

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

С.В. Ахонін, В.О. Березос, О.Г. Єрохін

**ОТРИМАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ
ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ
МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО-
ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ**

Київ 2025

УДК 669.187.826.002.2

Ахонін С.В., Березос В.О., Єрохін О.Г. Отримання високоміцних титанових сплавів методом електронно-променевої плавки. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2025. — 128 с.

У монографії розглянуто особливості виробництва зливків складнолегованих сплавів титану методом електронно-променевої плавки. Досліджено механізми та закономірності поведінки легуючих елементів під час отримання зливків складнолегованих високоміцних сплавів титану методом електронно-променевої плавки з використанням проміжної ємності. З урахуванням виявлених залежностей, на прикладі титанового сплаву VT9, запропоновано оптимальні технологічні режими отримання зливків складнолегованих сплавів титану методом електронно-променевої плавки, які забезпечують високий рівень якісних і техніко-економічних показників. Наведено характеристики хімічного складу, стану поверхні, макро- та мікроструктури зливків промислових і нових вітчизняних складнолегованих сплавів титану. Розглянуто питання деформаційної обробки отриманих сплавів і наведено механічні характеристики напівфабрикатів з зливків, отриманих методом електронно-променевої плавки.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, а також для студентів металургійних спеціальностей.

Бібліогр. 178, табл. 23, рис. 91.

Akhonin S.V., Berzoz V.O., Yerokhin O.H. Producing high-strength titanium alloys by the method of electron beam melting. — Kyiv: E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 2025. — 128 p.

The monograph deals with the features of producing ingots of complex titanium alloys by the method of electron beam melting. The mechanisms and regularities of alloying element behaviour when producing ingots of complex high-strength titanium alloys by the method of cold-hearth electron beam melting were studied. Taking into account the established dependencies, the optimal technological modes of producing complex titanium alloys by the method of electron beam melting were proposed for titanium alloy VT9, which provide a high level of qualitative and technical-economic parameters. The characteristics of chemical composition, state of the surface, macro- and microstructure of the ingots of commercial and new local complex titanium alloys are presented. The question of deformation processing of the produced alloys is considered and mechanical characteristics of semi-finished products from ingots produced by the method of electron beam melting are given.

The book is designed for scientific and engineering workers, as well as for students of metallurgical specialities.

178 Ref., 23 Tables, 91 Figures.

Рецензенти: д.т.н. В.А. Костін (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України),

д.т.н. І.В. Протоковілов (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України)

Редактор *І.Ю. Романова*

Комп'ютерна верстка *Т.Ю. Снегірьова, А.І. Сулима*

Рішення вченої ради ІЕЗ ім. Є.О. Патона: Протокол № 21 від 08.07.2025

ISBN 978-617-7785-82-7

© С.В. Ахонін, В.О. Березос, О.Г. Єрохін, 2025

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	7
Розділ 1. ТЕХНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ СПЛАВІВ ТИТАНУ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО–ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ	9
1.1. Порівняльний аналіз металургійних методів отримання зливків сплавів титану	9
1.1.1. Вакуумно-дугова плавка сплавів на основі титану	9
1.1.2. Електронно-променева плавка титану	13
1.1.3. Плазмова плавка титану	15
1.1.4. Переплав у багатосекційному кристалізаторі	17
1.1.5. Електрошлакова технологія плавки титану	19
1.2. Властивості та області застосування високоміцних сплавів на основі титану	23
1.3. Особливості кристалізації сплавів титану при електронно- променевої плавці	27
1.4. Особливості поведінки легуючих елементів при електронно-променевої плавці сплавів на основі титану ...	32
1.5. Високоміцні сплави титану	35
1.6. Конструктивні особливості електронно-променевих установок та обладнання для електронно-променевої плавки зливків сплавів титану	40
Розділ 2. ПРОЦЕСИ ВИПАРОВУВАННЯ ПРИ ЕЛЕКТРОННО- ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВЦІ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ	55
2.1. Математична модель процесів випаровування при електронно-променевої плавці титанового сплаву ВТ9	55
2.2. Перевірка адекватності математичної моделі процесів випаровування при електронно-променевої плавці титанового сплаву ВТ9	62
2.3. Аналіз впливу технологічних параметрів електронно- променевої плавки на хімічний склад зливків	62

Розділ 3. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ СКЛАДНОЛЕГОВАНИХ СПЛАВІВ ТИТАНУ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ	67
3.1. Технологічні особливості виплавки злиwkів високоміцних складнолегованих сплавів титану методом електронно- променевої плавки	67
3.2. Технологія електронно-променевої плавки	72
3.3. Отримання злиwkів високоміцних промислових сплавів титану методом електронно-променевої плавки	76
3.4. Отримання нових високоміцних складнолегованих сплавів титану T110 та T120 методом електронно-променевої плавки	85
3.5. Оплавлення бічної поверхні сплавів титану	90
Розділ 4. ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ТЕРМОДЕФОРМАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ НА МЕТАЛ ЗЛИWKІВ ВИСОКОМІЦНИХ СПЛАВІВ ТИТАНУ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО- ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ, ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ НАПІВФАБРИКАТІВ	95
4.1. Розробка технології термодформацийної обробки високоміцних складнолегованих сплавів титану, отриманих методом електронно-променевої плавки	95
4.2. Розробка технології термодформацийної обробки нового високоміцного складнолегованого сплаву титану T120, отриманого методом електронно-променевої плавки	109
4.3. Дослідження структури та механічних властивостей напівфабрикатів із нових високоміцних складнолегованих сплавів титану T110 та T120, отриманих методом електронно-променевої плавки	114
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	121

CONTENTS

PREFACE	7
Chapter 1. TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL FEATURES OF PRODUCING TITANIUM ALLOYS BY THE METHOD OF ELECTRON BEAM MELTING	9
1.1. Comparative analysis of metallurgical methods for producing titanium alloy ingots	9
1.1.1. Vacuum-arc melting of titanium-based alloys	9
1.1.2. Electron beam melting of titanium	13
1.1.3. Plasma melting of titanium	15
1.1.4. Remelting in a multi-section mould	17
1.1.5. Electroslag technology of melting titanium	19
1.2. Properties and fields of application of high-strength titanium-based alloys	23
1.3. Features of titanium alloy solidification during electron beam melting	27
1.4. Features of alloying element behaviour during electron beam melting of titanium-based alloys	32
1.5. High-strength titanium alloys	35
1.6. Design features of electron beam installations and equipment for electron beam melting of titanium alloy ingots	40
Chapter 2. EVAPORATION PROCESSES IN ELECTRON BEAM MELTING OF TITANIUM ALLOYS	55
2.1. Mathematical model of evaporation processes in electron beam melting of titanium alloy VT9	55
2.2. Checking the adequacy of the mathematical model of evaporation processes in electron beam melting of titanium alloy VT9	62
2.3. Analysis of the influence of the technological parameters of electron beam melting on chemical composition of the ingots	62

Chapter 3. DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF PRODUCING HIGH-STRENGTH COMPLEX TITANIUM ALLOYS BY THE METHOD OF ELECTRON BEAM MELTING	67
3.1. Technological features of producing ingots of high-strength complex titanium alloys by the method of electron beam melting	67
3.2. Technology of electron beam melting	72
3.3. Producing ingots of high-strength commercial titanium alloys by the method of electron beam melting	76
3.4. Producing new high-strength complex titanium alloys T110 and T120 by the method of electron beam melting	85
3.5 Glazing of the side surface of ingots of titanium alloys	90
Chapter 4. STUDYING THE INFLUENCE OF THE MODES OF THERMODEFORMATIONAL TREATMENT ON THE METAL OF HIGH-STRENGTH TITANIUM ALLOY INGOTS PRODUCED BY THE METHOD OF ELECTRON BEAM MELTING AND INVESTIGATION OF THE SEMI-FINISHED PRODUCT PROPERTIES	95
4.1. Development of the technology of thermoderformational treatment of high-strength complex titanium alloys produced by the method of electron beam melting	95
4.2. Development of the technology of thermoderformational treatment of the new high-strength complex titanium alloy T120, produced by the method of electron beam melting ...	109
4.3. Investigations of the structure and mechanical properties of semi-finished products from new high-strength complex titanium alloys T110 and T120 produced by the method of electron beam melting	114
REFERENCES	121

ПЕРЕДМОВА

В останні десятиліття титан та його сплави посіли одне з провідних місць серед конструкційних матеріалів, які використовуються у сучасній техніці та промисловості. Їх унікальні властивості забезпечили широке застосування у таких високотехнологічних сферах, як: авіаційно-космічна галузь, енергетика, хімічне машинобудування, біомедична інженерія та суднобудування. В авіації та космонавтиці титан є незамінним завдяки поєднанню малої густини, високої питомої міцності та здатності працювати в умовах дії значних механічних і температурних навантажень. У хімічній і морській промисловості він високо цінується за виняткову корозійну стійкість, а в медицині — за біосумісність, що дозволяє створювати імплантати та хірургічні інструменти нового покоління.

Незважаючи на очевидні переваги титану та його сплавів, повне розкриття їхнього потенціалу потребує вдосконалення методів його отримання, спрямованих на підвищення міцнісних характеристик, стабільності структури та мінімізацію дефектності матеріалу. Традиційні технології плавки та обробки металів не завжди забезпечують належну чистоту та однорідність титанових зливок. Це пов'язано з високою хімічною активністю титану, його схильністю до насичення газами та утворенням оксидних і нітридних включень. У результаті експлуатаційні характеристики готових виробів можуть істотно знижуватися.

Одним із найперспективніших методів отримання високоякісних титанових напівфабрикатів є електронно-променева плавка (ЕПП). Ця технологія ґрунтується на застосуванні потужного сфокусованого електронного пучка, який дозволяє досягти високих температур у зоні плавлення та забезпечити контрольований тепловий режим. На відміну від традиційних методів, ЕПП дає змогу ефективно видаляти шкідливі домішки, значно зменшувати вміст газів у металі, а також впливати на процес кристалізації та формування мікроструктури. У результаті утворюються зливки з високою щільністю, рівномірним хімічним складом, відсутністю пор та інших дефектів, що робить їх придатними для подальшої переробки у відповідальні деталі та вузли.

Особливу увагу в сучасних дослідженнях привертає можливість застосування ЕПП для створення як відомих промислових, так і нових вітчизняних високоміцних титанових сплавів. Такі матеріали розробляються з урахуванням вимог до експлуатації в екстремальних умовах: високих механічних навантажень, підвищених температур, агресивних середовищ і тривалих термінів служби. Від того, наскільки успішно вдається реалізувати ці вимоги на стадії виробництва, залежить конкурентоспроможність українських сплавів на світовому ринку та перспективи їх впровадження у новітні технологічні рішення.

Метою даної роботи є всебічний аналіз впливу технології електронно-променевої плавки на структуру, чистоту та механічні властивості високоміцних титанових сплавів. У монографії розглядаються як фундаментальні аспекти очищення та кристалізації металу під дією електронного променя, так і практичні питання оптимізації режимів плавки для досягнення найкращих експлуатаційних характеристик. Особлива увага приділяється визначенню умов, за яких забезпечується підвищена міцність, пластичність і довговічність матеріалів, що відкриває нові можливості для їх застосування у критично важливих галузях сучасної техніки.

У роботі наведено результати досліджень, що мають як теоретичне, так і прикладне значення. З одного боку, вони розширюють уявлення про процеси, які відбуваються під час електронно-променевої плавки титанових сплавів, а з іншого — створюють наукову основу для розробки нових технологій отримання напівфабрикатів з прогнозованими властивостями.

Розділи 1, 4 написав В.О. Березос, розділ 2 написав С.В. Ахонін, розділ 3 написав О.Г. Єрохін.

Розділ 1

ТЕХНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ СПЛАВІВ ТИТАНУ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО–ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

1.1. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТАЛУРГІЙНИХ МЕТОДІВ ОТРИМАННЯ ЗЛИВКІВ СПЛАВІВ ТИТАНУ

Важливим критерієм при прийнятті розробниками нових виробів рішення про використання титану замість альтернативних конструкційних матеріалів є співвідношення ціна/якість. Тому зниження собівартості титанових зливків як початкової ланки для виробництва напівфабрикатів, одночасно з підвищенням їх якості, є актуальним завданням. При цьому найперспективнішим є шлях застосування нових технологічних процесів, які дозволяють виключити із виробничого ланцюга деякі технологічні операції та за рахунок цього значно знизити собівартість продукції.

Одним із прогресивних напрямків металургійного виробництва тугоплавких і високореакційних металів і сплавів є застосування різних вакуумних процесів. Використання високого й чистого вакууму в умовах підвищених температур не тільки дозволяє глибше очищати ці матеріали від газових і летючих металевих домішок, а й істотно спрощує процес металургійного переділу та забезпечує отримання виробів з якісно новими фізико-хімічними та механічними властивостями.

1.1.1. ВАКУУМНО–ДУГОВА ПЛАВКА СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ТИТАНУ

Вакуумно-дугова плавка (ВДП) з витратним електродом у мідний водоохолоджуваний кристалізатор — найвідоміший і найпоширеніший спосіб плавки титану та його сплавів (рис. 1.1) [1–4].

Вакуумна дугова піч являє собою єдиний плавильно-ливарний агрегат, в якому поєднані процеси плавлення металу, приготування сплаву та формування зливка. Вакуумні дугові печі в залежності від особливостей їх конструкції можуть бути поділені на два основних види:

1. Вакуумні дугові печі з глухононним кристалізатором, що застосовуються для плавки витратних електродів і для плавки металу з невитратними

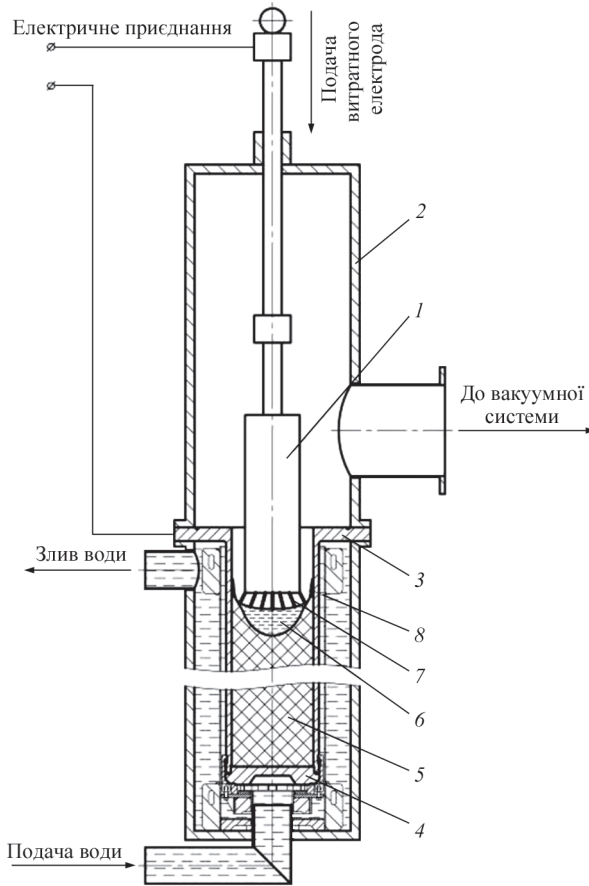


Рис. 1.1. Схема вакуумно-дугової печі з витратним електродом: 1 — піддон; 2 — зливоч; 3 — дуга; 4 — кристалізатор; 5 — витратний електрод; 6 — вакуумна камера; 7 — «корона», головна частина зливка

(графітовими) електродам. В останньому випадку печі обов'язково забезпечені бункером для подачі шихти в зону плавки в міру наплавлення зливка.

2. Вакуумні дугові печі з витягуванням зливка з кристалізатора в міру його наплавлення. Печі такого типу використовують витратний електрод або мають бункер, з якого додатково подається шихта (губка або відходи). Різновидом печей цього типу є вакуумні дугові печі зі ступінчастим кристалізатором, що поєднують проведення першого та другого переплаву.

За багато десятків років застосування вакуумно-дугових печей створено безліч їх конструкцій, але основні елементи зберігаються у всіх її видах — це мідний кристалізатор, стінки якого охолоджуються водою або натрій-калієвим розчином; піддон; вакуумна камера; електродотримачі; вакуумна система; джерело живлення постійного струму; система керування [5].

Основні технологічні операції при виплавці зливка у вакуумно-дугових печах включають: завантаження витратного електрода; герметизацію та вакуумування плавильного простору; розігрів електрода; наведення ванни на піддоні на зниженій потужності; безпосередньо процес плавки на номінальній потужності; виведення усадкової раковини; охолодження зливка; обробку його поверхні. Для отримання сплавів застосовують два переплави [6, 7]. У процесі плавки внаслідок розбризкування рідкого металу під впливом магнітних полів, а також інтенсивного газовиділення на стінках кристалізатора осідають краплі металу, які утворюють недостатньо проплавлену кірку завтовшки 3...5 мм, а також «корону» в головній частині зливка, які видаляються при подальшій механічній обробці.

Після завантаження та приварювання пресованого електрода до огарку приступають до плавки, якщо величини натікання та вакууму задовольняють прийнятним нормам. Плавку починають зазвичай при зниженій потужності, щоб уникнути пропалу піддону. Після появи рідкого металу підвищують струм до номінального значення та ведуть плавку. Велике значення для ефективної роботи печі та якості злиwkів має величина зазора між електродом і стінкою кристалізатора: чим зазор менше, тим краще. Однак при зменшенні зазора дуга частіше перекидається зі зливка на стінку кристалізатора. При плавці великих злиwkів зазор між електродом і кристалізатором зазвичай близько 50 мм, причому допускається зміщення осі електрода від осі кристалізатора до 25 мм.

Після закінчення плавки злиwки залишають в печі для охолодження, час якого залежить від діаметра зливка та складу сплаву. Для прискорення охолодження в піч після закінчення плавки іноді вводять невелику кількість гелію. У результаті посилення теплопередачі від зливка до кристалізатора час охолодження значно скорочується. Зазвичай злиwки вивантажують, коли ливникова частина остигає до 400...500 °С. Вивантаження при вищій температурі призводить до окислення поверхні зливка. Вивантаження при нижчій температурі збільшує час охолодження й тим самим знижує продуктивність печей. Крім того, злиwки в нагрітому стані легше піддаються обробці різанням на токарних верстатах.

Для проведення другої плавки два–три злиwки першого переплаву після підготовки зварюють безпосередньо в печі другого переплаву або поза піччю аргонодуговим зварювання. Нижній злиwок приварюють ливниковою частиною вниз, щоб недостатньо однорідна після першого переплаву донна частина вдруге плавилася вже в нормальних умовах. Підготовка злиwkів першого переплаву (литих електродів) до повторної плавки полягає в наступному. Відразу після вивантаження ще гарячі злиwки першого переплаву чистять металевою щіткою в проточній воді для видалення хлоридів з поверхневої кірки зливка. Після мийки зливки за рахунок внутрішнього тепла швидко просихають і їх подають на механічну обробку. На токарному верстаті обрізають «корони» та обточують окислені місця.

Другий переплав ведуть так само, як і перший, але наприкінці змінюють режим для виведення усадкової раковини. Після закінчення плавлення електрода напругу та силу струму знижують таким чином, щоб плавлення припинилося, а потужність, що виділяється, йшла на заповнення втраг тепла з поверхні рідкої ванни. Це запобігає затвердінню її поверхні, тоді як кристалізація від стінок виливниці триває. Режим підтримують доти, поки не закристалізується майже вся маса рідкого металу. Однак такий простий режим виведення раковини для великих зливків, що виплавляються при підвищеній силі струму, використовувати не можна, оскільки внаслідок усадки виходить чашеподібна форма ливника. Щоб не допускати цього, у перший період виведення раковини встановлюють режим, що забезпечує невелику швидкість плавлення для підтримки рівня ванни, що й створює рівну ливникову частину. Кращих результатів досягають у тому випадку, коли між електродом і недогарком приварюють перехідний темплет проміжного діаметра, а підживлення рідкої ванни відбувається внаслідок його сплавлення. Перехідний темплет зручний ще й тим, що оберігає недогарок від сплавлення.

Тривалість виведення усадкової раковини збільшується зі зростанням діаметра зливка. Так, при силі струму дуги 24...25 кА плавка зливка діаметром 850 мм йде близько 4 год, а режим виведення раковини триває 2,5 год. Збільшення часу виведення усадкової раковини при підвищенні маси зливка знижує виграш у продуктивності печей. Якщо виведення раковини проводять в атмосфері гелію при тиску 10 мм рт.ст., то в результаті інтенсифікації охолодження, й тим самим збільшення швидкості кристалізації, цей час вдається скоротити на 10...20 %. Усадкову раковину виводять не завжди при виплавці зливків другого переплаву, а тільки тоді, коли наступна обробка тиском зливка не забезпечує заварку усадкової раковини.

Другий переплав ряду сплавів з легколетючими легуючими компонентами проводять у розрідженій атмосфері інертних газів.

ВДП дозволяє переплавляти титанову губку у вигляді витратного електрода. Електрод, що витрачається, діаметром до 650 мм, виготовляється пресуванням губчастого титану з відходами та легуючими елементами в прохідну матрицю. У деяких країнах витратні електроди отримують пресуванням у глухонній матриці.

Аналіз ВДП сплавів титану показав, що цей спосіб має ряд переваг, у тому числі:

- глибока дегазація металу, що переплавляється, за рахунок низького парціального тиску водню в зоні плавки;
- відсутність забруднення розплаву матеріалом, з якого виготовлений кристалізатор;
- високий ККД процесу в порівнянні з індукційною плавкою в секційному кристалізаторі та плазмово-дуговою плавкою;
- відносна простота обладнання;

- нижчі витрати енергоресурсів у порівнянні з іншими видами плавки (електронно-променевої, індукційної, плазмово-дугової).

Проте цей спосіб має ряд недоліків:

- необхідність застосування потужних пресів для виготовлення витратних електродів: для електродів діаметром до 650 мм — прес зусиллям 1000 МПа;
- жорстка залежність між потужністю та швидкістю плавлення;
- підвищена вибухонебезпечність процесу, що вимагає використання сталевих або залізобетонних захисних камер;
- висока ймовірність утворення включень при попаданні в рідку ванну оксинітриду титану, а також тугоплавких металів (вольфраму, молібдену тощо);
- невисока якість поверхні зливка та наявність «корони» в головній частині;
- зливки титану, виплавлені в електродугових вакуумних печах, мають грубозернисту зональну структуру;
- неможливість проведення процесу плавки при наявності в губчастому титані понад 0,12 ваг. % з'єднань хлоридів металу;
- труднощі залучення у виробництво титанових відходів.

1.1.2. ЕЛЕКТРОННО–ПРОМЕНЕВА ПЛАВКА ТИТАНУ

Поряд з ВДП титану в останні десятиріччя, особливо в Україні, розвивається електронно-променева плавка [8–12]. Характерними рисами цього виду плавки є можливість керування в широких межах електронним променем і порівняно високий вакуум в зоні плавлення (10^{-2} ... 10^{-4} мм рт.ст.) [13–20]. При ЕПП джерелом нагріву металу слугує електронний пучок. Під час плавки кінетична енергія електрона перетворюється в тепло. Електронний промінь є одним із найчистіших джерел нагріву. Завдяки своїй універсальності електронний промінь застосовується як при переплаві витратної цільної заготовки, так і при переплаві сипучої шихти [21–24].

Електронно-променева установка (рис. 1.2) складається з наступних основних вузлів: електронних нагрівачів; механізму горизонтальної подачі заготовки або шихти; проміжної ємності; кристалізатора; механізму витягування зливка; вакуумної системи; системи керування; джерел живлення [25, 26].

Основні технологічні операції при ЕПП: завантаження шихти або заготовки в установку; вакумування установки; розігрів гарнісажу в проміжній ємності; нагрівання шихти або заготовки до температури плавлення; сплавлення шихти або заготовки в проміжну ємність; періодичний перелив рідкого металу в кристалізатор, який формує зливки; виведення усадкової раковини; охолодження зливка [27, 28]. Глибоке розрідження в зоні плавки, перегрів металу під впливом електронного бомбардування та вільне дзеркало рідкого металу забезпечують найсприятливіші умови для видалення газових домішок з металу [29, 30]. Рафінуючий ефект підсилює встановлення на електронно-променевої установці проміжної ємності.

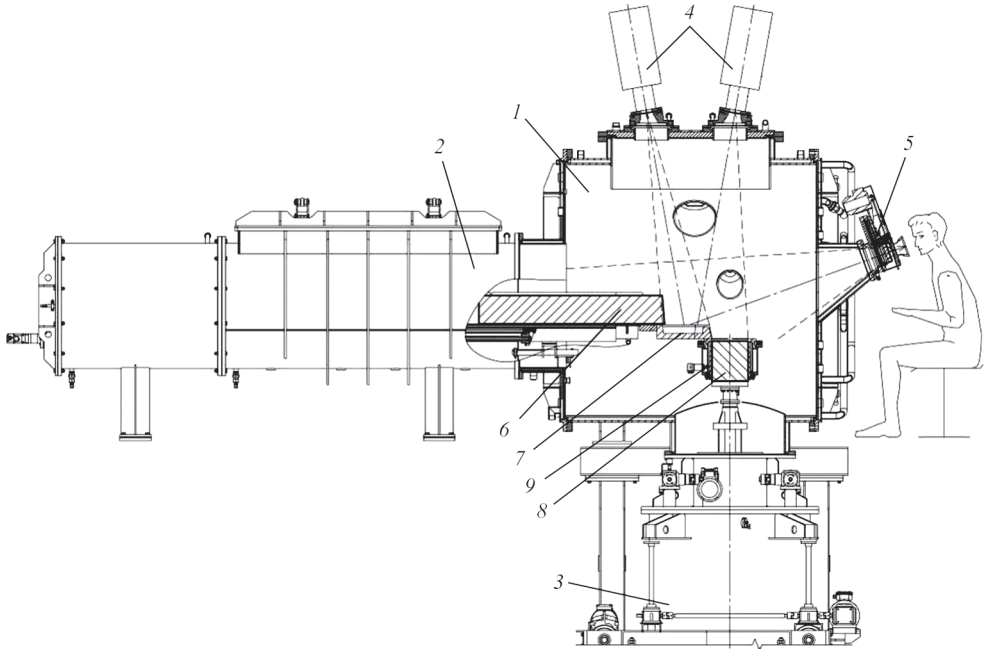


Рис. 1.2. Схема електронно-променевої установки: 1 — камера плавки; 2 — камера завантаження; 3 — механізм вертикальної подачі заготовки; 4 — електронно-променева гармата; 5 — оглядова система; 6 — заготовка; 7 — проміжна ємність; 8 — зливков; 9 — кристалізатор

Під час ЕПП можливе застосування шихти різного виду та розмірів (подрібнена титанова губка, пресована титанова губка, нероздроблені блоки губчастого титану, 100 % титанового брухту та ін.). Наявність проміжної ємності, в якій відбувається усереднення хімічного складу розплаву, дозволяє виплавляти зливки титанових сплавів з рівномірним хімічним складом. У зв'язку з цим є можливість отримання складних титанових сплавів, які важко отримати іншими металургійними методами плавки.

Виплавлені зливки в електронно-променевих печах характеризуються високою якістю металу: низьким вмістом домішок впровадження, а також водню, кисню, азоту. Одночасно необхідно відзначити високі пластичні властивості металу [31]. Застосування незалежних джерел нагріву — електронних гармат — дозволяє отримати зливки різної форми, високий вихід придатного металу, керувати процесами кристалізації, а також відмовитися від механічної обробки поверхні злиwkів після оплавлення поверхні виплавленого зливка електронними гарматами [25]. Процес виплавки злиwkів титану в ЕПП відрізняється відсутністю небезпеки вибуху в порівнянні з ВДП [32, 33]. Але поряд з перевагами ЕПП слід зазначити ряд деяких недоліків: складність обладнання, підвищене випаровування легуючих елементів з високою пружністю пари, неможливість переплавлення газонасиченої шихти.

Електронно-променева плавка має ряд переваг перед ВДП:

- повне виключення з технологічного циклу операції пресування витратного електрода;
- переплаву недроблених блоків губчастого титану масою до 5 тонн;
- отримання зливків-слябів прямокутного перерізу, зливків квадратного перерізу, а також порожнистих зливків;
- видалення неметалевих вкраплень високої та низької щільності;
- отримання структурно та хімічно однорідних зливків з мінімальною анізотропією текстури;
- можливість отримання високих швидкостей кристалізації розплаву;
- збільшення виходу придатного металу за рахунок скорочення кількості переплаву (один замість 2–3) та оплавлення поверхневого шару зливків замість механічної обробки поверхні (підвищення виходу придатного металу на 10...15 %) [34];
- економія капітальних витрат на будівництво цехових будівель;
- безпека технологічного процесу.

1.1.3. ПЛАЗМОВА ПЛАВКА ТИТАНУ

Менш чутливим процесом до переплаву газонасиченої шихти є плазмово-дугова плавка (ПДП) [35–40]. Суть цього способу плавки полягає в тому, що джерелом нагріву шихти слугує плазма — іонізована газова система з температурою 5000...30000 К. Пристрій, в якому генерується плазма, отримав назву — плазмотрон [41–45]. У плазмових печах (рис. 1.3) можливий переплаву як сипучої шихти, так і компактної заготовки [46].

Існує два основних типи плазмових нагрівальних пристроїв:

- непрямого нагріву, без виведення стовпа дуги (рис. 1.4, а);
- прямого нагріву, з виведенням стовпа дуги (рис. 1.4, б).

ККД плазмотронів становить 65...85 %, діапазон тиску — від 10^{-2} мм рт. ст. до декількох десятків атмосфер. Плазмотрони працюють як на постійному, так і на змінному струмі. В останньому випадку їх кількість кратна трьом [47]. Відмінною особливістю плазмових джерел нагріву є порівняно висока концентрація енергії і можливість гнучкого регулювання нагріву. Ці риси забезпечили застосування даних джерел у сучасній металургії. Найбільший розвиток отримали печі для переплаву некомпактної шихти. Основні конструктивні елементи печі: плавильна камера з плазмотронами, встановленими на її кришці; шихтові бункери; механізми подачі шихти; кристалізатор з піддоном; механізм витягування зливка; система газопостачання; вакуумна система [46, 48, 49].

Основні технологічні операції при виплавці зливка плазмовим способом: завантаження шихти в бункер; переміщення затравки в кристалізаторі; герметизація та вакуумування плавильного простору; заповнення плавильної камери плазмоутворюючим газом до атмосферного тиску; подача інертного газу на плазмотрони та їх підпал; наведення ванни на затравку та порційна подача шихти в зону плавки; розплавлення шихти в кристалізаторі та витягування

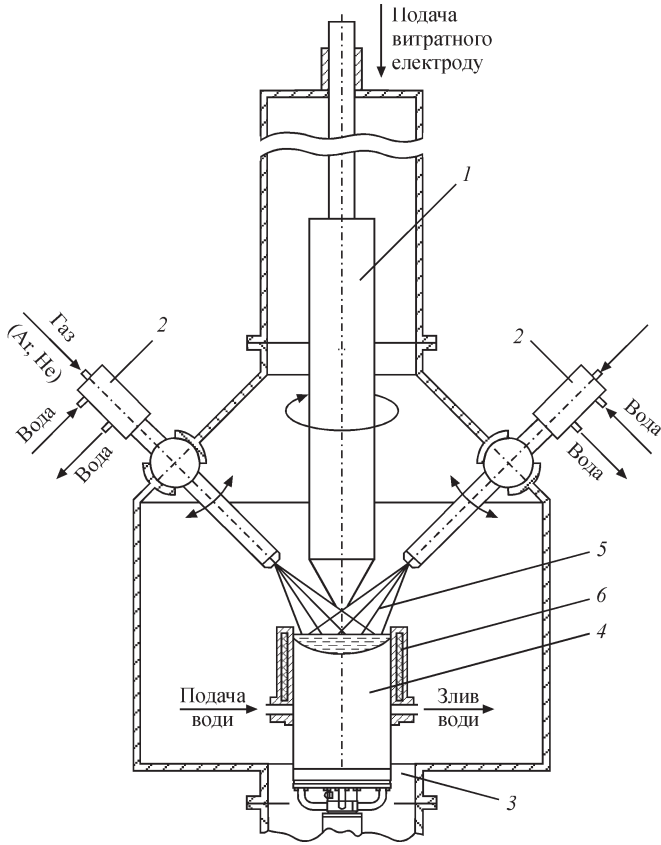


Рис. 1.3. Схема плазмово-дугової печі: 1 — витратний електрод; 2 — плазмотрони; 3 — піддон; 4 — зливоч; 5 — плазма; 6 — кристалізатор

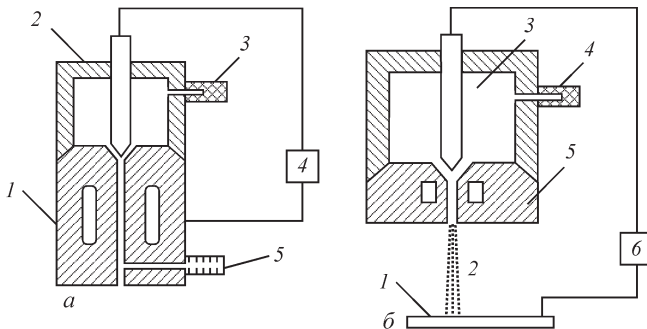


Рис. 1.4. Типи плазмових нагрівальних пристроїв: а — плазмовий пальник постійного струму без виведення стовпа дуги (1 — мідне сопло; 2 — вольфрамовий електрод; 3 — газ; 4 — джерело живлення; 5 — введення твердих, рідких і газоподібних речовин); б — плазмовий пальник постійного струму з виведенням стовпа дуги (1 — поверхня, що обігрівається; 2 — дуга; 3 — електрод; 4 — газ; 5 — водяне охолодження; 6 — джерело живлення)

зливка в міру наповнення рідким металом кристалізатора; охолодження зливка та його розвантаження [50, 51].

