьких межах.

4. Для виплавлення складнолегованих сплавів на основі титану та його інтерметалідів опрацьовуються нові технології: індукційне плавлення в печі з секційним водоохолоджуваним тиглем, дугошлакове переплавлення та ін.