Аналіз виплавки злиwkів у плазмовій печі показав, що цей технологічний процес має ряд переваг:

- висока концентрація енергії плазмового джерела нагріву;
- можливість проведення плавки як при розрідженні, так і при надмірному тиску в зоні плавки;

- відсутність «корони» на зливку;
- можливість переплаву сипучої газонасиченої шихти;
- мінімальне випаровування компонентів з високою пружністю пари.

Недоліки плазмової плавки:

- недостатня стійкість електродів у плазмотронах;
- високі витрати плазмоутворюючого газу;
- необхідність застосування складної системи газопостачання.

1.1.4. ПЕРЕПЛАВ У БАГАТОСЕКЦІЙНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

Поряд із перерахованими способами переплаву титанової шихти, у печах ЕПП і ПДП проводяться дослідження із застосування з цією метою індукційної плавки в секційному кристалізаторі (ІПСК) (рис. 1.5) [52–59]. Розрізні тигли-кристалізатори добре зарекомендували себе в малогабаритних установках, але виявилися неприйнятними для великих печей.

Джерелом нагріву металу, що переплавляється, слугує високочастотне електромагнітне поле, яке створюється високочастотним генератором. Основним вузлом індукційної установки є кристалізатор у комплекті з індуктором. Особливість конструкції кристалізатора полягає в тому, що його стінки складаються з декількох ізольованих один від одного профільованих мідних водоохолоджуваних пластин [60]. Концентрично до зовнішньої поверхні кристалізатора встановлюється індуктор, через який протікає струм високої частоти до металу, що переплавляється. Під дією струму відбувається розплавлення металу спочатку біля стінок ламелей, потім усередині кристалізатора. При цьому рідкий метал віджимається електромагнітним полем від стінок і утворюється купол, на поверхню якого подається шихта.

У міру подачі шихти відбувається її розплавлення, підвищення рівня розплаву в кристалізаторі та витягування наплавленого зливка в камеру охолодження. Розроблено конструкції установок, в яких індуктор може переміщатися по поверхні кристалізатора або при нерухомому індукторі переміщається кристалізатор. Наприкінці плавки потужність, що подається на індуктор, зменшується та плавка припиняється. Після охолодження зливок без обробки поверхні прямує на другий переплав [61–68].

Переваги ІПСК:

- відсутність забруднення розплаву матеріалом тигля;

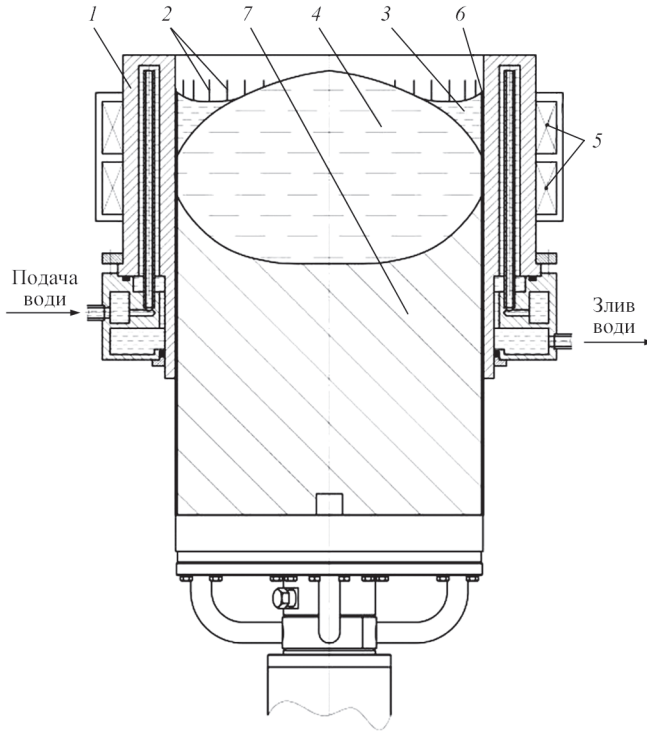


Рис. 1.5. Схема секційного кристалізатора [56]: 1 — секція кристалізатора; 2 — зазор; 3 — шлакова ванна; 4 — рідкий метал; 5 — індуктор; 6 — твердий шлак; 7 — зливоч

- інтенсивне перемішування металевої ванни під впливом електромагнітного поля, що сприяє отриманню дрібного зерна в зливках титану, а також усереднення хімічного складу металу;

- можливість переплаву сипучої шихти з великим вмістом газових домішок, хлоридів різних металів;

- можливість витримки розплаву при заданій температурі тривалий час;

- можливість виплавки сплавів, легованих металами, які різко відрізняються один від одного температурою плавлення, пружністю пари, питомою вагою;

- відсутність «корони» на зливку;

- можливість отримання зливка за один переплав.

Основні недоліки ПСК:

- неможливість проведення плавки в глибокому вакуумі;

- підвищена витрата електроенергії в 1.5 рази у порівнянні з ВДП;

- при цьому методі плавки не відбувається видалення домішок із шихтових матеріалів [69].

Отримані зливки можуть слугувати в якості витратних електродів для подальшої плавки в ВДП печах. Можливість створення більших установок, що працюють за цим принципом, є проблематичною.

1.1.5. ЕЛЕКТРОШЛАКОВА ТЕХНОЛОГІЯ ПЛАВКИ ТИТАНУ

Простота обладнання, застосування змінного струму, можливість отримання зливоків різного профілю періодично, починаючи з 60-х років минулого століття, привертала увагу металургів до електрошлакового способу плавки титану (ЕШП) [70–75]. Конструкції печей відрізняються великою різноманітністю, але найпоширеніша містить: мідний водоохолоджуваний кристалізатор, піддон, електродотримачі, джерело живлення (рис. 1.6).

Ізоляція розплаву від агресивного впливу навколишнього середовища може бути виконана у вигляді камери з відкачуванням повітря перед плавкою, флюсовим затвором, піддувом аргону в ході плавки в кристалізатор, на верхній частині якого встановлено кришку [76–78]. Під час плавки тепло для розплавлення електрода виділяється в шлаковій ванні, до складу якої входить фтористий кальцій, а в останні роки розроблено технологію, згідно з якою для зниження кількості шкідливих домішок у зливку в флюс додають металевий кальцій [79–81]. Наявність шлакової ванни над рідким металом і в зазорі між мідною стінкою кристалізатора та рідким металом перешкоджає утворенню «корони» у верхній частині зливка, що виплавляється, і сприяє формуванню гарної поверхні зливка.

Поряд з низкою переваг ЕШП має суттєві недоліки: необхідність застосування коштовного флюсу та знижена у порівнянні з ВДП і ЕПП рафінуюча здатність від водню.

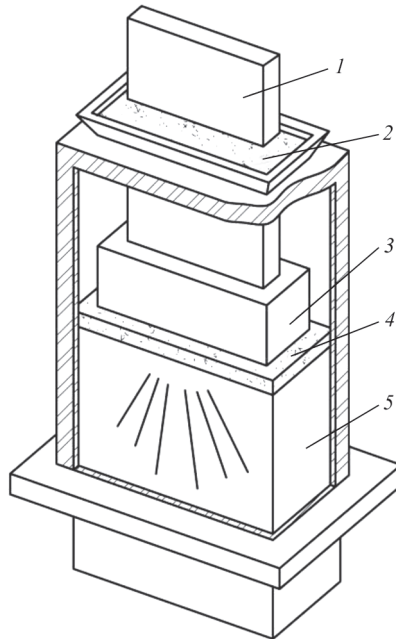


Рис. 1.6. Принципова схема електрошлакової печі для плавки титану з флюсовим затвором: 1 — електродотримач; 2 — шлаковий затвор; 3 — електрод, що витрачається; 4 — розплав; 5 — зливковий лоток

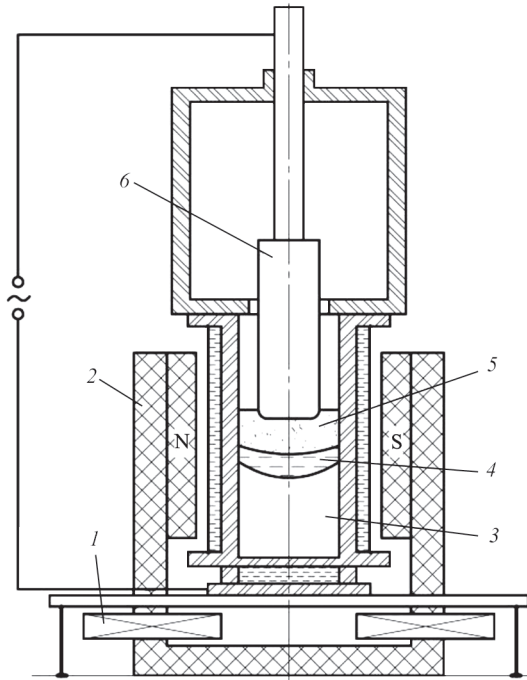


Рис. 1.7. Схема МЕР у поперечному магнітному полі: 1 — котушка електромагнітна; 2 — магнітопровід; 3 — зливка; 4 — ванна рідкого розплаву; 5 — шлакова ванна; 6 — витратний електрод

Традиційний електрошлаковий переплавлення титану супроводжується магнітогидродинамічною конвекцією розплаву, внаслідок чого спостерігаються дефекти кристалічної будови зливка. З метою вдосконалення традиційної технології ЕШП було розроблено технологію магнітокерованої електрошлакової плавки (МЕР) [82]. Основне завдання МЕР — електромагнітне керування тепловою, хімічною та гідродинамічною активностями шлакової ванни. Керування потоками в рідкій ванні здійснюється за допомогою накладання на зону плавки зовнішніх магнітних полів — поперечних або радіальних.

Установка МЕР (рис. 1.7) містить: герметичну вакуумну камеру, глухонний кристалізатор, піддон, магнітопровід, котушку електромагнітну, механізм подачі витратного електрода. У результаті застосування електромагнітного керування забезпечується хімічна та фізична однорідність металу, видаляються шкідливі домішки (хлориди металів, водень, мікродомішки лужних металів), формується гарна поверхня зливка без тріщин і пережимів. Але поряд з низкою переваг необхідно відзначити ряд недоліків. Одним з них є необхідність застосування коштовного флюсу, до складу якого входить хімічно чистий фтористий кальцій.

Одним із різновидів електрошлакової плавки титану є дугошлаковий процес (ДШП) (рис. 1.8), особливість якого полягає в тому, що джерелом тепла слугує дуга, яка горить між торцем витратного електрода та шлаковою ванною

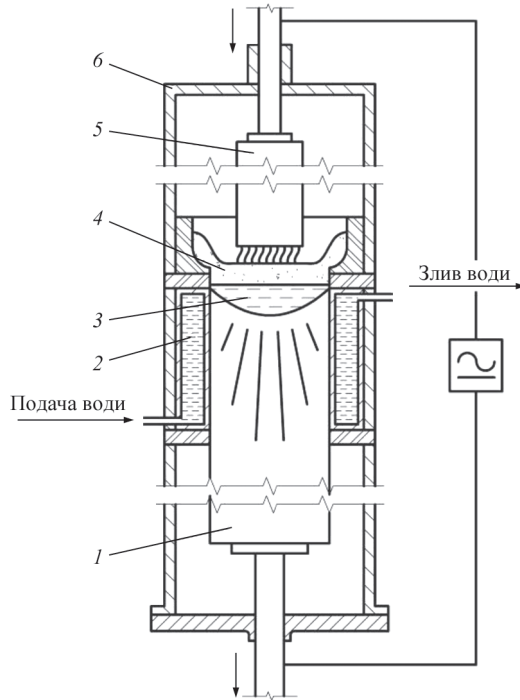


Рис. 1.8. Схема дугошлакової печі з витратним електродом: 1 — зливка; 2 — кристалізатор; 3 — розплав; 4 — шлакова ванна; 5 — витратний електрод; 6 — плавильна камера

[83–88]. У ДШП ізоляція дуги від контакту з повітрям може бути здійснена в камерній печі з попереднім видаленням з неї повітря або із застосуванням флюсового затвора. На відміну від класичного ЕШП тепло, необхідне для розплавлення електрода, виділяється в електричній дузі, яка горить в середовищі захисного газу та парів шлаку. Наявність парів шлаку стабілізує процес горіння дуги та робить його стійким при атмосферному тиску та невеликих розрідженнях, на відміну від ВДП, де стійке горіння дуги можливе тільки у вакуумі. Наявність шлакової ванни над рідким металом перешкоджає утворенню «коропи» у верхній частині зливка, що виплавляється, і сприяє формуванню гарної поверхні зливка.

Аналіз процесу плавки показав, що ДШП має низку переваг:

- вища якість металу, ніж при звичайному способі ЕШП;
- зниження кількості завантаженого на плавку флюсу в порівнянні зі звичайним способом ЕШП;
- зменшення витрат електроенергії;
- можливість отримання зливків різної форми.

Але є й недоліки:

- складність обладнання установки ДШП;
- складніше обслуговування закритих вузлів печі ДШП;

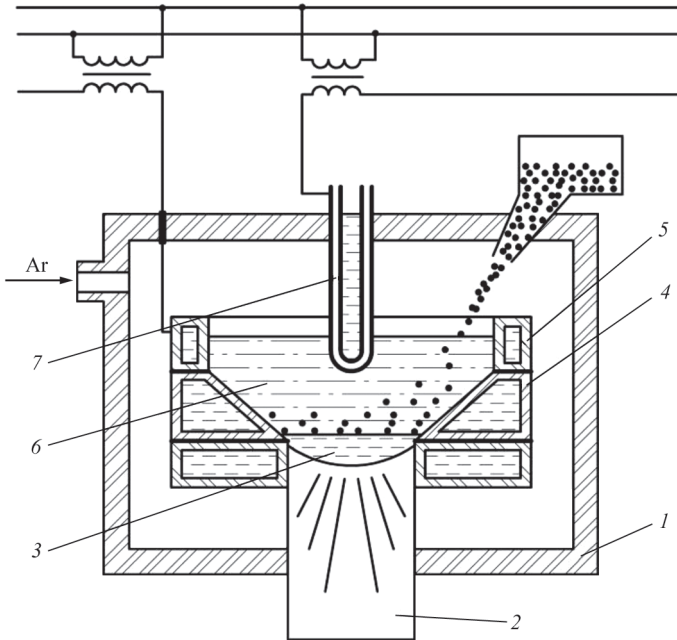


Рис. 1.9. Схема ЕШП губчастого титану в струмопідвідному кристалізаторі: 1 — вакуумна камера; 2 — зливоч; 3 — металевая ванна; 4 — середня секція кристалізатора; 5 — верхня секція кристалізатора; 6 — шлакова ванна; 7 — електрод

- підвищене випаровування компонентів флюсу при проведенні плавки в умовах зниженого тиску;

- необхідність використання коштовного флюсу.

Усі перераховані вище способи ЕШП мають ті чи інші переваги та недоліки, але їх загальна технологічна особливість полягає у застосуванні для виплавки зливка литого або пресованого витратного електрода.

Для розширення можливостей ЕШП був розроблений новий спосіб плавки — переплав сипучої шихти у струмопідвідний кристалізатор [88, 89].

Установка для переплаву титанової губки (рис. 1.9) містить: плавильну камеру; кристалізатор, що складається з ізольованих одна від одної секцій; піддон; шихтовий бункер з механізмом подачі шихти; невитратний електрод.

Технологія виплавки зливка складається з наступних основних операцій: заповнення печі аргоном, залив рідкого шлаку в кристалізатор, подача титану на плавку, наведення рідкої ванни, подача шихти в кристалізатор і подальше його витягування в міру наповнення ванни.

Перевагою цього методу плавки є:

- здешевлення процесу виплавки зливка;
- відсутність жорсткої залежності між потужністю, що підводиться, і швидкістю плавки.

До недоліків слід віднести:

- застосування коштовного флюсу;
- переплав ведеться тільки при атмосферному тиску або невеликому його надлишку.

Камерний ЕШП при отримання сплавів титану дозволяє легувати титан киснем із використанням кисневмісних лігатур, газової фази та оксиду титану. При цьому методі затримання кисню в титані підвищується від 0.053 до 0.73 ваг. %, зливки характеризуються задовільною хімічною та структурною однорідністю [90–94].

1.2. ВЛАСТИВОСТІ ТА ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ТИТАНУ

Титан за сукупністю фізико-хімічних властивостей є одним із найважливіших сучасних конструкційних матеріалів. Широке застосування сплавів титану в різних галузях промисловості пояснюється їх властивостями [95]:

- низька густина 4.5 г/см³;
- висока границя міцності σ_b до 1600 МПа;
- висока корозійна стійкість (у 30...50 разів більше, ніж у корозійностійкої сталі);
- висока жароміцність до 700 °С;
- немагнітність;
- низький температурний коефіцієнт розширення;
- забезпечення надійності в роботі конструкцій за характеристиками питомої жароміцності, тріщиностійкості, циклічної міцності та ін.;
- задовільна зварюваність всіма видами зварювання.

Важливе значення має велика поширеність титану в земній корі ($\approx 0.6\%$). Він займає четверте місце поміж інших конструкційних металів, поступаючись лише алюмінію, залізу та магнію.

Недоліки титану натуспні:

- активна взаємодія при високих температурах з усіма складовими атмосфери. Найгостріше ця проблема стосується рідкого стану титану, в результаті чого виникає необхідність плавити титан і сплави на його основі лише у вакуумі або в середовищі інертних газів;
- виробництво титану має високу вартість, яка значно коштовніша за виробництво інших широко вживаних конструкційних матеріалів;
- погані антифрикційні властивості, у результаті чого виникає налипання титану на інші матеріали;
- висока схильність титану та сплавів на його основі до сольової корозії і водневої крихкості;
- незадовільна здатність до механічної обробки різанням, що можна порівняти з оброблюваністю нержавяких сталей аустенітного класу.

Титан та його сплави є надзвичайно корисним матеріалом у тих галузях техніки, де виграш у вазі грає домінуючу роль. Сплави на основі титану до-

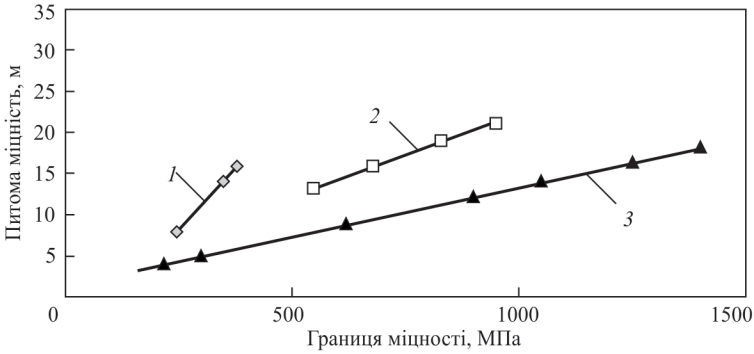


Рис. 1.10. Питома міцність різноманітних матеріалів: 1 — сплави алюмінію; 2 — титанові сплави; 3 — сталь

цільно використовувати в авіа- та ракетобудуванні, коли легкі алюмінієві й магнієві сплави вже не можуть працювати, а сталь і нікелеві сплави поступаються їм за питомою міцністю [95].

На рис. 1.10 наведено порівняльні дані за питомою міцністю алюмінієвих, титанових сплавів і сталей (під питомою міцністю розуміється та мінімальна довжина колони труб, при якій її розрив відбувається від власної ваги). З цих даних випливає, що найвигідніше поєднання міцності та питомої ваги мають титанові сплави [96].

Багаторічні фундаментальні дослідження та досвід експлуатації різних типів конструкційних матеріалів в авіакосмічних конструкціях показали, що найперспективнішими (як конструкційний матеріал) є титанові сплави (рис. 1.11).

У деяких областях застосування високоміцних титанових сплавів склалося досить стійке уявлення про надійне використання сплавів з тим чи іншим рівнем міцності та значеннями службових характеристик:

- у силових конструкціях пасажирських і транспортних літаків (механізми крила, стійки шасі тощо) (рис. 1.12);

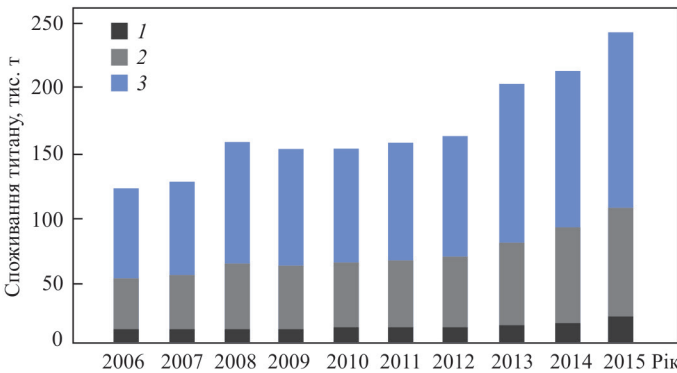


Рис. 1.11. Основні напрямки застосування титану в світовій промисловості: 1 — військове застосування; 2 — літакобудування; 3 — промисловість



Рис. 1.12. Застосування сплавів титану у виробництві силових елементів крила та фюзеляжу літака

- у дисках і лопатках вентилятора та компресора низького тиску авіаційного двигуна, що працюють при температурах до 300 °С;
- у силових конструкціях маневрених літаків, які можна виготовляти із високоміцних титанових сплавів;
- в окремих деталях і конструкціях авіакосмічної техніки.

У конструкції планерів сучасних пасажирських літаків титанові сплави за масою складають до 15 %, а у військових літаках — до 40 %. При цьому в планері сучасних літаків масова частка титанових сплавів безперервно зростає. Так, наприклад, якщо в літаках AIRBUS 320 частка титану становила лише 3 % від загальної маси літака, то в сучасному літаку AIRBUS 350 частка титану зросла до 13 % (рис. 1.13).

Це обумовлено широким застосуванням у конструкціях літаків нового покоління композиційних матеріалів замість алюмінієвих сплавів, а титан, при високій питомій міцності, хімічно не взаємодіє з вуглепластиками. У цілому, для виробництва всіх вже замовлених на теперішній час літаків BOENG та

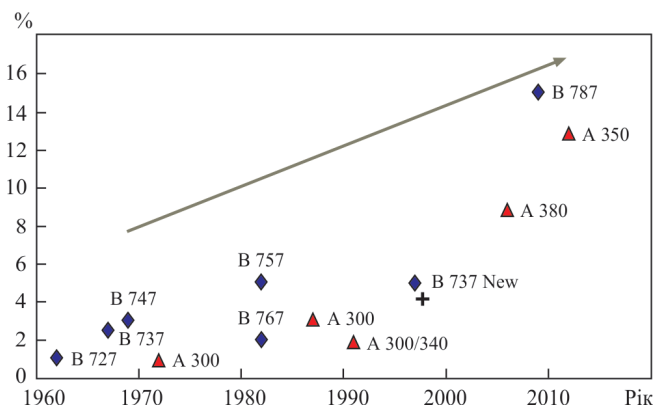


Рис. 1.13. Вміст титану в літаках (планер і двигун)

AIRBUS потрібно більше ніж 430 тис. т титанових напівфабрикатів протягом найближчих 10 років.

Розвиток авіаційної і ракетної техніки вимагає істотного підвищення експлуатаційних характеристик титанових сплавів. З метою вирішення цього завдання проводяться інтенсивні роботи зі створення нових і вдосконалення існуючих титанових сплавів [97].

У літакобудуванні на сьогоднішній день спостерігаються три основні області застосування титанових сплавів, які визначаються їх властивостями:

- низьколеговані високопластичні сплави титану застосовують для відносно мало навантажених виробів складної форми;
- високоміцні титанові сплави використовують для відповідальних високонавантажених вузлів і агрегатів літака;
- жароміцні титанові сплави застосовують у двигунах для деталей, що працюють при температурах до 600 °С.

Слід особливо зазначити велику ефективність використання високоміцних титанових сплавів для виробництва болтів, гвинтів та інших деталей кріплення.

Поряд із високошвидкісною та маневреною авіацією й космонавтикою титанові сплави можуть також широко використовуватися в інших галузях промисловості [98–101]:

- у газодовибувальній і нафтовій промисловості — для бурильних труб, трубчастих конструкцій (сплави VT14, VT23);
- у транспортному машинобудуванні — для деталей двигунів (шатуни, клапани), глушників, автокомпресорів, дисків коліс, шпильок кріплення коліс, ресорних пружин, силових конструкцій спортивних автомобілів, декоративно-го оформлення, інструменту (VT6, VT14, VT23);
- у хімічній промисловості — для трубопроводів, ємностей, насосів, силових конструкцій;
- у поліграфії — для ванн, трубопроводів;
- у годинниковій промисловості — для корпусів годинників, що забезпечують високі параметри точності й надійності роботи механізмів;
- у харчовій промисловості — для ємностей і трубопроводів для виробництва високоякісних вин, пива, крохмалю, патоки, екологічно чистих продуктів харчування;
- у медицині — для імплантних елементів (стрижнів, суглобів, шпильок, протезів, серцевих клапанів, медичного інструменту, інвалідних колясок) (VT5, VT5Л, VT6, VT23);
- у виробництві спортивного інвентарю — для велосипедів, спорядження альпіністів і туристів (VT14, VT23).

Достатньо ефективним є виготовлення із титанових сплавів броньового захисту (бронювання автомашин, дверей, сейфів), а також бронежилетів і шоломів (сплав VT23) [102].

Максимальний ваговий ефект забезпечують титанові сплави з високою міцністю, яка отримується не тільки шляхом збільшення ступеня їх легування, а й за рахунок термічної і термомеханічної обробки. Це пов'язано з тим, що помітна економія маси в результаті застосування титанових сплавів можлива лише при цілком певному рівні їх міцності [103].

Для подальшого розширення застосування сплавів на основі титану необхідно підвищувати їх механічні характеристики та знижувати вартість їх виробництва, що може бути досягнуто створенням нових сплавів з поліпшеними експлуатаційними властивостями та застосуванням нових високоефективних технологій виробництва, у першу чергу виплавки [104].

1.3. ОСОБЛИВОСТІ КРИСТАЛІЗАЦІЇ СПЛАВІВ ТИТАНУ ПРИ ЕЛЕКТРОННО–ПРОМЕНЕВІЙ ПЛАВЦІ

Серед нових галузей промисловості, які отримали широкий розвиток у зв'язку з вимогами сучасного машинобудування, виробництво зливків титанових сплавів посідає особливе місце.

В умовах сталої технологічної схеми виробництва зливків особливого значення набуває дослідження процесу кристалізації і супутніх йому явищ, що визначають будову та, у поєднанні зі складом шихти, властивості зливків і деформованих виробів.

Сучасний рівень вимог до якості зливків можна коротко сформулювати наступним чином:

- хімічний склад в об'ємі всього зливка повинен бути однаковим як за легуючими елементами, так і за домішками;
- структура зливка повинна бути рівномірною. Формування на стадії отримання зливка дрібного та рівновісного зерна є актуальною задачею. Отримання грубої зеренної структури може стати причиною руйнування металу під час деформації, а також значної неоднорідності властивостей у слабдеформованих виробках;
- зливок не повинен містити сторонніх металевих і неметалевих включень;
- зливок не повинен мати несплавлень, розривів та інших поверхневих дефектів, які можуть стати причиною руйнування металу при подальшій деформаційній обробці;
- в об'ємі зливка не повинно бути тріщин, усадкових раковин, пористості.

Розвиток технології плавки зливків пов'язаний з удосконаленням конструкції плавильних печей та їх окремих елементів. У свою чергу, воно безпосередньо впливає на техніко-економічні показники процесу.

Дослідженню кристалізації зливків титану присвячено велику кількість робіт, спрямованих на вивчення загальних закономірностей і рішення часткових завдань для численних методів плавки [105–110]. Типова кристалічна будова зливка, отриманого традиційними способами виробництва, являє собою

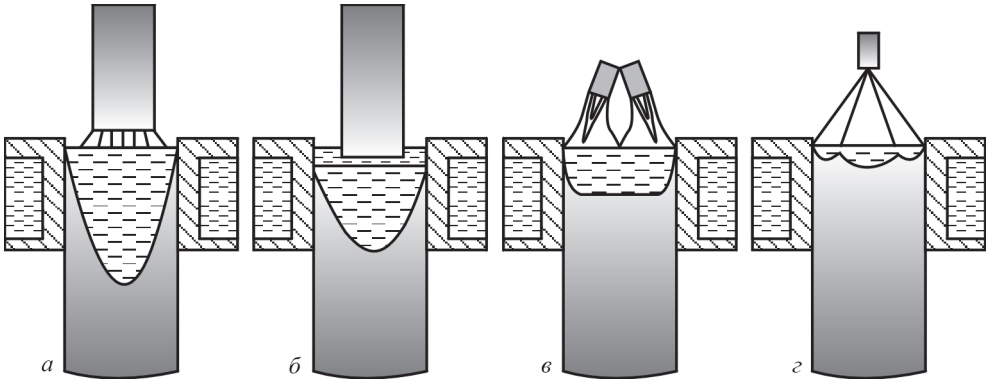


Рис. 1.14. Форма рідкої ванни та напрямок росту кристалів при різних переплавних процесах: *a* — ВДП; *б* — ЕШП; *в* — ПДП; *з* — ЕПП

три макроструктурні зони: периферійну дрібнозернисту, стовпчастих кристалів і центральну рівновісних кристалів [111].

Усі різновиди процесів плавки титанових сплавів (ВДП, ЕПП, ПДП) мають схожі риси. Під час плавки під дією тепла, що виділяється джерелом нагріву, вихідна шихта розплавляється. Краплі рідкого металу, що мають деякий перегрів, падають з неї у рідку ванну. Частина теплової енергії витрачається безпосередньо на нагрів рідкої ванни. Формування зливка відбувається у водоохолоджуваному мідному кристалізаторі, температура внутрішньої поверхні якого незначно перевищує температуру охолоджувальної води. Нижній торець кристалізатора закритий водоохолоджуваним металевим піддоном.

При таких теплових умовах у верхній частині зливка, що наплавляється, утворюється рідка ванна (рис. 1.14). На початку плавки, коли частка тепла, що відводиться через піддон, ще велика, розміри та форма рідкої ванни змінюються з ростом довжини зливка. У міру збільшення довжини зливка тепловий вплив піддону стає все менше і, нарешті, практично припиняється. Все тепло, що виділяється при кристалізації, проходить через бічну поверхню зливка та стінку кристалізатора. Кількість тепла, що втрачається зливком у поясі кристалізації, стає постійним у кожний момент часу.

При кристалізації металу в охолоджуваному кристалізаторі безперервно протікає процес теплообміну від нижнього до верхнього торців зливка, при безперервному надходженні тепла у верхню частину зливка (за рахунок обігріву та надходження рідкого металу). Якщо потужність тепла, що підводиться в процесі плавки, не змінюється, то в поясі кристалізації встановлюється теплова рівновага, відповідно до якої кількість рідкого металу, що надходить у ванну з шихти, буде дорівнювати кількості затверділого металу. В умовах рівноваги рідка ванна стабілізується та зберігає свою форму й розміри незалежно від довжини зливка.

Як видно з рис. 1.14, при переплавних процесах з незалежними джерелами нагріву (ЕПП та ПДП) форма рідкої ванни має найбільш наближену до плоскої

форму, тому що поверхня рідкої ванни безперервно обігривається електронним променем або потоком плазми. У цих умовах зростання кристалів йде в напрямку, найближчому до осевого [112].

Спрямований до зовнішніх границь зливка тепловідвід і високий градієнт температур при кристалізації зливка сприяють створенню стовпчастих кристалів з осевою спрямованістю. Високий градієнт температур підтримується протягом усього процесу переплаву металу при одночасно протікаючій кристалізації по всій поверхні розплаву.

Напрямок росту кристалів у процесі кристалізації зливка значною мірою залежить від форми рідкої ванни та її глибини. Глибока рідка ванна спричиняє радіальний напрямок росту стовпчастих кристалів і, навпаки, дрібна рідка ванна з плоским фронтом кристалізації сприяє осевому напрямку стовпчастих кристалів.

Разом з тим, кристалізація злиwkів, отриманих електронно-променевою плавою, відрізняється рядом специфічних рис. Це, перш за все, перегрів рідкого металу у ванні через вплив джерела нагріву та менша інтенсивність охолодження бічної поверхні зливка. При цих процесах злиwk охолоджується в основному за рахунок випромінювання. Кількість тепла, що випромінюється з бічної поверхні зливка, залежить від її температури, яка внаслідок невеликої інтенсивності охолодження змінюється по висоті зливка. Таким чином, температура бічної поверхні зливка та інтенсивність охолодження змінюються по висоті зливка. Для кількісного визначення параметрів кристалізації вивчають температурні поля зливка та пов'язані з ним теплові процеси, що відбуваються в циліндричному зливку, оскільки виплавка таких злиwkів знайшла найширше застосування.

Дослідження температурного поля рідкої ванни в умовах вакуумної плавки титану — дуже складне завдання. Тому в даний час можна лише приблизно судити про характер розподілу температури рідкого металу в зливку, що кристалізується.

Вимірювання температури рідкого металу у ванні, а також математичне моделювання теплових процесів дозволяють отримати уявлення про її температурне поле. Температура рідкого металу зростає в міру віддалення від фронту кристалізації. Максимальний перегрів знаходиться в зоні дії джерела нагріву на поверхні ванни. Шар перегрітого металу поширюється на значну глибину. Розміри його визначаються інтенсивністю теплообміну між рідким металом і затверділою частиною зливка. Підвищення потужності теплового нагріву збільшує максимальний перегрів рідкої ванни внаслідок великої кількості тепла, що виділяється в рідку ванну. Одночасно посилюється інтенсивність руху металу, що покращує тепловіддачу від рідкого металу до твердого.

Крім того, відповідно до закону конвективного теплообміну, кількість тепла, віддана рідким металом, прямо пропорційна температурі. У результаті з підвищенням потужності теплового нагріву абсолютне значення глибини перегрітого шару зростає, проте відносна величина цього шару дещо зменшується

в результаті поглиблення рідкої ванни. Тепло, що виділяється при твердінні, відводиться в напрямку, перпендикулярному до поверхні кристалізації.

Зі збільшенням діаметра зливка при однаковій масовій швидкості плавки глибина рідкої ванни зменшується [113]. Фізичний сенс такої залежності полягає в тому, що поверхня, через яку тепло випромінюється зі зливка в зоні кристалізації, збільшується пропорційно діаметру зливка. Відповідно до цього кількість тепла, що віддається зливком, зростає разом із радіусом зливка. Незважаючи на те, що з одиниці поверхні зливка кількість випромінюваного тепла дещо зменшується для зливків великого діаметра в порівнянні зі зливками малого діаметра, у сумі зі зростанням діаметра зливка охолодження стає інтенсивнішим. При однаковій кількості тепла, що підводиться, підвищення інтенсивності тепловіддачі, пов'язане зі збільшенням діаметра зливка, призводить до зменшення глибини рідкої ванни.

Звідси випливає, що час повного твердіння рідкої ванни в період плавки визначається тільки радіусом зливка й не залежить від потужності теплового нагріву. Потужність теплового нагріву впливає на час повного твердіння рідкої ванни тільки в разі значного осевого теплового потоку, тобто при дуже малій потужності обігріву і, відповідно, низькій швидкості плавки.

Величина часу повного твердіння рідкої ванни визначає тривалість режиму виведення усадкової раковини в кінці плавки, коли потужність обігріву поверхні зливка знижують з метою зменшення глибини рідкої ванни і, отже, глибини залягання усадкової раковини.

Величина часу твердіння рідкої ванни характеризує також тривалість перебування металу в рідкому стані, що суттєво впливає на повноту протікання процесів, які відбуваються в рідкій фазі. Для зливків титанових сплавів зазначено значне збільшення розмірів зерна з підвищенням діаметра виплавленого зливка. Така закономірність пояснюється, поряд зі зменшенням переохолодження на фронті кристалізації (у зв'язку зі зниженням швидкості кристалізації), більшою тривалістю перебування металу в рідкому стані зі збільшенням діаметра зливка, що призводить до дезактивації значної кількості частинок домішок, які є центрами кристалізації.

Маса рідкої ванни більшою мірою залежить від радіуса виплавленого зливка, ніж від потужності обігріву. Таким чином, можна вважати, що в реальних умовах промислової виплавки зливків титанових сплавів середня лінійна швидкість кристалізації визначається переважно радіусом виплавленого зливка та мало залежить від потужності нагріву.

Підвищення продуктивності заповнення призводить до поглиблення рідкої ванни, і чим більше діаметр зливка, тим меншою мірою буде впливати підвищення інтенсивності охолодження на глибину рідкої ванни.

Зливки різного діаметра, що кристалізуються в умовах нескінченно великої інтенсивності теплообміну з однаковою масовою швидкістю плавки, повинні

мати однакову глибину рідкої ванни. Зрозуміти фізичний зміст такого впливу інтенсивності охолодження на процес кристалізації зливків різного діаметра можна, проаналізувавши умови охолодження зливка. Відведення тепла із зони кристалізації складається з двох послідовних теплових процесів: теплопередачі через кірку затверділого металу та теплопередачі з бічної поверхні зливка до навколишнього середовища. Залежно від умов переважне становище може зайняти той або інший з цих процесів. При малій інтенсивності охолодження вирішальне значення має кількість тепла, що йде з бічної поверхні зливка. У цьому випадку чим більше діаметр зливка, тим більше площа його бічної поверхні і, отже, тим більше виділяється тепла. Таким чином, в умовах вакуумної плавки з тепловіддачею від бічної поверхні зливка випромінюванням (порівняно мала інтенсивність охолодження) глибина рідкої ванни при однаковій масовій швидкості плавки зменшується з підвищенням діаметра зливка.

До останнього часу більшість досліджень, пов'язаних з отриманням титанових зливків, було присвячено розробці та вдосконаленню технології плавки: вибору оптимальних конструкцій печей і джерел енергоживлення, підбору основних параметрів плавки, питанням організації виробництва [114–117], і лише в деяких роботах вивчалася будова реальних зливків [22, 118, 119].

У міру освоєння техніки плавки все більша увага стала приділятися отриманню максимально якісного зливка титану та його сплавів з точки зору його властивостей і структури. Так, у [120] показано вплив технологічних параметрів ЕПП на глибину рідкої ванни, а отже, на формування структури. На прикладі отримання зливка діаметром 200 мм високоміцного титанового сплаву Ті–6Al–4V промодельовано режими плавки, при яких досягаються різні стани головної частини формованого зливка – з глибокою, дрібною і без ванни рідкого металу (рис. 1.15).

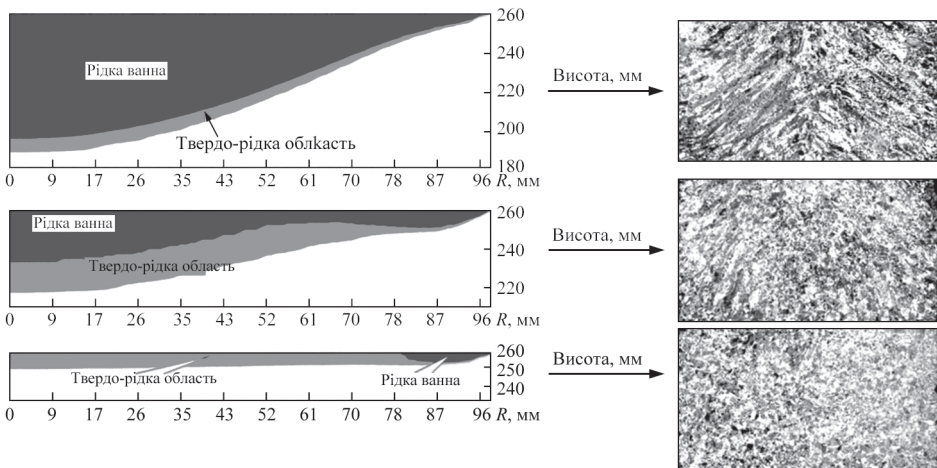


Рис. 1.15. Залежність структури зливка Ті–6Al–4V \varnothing 200 мм від глибини рідкої ванни при плавці

Дослідження для більш легованих високоміцних титанових сплавів при отриманні зливоків діаметром більше ніж 200 мм не проводилися. Тому великий інтерес представляє вивчення основних закономірностей зміни структури та властивостей зливоків високоміцних титанових сплавів у залежності від їх складу й режимів виплавки.

1.4. ОСОБЛИВОСТІ ПОВЕДІНКИ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ЕЛЕКТРОННО–ПРОМЕНЕВІЙ ПЛАВЦІ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ТИТАНУ

У виробництві титанових сплавів найважче — отримання металу, однорідного за хімічним складом і механічними властивостями.

Характерною рисою плавки у вакуумних печах є одночасність проходження процесів плавлення металу та його твердіння. У процесі плавки метал знаходиться в трьох станах: у вигляді решти ще не розплавленої шихти; у вигляді металу, що знаходиться в рідкій ванні; у вигляді вже затверділого металу.

Унаслідок зазначеної особливості плавки вирівняти хімічний склад по всьому об'єму зливка при ВДП, якщо є місцева неоднорідність у шихтовій заготовці, неможливо. Проте після плавки обриси та протяжність ділянки неоднорідності та, отже, її ступінь змінюються. Характер неоднорідності визначається глибиною рідкої ванни та об'ємом рідкого металу. За інших рівних умов збільшення глибини та об'єму рідкої ванни призводить до рівномірнішого розподілу легуючих елементів і зменшує ступінь нерівномірності властивостей зливка. Якщо неоднорідність або чередування неоднорідності в шихті незначні, то й зливок буде досить однорідним. Електронно-променева плавка з проміжною ємністю позбавлена даного недоліку, оскільки усереднення хімічного складу відбувається в проміжній ємності, в яку ведеться плавка вихідної шихти.

Неприпустима неоднорідність хімічного складу металу, яка надходить з торця шихти, що плавиться, у рідку ванну зливка, з'являється іноді внаслідок перерозподілу при плавці легуючих компонентів у шихті, яка була спочатку умовно однорідною.

До неоднорідності складу зливка, пов'язаної з короткочасністю перебування металу в рідкому стані, може призводити поєднання досить високої температури плавлення та великої питомої ваги шматочків легуючих компонентів або лігатур, що вводяться [104]. У процесі плавки метал, досягаючи температури, що незначно перевищує температуру плавлення, переноситься в рідку металеву ванну зливка, що виплавляється. Температура металу в рідкій ванні при цьому лише на 100...150 °С перевищує температуру плавлення сплаву. Ця обставина ускладнює розплавлення шматочків легуючих компонентів і лігатур, що мають температуру плавлення вищу за температуру металу в рідкій ванні. Особливо несприятливі умови створюються для розподілу тугоплавких елементів з більшою, ніж у титану, щільністю [11].

Одна з найважливіших особливостей виробництва титанових зливків — плавка у вакуумі при безпосередній близькості рідкого металу з водоохолоджуваними стінками плавильної установки. Це сприяє випаровуванню летких домішок, їх конденсації на охолоджуваних стінках, що, в свою чергу, унеможливає запобігання випаровуванню за рахунок граничного насичення зони плавки парами летючих компонентів і в результаті може призвести до утворення значної неоднорідності хімічного складу зливка по перерізу [8].

Для ЕПП характерними є невеликі швидкості кристалізації та інтенсивний рух розплаву в рідкій ванні. Тому в сплавах з широким температурним інтервалом кристалізації можливі ліквідаційні процеси в період кристалізації, що також призводить до неоднорідності зливків по перерізу.

Усі види неоднорідності можна поділити на три основні групи:

1. Неоднорідність хімічного складу зливка, пов'язана з обмеженим об'ємом рідкої ванни та неоднорідністю складу металу, що надходить у рідку ванну. Неоднорідність складу металу зливка може виникати внаслідок неоднорідності металу вихідної шихти. До неоднорідності цього виду можна віднести також: включення, що являють собою шматочки легуючих компонентів або лігатур, які не розплавився; компоненти шихти, збагачені газами або іншими домішками; твердосплавні включення, що потрапляють зі стружкою тощо.

2. Неоднорідність хімічного складу зливка, що виникає внаслідок зміни концентрації легуючих компонентів у рідкій ванні за рахунок їх випаровування з поверхні рідкого металу та конденсації на холодних стінках водоохолоджуваного кристалізатора.

3. Неоднорідність хімічного складу зливка, пов'язана з кристалізацією металу та протіканням ліквідаційних процесів.

Дослідження щодо зміни вмісту компонента в об'ємі зливка сплаву титану, проведені з урахуванням технологічних режимів плавки, при яких виникає кінцевий фронт кристалізації [113], показали, що максимум вмісту компонента знаходиться в центрі зливка на рівні переходу до усталених умов плавки. При подальшому наплавленні зливка встановлюється рівноважна концентрація, а в об'ємі рідкої ванни, відповідної моменту переходу на режим виведення усадкової раковини, концентрація значно підвищена. Також встановлено, що чим менша глибина рідкої ванни та чим ближче до одиниці значення коефіцієнта розподілу, тим раніше досягається однорідність складу зливка по довжині й перерізу.

Розміри перехідної області збільшуються в міру просування фронту кристалізації від периферії до центру зливка. Поблизу периферії, у зв'язку з невеликими розмірами перехідної області, ліквідаційні процеси не отримують помітного розвитку. Вміст компонента, що викликає ліквідацію, поблизу периферії зливка відповідає середньому складу рідкого металу у верхній частині рідкої ванни [11].

При подальшому переміщенні фронту кристалізації вглиб зливка стає помітною взаємодія між рідкою ванною та основним розплавом двофазної об-

ласті. Завдяки цій взаємодії основний розплав як би вимивається з перехідної області та збагачує ліквацийним компонентом периферійну зону рідкої ванни.

Збагачений шар іноді зберігається після різкого зменшення конвективних потоків у рідкій ванні в результаті припинення дії об'ємної кристалізації, яка має місце при виплавці без виведення усадкової раковини. У разі виведення усадкової раковини іноді також спостерігається збагачений шар, оскільки перемішування металу значно послаблюється. Найчастіше в об'ємі, що відповідає верхній частині рідкої ванни, вміст компонентів, що викликають ліквацию, приблизно однаковий. Однак ступінь перемішування рідкого металу виявляється недостатнім для вирівнювання концентрації по висоті рідкої ванни. У донній частині ванни, особливо при значній її глибині та великому опорі поверхні рідкої ванни руху металу, перемішування може бути значно ослабленим. Слід мати на увазі, що лінійна швидкість переміщення рідкого розплаву щодо перехідної області зменшується в міру поглиблення ванни ще й з-за зменшення діаметра відповідного перерізу ванни. Шар рідкого металу, збагачений легкоплавкою складовою сплавом, буде в цих умовах переміщуватися до центру зливка, створюючи підвищений вміст ліквуючого компонента. Утруднене перемішування рідкого металу в донній частині рідкої ванни може посилюватися ще й більшою щільністю легкоплавкої складової. Це може викликати переміщення більш важкого ліквата по контуру ванни вниз до центру зливка. Цей механізм процесу ліквации наведено стосовно компонентів, що знижують температуру плавлення. Для елементів, що її підвищують, закономірності розподілу матимуть зворотний характер.

Таким чином, основними факторами розвитку зональної ліквации в зливках титанових сплавів при ЕПП може бути [113]:

- величина коефіцієнта розподілу компонента або домішки;
- швидкість процесу плавки, що визначає глибину та форму рідкої ванни;
- швидкість кристалізації зливка та розміри перехідної області;
- інтенсивність і характер взаємодії рідкого металу рідкої ванни з перехідною областю та перемішування металу в об'ємі рідкої ванни.

Беручи до уваги вищенаведене, основними напрямками боротьби з зональною ліквациєю під час ЕПП сплавів титану можна вважати підбір оптимальних значень потужності обігріву та підвищення швидкості охолодження зливка.

При ЕПП сплавів титану над поверхнею розплавленого металу внаслідок наявності градієнтів температури, концентрації й тиску виникає потік парів металу та газів. При певних умовах напрямок потоку буде або до поверхні розплаву, або від неї. В умовах вакуумної плавки потік речовини взаємодіє із залишковими газами вакуумного середовища, що призводить до утворення газопарової фази над поверхнею рідкого металу [121]. Тому однією з проблем застосування технології ЕПП для отримання зливок титанових сплавів з гарантованим хімічним складом є забезпечення заданого хімічного складу зливка.

Це викликано тим, що процес ЕПП здійснюється у вищому вакуумі, ніж ВДП, і легуючі елементи з пружністю пари, що перевищує пружність пари титану, випаровуються інтенсивніше. У даному випадку до таких елементів відносяться Al, Cr, Mn та інші. Але в першу чергу ця проблема стосується алюмінію, тому що він є легуючим елементом практично всіх титанових сплавів. Концентрація у зливку елементів з пружністю пари нижче за пружність пари титану, у даному випадку Mo, V і Zr, може навіть незначно підвищуватися за рахунок зниження концентрації елементів з високою пружністю пари [122].

Процеси випаровування легуючих елементів при ЕПП досить повно досліджено в [8, 11, 25, 104]. У них зазначається, що характерною особливістю процесу ЕПП з проміжною ємністю є наявність трьох зон можливого випаровування з розплаву компонентів сплаву з високою пружністю пари: торець витратної заготовки, проміжна ємність і кристалізатор. При цьому час перенесення рідкого металу з торця витратної заготовки в проміжну ємність і з проміжної ємності в кристалізатор незначний і на процеси випаровування практично не впливає [11]. Тому практичне значення при ЕПП титанових сплавів має наступне завдання: за яких технологічних режимів і параметрів повинна проводитися плавка, щоб хімічний склад отриманого зливка знаходився в заданих межах.

1.5. ВИСОКОМІЦНІ СПЛАВИ ТИТАНУ

Промислові титанові сплави. Застосовувані для легування титану елементи за характером їх впливу на фазовий склад сплавів поділяються на α -стабілізатори (алюміній, галій, індій, кисень, азот, вуглець), β -стабілізатори (молібден, вольфрам, ванадій, ніобій, тантал, хром, залізо, кремній, марганець). З використанням зазначених стабілізаторів можна отримувати сплави трьох основних типів — α , β і $(\alpha+\beta)$, кожен з яких має свої характерні властивості. Основою для створення промислових α -сплавів є система Ti–Al [123]. Алюміній, за рідкісним винятком, присутній практично у всіх сплавах титану. Алюміній є єдиним широко застосовуваним металом, стабілізуючим α -фазу. Введення алюмінію в кількості до 13 % дозволяє отримувати сплави з задовільною жароміцністю [124]. Технічний титан і α -титанові сплави можуть бути віднесені до одного класу сплавів, оскільки вміст домішок у технічному титані (BT1-00, BT1-0) знаходиться в межах розчинності в α -фазі. Сплави типу $(\alpha+\beta)$ отримують шляхом легування титану елементами, що утворюють α - і β -тверді розчини з різним співвідношенням цих фаз і розширюють температурну область фазових перетворень титану. Двофазна структура сплавів виникає при нагріванні під загартування та фіксується різким охолодженням. Термообробка $(\alpha+\beta)$ -сплавів дозволяє помітно підвищити їх міцність при відносно невеликому погіршенні пластичності. Вони мають обмежену здатність до зварювання, після зварювання необхідна термічна обробка зварних швів. Крім алюмінію, найважливішими легуючими елементами титанових сплавів є ванадій і молібден.

Таблиця 1.1. Хімічний склад титанових сплавів

Сплав	Клас за структурою	Вміст елементів, %					
		Al	V	Mo	Zr	Cr	Nb
BT9	$\alpha+\beta$	5.8...7.0	–	2.8...3.8	1.0...2.0	–	–
BT14	$\alpha+\beta$	3.5...6.3	0.9...1.9	2.5...3.8	0.3	–	–
BT20	псевдо- α	5.5...7.0	0.8...2.5	0.5...2.0	1.5...2.5	0.1	–
BT23	$\alpha+\beta$	4.0...6.3	4.0...5.0	1.5...2.5	0.3	0.8...1.4	–
T110	$\alpha+\beta$	5.0...6.0	0.8...2.0	0.8...1.8	0.3...0.8	–	3.5...4.8
T120	$\alpha+\beta$	4.5...5.5	1.5...2.2	2.5...3.0	2.3...3.0	1.0...1.5	3.5...4.5

Закінчення табл. 1.1

Сплав	Клас за структурою	Домішки, не більше		
		Fe	Si	O
BT9	$\alpha+\beta$	0.25	0.20...0.35	0.15
BT14	$\alpha+\beta$	0.25	0.15	0.15
BT20	псевдо- α	0.25	0.15	0.15
BT23	$\alpha+\beta$	0.4...1.0	0.15	0.15
T110	$\alpha+\beta$	1.5...2.5	0.15	0.20
T120	$\alpha+\beta$	0.7...1.2	0.15	0.20

Найпоширенішим титановим сплавом загального призначення є розроблений Хансенем сплав, який містить 6 % Al і 4 % V, названий умовно сплавом Ті6-4 (аналоги — BT6 і BT6С [125]). Система Ті–Al–V є основою більшості високоміцних титанових сплавів, а система Ті–Al–Mo — основою жароміцних титанових сплавів.

Для проведення експериментів були використані промислові титанові сплави: BT9, BT14, BT20, BT23, T110, T120.

Хімічний склад сплавів, які використано в роботі, наведено в табл. 1.1.

Сплав BT9. Жароміцний деформований титановий сплав BT9 системи Ті–Al–Mo–Zr–Si є двофазним ($\alpha+\beta$)-сплавом мартенситного типу [126, 127]. Він використовується для виготовлення дисків, лопаток газотурбінних двигунів та інших деталей компресора, що працюють при температурі до 500 °С. Також ці сплави використовуються для виготовлення напівфабрикатів: листи, стрічки, фольги, полоси, плити, прутки, профілі, труби, поковки та штамповані заготовки. Титановий сплав BT9 має високу корозійну стійкість [128, 129]. За рахунок високого вмісту алюмінію та мікролегування кремнієм сплав BT9 має вищі показники міцності та жароміцності в порівнянні з класичним сплавом BT6. Сплав BT9 застосовують у відпаленому й термічно зміцненому станах. Гартування даного сплаву супроводжується істотною зміною його механічних властивостей та структури.

Для напівфабрикатів зі сплаву ВТ9 застосовують наступні види термічної обробки:

1. Подвійний відпал: нагрівання при 950...970 °С, витримка 1...4 год, охолодження на повітрі; потім нагрівання при 530 °С, витримка 6 год, охолодження на повітрі. Це — основний режим, що застосовується для деталей, які працюють при рекомендованих температурах і заданому ресурсі експлуатації. Для підвищення пластичності (у разі потреби) допускається ізотермічний відпал за режимом: нагрівання при 950 °С, витримка, охолодження з піччю (або перенесення в іншу піч) до 530...580 °С, витримка 6 год, охолодження на повітрі.

2. Зміцнююча термічна обробка, що складається із загартування у воду з 925 °С і подальшого старіння при 500...600 °С протягом 1...6 год з охолодженням на повітрі.

3. ВТМО — загартування у воду після високотемпературної деформації (перерва між закінченням деформації та загартуванням не повинна перевищувати 30...45 с) і наступне старіння при 570 °С протягом 2...6 год з охолодженням на повітрі.

Сплав ВТ9 після відпалу при температурі 750...850 °С з подальшим охолодженням на повітрі містить 8...10 % β -фази, решта — α -фаза [130]. Наступне нагрівання при 530 °С протягом 6 год (другий ступінь відпалу) практично не змінює характер мікроструктури сплаву, що спостерігається при світлових збільшеннях. Після відпалу сплаву ВТ9 при 950 °С з охолодженням на повітрі кількість β -фази складає близько 9 %. Зміна швидкості охолодження після нагрівання до 950 °С призводить до помітної зміни фазового складу. З підвищенням температури нагрівання під загартування з 870 до 950 °С спостерігається зменшення кількості β -фази та збільшення кількості α -фази внаслідок перетворення $\beta \rightarrow \alpha''$ у процесі охолодження, а після загартування з β -області фіксується α' -фаза. У процесі повільного охолодження з піччю з 850 °С відбувається перерозподіл компонентів в α - і β -фазах, у результаті не утворюється дисперсних продуктів розпаду, α - й β -фази зберігаються до кімнатної температури. Кількість β -фази при цьому складає близько 22 %. Міцність монотонно зменшується з підвищенням температури відпалу. Зниження пластичності після відпалу при температурах β -області пов'язане з інтенсивним зростанням зерна первинної β -фази.

Сплав ВТ14 є високоміцним термічно зміцненим титановим ($\alpha+\beta$)-сплавом мартенситного типу системи Ti–Al–Mo–V. Він містить невелику кількість β -стабілізуючих елементів ($K_{\beta} = 0.35$) і помірну — алюмінію. У стабілізованому стані містить близько 10 % β -фази, а після гартування з температури поблизу критичної — близько 37 %. Температура поліморфного перетворення складає 920...960 °С [131]. Цей сплав добре деформується в гарячому стані. Листове штампування сплаву у відпаленому або загартованому стані з невеликими деформаціями можна проводити в холодному стані, але основні операції

штамбування вдається успішно провести лише при підвищених температурах. Сплав задовільно зварюється усіма видами зварювання, що застосовуються для титану. Для відновлення пластичності зварного з'єднання після зварювання необхідно проводити відпал. Сплав застосовують у відпаленому та термічно зміцненому станах. Відпал проводять для додання сплаву підвищеної пластичності та помірної міцності. Залежно від температури відпалу та швидкості охолодження в структурі сплаву VT14 змінюється співвідношення α - і β -фаз, а також можуть утворюватися метастабільні фази, які помітно впливають на властивості металу. При повільному охолодженні (з піччю) утворюється порівняно рівноважна ($\alpha+\beta$)-структура та сплав має найнижчу міцність при підвищеній пластичності. У разі охолодження сплаву на повітрі тимчасовий опір і границя плинності з підвищенням температури відпалу вище за 750 °С збільшується, а характеристики пластичності падають [131]. Відпал листів, прутків, поковок, штамповок і деталей з них здійснюється при температурах 740...810 °С. Термічне зміцнення складається з гартування з температури 870...910 °С і старіння при 480...560 °С впродовж 8...16 год. Гартування сплаву VT14 супроводжується істотною зміною його механічних властивостей і структури. З підвищенням температури нагріву під гартування до 800 °С тимчасовий опір розриву дещо зменшується, а характеристики пластичності зростають. При подальшому підвищенні температури нагріву під гартування вище «критичної» збільшуються тимчасовий опір розриву та границя плинності, що пов'язано з мартенситним перетворенням збідненої молібденом і ванадієм метастабільної β -фази та збільшенням кількості мартенситу в структурі металу. Одночасно помітно знижується пластичність. Особливістю гартованої структури є ще більш дисперсна й тонка структура в порівнянні зі сплавом, охолодженим на повітрі [131]. Краще сполучення міцності й пластичності може бути отримано на сплаві, зістареному при 470...490 °С.

Сплав VT14 застосовується для виготовлення напівфабрикатів (листів, стрічок, фольги, смуг, плит, прутків, профілів, труб, поковок і штампованих заготовок) методом деформації, а також зливків; деталей і штамп-зварних конструкцій, які тривалий час працюють при температурах до 400 °С.

Сплав VT20 — це псевдо α -сплав, що належить до системи Ti–Al–Zr–Mo–V (табл. 1.2). Основний механізм підвищення механічних характеристик полягає у зміцненні твердого розчину α -стабілізуючого елемента Al. Досить високий вміст алюмінію забезпечує значну міцність і жароміцність цього сплаву. Технологічна пластичність сплаву VT20 невисока через великий вміст алюмінію. Тому додавання нейтральних елементів Zr та β -стабілізуючих елементів Mo та V покращує технологічність. Еквівалент Al цього сплаву становить 6,58 %, а еквівалент Mo — 2,46 %. VT20 є титановим сплавом з високим еквівалентом Al, близьким до α -типу. Тому він має як хорошу термічну міцність, так і зварюваність титанового сплаву α -типу. Сплав VT20 має середню міцність

при кімнатній і високій температурі, задовільну термічну стабільність і характеристики зварювання, а також трохи нижчу пластичність процесу, ніж VT6 [131]. Єдиним видом термічної обробки металу VT20 є відпал. Повний відпал проводять при температурах 700...800 °С зняттям наклепу від попередніх операцій обробки тиском. Неповний відпал листів і прутків зі зняттям залишкових напружень проводять при 600...650 °С. Зварні з'єднання відпалюють при 650...750 °С.

VT20 добре деформується в гарячому стані та поставляється у вигляді поковок і штампувань завтовшки до 250 мм, профілів, прутків, плит і листа. Сплав добре зварюється усіма видами зварювання, які застосовуються для титанових сплавів. Механічні властивості зварної конструкції не поступаються властивостям основного металу. Сплав призначений для виготовлення зварних несучих деталей, які працюють тривалий час при температурах до 500 °С. У листовому варіанті цей сплав за жароміцними характеристиками поступається тільки сплаву VT18У.

З цього сплаву виготовляють кільця, зварені з гарячекатаних і пресованих профілів, а також цільнокатані кільця. Також сплав VT20 застосовують для виготовлення деталей і зварних вузлів, які тривало працюють при температурах від 70 до 450 °С (6000 год) — 500 °С (3000 год).

Сплав VT23 відноситься до титанових сплавів мартенситного класу з ($\alpha+\beta$)-структурою [131, 132–135]. У промисловості сплав VT23 застосовується як у відпаленому, так і в термічно зміцненому (гартування з наступним старінням) станах. Сплав має задовільне співвідношення міцності й пластичних властивостей, завдяки чому застосовується для виготовлення високонавантажених, особливо в умовах фрикційного та кавітаційного впливів [136], деталей і вузлів конструкцій. Однак, якщо при значеннях тимчасового опору розриву до ~ 1100...1200 МПа відносно подовження сплаву зберігається на рівні ~ 10 %, то підвищення міцності вище цього рівня призводить до його різкої крихкості.

Сплав VT23 зварюється усіма видами зварювання, з нього виготовляють монолітні, зварні та паяні конструкції. У порівнянні з високоміцними зарубіжними β -сплавами сплав VT23 містять меншу кількість коштовних і дефіцитних легуючих елементів, що мають вищий комплекс механічних і експлуатаційних характеристик основного матеріалу та особливо зварних з'єднань, а також підвищені характеристики тріщиностійкості. У цього сплаву температура поліморфного перетворення становить 900...920 °С, тому при охолодженні формується досить великий розмір поліедров α -фази, здатних максимально змінювати напрямок тріщини та призводити до її розгалуження [134].

Високоміцний зварюваний сплав VT23 є сплавом широкого застосування; використовується в монолітних, зварних і паяних конструкціях літаків, ракет і космічних апаратів.

Перспективний вітчизняний високоміцний титановий сплав T110 створено в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Особливості титанового сплаву

Таблиця 1.2. Механічні властивості титанових сплавів

Сплав	Напівфабрикат	Вид термічної обробки	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU , Дж/см ²
BT9	пруток	відпал	930...980	–	6...7	15...16	20...25
BT14	лист, пруток	відпал	865...1080	–	8...10	25...35	30...45
BT20	лист, пруток	відпал	885...1130	–	6...10	10...25	20...40
BT23	лист	відпал	980...1225	–	>8	–	–
T110	лист	відпал	1100	1060	15...21	50	35...40

T110 — висока питома міцність і працездатність в умовах циклічних навантажень, що перевищує широко використовуваний в авіації сплав BT22 [31, 137]. Сплав створено на основі сировинної бази України, захищений патентом України [138], розроблено технічні умови на виробництво напівфабрикатів з цього сплаву. У стані після прокатки або кування сплав має високу міцність, задовільні пластичність і ударну в'язкість. Подальший відпал призводить до незначного зниження міцності та підвищення пластичності за рахунок зняття наклепу деформації. Зміцнююча термічна обробка сприяє підвищенню міцності сплаву після відпалу. При цьому зберігається високий рівень пластичності, а ударна в'язкість сплаву перевищує значення в'язкості в стані після прокатки [31, 139, 140].

Основні області застосування нового сплаву T110: виготовлення високонавантажених силових вузлів авіакосмічної техніки; в атомній енергетичній промисловості при виготовленні корпусів реакторів; авіаційних двигунів; спецвиробів, що працюють в умовах імпульсного високотемпературного навантаження, а також збірних зварних елементів бронезахисту екіпажів літаків і бронезасобів індивідуального захисту особового складу. Крім того, висока корозійна стійкість, притаманна всім титановим сплавам, низька теплопровідність, а також висока технологічність дозволяють застосувати його в нафтохімічній промисловості, у спорудженні платформ з видобутку нафти та газу на шельфі, у створенні бурового та обсадного обладнання при бурінні, при спорудженні глибоководних апаратів. Механічні властивості сплавів наведено в табл. 1.2.

1.6. КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ УСТАНОВОК ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ ЗЛИВКІВ СПЛАВІВ ТИТАНУ

В ІЕЗ ім. Е.О. Патона НАН України для проведення фундаментальних науково-дослідних робіт з вивчення металургійних процесів у вакуумі, покращення існуючих і розробки нових технологічних процесів, а також вдосконалення техніки ЕПП використовуються електронно-променеві установки лабораторного та промислового типу [104], в яких плавка здійснюється у вакуумі 0.1...0.01 Па,



Рис. 1.16. Зовнішній вигляд промислової електронно-променевої установки UE-5812

що практично виключає додаткове забруднення титану газовими домішками та дозволяє використовувати в якості вихідної шихти до 100 % брухту й губчастого титану зниженої якості без його попереднього пресування у витратний електрод [141, 142], а також дозволяє виплавляти зливки титанових сплавів як круглого, так і квадратного перерізу, та зливки-сляби [104, 143].

Промислова установка UE-5812. Для проведення плавки злиwkів \varnothing 400 мм високоміцних сплавів титану використовувалася промислова електронно-променевою установка UE-5812 (рис. 1.16), оснащена проміжною ємністю [144]. Конструкція UE-5812 відрізняється від раніше розроблених і експлуатованих у промисловості України установок вищим рівнем технічних та економічних характеристик. В UE-5812 штокові механізми подачі в зону плавки сировини та витягування зливка замінено на ланцюгові. Це дозволило при тій же продуктивності процесу зменшити вдвічі габарити камер завантаження та зливка, що значно зменшило монтажний простір, і збільшити масу злиwkів, що виплавляються, у два рази. Крім того, установка відрізняється високою функціональністю при проведенні деяких технологічних процесів плавки, яка досягається шляхом нескладної заміни однієї оснастки іншою, зокрема дозволяє проводити плавку злиwkів круглого перерізу 100...600 мм, злиwkів прямокутного перерізу — розміром від 80×400 до 1100×300 мм і завдовжки до 4 м.

Конструктивно електронно-променевою установка UE-5812 складається з: плавильної камери, камери заготовки і камери зливка (рис. 1.17). Усі елементи конструкції виконано з порожніми стінками, в яких циркулює вода для примусового охолодження під час плавки та охолодження зливка. Основні параметри установки наведено в табл. 1.3. Вакуумна система установки UE-5812 дозволяє створити розрідження в об'ємі плавильної камери (10^{-2} Па) і гарматах (10^{-3} Па), яке забезпечує безперебійну роботу гармат і необхідний ступінь рафінування металу, що переплавляється, впродовж всього технологічного процесу.

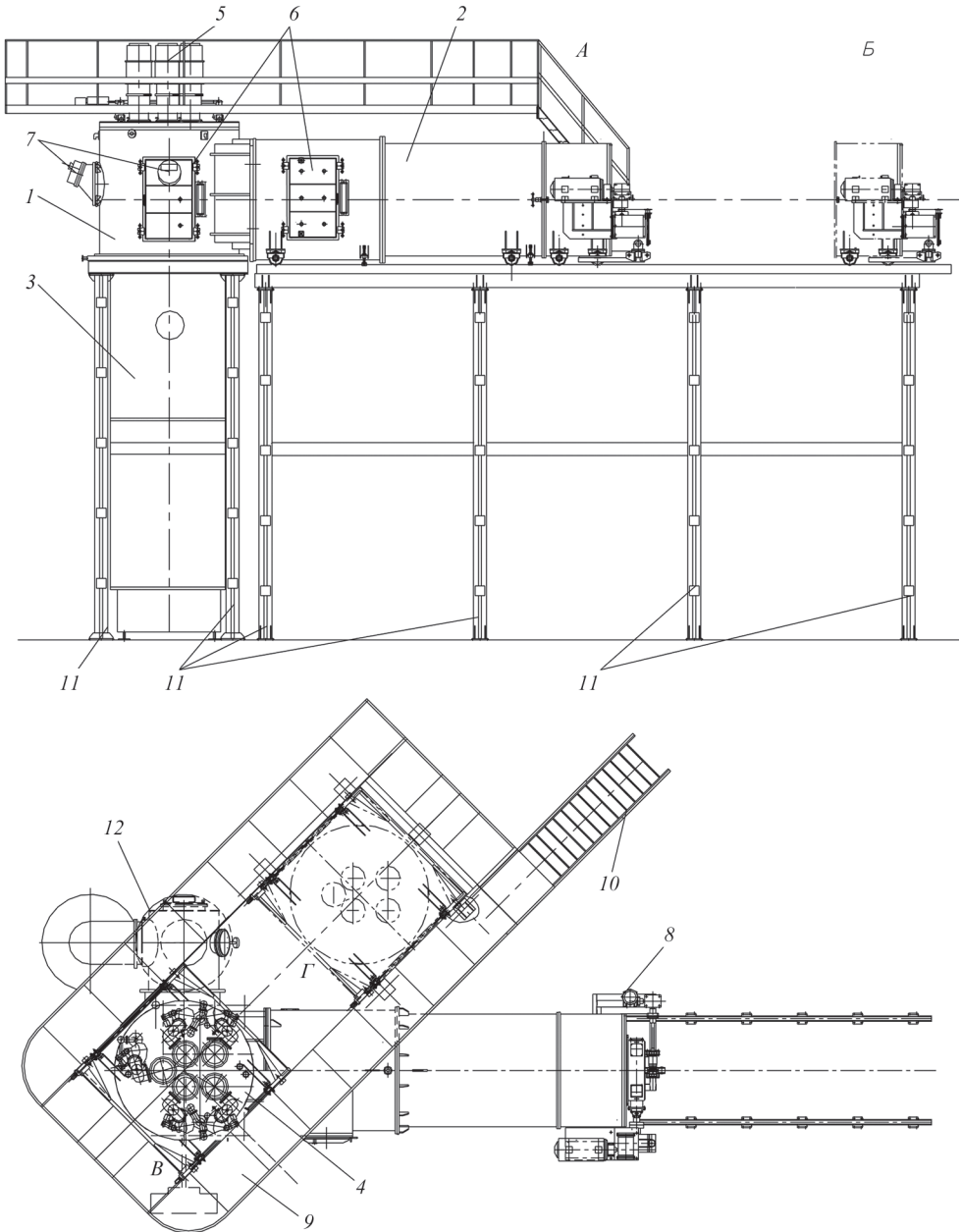


Рис. 1.17. Схема електронно-променевої установки UE-5812: 1 — камера плавки; 2 — камера заготовки (у закритому А і відкритому Б вигляді); 3 — камера зливка; 4 — плита гармат (у закритому В і відкритому Г вигляді); 5 — електронно-променеві гармати; 6 — технологічні двері; 7 — системи оглядові; 8 — привод переміщення камери заготовки; 9 — майданчик обслуговування гармат; 10 — сходи; 11 — колони опорні; 12 — перехідник до бустерних насосів

Таблиця 1.3. Технічні характеристики електронно-променевої установки УЕ-5812

Показник	Значення
Встановлена потужність, кВ·А	1500
Прискорююча напруга, кВ	30
Кількість гармат, шт.	5
Найбільші розміри заготовки, м: довжина переріз	5.3 0.55×0.8
Найбільші розміри зливків, м: довжина діаметр для прямокутного перерізу	4.0 0.6 1.1×0.3
Робочий вакуум у камері плавки, Па	$(6.6...13) \cdot 10^{-2}$
Габарити установки, м	14×8×5

Установка УЕ-5812 оснащена електронно-променевими гарматами «Патон-300». Гармати «Патон-300» (рис. 1.18, табл. 1.4) являють собою електронно-променеві нагрівачі аксіального типу [104]. Кожна гармата складається з: катодного вузла з вольфрамовим електродом, встановленого на високовольтно-му ізоляторі; анодного водоохолоджуваного вузла; магнітної лінзи, що відхиляє промінь; променевода та оснащена індивідуальною системою відкачування, яка дозволяє стабілізувати роботу гармати в умовах інтенсивного газовиділення в процесі плавки шихтових матеріалів.

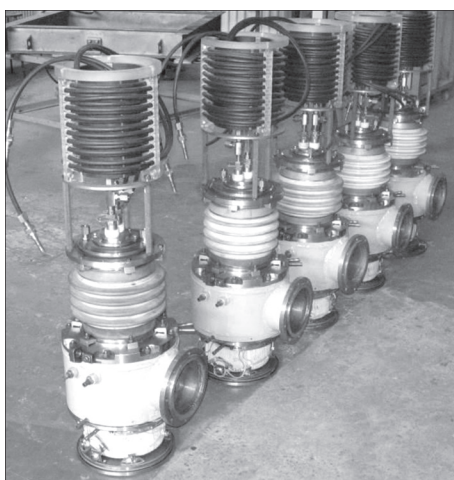


Рис. 1.18. Електронні гармати «Патон-300»

Таблиця 1.4. Технічні характеристики гармати «Патон-300»

Показник	Значення
Номінальна потужність, кВт	300
Прискорююча напруга, кВ	30
Максимальна частота розгортки, Гц	1000
Максимальна сила струму, А	10
Кут відхилення пучка від осі гармати, град.	0...35

Електроживлення гармат здійснюється за допомогою високовольтних джерел постійної напруги 30 кВ, що складаються з: комутаційної пускозахисної апаратури, тиристорних ключів, дроселів, трансформаторів, випрямлячів і джерел накаливання катодів гармат.

Електронно-променева установка УЕ-5812 є високопродуктивним агрегатом промислового типу для плавки металів і сплавів з проміжною ємністю. У якості шихтових матеріалів можуть бути використані наступні: цілісна витратна заготовка; кускові відходи; насипні матеріали; недроблені блоки губчастого титану масою до 1 тонни кожен. Конструкція установки дозволяє виплавляти зливки як круглого, так і прямокутного перерізів зі сплавів на основі заліза, нікелю, титану й тугоплавких металів.

Електронно-променева установка УЕ-121. Для проведення експериментальних досліджень була використана багатоцільова електронно-променева установка УЕ-121 [145], яка забезпечує можливість проведення декількох технологічних процесів на одній установці (рис. 1.19). Конструкція електронно-променевої установки та змінне технологічне обладнання дозволяють здійснювати наступні технологічні процеси: переплав металу безпосередньо в круглий або прямокутний кристалізатор; виплавку круглих і прямокутних злиwkів із застосуванням проміжної ємності; вилівку злиwkів у горизонтальну форму, у тому числі біметалевих і багатошарових; переробку кускових відходів металу та стружки, а також виплавку сплавів із різної шихти. Технічні характеристики установки наведено в табл. 1.5. Конструктивно установка складається із трьох камер — плавки, завантаження та зливка. Усі елементи конструкції мають порожнисті стінки, в яких циркулює вода для примусового охолодження зливка під час плавки й остигання. Установка оснащена також блоком електроживлення, вакуумною системою, системами керування та стабілізації.

Плавильна камера є центральною частиною установки, в якій і реалізується процес плавки. Вона являє собою вертикально розташований циліндр діаметром 2.0 м і заввишки 1.5 м, обмежений зверху та знизу вакуум-щільними кришками. Товщина стінок камери дозволяє повністю виключити проникнення назовні вторинного рентгенівського випромінювання, яке виникає внаслідок гальмування електронів об матеріал, що переплавляється. Усередині камери знаходиться технологічне оснащення, що складається з кристалізатора та

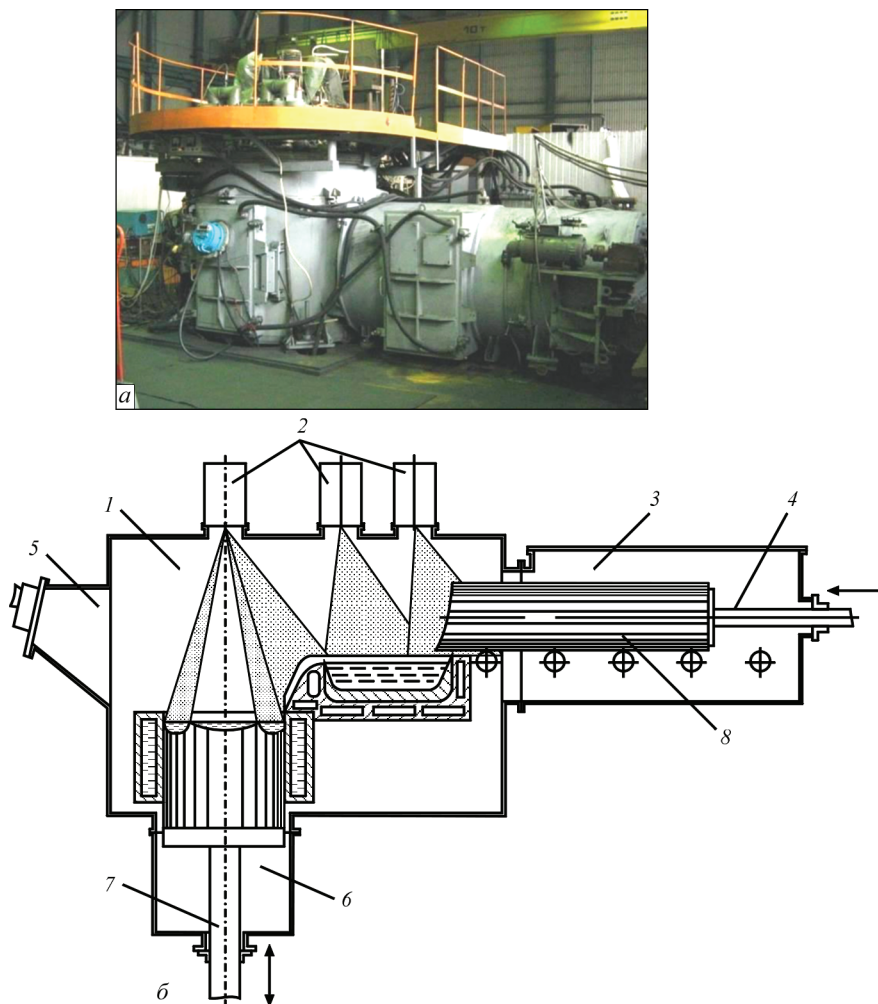


Рис. 1.19. Зовнішній вигляд (а) і схема установки (б) УЕ-121: 1 — камера плавки; 2 — електронні гармати; 3 — камера заготовки; 4 — механізм подачі заготовки; 5 — оглядова система; 6 — камера зливка; 7 — механізм витягування зливка; 8 — рольганг

проміжної ємності. На верхній кришці встановлено три електронно-променеві гармати «Патон-300».

Для відводу верхньої кришки з розташованими на ній електронно-променевими гарматами за межі плавильної камери застосовано рейкову систему. Завдяки їй можливе витягування готового зливка з камери за допомогою цехового крана, а також очищення внутрішніх поверхонь кришки та гармат від конденсату, що осідає на них у процесі плавки. До технологічного отвору в нижній кришці приєднано камеру зливка. Через наявні на нижній кришці штуцери,

Таблиця 1.5. Технічні характеристики електронно-променевої установки УЕ-121

Показники	Значення
Встановлена потужність, кВ·А	1200
Прискорююча напруга, кВ	30
Кількість гармат, шт.	3
Максимальні розміри заготовки, м: довжина переріз	2.2 0.5×0.45
Максимальні розміри зливка, м: довжина діаметр прямокутний переріз	2.1 0.5 0.6×0.3
Продуктивність високовакуумної системи відкачки, л/с	18000
Робочий вакуум, Па: у гарматах у камері плавки	$(6.6...13) \cdot 10^{-3}$ $(6.6...13) \cdot 10^{-2}$
Максимальна витрата охолодної води, м ³ /год	80
Габарити установки, м	14×8×5

призначені для охолодження, у кристалізатор і проміжну ємність за допомогою системи гнучких шлангів подається вода.

На бічній стінці камери розташовано оглядову систему (стробоскопічного типу) оператора, роз'єми для введення термопар і лампи-манометри. Ліворуч від місця оператора в стінці камери є патрубок ДУ630, через який за допомогою вакуумного затвора камера плавки з'єднується з системою відкачки. Праворуч від місця оператора на бічній стінці камери знаходяться вакуум-щільні технологічні двері розміром 1.8×1.0 м, на яких розташовано оглядову систему, що використовується технологом для спостереження за процесом плавки. Навпроти місця оператора камера плавки з'єднується з камерою завантаження.

Камера завантаження є порожнім паралелепіпедом і складається з двох частин, з'єднаних між собою вакуумним ущільненням. Її загальна довжина становить 2.2 м. Для проведення завантаження шихти зазначені частини камери розкріплюються після звільнення затискачів, розташованих по периметру ущільнення, потім задня частина камери завантаження відокремлюється й від'їжджає за допомогою електропривода. У камері завантаження розміщено механізм подачі шихти, що відкочується разом з відокремлюваною частиною камери. Механізм подачі шихти являє собою ряд паралельних направляючих, уздовж яких за допомогою ланцюгової передачі переміщується штовхач. Завдяки механізму подачі можна подавати цільну заготовку, витратний короб із



Рис. 1.20. Технологічна оснастка для процесу електронно-променевого переплаву

шихтовими матеріалами, кускову шихту та насипні матеріали, наприклад губчатий титан. Завдяки розстикуванню камери завантаження можна оперативно завантажувати шихту, використовуючи цеховий кран.

Камера зливка являє собою водоохолоджуваний циліндр діаметром 1.4 м, що кріпиться до нижньої кришки камери плавки через фланець. У камеру зливка через вакуумне ущільнення знизу вводиться шток, на верхній частині якого розташовано мідний водоохолоджуваний піддон. Піддон закріплений у камері зливка за допомогою двох траверс, з'єднаних між собою гвинтовими тягами. Зовні камери зливка розташовано привод, який за допомогою гвинтових тяг переміщує шток у вертикальному напрямку для витягування зливка в процесі плавки. Привод складається з електродвигуна та редуктора. Перед початком плавки на піддоні кріпляться «закладні», виготовлені з матеріалу зливка, що виплавляється.

Технологічна оснастка, в якій відбувається процес електронно-променевого переплаву, складається із проміжної ємності та кристалізатора (рис. 1.20). У стінках проміжної ємності (холодний під) є проріз для зливу рідкого металу (зливний носик). У вказану ємність сплавляється шихта, що подається із камери завантаження. Проміжна ємність слугує для усереднення хімічного складу, рафінування розплаву від домішок (у тому числі й газових) і включень [104]. У процесі плавки в ємності утворюється гарнісаж, що охороняє її стінки та дно від взаємодії з розплавленим металом. Метал із проміжної ємності зливається в кристалізатор, що являє собою порожній замкнутий контур. Його внутрішня частина, яка контактує з металом зливка, виконана з міді, що водоохолоджується. Проміжна ємність і кристалізатор становлять єдиний вузол, змонтований на сталевій рамі, яка закріплена в камері плавки. Конструктивна схема кріплення обладнання усередині камери дозволяє оперативно замінити його вузли при зміні розмірів злиwkів.

Вакуумна система установки УЕ-121 (рис. 1.21) містить у собі вакуумні магістралі, затвори та насоси — механічні, пароструменеві й дифузійні. Магістралі складаються зі сталевих труб, що з'єднують насоси між собою, а також

з камерою плавки й гарматами. Магістралі забезпечують необхідні прохідні перетини для максимального використання продуктивності насосів. Вакуумування внутрішніх порожнин камер установки від рівня атмосферного тиску здійснюється механічним насосом РВН-6. Завдяки його продуктивності в камері плавки залишковий тиск $3 \cdot 10^4$ Па досягається протягом 10 хв. Для подальшого вакуумування установки та видалення газів і парів металу під час плавки використовується основна магістраль, що складається з механічних насосів НВЗ-300 (2 шт.), 2ДВН 1500 (2 шт.), а також пароструменевого 2НВБМ 630 (1 шт.) і дифузійного Н-160 (3 шт.) насосів.

Вакуумна система установки УЕ-121 дозволяє створити в об'ємі плавильної камери тиск $1 \cdot 10^{-2}$ Па, а в гарматах — $1 \cdot 10^{-3}$ Па. Це забезпечує безперебійну роботу гармат і збереження необхідного рівня рафінування металу, що переплавляється, протягом усього технологічного процесу.

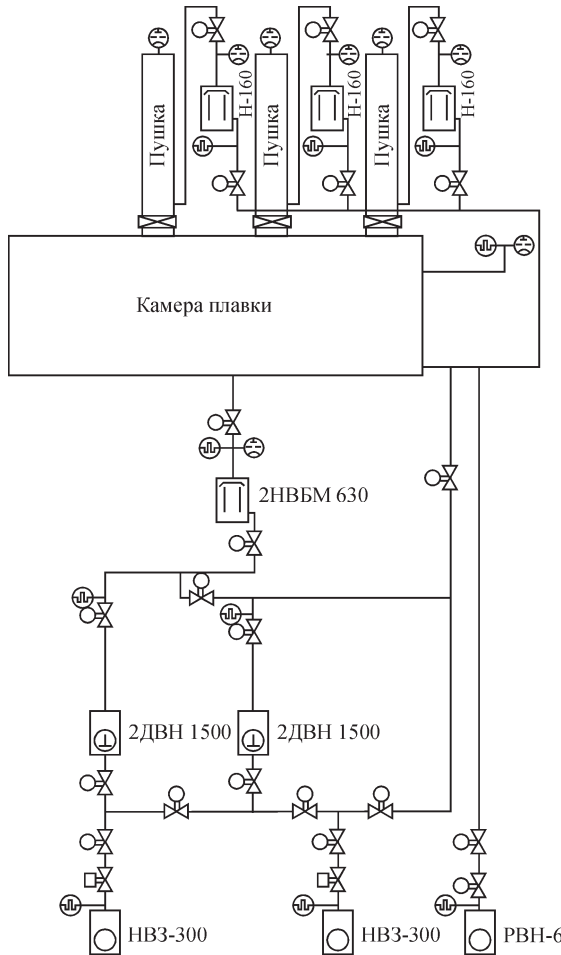


Рис. 1.21. Схема вакуумної системи електронно-променевої установки УЕ-121

Електронно-променева установка УЕ-121 є високопродуктивним агрегатом промислового типу для плавки металів і сплавів із проміжною ємністю. У якості шихтових матеріалів можуть бути використані як цільні витратні заготовки, так і кускові відходи або насипні матеріали. Завдяки оперативній заміні технологічного оснащення на установці можна виплавляти зливки круглого та прямокутного перерізів зі сплавів на основі заліза, нікелю, титану й тугоплавких металів.

Спеціалізована електронно-променева установка УЕ-185. Електронно-променева плавка є прогресивним напрямом металургійного виробництва титанових сплавів, що дозволяє глибше очищати ці матеріали від водню, легких металевих домішок і неметалевих включень. Однак, з ряду причин, обумовлених металургійними та технологічними особливостями, у процесі електронно-променевого переплаву на поверхні отриманих злиwkів виникають дефекти у вигляді гофр, тріщин, поздовжньої смуги заливки металу [146–150]. Причини виникнення цих дефектів досить добре вивчені, але запобігти їх виникненню практично неможливо. Тому необхідна якість поверхні злиwkів і заготовок досягається видаленням поверхневого шару механічною обробкою, що призводить до зниження виходу придатного металу. Вирішення проблеми безвідходного видалення локальних поверхневих дефектів дозволяє скоротити втрати основного металу та цінних легуючих елементів, що має забезпечити значний економічний ефект.

В ІЕЗ ім. Е.О. Патона НАН України розроблено, виготовлено та змонтовано спеціалізовану електронно-променеву установку УЕ-185 [151, 152] для обробки поверхневого шару плоских і круглих злиwkів. Ця установка є вакуумною камерою з механізмами, пристроями та системами, що забезпечують проведення технологічного процесу оплавлення.

Електронно-променева обробка поверхневого шару злиwkів і заготовок має певні переваги: наявність у пічному просторі вакууму захисного та рафінуючого середовища; високу щільність енергії, що підводиться; прецизійність; простоту контролю та керування технологічними параметрами.

Основні вузли й агрегати установки: вакуумна камера; електронно-променеві нагрівачі (ЕПН); механізми переміщень і обертання злиwkів; системи: вакуумна, водоохолодження, електроживлення ЕПН, керування та стабілізації променя. Зовнішній вигляд і схема установки зображені на рис. 1.22 та 1.23, основні технологічні дані наведено в табл. 1.6.

Вакуумна камера оплавлення установки УЕ-185 являє собою горизонтально розташовану циліндричну посудину з подвійними стінками, з'єднаними між собою фланцями, виготовлену із низьковуглецевої сталі. У зазорі між стінками циркулює охолоджуюча вода. Внутрішній діаметр камери 1800 мм, довжина 3000 мм. Товщина стінок вакуумної камери забезпечує жорсткість і надійний захист обслуговуючого персоналу від рентгенівського випромінювання.



Рис. 1.22. Зовнішній вигляд спеціалізованої електронно-променевої установки UE-185 для оплавлення зливків

Вакуумна камера герметизується кришками, на яких встановлені механізми обертання й пересування циліндричних або прямокутних зливків (у залежності від того, який процес необхідно проводити) з одного боку та кришкою без механізмів — з протилежного боку. Знизу камера має два люки, на які встановлюються механізми вертикального переміщення для запобігання прогину зливків прямокутного перерізу в процесі оплавлення. Механізм обертання та пересування циліндричних зливків складається з кришки, яка своєю бічною поверхнею герметично стикується з камерою, а кронштейнами кріпиться до рами відкатного візка. До бічної поверхні кришки, яка стикується з камерою, кріпиться візок. На рамі візка розміщені чотири валки для оплавлення циліндричних зливків. Валки отримують обертальний рух від привода, що має регу-

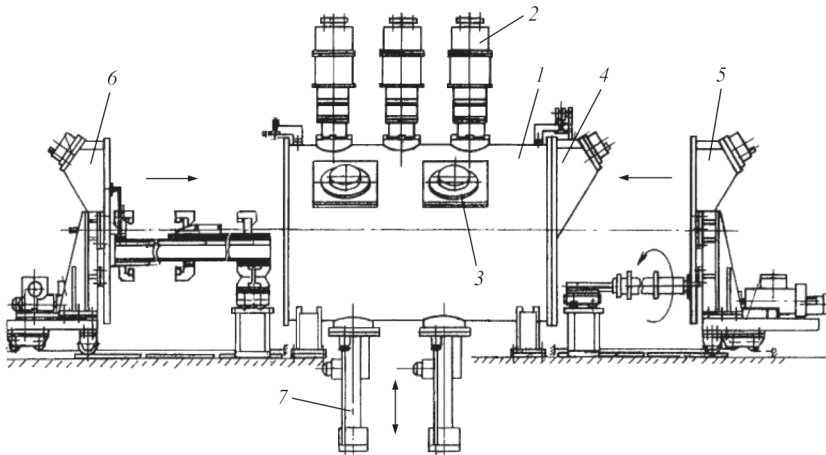


Рис. 1.23. Технологічна схема спеціалізованої електронно-променевої установки для оплавлення зливків: 1 — камера оплавлення; 2 — електронно-променева гармата; 3 — система спостереження; 4 — кришка; 5 — механізм обертання та пересування циліндричних зливків; 6 — механізм обертання та пересування зливків прямокутного перерізу; 7 — механізм вертикального пересування

Таблиця 1.6. Основні технологічні параметри установки

Розміри оплавлених зливків, мм		
Круглі:	діаметр	110...840
	довжина	2000
Прямокутні:	ширина	970
	висота	165
	довжина	2000
Кількість зливків за одне вакуумування:	круглі	1-3
	прямокутні	1
Швидкість обертання зливків, об/хв:	робоча	0.1...0.3
	маршова	10
Величина пересування механізму під завантаження зливка, мм		2150
Тиск залишкових газів, Па (мм рт. ст.):	у порожнині електронних гармат	$1.3 \cdot 10^{-2} \dots 6.6 \cdot 10^{-2}$ ($1 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-4}$)
	у камері оплавлення	$1.3 \cdot 10^{-2} \dots 1.3 \cdot 10^{-1}$ ($1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3}$)
Кількість електронних гармат, шт		3
Робоча прискорююча напруга, кВ		30
Найбільший струм електронного променя гармати, А		10
Встановлена потужність установки, кВА, у тому числі:		570
	Встановлена потужність живлення високовольтного перетворювача	400
	Встановлена потужність систем:	
	керування вакуумом	150
	керування приводами	10
	керування гарматами	10
Тиск охолоджуючої води, Па		$3 \cdot 10^5 \dots 4 \cdot 10^5$
Витрати охолоджуючої води при температурі 15 °С, м³/год		50
Якість охолоджуючої води, кл		6

лювання швидкості обертання, і зубчастої передачі. Відкат механізму вліво або вправо здійснюється приводом з ланцюговою передачею. Кришка має систему спостереження для візуального контролю за технологічним процесом. На бічній поверхні розташовано комплекс системи спостереження, що забезпечує візуальний контроль за технологічним процесом. До камери стикується перехідник, який являє собою водоохолоджувану вакуумну камеру з патрубками для під'єднання вакуумних насосів. Перехідник комплектується запобіжним клапаном, призначеним для випуску газів при виникненні аварійного підвищення тиску в камері плавки.

Кришка являє собою круглу водоохолоджувальну конструкцію, що має систему спостереження та слугує для герметизації камери в процесі оплавлення зливків. За допомогою шарнірної підвіски кришка кріпиться до балки й на роликах має можливість відкочуватися по ній вліво та вправо.

У якості джерела нагріву виступають три аксіальні гармати «Патон-300». Гармати монтуються на водоохолоджувані фланці, розташовані у верхній частині бічної поверхні вакуумної камери оплавлення.

Вакуумна система (рис. 1.24) електронно-променевої установки УЕ-185 дозволяє вакуумувати камеру оплавлення та електронно-променеві нагрівачі. Попереднє розрідження у вакуумній камері створюється системою окремих форвакуумних насосів РВН6, НВЗ 300 і 2ДВН-1500. Вакуумування камери оплавлення здійснюється двома паромасляними бустерними насосами 2НВБМ-630, а порожнин електронно-променевих гармат — трьома високовакуумними дифузійними насосами Н-160.

Розрідження на вихлопних патрубках бустерних і дифузійних насосів створюється та підтримується системою форвакуумних насосів 2ДВН-1500 і НВЗ 300. До складу вакуумної системи також входять вакуумні затвори, за-

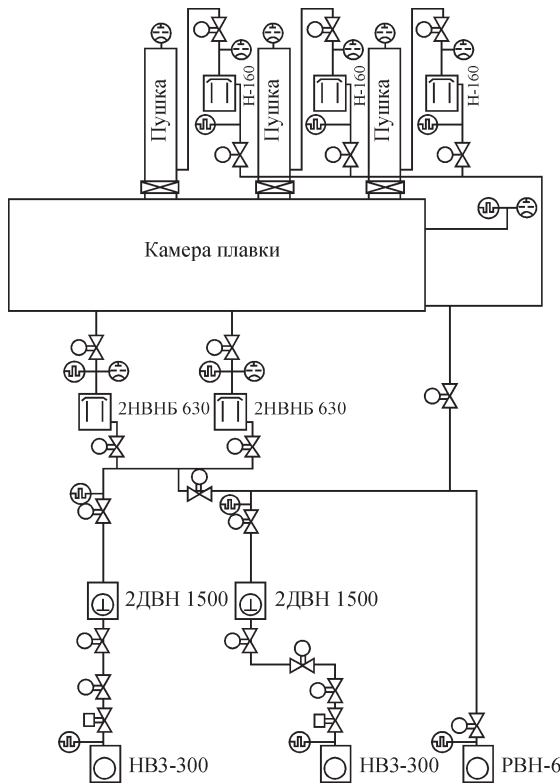


Рис. 1.24. Принципова схема вакуумної системи спеціалізованої електронно-променевої установки для оплавлення зливків

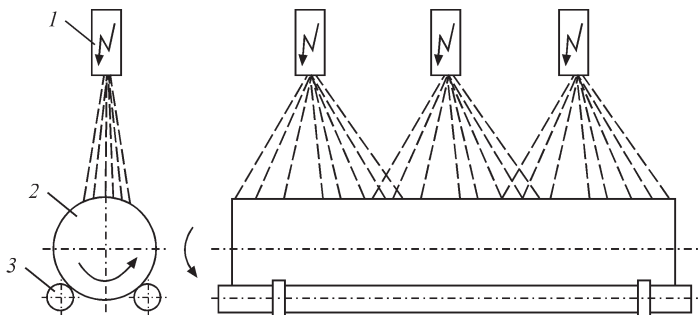


Рис. 1.25. Схема оплавлення зливка: 1 — електронно-променева гармата; 2 — зливоч; 3 — валки

соби контролю вакууму (термопарні ПМТ-2 та іонізаційні ПМІ-2 перетворювачі, вакуумметри ВІТ-3). Вакуумна система забезпечує необхідний діапазон залишкового тиску для проведення технологічного процесу, швидко ліквідує підвищення тиску при пікових газовиділеннях із розплаву, має достатню надійність в експлуатації і зручна в обслуговуванні. При виході з ладу або при профілактичному ремонті одного з форвакуумних насосів вакуумна система печі дозволяє проводити вакуумування іншим (робочим) насосом.

Система охолодження складається з комплексу гідроблоків і колекторів, що забезпечують подачу та злив охолоджуючої води з камери, механізмів, насосів і теплонавантажених вузлів установки.

Для забезпечення режимів технологічного процесу оплавлення (стабілізації променів гармат, швидкості обертання зливків, керування вакуумними агрегатами, вимірювання ступеня розрідження тощо) слугують стійки, виконані у вигляді шаф.

Оглядова система дозволяє контролювати весь зливоч з чотирьох місць по півколу камери оплавлення. Система обертання зливка дозволяє за одне вакуумування оплавити три зливки діаметром 110...250 мм, два зливки діаметром 300...500 мм та один зливоч діаметром 600...840 мм або один зливоч прямокутного перерізу (сляб).

Оплавлення зливків круглого перерізу здійснюється за схемою, при якій електронний промінь нерухомий, а зливоч обертається навколо своєї осі [104] (рис. 1.25).

Для оплавлення зливків прямокутного перерізу використовується схема, при якій зливоч нерухомий, а промінь сканує поверхню, що оплавляється, за заданим режимом програматора.

Загалом надійна конструкція установки УЕ-185 дозволяє проводити оплавлення різного характеру та має можливість проводити експериментальні дослідження з розробки нових електронно-променевих технологій.

Розділ 2

ПРОЦЕСИ ВИПАРОВУВАННЯ ПРИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІЙ ПЛАВЦІ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

2.1. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСІВ ВИПАРОВУВАННЯ ПРИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІЙ ПЛАВЦІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT9

Розглянемо процеси випаровування при електронно-променевому плавліці титанових сплавів на прикладі виплавки титанового сплаву VT9.

Характерною особливістю технології ЕПП є те, що в процесі плавки взаємодія рідкого металу з вакуумом відбувається на трьох стадіях — на торці витратної заготовки, у проміжній ємності та у кристалізаторі (рис. 2.1) [153]. При цьому час перенесення рідкого металу з торця витратної заготовки в проміжну ємність і з проміжної ємності в кристалізатор незначні і на процеси випаровування практично не впливають [154].

Математична модель процесів випаровування при ЕПП будується на основі рівнянь матеріального балансу алюмінію, титану та інших легуючих елементів для кожної стадії плавки. При цьому зв'язки між стадіями заміняють масовими потоками. Розглянемо виплавку зливка титанового сплаву VT9 системи легування: Ti–Al–Mo–Zr–Si (ваг. %). Нехай у процесі електронно-променевої плавки витратна заготовка з площею поперечного перерізу S_1 (м²) подається в зону плавки над проміжною ємністю з постійною швидкістю m_0 (кг/с) і в ній міститься алюміній концентрації $[Al]_0$ (масова частка), титан концентрації $[Ti]_0$ (масова частка), молібден концентрації $[Mo]_0$ (масова частка), цирконій концентрації $[Zr]_0$ (масова частка), ванадій концентрації $[V]_0$ (масова частка) і кремній концентрації $[Si]_0$ (масова частка). При цьому будемо вважати, що рідкий метал надходить у проміжну ємність і кристалізатор безперервним потоком. У процесі плавки вміст алюмінію в рідкому металі змінюється до концентрації $[Al]_1$ (масова частка) на торці заготовки, $[Al]_2$ (масова частка) у проміжній ємності, $[Al]_3$ (масова частка) у кристалізаторі. Концентрація молібдену в рідкому металі змінюється до

$[Mo]_1$ (масова частка) на торці заготовки, $[Mo]_2$ (масова частка) у проміжній ємності і $[Mo]_3$ (масова частка) у кристалізаторі. Концентрація цирконію в рідкому металі змінюється до $[Zr]_1$ (масова частка) на торці заготовки, $[Zr]_2$ (масова частка) у проміжній ємності і $[Zr]_3$ (масова частка) у кристалізаторі. Концентрація кремнію в рідкому металі змінюється до $[Si]_1$ (масова частка) на торці заготовки, $[Si]_2$ (масова частка) у проміжній ємності і $[Si]_3$ (масова частка) у кристалізаторі. Концентрація титану в рідкому металі змінюється до $[Ti]_1$ (масова частка) на торці заготовки, $[Ti]_2$ (масова частка) у проміжній ємності і $[Ti]_3$ (масова частка) у кристалізаторі. Через те що при кристалізації зі швидкостями, що мають місце при ЕПП, для більшості елементів коефіцієнт розподілу дорівнює одиниці, концентрацію алюмінію, хрому, ванадію, молібдену, цирконію й титану в зливку позначимо як $[Al]_3$, $[Mo]_3$, $[Zr]_3$, $[Si]_3$ і $[Ti]_3$ відповідно.

Рівняння матеріального балансу алюмінію, молібдену, цирконію, кремнію й титану для рідкого металу на торці витратної заготовки має вигляд:

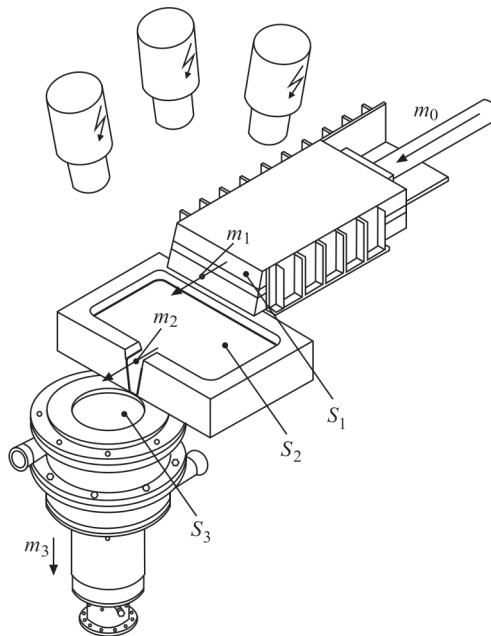


Рис. 2.1. Схема ЕПП з проміжною ємністю: S_1 — площа поперечного перерізу витратної заготовки; S_2 — площа вільної поверхні рідкого металу в проміжній ємності; S_3 — площа вільної поверхні рідкого металу в кристалізаторі; m_0 — масова швидкість подачі витратної заготовки; m_1 — масова швидкість надходження розплаву з торця заготовки в проміжну ємність; m_2 — масова швидкість надходження розплаву з проміжної ємності в кристалізатор; m_3 — масова швидкість твердіння розплаву в кристалізаторі

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_1} \rho[\text{Al}]_1 dV &= m_0 [\text{Al}]_0 - S_1 \pi_1^{\text{Al}} - m_1 [\text{Al}]_1; \\
\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_1} \rho[\text{Mo}]_1 dV &= m_0 [\text{Mo}]_0 - S_1 \pi_1^{\text{Mo}} - m_1 [\text{Mo}]_1; \\
\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_1} \rho[\text{Zr}]_1 dV &= m_0 [\text{Zr}]_0 - S_1 \pi_1^{\text{Zr}} - m_1 [\text{Zr}]_1; \\
\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_1} \rho[\text{Si}]_1 dV &= m_0 [\text{Si}]_0 - S_1 \pi_1^{\text{Si}} - m_1 [\text{Si}]_1; \\
\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_1} \rho[\text{Ti}]_1 dV &= m_0 [\text{Ti}]_0 - S_1 \pi_1^{\text{Ti}} - m_1 [\text{Ti}]_1,
\end{aligned} \tag{2.1}$$

де V_1 — об'єм рідкого металу на торці заготовки, м³; ρ — щільність розплаву, кг/м³; S_1 — площа рідкого металу на торці заготовки, м²; π_1^{Al} , π_1^{Mo} , π_1^{Zr} , π_1^{Si} , π_1^{Ti} — питомі потоки алюмінію, молібдену, цирконію, кремнію й титану через міжфазову поверхню в парову фазу, кг/(с·м²); m_1 — масова швидкість надходження розплаву з торця заготовки в проміжну ємність, кг/с.

Записавши рівняння матеріального балансу алюмінію, молібдену, цирконію, кремнію й титану для рідкого металу в проміжній ємності, отримаємо:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_2} \rho[\text{Al}]_2 dV &= m_1 [\text{Al}]_1 - S_2 \pi_2^{\text{Al}} - m_2 [\text{Al}]_2; \\
\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_2} \rho[\text{Mo}]_2 dV &= m_1 [\text{Mo}]_1 - S_2 \pi_2^{\text{Mo}} - m_2 [\text{Mo}]_2; \\
\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_2} \rho[\text{Zr}]_2 dV &= m_1 [\text{Zr}]_1 - S_2 \pi_2^{\text{Zr}} - m_2 [\text{Zr}]_2; \\
\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_2} \rho[\text{Si}]_2 dV &= m_1 [\text{Si}]_1 - S_2 \pi_2^{\text{Si}} - m_2 [\text{Si}]_2; \\
\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_2} \rho[\text{Ti}]_2 dV &= m_1 [\text{Ti}]_1 - S_2 \pi_2^{\text{Ti}} - m_2 [\text{Ti}]_2,
\end{aligned} \tag{2.2}$$

де V_2 — об'єм рідкого металу в проміжній ємності, м³; S_2 — площа вільної поверхні рідкого металу в проміжній ємності, м²; π_2^{Al} , π_2^{Mo} , π_2^{Zr} , π_2^{Si} , π_2^{Ti} — питомі потоки алюмінію, молібдену, цирконію, кремнію й титану з проміжної ємності в парову фазу, кг/(с·м²); m_2 — масова швидкості надходження розплаву з проміжної ємності в кристалізатор, кг/с.

Для розплаву в кристалізаторі рівняння матеріального балансу алюмінію, молібдену, цирконію, кремнію й титану, з урахуванням затвердіння розплаву на фронті кристалізації, матимуть вигляд:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_3} \rho[\text{Al}]_3 dV &= m_2 [\text{Al}]_2 - S_3 \pi_3^{\text{Al}} - m_3 [\text{Al}]_3; \\
 \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_3} \rho[\text{Mo}]_3 dV &= m_2 [\text{Mo}]_2 - S_3 \pi_3^{\text{Mo}} - m_3 [\text{Mo}]_3; \\
 \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_3} \rho[\text{Zr}]_3 dV &= m_2 [\text{Zr}]_2 - S_3 \pi_3^{\text{Zr}} - m_3 [\text{Zr}]_3; \\
 \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_3} \rho[\text{Si}]_3 dV &= m_2 [\text{Si}]_2 - S_3 \pi_3^{\text{Si}} - m_3 [\text{Si}]_3; \\
 \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_3} \rho[\text{Ti}]_3 dV &= m_2 [\text{Ti}]_2 - S_3 \pi_3^{\text{Ti}} - m_3 [\text{Ti}]_3,
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

де V_3 — об'єм рідкого металу в кристалізаторі, м^3 ; S_3 — площа вільної поверхні рідкого металу в кристалізаторі, м^2 ; π_3^{Al} , π_3^{Mo} , π_3^{Zr} , π_3^{Si} , π_3^{Ti} — питомі потоки алюмінію, молібдену, цирконію, кремнію й титану з кристалізатора в парову фазу, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$; m_3 — масова швидкість твердіння розплаву в кристалізаторі, $\text{кг}/\text{с}$.

При стаціонарних умовах плавки хімічний склад розплаву в кожній зоні рафінування залишається незмінним у часі, тобто повинні виконуватися наступні рівності [155]:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_1} \rho[\text{Al}]_1 dV &= \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_2} \rho[\text{Al}]_2 dV = \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_3} \rho[\text{Al}]_3 dV = 0; \\
 \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_1} \rho[\text{Mo}]_1 dV &= \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_2} \rho[\text{Mo}]_2 dV = \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_3} \rho[\text{Mo}]_3 dV = 0; \\
 \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_1} \rho[\text{Zr}]_1 dV &= \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_2} \rho[\text{Zr}]_2 dV = \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_3} \rho[\text{Zr}]_3 dV = 0; \\
 \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_1} \rho[\text{Si}]_1 dV &= \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_2} \rho[\text{Si}]_2 dV = \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_3} \rho[\text{Si}]_3 dV = 0; \\
 \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_1} \rho[\text{Ti}]_1 dV &= \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_2} \rho[\text{Ti}]_2 dV = \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{V_3} \rho[\text{Ti}]_3 dV = 0.
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Оскільки для кожної зони рафінування виконується умова:

$$[\text{Ti}]_j + [\text{Al}]_j + [\text{Mo}]_j + [\text{Zr}]_j + [\text{Si}]_j = 1, \tag{2.5}$$

де $j = 1, 2, 3$ — зони рафінування, то при сталих режимах плавки, відповідно до рівнянь (2.1)–(2.4), масові потоки металу між зонами рафінування будуть пов'язані такими співвідношеннями:

$$\begin{aligned} m_1 &= m_0 - S_1(\pi_1^{\text{Al}} + \pi_1^{\text{Mo}} + \pi_1^{\text{Zr}} + \pi_1^{\text{Si}} + \pi_1^{\text{Ti}}); \\ m_2 &= m_1 - S_2(\pi_2^{\text{Al}} + \pi_2^{\text{Mo}} + \pi_2^{\text{Zr}} + \pi_2^{\text{Si}} + \pi_2^{\text{Ti}}); \\ m_3 &= m_2 - S_3(\pi_3^{\text{Al}} + \pi_3^{\text{Mo}} + \pi_3^{\text{Zr}} + \pi_3^{\text{Si}} + \pi_3^{\text{Ti}}). \end{aligned} \quad (2.6)$$

У камері плавки електронно-променевої установок тиск залишкових газів становить 0.01...0.1 Па. При такому тиску довжина вільного пробігу атомів (λ) більша за характерний розмір вакуумної камери, тому зіткненням атомів у паровій фазі можна знехтувати та, отже, має місце молекулярний режим випаровування [156, 157]. У цьому випадку питома масова швидкість випаровування компонентів сплаву з поверхні в парову фазу J_{ev} (кг/(с·м²)) буде пропорційна їхній концентрації у розплаві та визначатися рівнянням Ленгмюра [158, 159]:

$$J_{ev} = \alpha_c p_i^0 \gamma_i N_i \sqrt{M_i / 2\pi RT}, \quad (2.7)$$

де α_c — коефіцієнт конденсації; N_i — мольна доля i -го елемента; p_i^0 — рівноважна пружність пари i -го елемента, Па; γ_i — коефіцієнт активності i -го елемента; M_i — атомна маса легуючого елемента, кг/моль; R — універсальна газова постійна, Дж/(моль·К); T — температура розплаву, К.

Мольна доля i -го елемента в розплаві сплаву ВТ9 пов'язана з його масовою концентрацією $[X_i]$ наступним співвідношенням:

$$N_i = \frac{[X_i] / M_i}{[\text{Ti}] / M_{\text{Ti}} + [\text{Al}] / M_{\text{Al}} + [\text{Mo}] / M_{\text{Mo}} + [\text{Zr}] / M_{\text{Zr}} + [\text{Si}] / M_{\text{Si}}}, \quad (2.8)$$

де M_{Ti} , M_{Al} , M_{Mo} , M_{Zr} , M_{Si} — атомні маси титану, алюмінію, молібдену, цирконію й кремнію відповідно, кг/моль. З урахуванням виразу (2.5), після нескладних перетворень, рівняння (2.8) можна записати в наступному вигляді:

$$N_i = k_c \frac{M_{\text{Ti}}}{M_i} [X_i], \quad (2.9)$$

де k_c — коефіцієнт, значення якого залежить від хімічного складу розплаву та визначається рівнянням:

$$k_c = \frac{1}{1 + [\text{Al}] \left(\frac{M_{\text{Ti}}}{M_{\text{Al}}} - 1 \right) + [\text{Mo}] \left(\frac{M_{\text{Ti}}}{M_{\text{Mo}}} - 1 \right) + [\text{Zr}] \left(\frac{M_{\text{Ti}}}{M_{\text{Zr}}} - 1 \right) + [\text{Si}] \left(\frac{M_{\text{Ti}}}{M_{\text{Si}}} - 1 \right)}.$$

Розрахунок за наведеною вище формулою показав, що для процесу виплавки сплаву ВТ9 складу $Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si$ чисельне значення коефіцієнта дорівнює $k_c = 0.62$.

Виходячи з рівнянь (2.7) і (2.9) і приймаючи значення коефіцієнта конденсації α_c рівним одиниці, питомі потоки молібдену, цирконію, кремнію й титану через міжфазову поверхню в парову фазу в j -й зоні плавки можна навести наступним чином:

$$\begin{aligned} \pi_j^{Mo} &= k_j^{Mo} [Mo]_j; \quad \pi_j^{Zr} = k_j^{Zr} [Zr]_j; \\ \pi_j^{Si} &= k_j^{Si} [Si]_j; \quad \pi_j^{Ti} = k_j^{Ti} [Ti]_j, \end{aligned} \quad (2.10)$$

де

$$\begin{aligned} k_j^{Mo} &= k_c P_{Mo}^0(T_j) \gamma_j^{Mo} \frac{M_{Ti}}{\sqrt{2\pi R M_{Mo} T_j}}; \quad k_j^{Zr} = k_c P_{Zr}^0(T_j) \gamma_j^{Zr} \frac{M_{Ti}}{\sqrt{2\pi R M_{Zr} T_j}}; \\ k_j^{Si} &= k_c P_{Si}^0(T_j) \gamma_j^{Si} \frac{M_{Ti}}{\sqrt{2\pi R M_{Si} T_j}}; \quad k_j^{Ti} = k_c P_{Ti}^0(T_j) \gamma_j^{Ti} \frac{M_{Ti}}{\sqrt{2\pi R T_j}} \end{aligned}$$

є константами швидкості випаровування молібдену, цирконію, кремнію й титану в j -й зоні плавки відповідно, $кг/(с \cdot м^2)$; $P_{Mo}^0, P_{Zr}^0, P_{Si}^0, P_{Ti}^0$ — пружності парів молібдену, цирконію, кремнію й титану в j -й зоні плавки відповідно; $\gamma_i^{Mo}, \gamma_i^{Zr}, \gamma_i^{Si}, \gamma_i^{Ti}$ — коефіцієнти активності молібдену, цирконію, кремнію й титану в j -й зоні плавки відповідно; T_j — температура розплаву в j -й зоні плавки, К.

Пружність пари алюмінію набагато вища за пружність парів титану, молібдену та цирконію. Так, наприклад, для температури 2000 К пружність пари молібдену становить 10^{-6} Па, цирконію — $3.5 \cdot 10^{-4}$ Па, титану — 1 Па, алюмінію — 642 Па. Тому алюміній випаровується набагато інтенсивніше, ніж молібден, цирконій і титан. Внаслідок цього концентрація алюмінію на поверхні розплаву стає набагато меншою від концентрації алюмінію в обсязі розплаву та виникає градієнт концентрації алюмінію в приповерхневому шарі розплаву. У [160] отримано кінетичне рівняння процесу випаровування легуючих елементів, яке одночасно враховує масоперенос у розплаві та фізико-хімічні реакції десорбції з поверхні розплаву. Для розплаву титану питомий потік алюмінію з рідкого металу буде визначатися наступним виразом:

$$\pi_j^{Al} = \rho_{Ti} \beta_j^{Al} [Al]_j, \quad (2.11)$$

де $\beta_j^{Al} = \left(\frac{1}{\beta_{Al}} + \frac{\rho_{Ti}}{k_j^{Al}} \right)^{-1}$ — сумарний коефіцієнт масопереносу алюмінію в рідкому металі в j -й зоні плавки, м/с; β_{Al} — коефіцієнт масопереносу алюмінію в розпла-

ві титану, м/с; ρ_{Ti} — щільність розплаву титану, кг/м³; $k_j^{\text{Al}} = k_c \frac{p_{\text{Al}}^0 \gamma_j^{\text{Al}} M_{\text{Ti}}}{\sqrt{2\pi M_{\text{Al}} RT_j}}$ — константа швидкості випаровування алюмінію в j -й зоні плавки, кг/(с·м²); $[\text{Al}]_j$ — концентрація алюмінію в j -й зоні плавки, масова частка; p_{Al}^0 — пружність пари чистого алюмінію; P_{a} ; γ_j^{Al} , — коефіцієнт активності алюмінію в j -ї зоні плавки.

Рівноважні пружності парів алюмінію, молібдену, цирконію, кремнію й титану розраховані за наступними рівняннями [161]:

$$\begin{aligned} \lg p_{\text{Al}}^0 &= -\frac{16379}{T} + 9.979 - 0.335 \lg T; \\ \lg p_{\text{Mo}}^0 &= -\frac{35904}{T} + 12.370 - 0.107 \lg T - \frac{0.363}{1000} T; \\ \lg p_{\text{Zr}}^0 &= -\frac{32541}{T} + 13.966 - 0.847 \lg T - \frac{0.243}{1000} T; \\ \lg p_{\text{Si}}^0 &= -\frac{20542}{T} + 8.783 - 0.019 \lg T; \\ \lg p_{\text{Ti}}^0 &= -\frac{25860}{T} + 12.392 - 0.142 \lg T - \frac{0.551}{1000} T. \end{aligned} \quad (2.12)$$

З урахуванням рівнянь (2.10), (2.11) із системи рівнянь (2.1)–(2.6) отримаємо математичну модель процесів випаровування компонентів сплаву ВТ9 при електронно-променевої плавці з проміжною ємністю:

$$\begin{aligned} m_{j-1} [\text{Al}]_{j-1} &= (S_j \rho_{\text{Ti}} \beta_j^{\text{Al}} + m_j) [\text{Al}]_j; \quad m_{j-1} [\text{Mo}]_{j-1} = (S_j k_j^{\text{Mo}} + m_j) [\text{Mo}]_j; \\ m_{j-1} [\text{Zr}]_{j-1} &= (S_j k_j^{\text{Zr}} + m_j) [\text{Zr}]_j; \quad m_{j-1} [\text{Si}]_{j-1} = (S_j k_j^{\text{Si}} + m_j) [\text{Si}]_j; \\ m_{j-1} [\text{Ti}]_{j-1} &= (S_j k_j^{\text{Ti}} + m_j) [\text{Ti}]_j; \\ m_{j-1} &= m_j + S_j (\rho_{\text{Ti}} \beta_j^{\text{Al}} [\text{Al}]_j + k_j^{\text{Mo}} [\text{Mo}]_j + k_j^{\text{Zr}} [\text{Zr}]_j + k_j^{\text{Si}} [\text{Si}]_j + k_j^{\text{Ti}} [\text{Ti}]_j), \end{aligned} \quad (2.13)$$

де $j = 1, 2, 3$ — стадії процесу випаровування при ЕПП.

Згідно з дослідженнями, проведеними в [162], коефіцієнт масопереносу алюмінію в розплаві титану в умовах електронно-променевої плавки складає $\beta_{\text{Al}} = 6.6 \cdot 10^{-6}$ м/с. Чисельні значення коефіцієнтів активності у рамках моделі Редліха–Кістера [163] для титану, кремнію, цирконію й молібдену можуть бути прийняті рівними одиниці, для алюмінію — 0.3.

Загалом математична модель являє собою систему нелінійних алгебраїчних рівнянь, яку вирішували чисельними методами. Розроблена математична модель (2.13) встановлює залежність концентрації алюмінію, молібдену, цирконію, кремнію й титану в зливку сплаву ВТ9, отриманому методом електронно-променевої

Таблиця 2.1. Фактичний і розрахунковий хімічний склад зливка титанового сплаву ВТ9

Характеристика металу	Вміст елементів, мас. %				
	Al	Mo	Zr	Si	Ti
Вихідна шихта	7.30	3.50	1.36	0.30	Залишок
Зливок ЕПП (експеримент)	6.13	3.57	1.27	0.29	
Зливок ЕПП (розрахунок)	6.36	3.55	1.38	0.30	

плавки з проміжною ємністю, від швидкості плавки, концентрації легуючих елементів у витратній заготовці й температури розплаву. Дана модель дозволяє прогнозувати хімічний склад злиwkів титанового сплаву ВТ9, що виплавляються, і може бути використана для отримання злиwkів з необхідним хімічним складом.

2.2. ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ВИПАРОВУВАННЯ ПРИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІЙ ПЛАВЛЦІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ВТ9

Для перевірки адекватності математичної моделі на електронно-променевої установці УЕ5812 було проведено експериментальну плавку зливку титанового сплаву ВТ9 у кристалізатор \varnothing 600 мм. Масова швидкість плавки складала 510 кг/год, потужність електронно-променевого нагріву поверхні розплаву в кристалізаторі дорівнювала 205 кВт, потужність електронно-променевого нагріву поверхні розплаву в проміжній ємності та на торці вихідної заготовки — 515 кВт.

За допомогою побудованої математичної моделі процесів випаровування при ЕПП титанового сплаву ВТ9 для вищенаведених режимів плавки було визначено розрахунковий вміст легуючих елементів у зливку сплаву ВТ9 \varnothing 600 мм. При розрахунках за математичною моделлю (2.13), зважаючи на високу потужність електронно-променевого нагріву при ЕПП, було прийнято, що перегрів вільної поверхні розплаву в проміжній ємності та кристалізаторі вище за температуру плавлення титану та складає 100 К.

Аналіз хімічного складу отриманого зливка показав, що побудована математична модель описує процес випаровування легуючих елементів з титанового сплаву ВТ9 при ЕПП з досить високим ступенем точності (табл. 2.1). Відносна похибка розрахункових результатів від експериментальних даних при електронно-променевої плавці злиwkів сплаву ВТ9 складала: 4 % (відн.) для алюмінію, менше 1 % (відн.) для молібдену, 9 % (відн.) для цирконію і 3 % (відн.) для кремнію.

2.3. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ НА ХІМІЧНИЙ СКЛАД ЗЛИWKІВ

Для аналізу впливу технологічних параметрів електронно-променевої плавки та хімічного складу початкової шихти на хімічний склад злиwkів, що виплавляються, за допомогою математичної моделі (2.13) були визначені залежно-

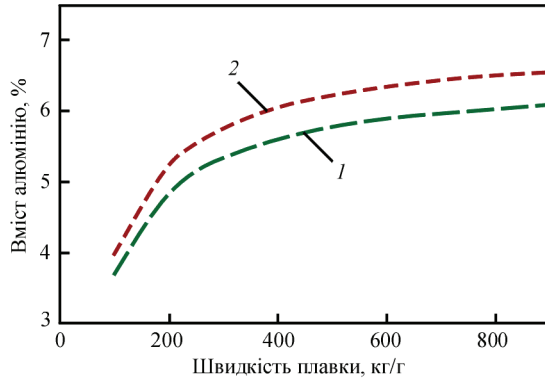


Рис. 2.2. Залежності вмісту алюмінію у зливку сплаву ВТ9 від швидкості плавки при різному вмісті алюмінію в початковій шихті: 1 — $[Al]_0 = 6.5\%$, 2 — $[Al]_0 = 7\%$

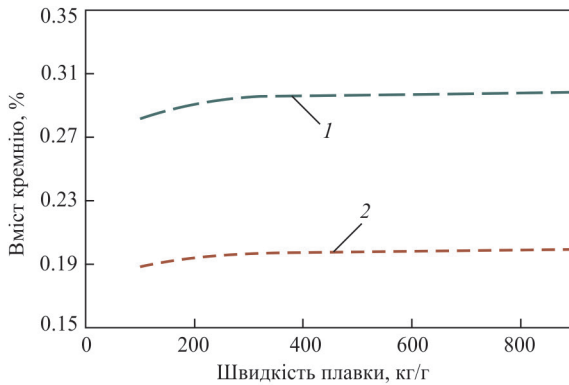


Рис. 2.3. Залежності вмісту кремнію у зливку сплаву ВТ9 від швидкості плавки при різному вмісті кремнію в початковій шихті: 1 — $[Si]_0 = 0.3\%$, 2 — $[Si]_0 = 0.25\%$

сті вмісту легуючих елементів у зливку титанового сплаву ВТ9 Ø 600 мм від швидкості плавки при різному хімічному складі вихідної шихти $[Al]_0$, $[Mo]_0$, $[Zr]_0$, $[Si]_0$ (рис. 2.2–2.5).

Вивчення отриманих результатів розрахунків показує, що втрати легуючих елементів на випаровування залежать від їх фізико-хімічних властивостей: якщо вміст алюмінію та кремнію в процесі плавки зменшується (рис. 2.2, 2.3), то вміст молібдену та цирконію навпаки — збільшується (рис. 2.4, 2.5) у порівнянні з вмістом цих елементів у початковій шихті. Така поведінка легуючих елементів у процесі плавки пояснюється тим, що пружність пари алюмінію та кремнію при заданій температурі вища за пружність пари титану, тоді як пружність пари молібдену та цирконію менша за пружність пари титану. Як наслідок, згідно з законом Ленгмюра [158, 159], швидкість випаровування титану менша за швидкість випаровування алюмінію й кремнію та більша за швидкість випаровування молібдену та цирконію. Тому концентрація алюмінію й

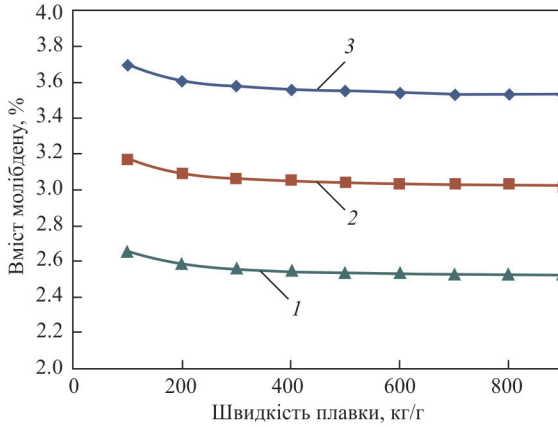


Рис. 2.4. Залежності вмісту молибдену у зливку сплаву VT9 від швидкості плавки при різному вмісті молибдену в початковій шихті: 1 — $[Mo]_0 = 2.5\%$, 2 — $[Mo]_0 = 3.0\%$, 3 — $[Mo]_0 = 3.5\%$

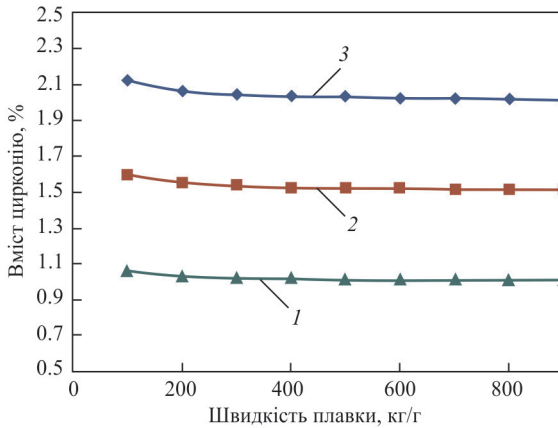


Рис. 2.5. Залежності вмісту цирконію у зливку сплаву VT9 від швидкості плавки при різному вмісті цирконію в початковій шихті: 1 — $[Zr]_0 = 1.0\%$, 2 — $[Zr]_0 = 1.5\%$, 3 — $[Zr]_0 = 2.0\%$

кремнію у зливку ЕПП відповідно зменшується у порівнянні з їх концентрацією в початковій шихті, а концентрація молибдену та цирконію — збільшується.

Для оптимізації процесу ЕПП титанового сплаву VT9 критично важливим є вивчення поведінки такого легуючого елементу як алюміній. Це обумовлено втратами алюмінію при ЕПП і значним впливом алюмінію на структуру та механічні властивості титанових сплавів.

Залежність вмісту алюмінію у зливку ЕПП від швидкості плавки має нелінійний характер. При фіксованому складі вихідної шихти та при невеликих швидкостях плавки (до 300 кг/год) втрати алюмінію на випаровування досить суттєві й сильно залежать від швидкості плавки (рис. 2.2). Так, наприклад, при вмісті алюмінію в початковій шихті 7% зменшення швидкості плавки з 300 до 100 кг/год призводить до збільшення втрат алюмінію на випаровування з

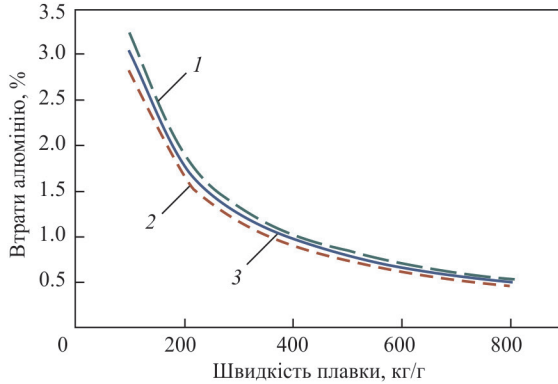


Рис. 2.6. Втрати алюмінію випаровуванням у залежності від швидкості плавки при різній концентрації алюмінію в початковій шихті: 1 — $[Al]_0 = 7.5\%$, 2 — $[Al]_0 = 6.5\%$, 3 — $[Al]_0 = 7\%$

1.25 до 3 %, тобто в 2.4 рази. При швидкостях плавки понад 300 кг/год втрати алюмінію на випаровування значно менші, а їх залежність від швидкості плавки доволі слабка. При збільшенні швидкості плавки з 400 до 600 кг/год втрати алюмінію на випаровування зменшуються з 0.96 до 0.66 %, тобто в 1.5 рази.

Слід зазначити, що втрати алюмінію випаровуванням сильно залежать від швидкості плавки, тобто часу знаходження титану в рідкому стані, коли алюміній інтенсивно випаровується з розплаву (рис. 2.6).

Незважаючи на відносно слабку залежність втрат алюмінію випаровуванням від концентрації алюмінію в початковій шихті (рис. 2.6), детальний аналіз залежності цих втрат показав (рис. 2.7), що чим більше вміст алюмінію в початковій шихті, тим більші втрати алюмінію на випаровування.

Аналіз втрат алюмінію на випаровування на кожній стадії ЕПП (рис. 2.8) показав, що у залежності від швидкості плавки відносні втрати алюмінію випаровуванням складають на торці заготовки, що витрачається, приблизно

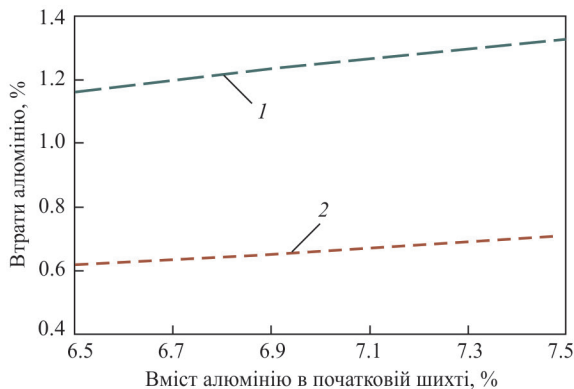


Рис. 2.7. Втрати алюмінію випаровуванням у залежності від вмісту алюмінію в початковій шихті при швидкості плавки, кг/г: 1 — 300, 2 — 600

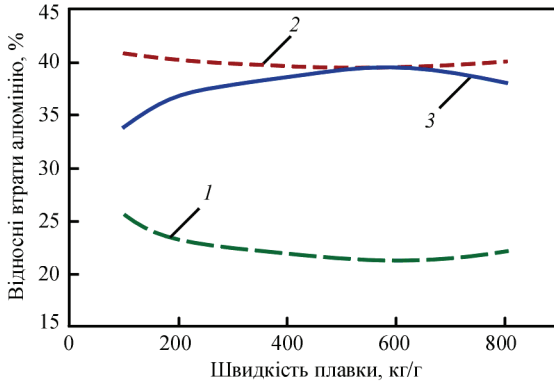


Рис. 2.8. Відносні втрати алюмінію випаровуванням на торці електрода, що витрачається, у проміжній ємності та кристалізаторі у залежності від швидкості плавки: 1 — електрод; 2 — проміжна ємність; 3 — кристалізатор

20...25 % від загальних втрат алюмінію в процесі ЕПП; відносні втрати алюмінію випаровуванням у проміжній ємності складають 39...40 % від загальних втрат алюмінію, а в кристалізаторі — 34...39 %. Такий розподіл втрат алюмінію між стадіями плавки слабо залежить від швидкості плавки та обумовлюється, у першу чергу, площею вільної поверхні розплаву на кожній стадії плавки, з якої відбувається випаровування алюмінію. Даний факт необхідно враховувати при проектуванні технологічного оснащення для виплавки зливок методом ЕПП.

Таким чином, за результатами проведеного аналізу можна зробити висновок, що основним чинником, який впливає на концентрацію алюмінію у зливку ЕПП, є його вміст у початковій шихті та швидкість плавки. За результатами аналізу проведених розрахунків встановлено, що концентрація таких легуючих елементів сплаву ВТ9 як молібден, цирконій і кремній при швидкості плавки більше ніж 300 кг/год у зливку ЕПП практично не змінюється (рис. 2.3–2.5). Слід зазначити, що при швидкостях плавки до 300 кг/год вміст молібдену та цирконію у зливку збільшується у порівнянні з їх концентрацією у вихідній шихті на 0.05...0.2 %, а вміст кремнію — зменшується на 0.01...0.02 %, що пов'язано з відносно великими втратами алюмінію на випаровування при цих швидкостях плавки (рис. 2.6).

Як показано в [164, 165], при виплавці методом ЕПП зливок титанових сплавів Ø 600 мм збільшення швидкості плавки понад 800 кг/год призводить до утворення глибокої рідкої ванни у кристалізаторі, що може негативно позначитися на структурі зливка. Тому з точки зору отримання однорідної дрібнозернистої структури зливка необхідно обмежувати максимальну швидкість плавки.

Таким чином, за результатами проведених розрахунків встановлено, що для забезпечення заданого хімічного складу зливка сплаву ВТ9 Ø 600 мм і його високої якості необхідно плавку проводити зі швидкістю 400...800 кг/год і додавати до початкової шихти алюміній у кількості на 0.75 % більше, ніж цільове значення концентрації алюмінію у зливку.

Розділ 3

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ СКЛАДНОЛЕГОВАНИХ СПЛАВІВ ТИТАНУ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

3.1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИПЛАВКИ ЗЛИВКІВ ВИСОКОМІЦНИХ СКЛАДНОЛЕГОВАНИХ СПЛАВІВ ТИТАНУ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

Будь-які недосконалості хімічної і структурної однорідності у високоміцних титанових сплавах призводять до зниження міцності та довговічності виробів. Отримання високоміцних титанових сплавів пов'язано з труднощами, зумовленими високою чутливістю титану до домішок впровадження, особливо до кисню, азоту, водню, вуглецю, та взаємодією з багатьма хімічними елементами, у результаті чого утворюються тверді розчини або хімічні сполуки. Крім того, однією з основних структурних недосконалостей високоміцних титанових сплавів є наявність неметалевих включень [104]. Висока активність титану призводить до перебігу фізико-хімічних процесів взаємодії з газами навіть у твердому стані. Тому неметалеві включення, зокрема гідриди, нітриди, оксиди, можуть утворюватися як у процесі виплавки зливків, так і на різних етапах технологічної переробки в готову продукцію. Неметалеві включення в готовий виріб можуть бути внесені із шихтових матеріалів у процесі плавки, а також сформовані в процесі термічної обробки готового виробу. Ці домішки в кінцевому підсумку визначають якість і властивості титанових сплавів [166].

У даний час не всі методи виробництва зливків титанових сплавів дозволяють отримати якісний метал, а при порушенні технологічного процесу виробництва сплавів титану в зливках виявляються дефекти, які знижують якість металу.

Таким чином, вирішення проблеми отримання якісних зливків складнолегованих високоміцних титанових сплавів із різних шихтових матеріалів є досить актуальним. А роботи в даному напрямку дозволять розширити сировинну базу при виробництві зливків і знизити собівартість продукції зі сплавів титану.

Технологія ЕПП з проміжною ємністю є ефективним методом отримання бездефектних зливків титану та його сплавів з високою часткою викори-



Рис. 3.1. Шихтові матеріали, що застосовуються при виготовленні методом ЕПП зливок високоміцних сплавів титану: *a* — недроблені блоки губчастого титану; *b* — фракційний губчастий титан; *c* — брикетований губчастий титан; *d* — відходи титанового виробництва

стання відходів. Застосування проміжної ємності дозволяє не тільки провести очищення від шкідливих домішок і включень різної щільності, а й отримати зливку з якісною структурою та однорідним хімічним складом. Крім того, переплав з проміжною ємністю дозволяє здійснювати легування рідкого металу в процесі плавки, а також обробляти розплав металу різними реагентами.

При переплаві кристалізація протікає в умовах безперервного надходження металу в рідку ванну, обігріву дзеркала рідкої ванни, охолодження зливка. Ці фактори забезпечують сприятливу конфігурацію рідкої ванни та високий температурний градієнт при кристалізації, що знижує ймовірність виникнення й розвитку дефектів макроструктури.

Основною вимогою до зливок титанових сплавів є висока однорідність за хімічним складом. Виконання цієї вимоги значною мірою залежить від ретельності добірки шихтових матеріалів і технології їх підготовки до виплавки зливок.

При отриманні складнолегованих високоміцних сплавів титану методом ЕПП в якості шихтових матеріалів можуть використовуватися наступні: губчастий титан, брикети з губчастого титану, нероздроблені блоки губчастого титану, лом і відходи титану та його сплавів (у кількості до 100 %) (рис. 3.1).

Легування титанової губки. Основною шихтою для виробництва високоміцних сплавів титану є губчастий титан, який отримують магністермічним способом із тетрахлориду титану. Відповідно до стандартів випускається декілька марок губчастого титану, які відрізняються за твердістю та вмістом шкідливих домішок (кисню, азоту, заліза, кремнію, вуглецю, хрому, нікелю тощо). Ці домішки мають істотне значення, тому що їх потрапляння в метал при отриманні зливків значною мірою визначає властивості легуваних сплавів титану.

Крім того, висока реакційна здатність титану та його схильність до активної хімічної взаємодії з газами атмосфери (киснем, азотом, вуглецем та іншими елементами) вимагають проведення плавки виключно в умовах, що захищають рідкий метал від насичення його газами та іншими шкідливими домішками. Як вже зазначалося, титанова губка містить певну кількість домішок, у тому числі летючих: хлористий магній, магній, водень, волога тощо. Процес видалення летючих домішок під час плавки йде значно швидше у вакуумі, ніж у середовищі інертних газів, оскільки тиск газу пригнічує процеси випаровування. Тому проведення процесу виплавки зливків сплавів титану із застосуванням титанової губки у вакуумі має істотну перевагу в порівнянні з плавкою в захисній атмосфері.

Але при ЕПП деяка кількість газів може потрапити в титан внаслідок натікання в установку атмосфери в період плавки та десорбції газів з поверхні вакуумних камер і технологічної оснастки. Висока герметичність вакуумних систем і ретельна підготовка плавильних установок роблять ці забруднення незначними. Також слід мати на увазі, що, маючи значну розвинену поверхню, титанова губка здатна адсорбувати гази і значна кількість домішок може потрапити при переплаві в метал зливка. З метою мінімізації потрапляння таких домішок у зливки сплавів титану при отриманні методом ЕПП, тривалість між технологічними операціями з підготовки шихти та проведення процесу плавки повинна бути мінімальною.

Для отримання сплавів титану можливе використання титанової губки різного виду: дробленої фракціями 10...100 мм, пресованої або цільними блоками губчастого титану масою до 5 тонн. Зазвичай губчастий титан поставляється партіями. При шихтовці одного зливка найкраще використовувати губку з однієї партії. Однак при виплавці методом ЕПП великих зливків масою до 20 тонн не завжди вистачає однієї партії. Тому при підготовці шихтової заготовки із декількох партій губчастого титану на один зливок підбирають марки, близькі за твердістю та вмістом шкідливих домішок. У шихту із титанової губки вводять необхідну кількість легуючих компонентів шляхом замішування або нанесення рівномірним шаром на поверхню. При правильному виконанні цих умов отримується однорідний за складом та з мінімальним вмістом домішок зливок.

Плавка із застосуванням лігатур. Однією з важливих вимог при виготовленні високоміцних сплавів титану є правильний вибір легуючих компонентів

і лігатур. Важливим моментом при отриманні зливків високоміцних сплавів титану є використання відходів, що утворюються в процесі переробки зливків на напівфабрикати. При технології ЕПП можливо використовувати до 100 % відходів титанового виробництва, за виключенням титанової стружки. Стружка, яка виникає у процесі обробки зливка на напівфабрикат, має розвинену поверхню, насичену газами. Крім того, у процесі механічної обробки стружка взаємодіє з охолоджувальними емульсіями різального інструменту. Також слід мати на увазі, що в процесі механічної обробки в стружку можуть потрапити шматочки різального інструменту, який зазвичай виготовлений із твердосплавних матеріалів, потрапляння яких у сплави титану неприпустимо. Таку стружку необхідно ретельно відсортовувати, мити, сушити. Ці операції вимагають великої кількості часу та матеріальних ресурсів, що невиправдано коштовно з економічної точки зору.

Зазвичай до переробки приймаються тільки світлі неокислені кускові відходи, які попередньо піддають галтуванню й подальшому травленню для видалення окислів з поверхні. Іноді хімічне травлення комбінують з електрохімічним для більшої ефективності та рівномірності. При підготовці кускових відходів можливе застосування тільки галтування.

Високоміцні сплави титану містять тугоплавкі легуючі компоненти (ванадій, молібден тощо). Домогтися повного розчинення та рівномірного розподілу таких елементів у зливку при введенні їх у великій кількості в чистому вигляді не завжди вдається. У процесі плавки шматочки цих металів не встигають повністю розчинитися та залишаються у зливку у вигляді крапель. Тому тугоплавкі легуючі елементи доцільніше вводити у високоміцні сплави титану у вигляді лігатур (алюміній-молібден, ванадій-алюміній тощо), які зазвичай мають нижчі температури плавлення, ніж титан. Такі лігатури добре розчиняються в титані та дозволяють отримати досить однорідний за хімічним складом метал.

При отриманні високоміцних сплавів титану все більше застосування знаходять лігатури, що містять у своєму складі титан (наприклад титан-цирконієва лігатура).

Підготовка шихтової заготовки із чистих сировинних матеріалів відносно проста. Крім губчастого титану, вводять легуючі елементи з розрахунку на задані межі, з урахуванням втрат на випаровування. При виплавці зливків високоміцних сплавів титану відходи титанового виробництва можливо комбінувати з губчастим титаном таким чином, щоб наприкінці отримати необхідні механічні характеристики сплаву з урахуванням зміцнення за рахунок легування та підвищення вмісту газів при плавці. Великі шматки брухту та відходів за потреби ріжуть газокисневою різкою, а місця різки очищають від окислів і шлаку. У разі потреби проводиться зачистка поверхні шматків брухту. Брухт, відходи та губчастий титан рівномірно та максимально компактно укладають шарами у невитратний короб, причому необхідно укладати так, щоб у процесі

подачі штовхачем у зону плавки не було заклинювання шихти в коробі. Пропорції компонентів шихти заздалегідь розраховуються та визначаються завданням на плавку.

Плавка із застосуванням чистих компонентів. Введення легуючих компонентів у чистому вигляді або у вигляді лігатур обумовлено температурою їх плавлення та можливістю розплавлення в умовах плавки.

При ЕПП високоміцних сплавів титану у чистому вигляді можна застосовувати такі легуючі компоненти: алюміній, хром, ванадій, цирконій, залізо, кремній. Хром, ванадій і малібден можливо також вводити у вигляді лігатур з алюмінієм.

Перед введенням у шихту чисті метали роздрібнюють. Крихкі метали (хром, молібден, ванадій) дроблять на шматки розміром не більше за 15 мм, потім просівають через сито для відсіву частинок розміром менше за 2 мм, щоб уникнути їх втрати при шихтуванні та, як наслідок, відхилень від заданого хімічного складу. Відсіви можна вводити, загорнувши їх в алюмінієву фольгу. Перед подрібненням компоненти ретельно розбраковують. На їх поверхні та у зламі не повинно бути нальоту оксидів, шлакових і окисних включень, нерозчинених складових і сторонніх домішок. Газова та усадкова рихлості допускаються у тому випадку, якщо вони не містять нальоту окислів. Алюміній доцільніше використовувати у вигляді дрібних нарізаних шматків листів, смуг або пресованих шин.

Для прямого ЕПП переплаву в чистому вигляді можуть бути введені у зливок тільки компоненти, температура плавлення яких не перевищує температуру плавлення титану (за винятком легкоплавких елементів). У цьому випадку перегрів металу в рідкій ванні буде покращувати умови розподілу. Введення легуючих компонентів, у яких температура плавлення значно вища за температуру плавлення титану, але нижча за температуру перегріву рідкого металу, може призводити до неповного розчинення компонента внаслідок нестійкості й мінливості величини перегріву по довжині зливка.

Значний вплив на розподіл у зливку легкоплавких легуючих компонентів має нагрівання шихти в процесі плавки. При досягненні шихтою температури плавлення легкоплавкого компонента останній починає витікати зі ще нерозплавлених ділянок шихти та збагачувати певні ділянки зливка.

Зона високої температури металу в безпосередній близькості від водоохолоджуваних стінок кристалізатора при ЕПП створює сприятливі умови для випаровування летючих компонентів, їх конденсації на внутрішніх стінках кристалізатора і тим самим призводить до перерозподілу вмісту цих компонентів по перерізу отриманого зливка. Щоб запобігти цьому, необхідно тримати ванну рідкого металу якнаймога вище до верхньої кромки кристалізатора та проводити її опускання тільки перед безпосереднім зливом наступної порції металу із проміжної ємності.

Однією з причин неоднорідності злиwkів високоміцних сплавів титану є зональна ліквіація. Вона спостерігається, головним чином, у сплавах з широким ін-

тервалом кристалізації і розвивається через відмінності в розчинності легуючого компонента або домішки у твердій і рідкій фазах. До числа сильно ліквуючих у титані елементів відносяться хром, молібден і нікель. Зі збільшенням концентрації цих елементів у сплавах їх ліквідація може помітно посилюватися.

Для рівномірного розподілу тугоплавких легуючих компонентів їх вводять до складу лігатури, що мають температуру плавлення нижче від температури рідкого металу. Іноді використовують тугоплавкі компоненти у вигляді подрібнених шматочків, тонкої стружки або обрізу. У таких випадках їх необхідно ретельно й рівномірно розподіляти в шихті, щоб, підходячи до зони плавки, такі шматочки поступово прогрівалися до температури плавлення титану, а потім розплавляється на торці шихти або безпосередньо в проміжній ємності та потрапляли в кристалізатор вже в рідкому вигляді. Регулюючи температуру плавлення, щільність лігатур, а також зменшуючи розміри шматочків, можна створити умови, коли повне розчинення компонента буде проходити найповніше.

Шихтовка для виготовлення високоміцних сплавів методом ЕПП із первинних матеріалів може здійснюватися наступним чином. Вихідну шихту формують із попередньо виплавлених із титанової губки або відходів титанового виробництва зливків прямокутного перерізу (зливків-слябів) і легуючих компонентів. При цьому легуючі компоненти закладають рівномірно пошарово у проміжок між двома або більше зливками прямокутного перерізу. При такій схемі створюються умови для запобігання висипанню, витіканню та інтенсивному випаровуванню легкоплавких елементів і елементів з високою пружністю пари, а також найповнішого розплавлення тугоплавких елементів.

3.2. ТЕХНОЛОГІЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

Технологія ЕПП з проміжною ємністю є ефективним методом отримання бездефектних зливків титану та його сплавів з високою часткою використання відходів.

Застосування проміжної ємності дозволяє не тільки провести очищення від шкідливих домішок і включень різної щільності, а й отримати зливки з однорідним хімічним складом і якісною структурою. Крім того, переплави з проміжною ємністю дозволяє здійснювати легування рідкого металу в процесі плавки, а також обробляти розплав металу різними реагентами.

При переплаві кристалізація протікає в умовах безперервного надходження металу в рідку ванну, обігріву дзеркала рідкої ванни, охолодження зливка. Ці фактори забезпечують сприятливу конфігурацію рідкої ванни та високий температурний градієнт при кристалізації, що знижує ймовірність виникнення й розвитку дефектів макроструктури.

У якості шихтових матеріалів можуть бути використані: губчастий титан, брикети з губчастого титану, нероздроблені блоки губчастого титану, лом і відходи титану та його сплавів (у кількості до 100 %). При виплавці сплавів також використовуються різні легуючі компоненти.

Технологічна послідовність отримання злиwkів методом ЕПП складається з наступних етапів:

- підготовка шихтових матеріалів і витратної заготовки для плавки;
- підготовка обладнання та технологічної оснастки до плавки;
- процес плавки;
- контроль якості отриманого зливка.

Важливою вимогою при виготовленні сплавів титану є правильний підбір легуючих компонентів і лігатур. Введення легуючих компонентів у чистому вигляді або у вигляді лігатур обумовлено температурою їх плавлення та можливістю розплавлення (або розчинення) в умовах плавки.

При виплавці сплавів процентне співвідношення маси різних легуючих елементів у шихті видається завданням на плавку в залежності від марки сплаву, що виплавляється. Зважування шихти різних марок і складу проводять окремо. При введенні у сплав елементів з високою пружністю пари необхідно враховувати втрати на випаровування. Зокрема це стосується алюмінію, хрому тощо.

Суть процесу ЕПП (рис. 3.2) полягає в горизонтальній подачі витратної заготовки 4 із заданою швидкістю в зону плавки, її плавлення електронними променями гармат 2, 3 над проміжною ємністю 5. У міру наповнення проміжної ємності рідкий метал зливається в кристалізатор 6, де відбувається формування зливка 7 необхідної довжини.

При роботі на електронно-променевих установках керуються технічним описом установки та інструкцією з експлуатації електронно-променевої установки.

При підготовці електронно-променевої установки до плавки:

- проводиться чистка внутрішніх порожнин плавильної камери, плити гармат, променеводів електронних гармат, проміжної ємності та кристаліза-

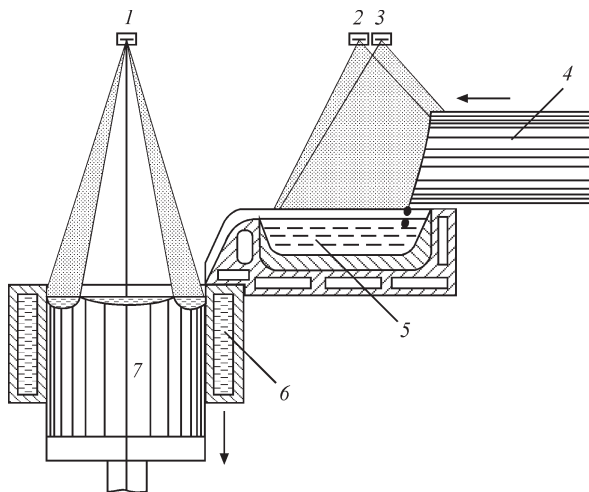


Рис. 3.2. Схема ЕПП з проміжною ємністю: 1–3 — електронно-променеві гармати; 4 — витратна заготовка; 5 — проміжна ємність; 6 — кристалізатор; 7 — злиwk

тора, ланцюгів привода подачі заготовки й механізму витягування зливка від конденсату попередньої плавки;

- проводиться чистка оглядових систем. При цьому в обов'язковому порядку очищуються стекла оглядових систем від конденсату та протираються спиртом;
- встановлюється закладна на піддон, яка фіксується гвинтом;
- проводиться завантаження шихтових матеріалів у камеру заготовки;
- піддон встановлюється в кристалізаторі на глибину 30...40 мм нижче від верхньої кромки кристалізатора;
- встановлюються захисні екрани;
- чистою ганчіркою, змоченою бензином РБР «калоша», протираються ущільнюючі з'єднання на фланцях рухомих частин камер, дверей, технологічних люків. Камери закриваються та фіксуються за допомогою затискачів;
- подається охолоджуюча вода на всі вакуумні насоси, технологічне оснащення, охолодження електронних гармат, сорочок охолодження камер установки;
- проводиться вакуумування електронно-променевої установки;
- при досягненні робочого тиску в камері плавки $1.33 \cdot 10^{-2} \dots 6.66 \cdot 10^{-3}$ Па визначається рівень натікання в робочий об'єм камери. Допустиме значення натікання не більше ніж 30 мкм·л/с;
- проводиться вмикання установки згідно з керівництвом з експлуатації.

Процес плавки проходить наступним чином. Вмикаються автомати шаф керування приводами, механізмів витягування зливка та подачі заготовки, оглядових систем, керування електронними променями. Впродовж 10 хв проводиться прогрів катодів на струмені бомбардування 0.25...0.3 А. Після вмикання напруги гармат встановлюються струми для кожної електронної гармати потенціометрами та корегується положення й геометрія зони нагріву електронних променів за допомогою ручок розгортки та статичного відхилення електронних променів кожної гармати. На малих струмах виставляються електронні промені в їх робочі положення (рис. 3.3): промінь 1 гармати встановлюється на обігрів верхнього торця зливка з розгорткою по спіралі; промені 2 і 3 гармат працюють з растровою розгорткою в проміжній ємності, а також будь-який з них може використовуватися для роботи в режимі «точка», «підрізування точкою» і зливу рідкого розплаву в кристалізатор; промені 4 і 5 встановлюються на плавлення витратної заготовки та обігрів поверхні металу в проміжній ємності.

Плавка починається з плавного підвищення струмів променів на гарматах до значень 0.5 А і встановлення променів у робоче положення на витратній заготовці, проміжній ємності та кристалізаторі. Витратна заготовка прогривається протягом 10...15 хв, після чого встановлюються робочі значення струмів променів і починається процес плавлення витратної заготовки в проміжну ємність.

Після заповнення проміжної ємності виставляється робочий струм гармати 1 і рідкий метал зливається в кристалізатор. Затравка зливка формується за 3–5 зливів рідкого металу в кристалізатор. Після формування затравки вста-

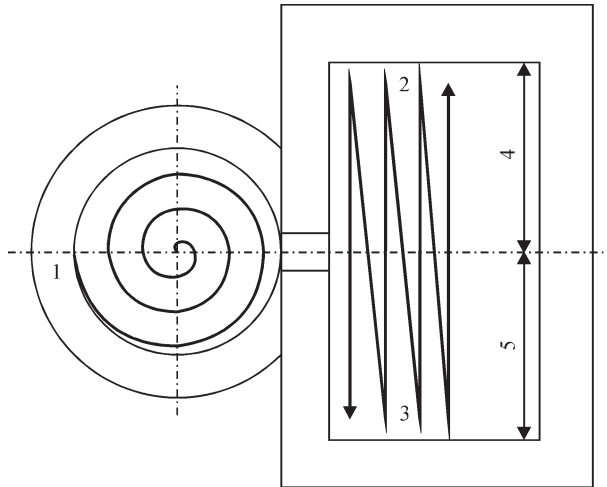


Рис. 3.3. Схема розташування розгортки променів для плавки зливок сплавів титану

новлюються робочі струми променів на гарматах і вмикається робоча швидкість подачі заготовки.

У процесі плавки застосовується кристалізатор циліндричної форми з потрібним внутрішнім діаметром (рис. 3.4), оснащений піддоном, що вертикально переміщується.

У міру наплавлення зливок опускається вниз механізм витягування за напівбезперервним режимом: після підвищення рівня рідкого металу в кристалізаторі на необхідну величину зливок опускається доти, поки ванна не опуститься до колишнього рівня. У процесі плавки витратна заготовка безперервно подається в робочу область над проміжною ємністю, де під дією електронно-променевого нагріву відбувається її плавлення.

З метою запобігання виникненню в головній частині зливка дефектів усадкового походження (усадкова раковина, пори) у кінці плавки проводиться виведення усадки шляхом поступового зниження потужності обігріву верхнього

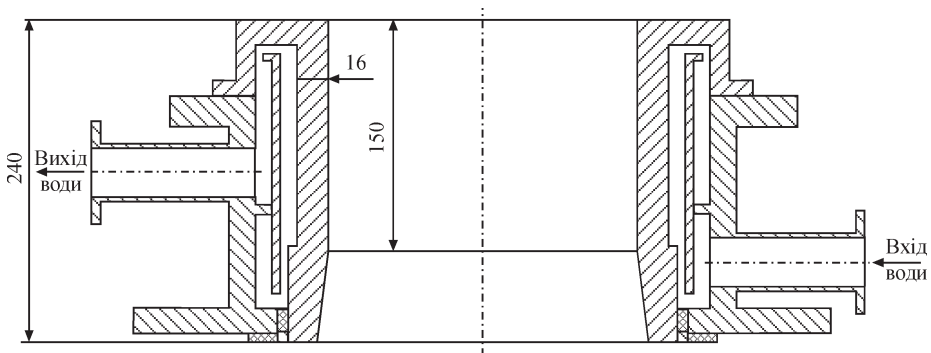


Рис. 3.4. Схема кристалізатора

торця зливка в кристалізаторі. Весь процес виведення усадкової раковини можна умовно розділити на чотири періоди. Спочатку потужність, що подається в кристалізатор, не змінюється у порівнянні зі сталим режимом плавки. При цьому надходження рідкого металу припиняється. Тим самим запобігається швидке охолодження зливка та виникнення зустрічного фронту кристалізації. Глибина ванни рідкого металу поступово зменшується. На другому етапі проводиться перерозподіл потужності. Зменшується розгортка електронного променя. Внаслідок цього зростає частка тепла, що вкладається в осьову зону зливка. Одночасно поступово знижуються струми променів до нуля. У цьому випадку візуально спостерігається кристалізація поверхні зливка, спрямована від периферії до центру. При досягненні робочими струмами нульової позначки кристалізація закінчується. Третій період полягає у тимчасовій витримці поверхні зливка без обігріву впродовж 2...3 хв. В останньому періоді процесу (контрольне проплавлення) сконцентрованим променем в осьовій зоні зливка проплавляється коло впродовж 2...3 хв. Потім струми поступово знижуються до нуля.

Під час ведення процесу плавки проводився контроль технологічних параметрів: швидкості плавки, струмів променів, величини прискорюючої напруги. Чисельні значення прискорюючих напруг і струмів променя вимірюються та регулюються оператором за допомогою призначених для цього приладів. Швидкість плавки регулюється швидкістю подачі витратної заготовки в зону плавки.

Після виплавки зливка охолоджується в камері плавки в умовах вакууму. Після охолодження зливка установка розвакуується та вивантажується зливка. Виплавлений зливка маркується та відбираються проби на хімічний і газовий аналіз.

3.3. ОТРИМАННЯ ЗЛИВКІВ ВИСОКОМІЦНИХ ПРОМИСЛОВИХ СПЛАВІВ ТИТАНУ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

У сучасному промисловому виробництві напівфабрикати зі сплавів титану займають важливе місце. До таких сплавів належать промислові високоміцні сплави ВТ9, ВТ14, ВТ20, ВТ23, які розроблені на основі теорії комплексного легування титанових сплавів. У цих сплавах вигідно поєднуються висока міцність і низький модуль пружності, низька щільність і високе співвідношення $\sigma_{0,2}/\sigma_b$, немагнітність, висока корозійна стійкість в агресивних середовищах.

З метою відпрацювання технології виробництва зливків складнолегованих сплавів титану в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України були проведені роботи з виплавки партії зливків сплавів ВТ9, ВТ14, ВТ20, ВТ23. Отримували зливки круглого перерізу $\varnothing 110...600$ мм за технологією ЕПП з проміжною ємністю та порційною подачею рідкого металу у водоохолоджуваний кристалізатор.

На основі проведених фундаментальних досліджень процесів випаровування компонентів сплавів з розплаву у вакуумі (розд. 2) проводилися розрахунки прогнозованого хімічного складу зливків, що виплавляються, за ре-



Рис. 3.5. Шихтові заготовки для виплавки зливок титанових сплавів: а — VT20; б — VT23

зультатами яких здійснювалося корегування складових шихтової заготовки. Легуючі компоненти з високою пружністю пари (Al, Cr) шихтувалися з урахуванням компенсації втрат на випаровування.

Шихтову заготовку для виплавки зливок сплавів VT9, VT14, VT20, VT23 формували у невитратний короб. Заготовка являла собою щільно укладені брикети титанової губки ТГ-120 з легуючими компонентами (рис. 3.5).

Технологія отримання зливок високоміцних сплавів титану в електронно-променевої установці містила наступні етапи:

- формування витратної заготовки;
- підготовку устаткування й технологічної оснастки до плавки;
- процес плавки;
- контроль якості виплавленого зливка.

Для проведення дослідних плавок з отримання зливок \varnothing 400 мм сплавів титану VT20 і VT23 використовувалася електронно-променева установка УЕ-121 (рис. 3.6). Отримання зливок \varnothing 600 мм сплавів титану VT9 і VT14 проводили на електронно-променевої установці УЕ-5810 (рис. 3.7).

У всіх випадках у процесі плавки контролювалися наступні технологічні параметри: прискорююча напруга електронно-променевих гармат; струми променів; швидкість подачі вихідної шихти в зону плавки; швидкість витягування зливка із кристалізатора; температура охолоджуючої води.



Рис. 3.6. Процес ЕПП зливка \varnothing 400 мм

Чисельні значення технологічних параметрів плавки, що використовувалися при виплавці злиwkів \varnothing 400 та 600 мм сплавів титану ВТ9, ВТ14, ВТ20, ВТ23, наведені в табл. 3.1.

Наприкінці плавки проводилося виведення усадки шляхом поступового зниження потужності обігріву верхнього торця зливка в кристалізаторі (рис. 3.8, 3.9).

Бічна поверхня виплавлених злиwkів після охолодження у вакуумі до температури нижче за 300 °С чиста, підвищена концентрація домішкових елементів на поверхні у вигляді окисленого або альфованного шару відсутня (рис. 3.10).



Рис. 3.7. Процес ЕПП зливка \varnothing 600 мм

Таблиця 3.1. Технологічні параметри плавки

Технологічний параметр	Ø 400 мм	Ø 500 мм	Ø 600 мм
Швидкість плавки, кг/год	270	280	300
Висота порцій, мм	8	10	12
Потужність у кристалізаторі, кВт	120	160	205
Потужність у проміжній ємності, кВт	240	260	300

Глибина поверхневих дефектів типу «гофр» становить 1...3 мм. Дефекти у вигляді розривів, тріщин або несплавлень відсутні.

Для оцінки якості металу отриманих зливок проводилося дослідження хімічного складу зразків, відібраних по довжині зливка з верхньої, середньої та нижньої частин. Результати аналізу хімічного складу металу отриманих зливок (табл. 3.2) показали, що розподіл легуючих елементів по довжині зливок рівномірний та відповідає марочному складу. Підвищеного вмісту газів, як у донній, так і в головній частинах зливок не виявлено.

З метою скорочення втрат коштовного металу в стружку та через відсутність окисленого або альфованного шару дефекти типу «гофри» на зливках

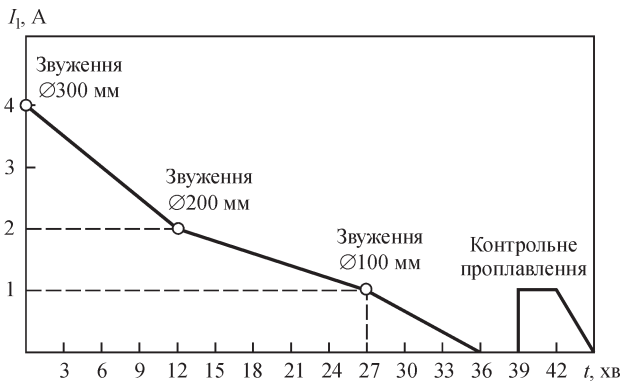


Рис. 3.8. Режим виведення усадкової раковини для зливок зі сплавів титану Ø 400 та 500 мм

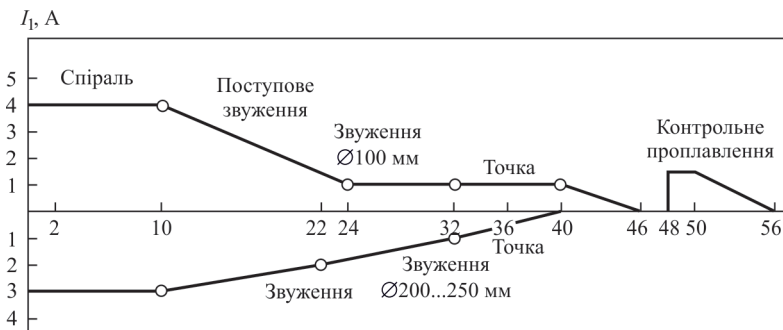


Рис. 3.9. Режим виведення усадкової раковини для зливок зі сплавів титану Ø 600 мм

Таблиця 3.2. Розподіл легуючих елементів і домішок по довжині зливоків титанових сплавів, отриманих за розробленою технологією ЕПП

Марка сплаву	Частина зливка	Вміст, ваг. %			
		Al	Mo	V	Fe
BT20	верхня	5.9	1.3	1.5	0.16
	середня	6.2	1.4	1.5	0.14
	нижня	6.0	1.3	1.6	0.15
ГОСТ 19807–91		5.5...7.0	0.5...2.0	0.8...2.5	<0.25
BT23	верхня	4.5	2,0	4.7	0.5
	середня	4.7	2.1	5.0	0.6
	нижня	4.3	1.9	4.7	0.5
ОСТ 1-90013–81		4.0...6.3	1.5...2.5	4.0...5.0	0.4...0.1
BT14	верхня	5.1	3.1	1.5	0.16
	середня	5.2	3.3	1.5	0.19
	нижня	5.4	3.3	1.6	0.17
ГОСТ 19807–91		3.5...6.3	2.5...3.8	0.9...1.9	<0.25
BT9	верхня	6.06	3.63	–	0.21
	середня	6.13	3.68	–	0.14
	нижня	6.64	3.21	–	0.22
ОСТ 1-90013–81		5.8...7.0	2.8...3.8	–	≤0.25

Ø 400, 500 та 600 мм високоміцних сплавів титану були вилучені шляхом електронно-променевого оплавлення бічної поверхні зливка, що дозволило збільшити вихід придатного металу на $\approx 5\%$.

Оплавлення здійснювали на спеціалізованій електронно-променевої установці УЕ-185, обладнаній трьома електронно-променевими гарматами. Сутність технології оплавлення поверхневого шару зливка електронним променем полягала в наступному. Отриманий зливок цеховим краном розташовували на валки механізму обертання, після чого проводили герметизацію робочого об'єму камери. За допомогою вакуумних насосів проводили вакуумування камери оплавлення до робочого тиску 10^{-2} Па. Далі вмикали приводи обертання валків, а також схеми живлення та керування електронними гарматами. При обертальному русі валків розташований на них зливок також набував обертального руху навколо своєї поздовжньої осі. Електронні промені за допомогою систем фокусування та відхилення проектувалися на поверхню зливка, що оброблюється. Оплавлення зливка здійснювалося за рахунок нагріву та розплавлення поверхневого шару електронними променями уздовж його твірної. Поверхня оплавлялася одночасно по всій довжині трьома електронними гарматами. При

Марка сплаву	Частина зливка	Вміст, ваг. %			
		Zr	Cr	Si	O
BT20	верхня	2.2	–	0.1	0.09
	середня	2.5	–	0.08	–
	нижня	2.2	–	0.09	0.10
ГОСТ 19807–91		1.5...2.5	–	–	<0.15
BT23	верхня	0.01	0.9	–	0.10
	середня	0.01	0.9	–	–
	нижня	0.01	0.9	–	0.12
ОСТ 1-90013–81		<0.3	0.8...1.4	–	<0.15
BT14	верхня	0.08	–	–	0.10
	середня	0.10	–	–	–
	нижня	0.07	–	–	0.09
ГОСТ 19807–91		<0.3	–	–	<0.15
BT9	верхня	1.69	–	0.32	0.11
	середня	1.64	–	0.32	–
	нижня	1.67	–	0.31	0.12
ОСТ 1-90013–81		1.0...2.0	–	0.20...0.35	<0.15

оплавленні зони нагріву кожного променя перекривали на 5...10 мм. За три оберти проводили повне оплавлення поверхні зливків.

Параметри процесу оплавлення були наступними: розмір фокальної плями електронного променя 0.67×0.02 мм, потужність 90 кВт. Зазначений режим оплавлення дозволив проплавити поверхневий шар зливків на глибину 5...8 мм, що забезпечило повне усунення поверхневих дефектів (рис. 3.11). Шорсткість поверхні відповідала 3–4 класу при хвилястості поверхні, яка відповідно дорівнює 0.2...0.6 мм.

Макроструктура зливків вивчалася на поперечних темплетях, вирізаних із середини зливків. Виявлення структури проводилося травленням темплетів у 15 %-му розчині фтористої кислоти з додаванням 3 %-ої азотної кислоти при кімнатній температурі.

Структура металу зливків (рис. 3.12–3.14) — щільна, однорідна, з відсутністю зон, що по-різному травляться по перерізу зливка. Істотної різниці в структурі центральної зони зливка та периферійної зони не спостерігається. Дефектів у вигляді пор, раковин, тріщин і неметалевих включень не виявлено. Характерної для зливків ВДП сегрегації легуючих елементів у жодному з отриманих зливків не виявлено.



Рис. 3.10. Зливки високоміцних сплавів титану: *a* — \varnothing 500 мм ВТ20; *б* — \varnothing 400 мм ВТ23; *в* — \varnothing 600 мм ВТ14

Кристалічна будова металу зливок однакова по всьому перерізу та характеризується кристалами, за формою близькою до рівновісної. Ділянки стовбчастої структури відсутні в усіх випадках.

Величина зерна в отриманих темплетях визначалася за 10-ти бальною шкалою макроструктури згідно з Інструкцією № 1054-76 ВІАМ. У зливку \varnothing 500 мм титанового сплаву ВТ20 величина зерна відповідає 9-му балу (рис. 3.12), для зливка \varnothing 400 мм титанового сплаву ВТ23 — 7-му балу (рис. 3.13), для зливка \varnothing 600 мм титанового сплаву ВТ14 — величина зерна на площі темплетя в поперечному перерізі відповідає 8-му балу (рис. 3.14). По периметру зливок \varnothing 400 мм ВТ23, \varnothing 500 мм ВТ20 і \varnothing 600 мм ВТ14 на глибину 10 мм структу-

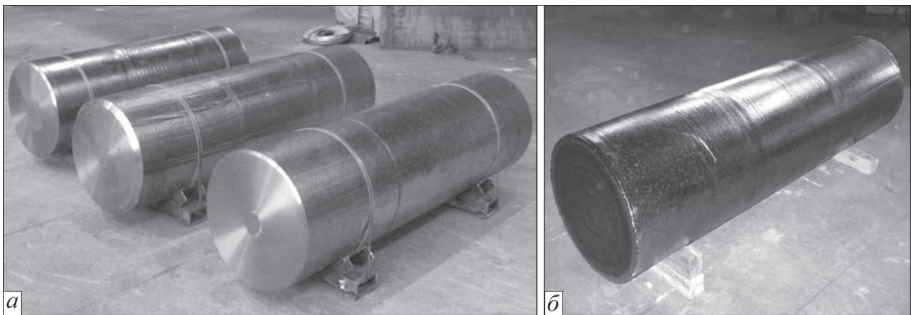


Рис. 3.11. Зовнішній вигляд оплавлених зливок із високоміцних титанових сплавів: *a* — \varnothing 500 мм ВТ20; *б* — \varnothing 600 мм ВТ14

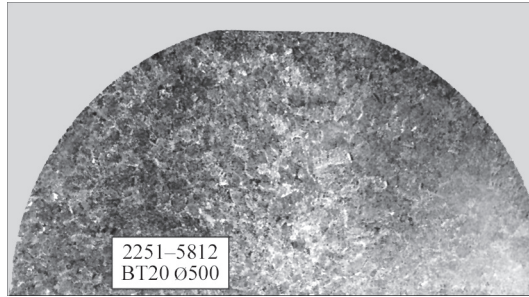


Рис. 3.12. Макроструктура зливка Ø 500 мм титанового сплаву BT20, отриманого методом ЕПП ра більш дрібнозерниста та відповідає 5–6-му балу. Це викликано термічним впливом ЕПН при застосуванні оплавлення поверхні зливоків.

Найважливішим критерієм якості зливоків сплавів титану є відсутність у металі неметалевих включень, особливо у вигляді азотовмісних альфованих частинок або нітридів титану. При переплаві титану за технологією ЕПП з проміжною ємністю створюються термічні та фізико-хімічні умови, що забезпечують видалення вищевказаних включень.

Для дослідження наявності або відсутності в титанових зливках внутрішніх дефектів у вигляді неметалевих включень, а також пор і нещільностей використовувався метод ультразвукової дефектоскопії. Дослідження проводилися з використанням дефектоскопа ультразвукового УД4-76 відлуння-імпульсним методом при контактному варіанті контролю. Робоча частота аналізу становила 1,25 МГц, що забезпечувало максимальне співвідношення «сигнал/шум». При дослідженні зливоків спостерігалися множинні відбивання малої амплітуди. Це типово для литого металу та є результатом відбивання сигналу від границь зерен. Проведеним аналізом не виявлено імпульсів, які можна було б



Рис. 3.13. Макроструктура зливка Ø 400 мм титанового сплаву BT23, отриманого методом ЕПП

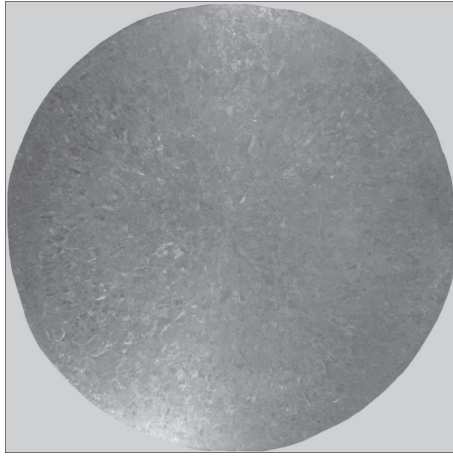


Рис. 3.14. Макроструктура зливка \varnothing 600 мм титанового сплаву ВТ14, отриманого методом ЕПП

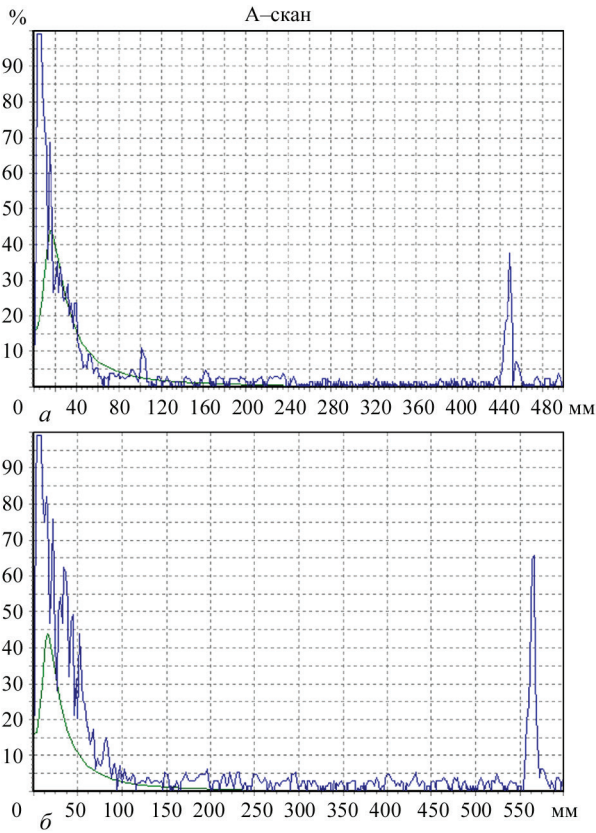


Рис. 3.15. УЗК-скан центральної частини зливка: *a* — \varnothing 400 мм ВТ23; *б* — \varnothing 600 мм ВТ14

інтерпретувати як великі неметалеві включення, пори, усадкові раковини. На скані чітко визначається відбивання донного імпульсу (рис. 3.15). В області введення зондуючих сигналів присутні шуми, які обумовлені нещільним приляганням датчика до поверхні зливка, яке не вдається компенсувати застосуванням «ущільнюючого» мастила.

Проведені дослідження показали, що у виплавлених методом ЕПП зливках \varnothing 400 мм титанового сплаву ВТ20 і ВТ23, \varnothing 600 мм титанового сплаву ВТ14 відсутні нещільності, неметалеві включення з розміром більше за 1 мм, а також щільні скупчення дрібніших включень.

Таким чином, із використанням розрахованих режимів ведення процесу ЕПП відпрацьовано технологічні режими отримання зливок \varnothing 110, 400 та 600 мм високоміцних сплавів титану ВТ9, ВТ14, ВТ20, ВТ23. Показано, що ЕПП є ефективним методом отримання якісних бездефектних зливок високоміцних складнолегованих сплавів титану.

3.4. ОТРИМАННЯ НОВИХ ВИСОКОМІЦНИХ СКЛАДНОЛЕГОВАНИХ СПЛАВІВ ТИТАНУ Т110 ТА Т120 МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

Подальший розвиток авіакосмічної техніки та інших галузей транспортного машинобудування значною мірою пов'язаний з підвищенням експлуатаційних характеристик конструкційних матеріалів, що використовуються. Це повною мірою стосується й сплавів на основі титану, що обумовлює необхідність проведення дослідницьких робіт зі створення нових титанових сплавів з поліпшеним комплексом механічних властивостей, які забезпечують поряд з високою міцністю достатню надійність.

Найперспективнішим напрямком підвищення конструкційної міцності при розробці високоміцних складнолегованих титанових сплавів є комплексне легування, яке було взято за основу при розробці нових сплавів [167]. При комплексному легуванні зміцнюють α - і β -тверді розчини таким чином, щоб різниця в їх характеристиках міцності була мінімальною. Це сприяє зниженню нерівномірності деформації і повнішій реалізації міцності α - і β -фаз, а також зменшенню дій гострих пластинчастих структурних елементів як концентраторів напружень [168, 169].

На основі методу комплексного легування в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України розроблено вітчизняні високоміцні складнолеговані ($\alpha+\beta$)-титанові сплави Т110 та Т120. Особливості титанового сплаву Т110 — висока питома міцність, корозійна стійкість, притаманна всім титановим сплавам низька теплопровідність, а також висока технологічність дозволяють застосувати його в якості матеріалу захисного призначення.

Високоміцний складнолегований ($\alpha+\beta$)-титановий сплав Т120 системи легування Ti–Al–Mo–V–Nb–Cr–Fe–Zr, що має границю міцності щонайменше 1200 МПа, захищений патентом України [170].



Рис. 3.16. Процес ЕПП зливка Ø 110 мм титанового сплаву Т120

На виробничих потужностях ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України були проведені роботи з відпрацювання розробленої технології отримання зливків вітчизняних високоміцних ($\alpha+\beta$)-титанових сплавів Т110 та Т120. Для проведення дослідних плавок з отримання зливка Ø 400 мм високоміцного сплаву Т110 була використана електронно-променева установка УЕ-121, оснащена проміжною ємністю. Для отримання зливка Ø 150 мм високоміцного сплаву Т120 була задіяна електронно-променева установка УЕ-208М (рис. 3.16). Для отримання зливка Ø 400 мм титанового сплаву Т110 були задіяні технологічні режими, як і при отриманні зливків Ø 400 мм високоміцних сплавів ВТ20, ВТ23 (табл. 3.1, рис. 3.8).

Чисельні значення для отримання зливка Ø 150 мм високоміцного сплаву Т120 наведені в табл. 3.3.

З метою запобігання виникненню у зливку Ø 150 мм високоміцного сплаву Т120 дефектів усадкового походження в кінці плавки виконувалося виведення усадкової раковини за схемою, наведеною на рис. 3.17.

У результаті проведених робіт отримано зливки високоміцних титанових сплавів Т110 та Т120 (рис. 3.18).

Дослідження вмісту легуючих елементів зливків сплавів Т110 та Т120 показало їх рівномірний розподіл як по довжині, так і по поперечному перерізу зливків (табл. 3.4).

Таблиця 3.3. Технологічні параметри плавки отримання зливка Ø 150 мм високоміцного сплаву Т120

Технологічний параметр	Значення
Швидкість плавки, кг/год	80
Висота порцій, мм	5
Потужність у кристалізаторі, кВт	30
Потужність у проміжній ємності, кВт	150

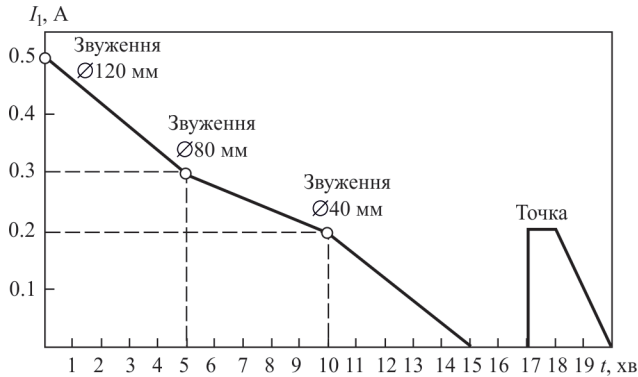


Рис. 3.17. Режим виведення усадкової раковини для зливків зі сплавів титану Ø 150 мм

Макроструктура зливків вивчалася на поперечних темплетях, вирізаних на відстані 150 мм від верхньої частини зливків. Виявлення структури проводилося травленням темплетів в 15 %-му розчині фтористої кислоти з додаванням 3 %-ої азотної кислоти при кімнатній температурі. Структура металу зливків титанових сплавів Т110 та Т120 (рис. 3.19, 3.20) — щільна, однорідна, з відсутністю зон, що по-різному травляться по перерізу зливка. Істотної різниці в структурі центральної і периферійної зон зливків не спостерігається. Дефектів у вигляді пор, раковин, тріщин і неметалевих включень не виявлено. Кристалічна будова металу однакова по всій довжині зливків і характеризується кристалами, за формою близькими до рівноосних. Ділянки стовбчастої структури відсутні.

Найважливішим критерієм якості титанових зливків є відсутність у металі неметалевих включень, особливо у вигляді азотовмісних альфірованих частинок або нітридів титану. Проведені дослідження за допомогою УЗК показа-



Рис. 3.18. Зовнішній вигляд зливка: а — Ø 400 мм титанового сплаву Т110; б — Ø 150 мм титанового сплаву Т120

Таблиця 3.4. Розподіл легуючих елементів і домішок по довжині зливків титанових сплавів Т110 та Т120, отриманих методом ЕПП

Марка сплаву	Частина зливка	Місце відбору проби	Вміст, мас. %			
			Al	Mo	V	Nb
Т-110	Верхня	О	5.53	1.25	1.30	4.02
		С	5.51	1.27	1.31	4.04
		П	5.49	1.27	1.33	3.92
	Середня	О	5,35	1.33	1.30	3.94
		С	5.35	1.35	1.33	3.90
		П	5.40	1.32	1.37	3.88
	Нижня	О	5.34	1.37	1.32	3.84
		С	5.30	1.38	1.31	3.88
		П	5.32	1.37	1.33	3.98
ТУ У 27.4.05416923.071–2005			5.0...6.0	1.0...1.8	0.8...2.0	3.5...4.8
Т-120	Верхня	О	4.81	2.93	2.26	4.31
		С	4.90	2.97	2.30	4.29
		П	5.02	2.82	2.30	4.22
	Середня	О	5.35	2.84	2.32	4.25
		С	5.50	2.86	2.39	4.20
		П	5.49	2.90	2.50	4.18
	Нижня	О	5.11	2.78	2.42	4.09
		С	5.03	2.69	2.44	4.12
		П	5.02	2.73	2.48	4.11
Технічне завдання			4.5...5.5	2.5...3.0	1.5...2.5	3.5...4.5

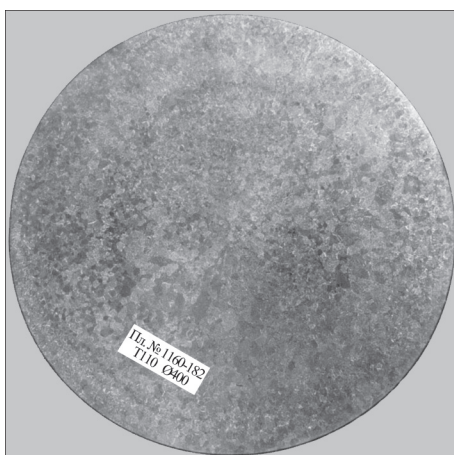
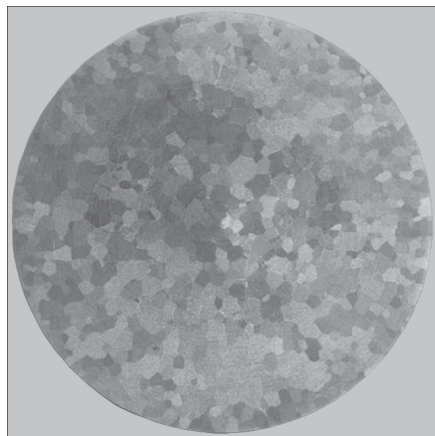


Рис. 3.19. Макроструктура поперечного перерізу зливка \varnothing 400 мм сплаву Т110

Марка сплаву	Частина зливка	Місце відбору проби	Вміст, мас. %			
			Fe	Zr	Cr	O
Т-110	Верхня	О	1.90	0.60	–	0.12
		С	1.96	0.59	–	
		П	1.91	0.57	–	
	Середня	О	1.88	0.59	–	–
		С	1.85	0.59	–	–
		П	1.92	0.61	–	–
	Нижня	О	1.79	0.60	–	0.14
		С	1.80	0.57	–	
		П	1.82	0.59	–	
ТУ У 27.4.05416923.071–2005			1.5...2.5	0.3...0.8	–	<0.20
Т-120	Верхня	О	0.98	2.44	1.30	0.11
		С	1.02	2.60	1.15	
		П	0.89	2.60	1.09	
	Середня	О	1.07	2.63	1.10	–
		С	1.05	2.68	1.12	–
		П	1.12	2.70	1.20	–
	Нижня	О	1.09	2.70	1.30	–
		С	1.11	2.67	1.28	–
		П	1.19	2.65	1.30	–
Технічне завдання			0.7...1.2	2.3...3.0	1.0...1.5	<0.15
<i>Примітки:</i> О — поблизу осі зливка; С — поблизу середини радіуса; П — у периферійній зоні (10 мм від поверхні зливка)						

Рис. 3.20. Макроструктура поперечного перерізу зливка \varnothing 150 мм сплаву Т120

ли, що в металі зливок нових високоміцних титанових сплавів Т110 та Т120, отриманих методом ЕПП, відсутні несучільності, неметалеві включення з розміром більше за 1 мм, а також щільні скупчення дрібніших включень. Структура металу щільна, кристалічну неоднорідність і зональну будову в зливках не виявлено. Таким чином, показано, що при переплаві титану за технологією ЕПП з проміжною ємністю створюються термічні та фізико-хімічні умови, що забезпечують видалення вищевказаних включень та уникнення їх появи.

3.5. ОПЛАВЛЕННЯ БІЧНОЇ ПОВЕРХНІ СПЛАВІВ ТИТАНУ

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України накопичено великий досвід щодо використання електронного променя для обробки поверхневого шару зливок круглого та прямокутного перерізу, проведено низку досліджень із застосуванням математичного моделювання процесів тепло- та масопереносу в оброблюваному електронним променем зливку [171]. На базі цих досліджень розроблено технологію електронно-променевого оплавлення (ЕПО) та спеціалізоване обладнання для її реалізації [104].

Проведені дослідження ставили за мету дослідити ефективність застосування технології електронно-променевого оплавлення поверхневого шару зливок жароміцного титанового сплаву ВТ9 і вплив технологічних параметрів електронно-променевого оплавлення на хімічний склад, глибину проплавлення поверхневого шару та структуру металу зливка.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- дослідження хімічного складу металу основи та оплавленого шару зливок;
- дослідження структури металу основи та оплавленого шару зливок;
- визначення глибини проплавлення поверхневого шару зливок.

З метою перевірки ефективності застосування електронно-променевого оплавлення поверхневого шару зливок жароміцного титанового сплаву на виробничих потужностях ДП «НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» були проведені комплексні дослідницькі роботи з виплавки партії зливок \varnothing 600 мм і завдовжки до 2 м та оплавлення їх бічної поверхні електронним променем. При цьому лінійна швидкість оплавлення становила 54 мм/хв, а питома потужність нагріву — 7,25 Вт/мм² (рис. 3.21).

Бічна поверхня зливок, оплавлених електронним променем, має рівний мікрорельєф, дзеркальний вигляд із характерним вакуумним травленням, без тріщин, розривів і несплавлень, шорсткість поверхні знаходиться в межах 3–4 класів при хвилястості поверхні, що дорівнює 0.2...0.6 мм (рис. 3.21).

Результати досліджень масової концентрації легуючих елементів у металі оплавленого шару зливок жароміцного титанового сплаву ВТ9 показали, що їх вміст відповідає марочному складу, спостерігається зниження вмісту алюмінію, легуючого елементу з пружністю пари вище, ніж у основи сплаву, і підвищення вмісту молібдену, цирконію, легуючих елементів з пружністю пари нижче, ніж у основи сплаву (табл. 3.5).

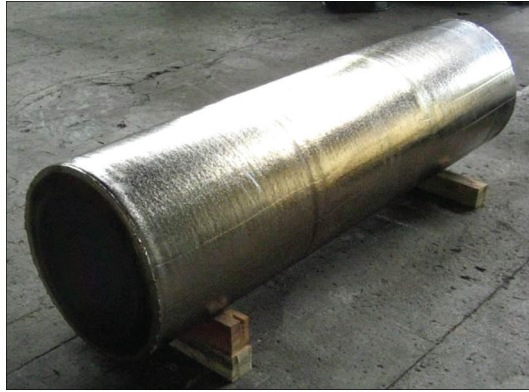


Рис. 3.21. Зливков жароміцного титанового сплаву ВТ9 Ø 600 мм з оплавленою бічною поверхнею

Експериментальна оцінка глибини проплавлення поверхневого шару зливоків за вказаними вище режимами проводилася на поперечних темплетях і становила до 8 мм (рис. 3.22). При цьому бічна поверхня зливоків мала рівний мікрорельєф, дзеркальний вигляд із характерним вакуумним травленням, без тріщин, розривів і несплавлень.

Металографічний аналіз металу оплавленого зливка титанового сплаву ВТ9 проводився з метою виявлення структурних змін, що відбулися в металі в результаті термічного впливу електронного променя на бічну поверхню та основу зливка. Досліджувані макрошліфи зливка сплаву ВТ9 Ø 600 мм з оплавленим електронними променями шаром на поверхні характеризуються відсутністю раковин і несучільностей. Макроструктура складається з кристалів, близьких до рівновісних, оплавлений шар утворений дрібнішими кристалами порівняно з основою зливка, витягнутими у бік кристалізації, тобто до центру зливка.

У периферійних зонах зливка утворюються зерна розміром 0.8...1.2 мм. Такі зерна спостерігаються до глибини близько 8 мм від поверхні, далі у зливку присутні зерна значно більшого розміру (рис. 3.23).

Мікроструктуру металу оплавленого шару при збільшенні показано на рис. 3.24. Зона термічного впливу від дії електронного променя при оплавленні поверхні ймовірно вузька та може становити частину зерна, структурно не

Таблиця 3.5. Масова концентрація легуючих елементів у металі оплавленого шару зливоків жароміцного титанового сплаву ВТ9

Місце відбору проб	Вміст, мас. %						
	Al	Mo	Fe	Zr	Si	O	N
Основа	6.64	3.63	0.21	1.64	0.32	0.11	0.012
Оплавлений шар	6.13	3.68	0.20	1.69	0.32	0.13	0.016
ОСТ 1-90013-81	5.8...7.0	2.8...3.8	≤0.25	1.0...2.0	0.20...0.35	<0.15	<0.05



Рис. 3.22. Макроструктура металу зливка жароміцного титанового сплаву ВТ9 Ø 600 мм з оплавленою бічною поверхнею

відрізняється від решти металу зливка. Величина зерна, що визначається за 10-бальною шкалою макроструктур згідно з Інструкцією № 1054-76 ВІАМ, відповідає 6–7 балу в оплавленому шарі та 8–9 балу у зоні основного металу.

Дослідження мікроструктури зразків показало, що оплавлений шар складається з ділянок з одиничними α -пластинами, проміжки між якими займають дисперсні частинки. У металі оплавленого шару присутні також ділянки структури, де α -пластини зібрані в колонії різних розмірів, а дисперсні частинки знаходяться в проміжках між паралельними пластинами (рис. 3.24). Ділянки з одиничними α -пластинами переважають поблизу поверхні зливка, глибше в оплавленому шарі збільшується кількість α -колоній. Ширина α -колоній в оплавленому шарі становить 10...50 мкм, товщина α -пластин — 1...2.5 мкм. У швидко охолодженому металі оплавленого шару можуть бути метастабільні β -фаза і мартенситні фази. Дисперсні частинки можуть бути продуктами роз-

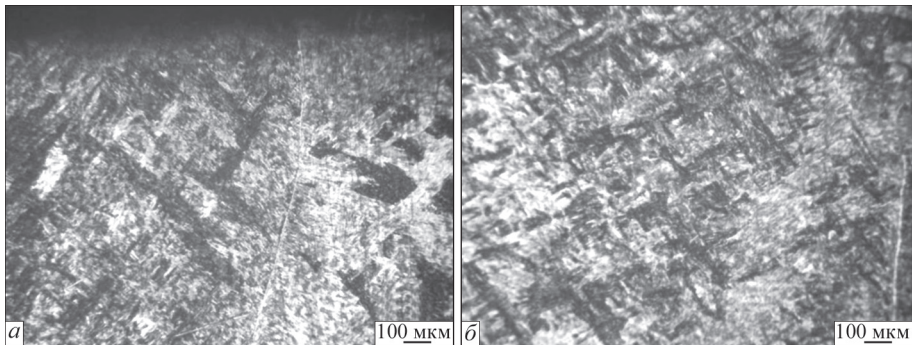


Рис. 3.23. Мікроструктура металу зливка жароміцного сплаву ВТ9 з оплавленою бічною поверхнею: *a* — на глибині 0.5 мм від поверхні; *б* — на глибині 12 мм від поверхні

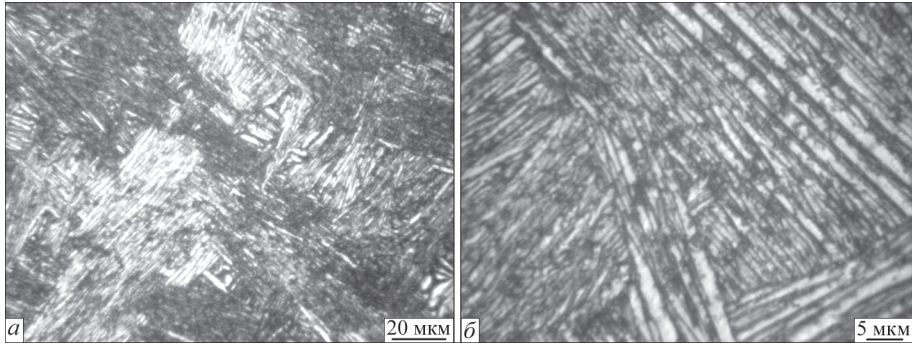


Рис. 3.24. Мікроструктура металу оплавленого шару зливка

паду метастабільних фаз. Розмір дисперсних частинок — 1...2 мкм. Мікроструктуру металу основи зливка показано на рис. 3.25.

Таким чином, показано, що в металі основи зливка переважає крупнозерниста структура, утворенню якої сприяло повільне охолодження великого об'єму металу. Границі первинних β -зерен декоровані α -облямівкою, яка місцями суцільна, а місцями переривчаста, при цьому її ширина становить до 7 мкм. Внутрішня зернова структура складається в основному з α -колоній розміром 10...60 мкм. У проміжках між колоніями спостерігаються ділянки з дисперсною структурою, розміри дисперсних частинок становлять до 1...2 мкм. Такі дрібні частинки є і між α -пластинами в колонії. На нашу думку, це можна пояснити тим, що при повільному охолодженні габаритного зливка відбувається перерозподіл легуючих елементів між фазовими складовими, у результаті чого, очевидно, відбувається розпад метастабільних мартенситних і β -метастабільної фази з виділенням дисперсних частинок стабільних α - та β -фаз. Товщина пластин у колоніях становить 1...3 мкм.

Таким чином, результати аналізу мікроструктури оплавленого шару та основи зливка жароміцного титанового сплаву ВТ9 свідчать про те, що обробка поверхні зливка електронними променями на вказаних вище режимах призво-

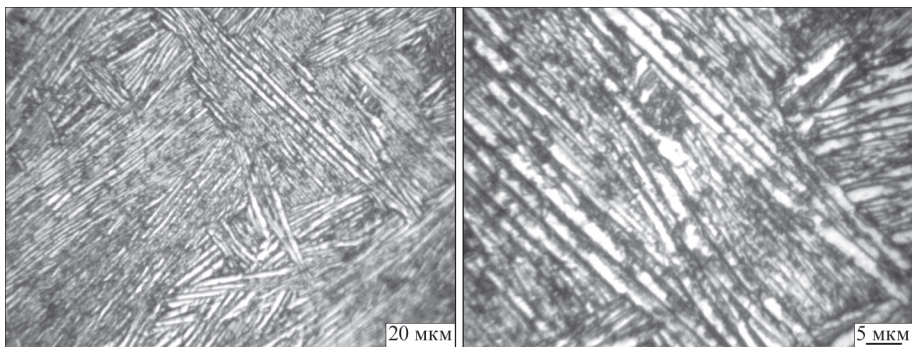


Рис. 3.25. Мікроструктура металу основи зливка

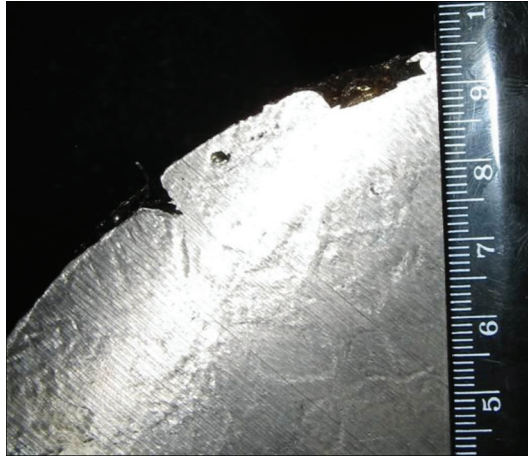


Рис. 3.26. Дефектний шар поверхні зливка

дить до подрібнення α -колоній та α -пластин зерен в оплавленому шарі порівняно з основою зливка.

За стандартною технологією дефекти, що утворюються на поверхні зливків титанових сплавів при їх виплавці, усуваються шляхом видалення поверхневого шару механічними методами. Товщина дефектного шару, що видаляється з поверхні зливків, сягає до 10 мм (рис. 3.26), втрати в стружку при цьому складають до 100...140 кг для зливка \varnothing 600 мм, що становить до 4...5.5 % від загальної маси зливка.

Отже, технологія електронно-променевого опалення поверхневого шару зливків жароміцного титанового сплаву ВТ9 дозволяє з високою ефективністю отримувати якісний метал в оплавленому шарі, який відповідає вимогам стандарту, та зберігати при цьому до 5.5 % від загальної маси зливка металу високої вартості.

Розділ 4

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ТЕРМОДЕФОРМАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ НА МЕТАЛ ЗЛИВКІВ ВИСОКОМІЦНИХ СПЛАВІВ ТИТАНУ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ, ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ НАПІВФАБРИКАТІВ

4.1. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТЕРМОДЕФОРМАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ВИСОКОМІЦНИХ СКЛАДНОЛЕГОВАНИХ СПЛАВІВ ТИТАНУ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

З метою дослідження якості металу зливків жароміцних сплавів титану, отриманих методом ЕПП, були проведені роботи з виготовлення кованих прутків $\varnothing 300$ мм зі зливка $\varnothing 600$ мм сплаву ВТ9 (рис. 4.1) [172].

Кування проводилося за наступною технологічною схемою, яка складалась з трьох етапів.

Перший етап — нагрівання зливка $\varnothing 600$ мм до температури 1180 °С; витримка заготовки протягом 8 год; кування на плоских бійках у квадрат 450×450 мм.

Другий етап — нагрівання заготовки 450×450 мм до температури 1100 °С; кування в круглий пруток $\varnothing 360$ мм і розрізання його на 3 частини.



Рис. 4.1. Напівфабрикати у вигляді кованих прутків $\varnothing 300$ мм зі сплаву ВТ9

Третій етап — нагрівання заготовки Ø 360 мм до температури 1100 °С; кування заготовок через квадрат у готовий розмір Ø 315 мм; рихтування.

Температура закінчення кування була не нижче за 850 °С. Було отримано три деформованих прутка, і з кожного був відрізаний теплет завтовшки 15 мм для подальших досліджень.

З метою подальшого вивчення якості отриманих напівфабрикатів із титанового сплаву ВТ9 були проведені комплексні дослідження, які склалися з наступних робіт:

- отримання темплетів із деформованих напівфабрикатів;
- термічна обробка темплетів;
- підготовка поверхні темплетів;
- хімічне травлення темплетів;
- контроль макроструктури металу;
- порізка на зразки;
- визначення температури поліморфного перетворення T_{mn} ;
- визначення механічних властивостей при 20 °С;
- визначення рівня тривалої міцності при 500 °С;
- контроль мікроструктури.

Термічна обробка отриманих поковок і вирізаних із них темплетів виконувалась за наступним режимом:

- нагрівання до температури 950 °С; витримка 60 хв; охолодження на повітрі;
- нагрівання до температури 550 °С; витримка 360 хв; охолодження на повітрі.

Після механічної обробки й травлення поверхні темплетів було досліджено їх макроструктуру та встановлено, що в макроструктурі металу отриманих прутків відсутні тріщини, розшарування, пористості, а металевих і неметалевих включень не виявлено.

Для подальших досліджень із трьох темплетів методом електроіскрового різання за наведеною нижче схемою (рис. 4.2) було виготовлено зразки для визначення механічних характеристик і температури поліморфного перетворення титанового сплаву ВТ9.

Експериментально визначена температура поліморфного перетворення (T_{mn}) для даних зразків титанового сплаву ВТ9 склала $T_{\text{mn}} = 950$ °С. Механічні властивості визначали при температурах 20 та 500 °С після проведення вищевказаної термічної обробки. Випробування на відповідність вимогам стандартів містили випробування на розтяг, ударну в'язкість, твердість і тривалу міцність (табл. 4.1, 4.2). Ці дані дозволяють зробити висновок, що більшість механічних властивостей напівфабрикатів зі сплаву ВТ9, отриманого методом ЕПП, відповідають вимогам стандартів, але пластичні властивості виявилися нижчими за стандартні. Це може бути пов'язано з тим, що температура деформації знаходилась в області існування β -фази, і в металі сформувалася повні-

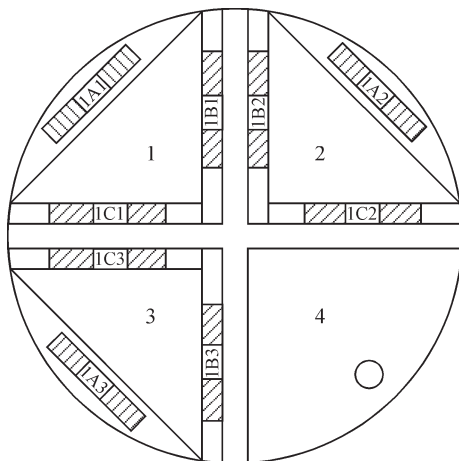


Рис. 4.2. Схема різання темплету на зразки для подальших механічних випробувань

стю пластинчаста структура з досить великим розміром пластин. Відомо, що від типу структури та розміру кристалітів дуже сильно залежать показники пластичності матеріалу. Зниження поперечного звуження при пластинчастій структурі у порівнянні з глобулярною може досягати 70...80 відн. %, а відносне подовження може зменшуватися на 40...50 % [113, 173]. Також досить низькою була температура відпалу, на нижній межі поліморфного перетворення.

Більшість зразків титанового сплаву ВТ9 пройшли випробування на тривалу міцність при температурі 50 °С та $\sigma = 60$ МПа без руйнування, середній час випробувань склав 122 год. Аналіз мікроструктури отриманих напівфабрикатів титанового сплаву ВТ9 у вигляді гарячедеформованих прутків $\varnothing 315$ мм показав, що мікроструктура всіх зразків відповідає 4а–6а типу за 9-типовою шкалою мікроструктур згідно з Інструкцією № 1054-76 (рис. 4.3) [174].

Таблиця 4.1. Механічні властивості зразків деформованого напівфабрикату титанового сплаву ВТ9

Номер темплету	Номер зразка	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	Твердість, HB
1	1C1	1129	3.2	9	23	341
	1C2	1116	4.8	17	25	
	1C3	1120	4	12	20	
2	2C1	1142	4.8	14.5	23	331
	2C2	1139	4.8	12.6	28	
	2C3	1127	3.2	11.8	28	
3	3C1	1089	4	13.4	35	321
	3C2	1078	4	18.5	35	
	3C3	1101	6	20.6	30	
ОСТ 1-90107-73		932-1177	>6	>14	>29	269...363

Таблиця 4.2. Тривала міцність зразків із деформованих напівфабрикатів титанового сплаву ВТ9

Номер темплета	Тривала міцність при $T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$			
	Номер зразка	σ_v , МПа	Час, год	Примітка
1	1А1	60	132	без руйнування
	1А2		132	без руйнування
	1А3		96	з руйнуванням
2	2А1	60	126	без руйнування
	2А2		137	без руйнування
	2А3		113	без руйнування
3	3А1	60	96	з руйнуванням
	3А2		126	без руйнування
	3А3		137	без руйнування
ОСТ 1-90107-73		60	≥ 100	—

Для покращення характеристик пластичності було проведено додаткову термічну обробку зразків із титанового сплаву ВТ9. Температура першого нагріву була підвищена до $980 \text{ }^\circ\text{C}$, а час витримки в печі зразків також підвищили до 120 хв. Проведені механічні випробування зразків після додаткової терміч-

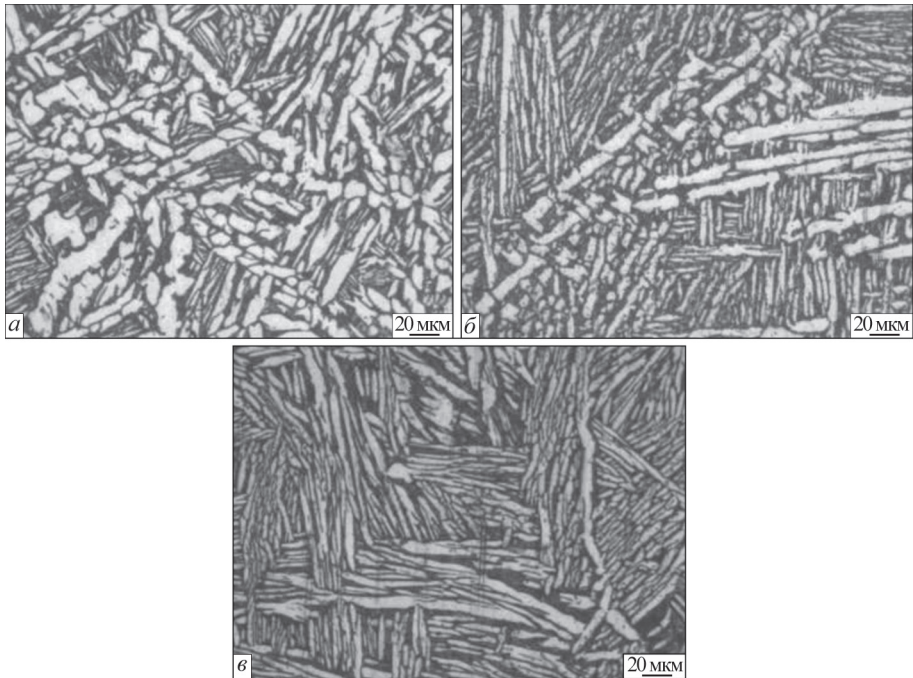


Рис. 4.3. Мікроструктура прутків $\text{Ø} 315 \text{ мм}$, отриманих деформаційною обробкою зливка $\text{Ø} 600 \text{ мм}$ із титанового сплаву ВТ9: *a* — зразок 1; *б* — зразок 2; *в* — зразок 3

Таблиця 4.3. Механічні властивості зразків деформованого напівфабрикату титанового сплаву ВТ9 після додаткової термообробки

Номер темплета	Номер зразка	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU , Дж/см ²	Твердість, HV
1	1	1068	11	29	29	321
	2	1092	10	14	30	311
2	1	1092	7	16	29	321
	2	1067	10	42	30	321
3	1	1078	11	29	33	321
	2	1118	14	32	32	321
ОСТ 1-90107-73		932...1177	>6	>14	>29	269...363

ної обробки (табл. 4.3) показали повну відповідність механічних характеристик напівфабрикатів із титанового сплаву ВТ9, отриманого методом ЕПП, вимогам стандартів.

Таким чином, додаткова термічна обробка показала, що подвійний відпал як один із видів термічної обробки жароміцного титанового сплаву ВТ9, застосований у даному випадку, повністю забезпечує механічні властивості деформованих напівфабрикатів, отриманих зі зливок, виплавлених методом ЕПП.

Міцність високоміцних титанових сплавів визначається не тільки ступенем легування, а й параметрами обробки тиском, подальшої термічної або термомеханічної обробки. Однак із підвищенням міцності сплаву, як правило, знижується його пластичність, що є істотним недоліком матеріалу при виготовленні з нього конструкцій, які працюють в умовах вібрації, повторної статички, вигину, ударних навантажень. Тому останнім часом все більша увага приділяється оптимізації параметрів деформування зливок при виготовленні з них напівфабрикатів і режимам термічної обробки.

Фізико-хімічні та теплофізичні особливості титану та сплавів на його основі вимагають ретельного підходу до процесів їх деформування. Це обумовлено наступними факторами. Знижена теплопровідність титанових сплавів призводить до температурних перепадів по перерізу зливок і заготовок при їх нагріванні, виникнення значних внутрішніх напружень, а в окремих випадках — до утворення тріщин. Це обумовлює необхідність обмеження швидкості нагрівання, особливо зливок і заготовок великих розмірів. При охолодженні заготовок також можуть виникати значні температурні перепади. Наприклад, швидке охолодження гострих кутів, тонких елементів перерізів заготовок надзвичайно ускладнює забезпечення рівномірної деформації, призводить до утворення тріщин і низки інших дефектів.

З метою подальшого вивчення якості титанових зливок були проведені комплексні дослідницькі роботи з виготовлення напівфабрикатів зі зливок високоміцних сплавів титану, отриманих методом ЕПП.

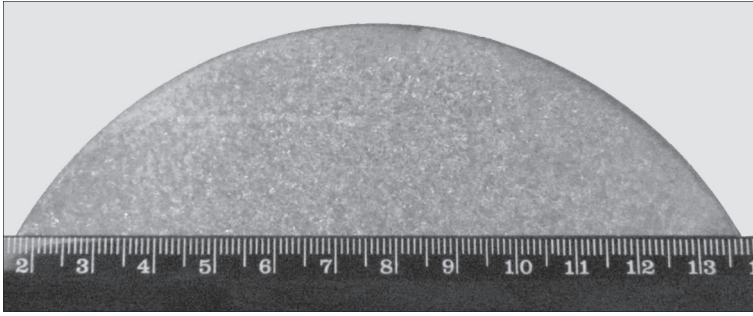


Рис. 4.4. Макроструктура кованого прутка \varnothing 140 мм із титанового сплаву VT20

Традиційно для виготовлення трубної заготовки зі сплаву титану VT20 \varnothing 110...150 мм використовують зливки \varnothing 300 мм, виплавлені електронно-променевим або вакуумно-дуговим способом. Трубну заготовку виготовляють куванням злиwkів на гідропресах і кувальних машинах в інтервалі температур 1000...1050 °С. Проведений вхідний контроль злиwkів \varnothing 500 мм сплаву титану VT20 показав, що за якістю поверхні та геометричними розмірами вони відповідають вимогам ТУ У 27.5-23712944-005–2001 «Заготовка трубна лита з титанових сплавів».

Структура металу, що формується в процесі гарячої деформації, істотно впливає на механічні властивості виробів. Основними факторами, що впливають на макроструктуру поковок, є: вихідна структура зливка, температура, ступінь і швидкість його деформації [175]. Оптимальне поєднання механічних властивостей титанових поковок забезпечується дрібно- та середньозернистою пластинчастою структурою, яка позитивно впливає на міцність, пластичність, тривалу міцність та границю витривалості [176].

Виплавлені зливки \varnothing 500 мм сплаву VT20 з оплавленою поверхнею піддавали гарячій деформації на гідропресі в інтервалі температур 970...1000 °С, а потім на відкритому кувальному молоті в інтервалі температур 990...1020 °С за ступеня деформації 40...50 % з наступною механічною обробкою окисленої поверхні поковки. Макроструктура кованої заготовки, отриманої за розробленою технологією, відповідає 6-ти балам за шкалою макроструктур (рис. 4.4).

Таблиця 4.4. Середні значення механічних властивостей кованих прутків \varnothing 140 мм із титанового сплаву VT20

Номер поковки	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/м ²
2251	930	10	21	5.1
2252	951	11	24	5.2
2256	943	10	22	5.0
ОСТ 1-90107–73	900...1150	8	20	3.0



Рис. 4.5. Ковані прутки із титанового сплаву BT20 \varnothing 140 мм

Визначення механічних властивостей кованих прутків проводилося за кімнатної температури (табл. 4.8). Зразки для визначення міцності та пластичності металу відбиралися від прутків, виготовлених із головної, середньої та донної частин зливка. Механічні властивості кованих прутків відповідають вимогам стандартів ОСТ 1-90107-73 «Прутки ковані з титанових сплавів». Отримані прутки (рис. 4.5) використовувалися як трубні заготовки для подальшого виготовлення труб.

Гарячу прокатку труб на розмір 114×15 мм проводили на трубопрокатній автоматичній установці «ГПА 140» за технологією ТПЦ «НЗСТ «ЮТ та СТ» на ЗАТ «НЗТО». Нагрівання металу в печі здійснювали до температури центру металу 1000 ± 10 °С.

Гарячекатані труби розміром 114×15×3000...3500 мм контролювали на відповідність вимогам ГОСТ 21945-76 «Труби безшовні гарячекатані зі сплавів на основі титану» зі звичайною якістю поверхні без механічної обробки (рис. 4.6). Візуальний огляд зовнішньої та внутрішньої поверхонь показав, що якість поверхонь, геометричні розміри та кривизна труб знаходяться в межах вимог стандартів.

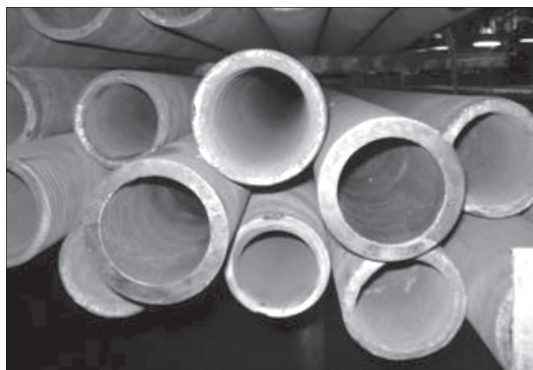


Рис. 4.6. Гарячекатані труби 114×15×3000...3500 мм із титанового сплаву BT20



Рис. 4.7. Макроструктура гарячекатаної труби 114×15 мм із титанового сплаву ВТ20

Макроструктура труб дрібнозерниста (рис. 4.7). Глибина газонасиченого шару не перевищує значень шару, що утворюється в процесі прокатки труб за існуючою технологією.

Труби піддавали 100 % контролю УЗК. Дефектів під час контролю не виявлено. Усі операції обробки труб від здачі у виробництво до приймального контролю здійснювали за діючою технологією. Труби після механічної обробки піддавали термообробці в печі за режимом: нагрівання при температурі $850 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ з подальшим охолодженням на повітрі протягом 1 год.

Механічні властивості гарячекатаних труб відповідають вимогам стандартів (табл. 4.5). Нерівномірностей розподілу значень механічних властивостей в трубах у межах однієї плавки не спостерігалось. Пластичні властивості перебувають на досить високому рівні.

Таблиця 4.5. Механічні властивості гарячекатаних труб 114×15 мм із титанового сплаву ВТ20

Номер зразка	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU , Дж/м ²
1	984	13.0	29.8	6.2
2	967	13.1	26.2	5.6
3	1012	13.0	29.1	5.7
4	1005	12.9	28.4	6.1
ТУ 14-3-1349-85	95...115	<8.0	<18.0	<3.0

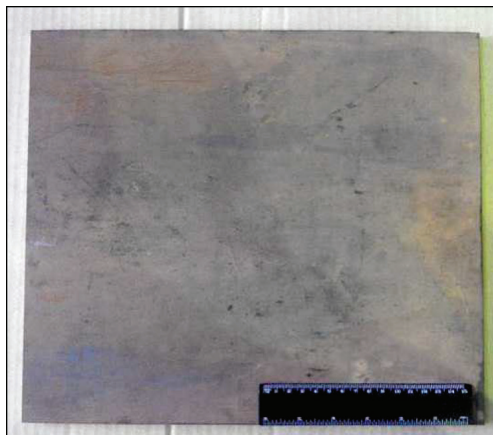


Рис. 4.8. Напівфабрикат у вигляді пластини зі сплаву VT23

Таким чином, проведені роботи дозволили показати високу якість прутків і труб сплаву титану VT20, виготовлених з металу електронно-променевою плавкою.

З метою подальшого вивчення якості металу отриманих зливок сплаву VT23 були проведені дослідницькі роботи з виготовлення напівфабрикатів у вигляді листів. Деформаційна обробка плит проводилася на реверсивному прокатному ДУО стані марки Skoda 355/500, у результаті якої були отримані листи, порізані надалі на пластини завширшки 300 мм, завдовжки 350 мм і завтовшки 5 мм (рис. 4.8). Листи з титанового сплаву VT23 виготовлялися із застосуванням поздовжньо-поперечної прокатки, а для досягнення необхідної якості поверхні листів і різновтовщинності застосовувалися стандартні оздоблювальні операції. На поверхні отриманих листів при візуальному огляді тріщин, розшарувань, а також включень не виявлено. Заключна термообробка листів здійснювалася за режимом: нагрівання при $T = 750$ °С, витримка 30 хв, охолодження на повітрі.

Мікроструктуру металу отриманих листів сплаву VT23 завтовшки 5 мм досліджували на металографічному мікроскопі Neophot-2. На рис. 4.9 показано типову мікроструктуру в стані після фінішної термообробки. Внутришньозеренна структура складається з пластин α -фази, між якими знаходиться β -фаза. Товщина α -пластин становить 0.7...1.0 мкм. По границях β -зерен спостерігається α -облямівка завтовшки до 1.5 мкм. Така мікроструктура характерна для титанових ($\alpha+\beta$)-сплавів мартенситного типу, до якого відноситься й сплав VT23. Напрямок частинок α -фази ненаправлений.

Дослідження механічних властивостей отриманого металу проводили шляхом випробування зразків на розтяг при $T = 20$ °С. Результати проведених випробувань показують, що метал напівфабрикатів у вигляді листів, отриманих в результаті проведеної роботи, відповідає вимогам стандарту (табл. 4.6).

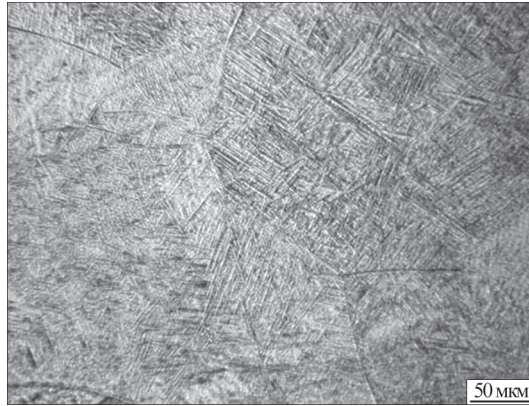


Рис. 4.9. Мікроструктура металу пластини зі сплаву ВТ23

Таким чином, проведені роботи показують, що ЕПП є ефективним методом отримання якісних зливок складнолегованого сплаву ВТ23, а якість напівфабрикатів у вигляді листів, виготовлених із цих зливок, відповідає вимогам стандартів. При цьому метал листів має підвищену пластичність при високих показниках міцності.

З метою вивчення якості зливок сплавів титану були проведені комплексні роботи з виготовлення напівфабрикатів у вигляді труб зі зливок титанового сплаву ВТ14, отриманих методом ЕПП.

Для отримання дрібного зерна та рівномірного розподілу механічних властивостей у трубних заготовках доцільно застосувати зливки великого діаметра, що дозволяє підвищити ступінь деформації і тим самим призводить до більшого подрібнення структури [177].

Міцність титанових сплавів визначається не тільки ступенем легування, а й параметрами обробки тиском, подальшої термічної або термомеханічної обробки. Однак підвищення міцності сплаву, як правило, призводить до зниження його пластичності. Основними факторами, що впливають на макроструктуру кованої заготовки, є вихідна структура зливка, температура, ступінь і швидкість його деформації [178]. Оптимальне поєднання механічних властивостей титанових кованих заготовок забезпечується дрібно- та середньозернистою пластинчастою структурою, яка позитивно впливає на міцність, пластичність, тривалу міцність і границю витривалості.

Таблиця 4.6. Механічні властивості металу листів зі сплаву ВТ23

Номер зразка	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	KCU , Дж/м ²
1	1072	1126	11.2	19.5	43.7
2	1054	1106	12.7	24.9	47.9
3	1065	1114	10.7	19.7	43.3
ОСТ 1-90013-81	—	1100...1200	10...13	—	—

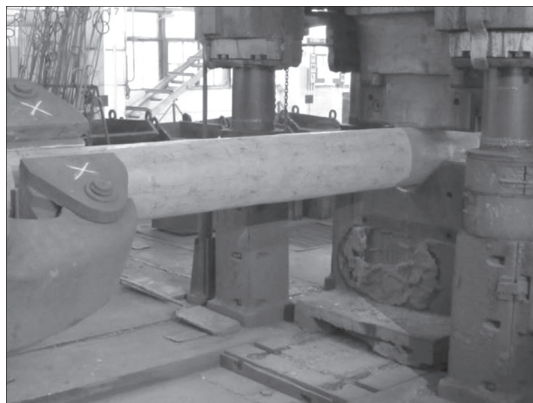


Рис. 4.10. Процес кування зливка сплаву титану VT14

Виплавлені зливки $\varnothing 600$ мм сплаву VT14 з оплавленою поверхнею піддавали гарячій деформації на відкритому кувальному молоті в два етапи до діаметра поковки 200 мм: перший етап — в інтервалі температур 1100...1150 °С за ступеня деформації 40 %, другий — в інтервалі температур 1050...1100 °С за ступеня деформації 60 % (рис. 4.10).

Зі зливків $\varnothing 600$ мм титанового сплаву VT14, виплавлених методом ЕПП з проміжною ємністю, були отримані ковани прутки $\varnothing 200$ мм (рис. 4.11).

На поверхні кованих прутків $\varnothing 200$ мм зі сплаву VT14 при візуальному огляді тріщин, розшарувань, а також включень не виявлено.

Визначення механічних властивостей кованих прутків проводилося при кімнатній температурі на відпалених зразках (табл. 4.7). Зразки для визначення



Рис. 4.11. Ковані прутки $\varnothing 200$ мм із титанового сплаву VT14

Таблиця 4.7. Середні значення механічних властивостей кованих прутків Ø 200 мм із титанового сплаву ВТ14

Номер поковки	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/м ²
1	990	12	22	5.0
2	981	13	24	5.2
3	973	10	24	5.1
ОСТ 1-90107-73	850...1100	>8	>20	>3.0

міцності та пластичності металу відбиралися від прутків у поперечному напрямку з головної, середньої і донної частин заготовки. Механічні властивості кованих прутків відповідають вимогам стандартів ОСТ 1-90107-73 «Прутки ковани з титанових сплавів».

Макроструктура кованої заготовки, виявлена на макротемплеті, не має тріщин, розшарувань, волосовин, пустот, металевих і неметалевих включень, видимих незброєним оком, і відповідає 6-му балу шкали макроструктур (рис. 4.12).

Ковані прутки піддавали механічній обробці для видалення поверхневих дефектів і газонасиченого шару (рис. 4.13).

Трубні заготовки отримували механічною обробкою кованих прутків. На токарно-гвинторізному верстаті ДПЗ00 методом свердління було отримано отвір Ø 90 мм у центральній частині трубних заготовок (рис. 4.14).

Трубні заготовки Ø 190/90 мм із титанового сплаву ВТ14 піддавалися відпалу при температурі 750 °С протягом 1 год з наступним охолодженням на повітрі. Візуальний огляд зовнішньої і внутрішньої поверхні показав, що якість поверхні, геометричні розміри та кривизна трубних заготовок із титанового сплаву ВТ14 знаходяться в межах вимог стандартів.



Рис. 4.12. Макроструктура кованого прутка Ø 200 мм із титанового сплаву ВТ14



Рис. 4.13. Механічно оброблені ковани прутки \varnothing 190 мм із титанового сплаву ВТ14

Макроструктура трубних заготовок у поздовжньому напрямку характеризується дрібними зернами, витягнутими уздовж осі пластичної деформації (рис. 4.15).

Механічні властивості трубних заготовок визначалися на зразках, вирізаних у поздовжньому напрямку (табл. 4.8). Як видно з таблиці, границя міцності трубних заготовок у поздовжньому напрямку дещо знижується, проте підвищуються пластичні властивості.

Гаряче пресування труб на розмір \varnothing 120×15 мм виробляли на пресі зусиллям 2000 т.с. Перед пресуванням на трубні заготовки наносилося скломасило. Нагрівання трубної заготовки в печі здійснювали до температури центру металу 960 ± 10 °С. Візуальний огляд зовнішньої і внутрішньої поверхонь показав, що якість поверхонь, геометричні розміри та кривизна труб знаходяться в межах вимог стандартів. Дефектів при ультразвуковому контролі не виявлено.



Рис. 4.14. Трубні заготовки \varnothing 190/90 мм із титанового сплаву ВТ14

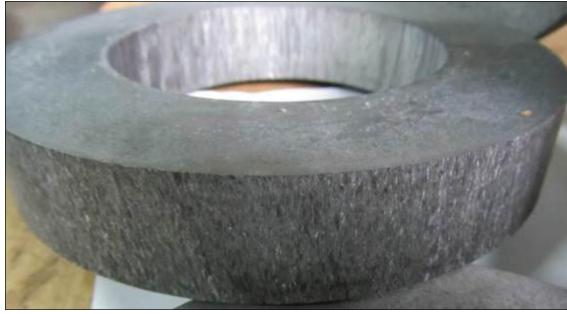


Рис. 4.15. Макроструктура трубної заготовки $\varnothing 190/90$ мм із титанового сплаву ВТ14

Таблиця 4.8. Середні значення механічних властивостей трубних заготовок $\varnothing 190/90$ мм із титанового сплаву ВТ14

Номер поковки	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/м ²
1	923	14	40	6.9
2	911	17	42	7.0
3	903	13	39	6.3
ТУ 1-5-127-73	900...1100	>10	>35	>5.0

Труби після механічної обробки (рис. 4.16) піддавали термообробці за режимом: нагрівання при температурі 750 ± 10 °С впродовж 1 год з наступним охолодженням на повітрі.

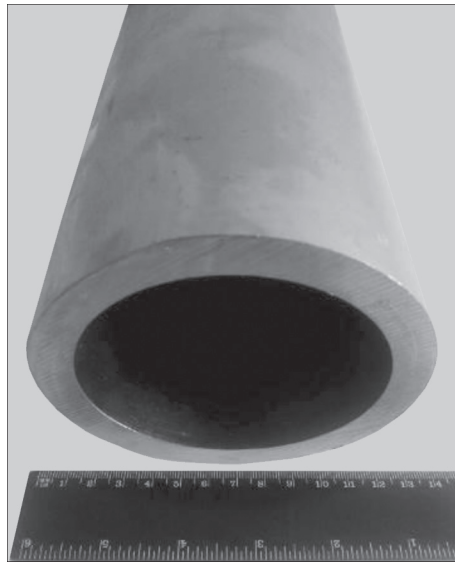


Рис. 4.16. Труба гарячепресована $\varnothing 120 \times 15 \times 2500$ мм після механічної обробки

Таблиця 4.9. Механічні властивості гарячепресованих труб $\varnothing 120 \times 15 \times 2500$ мм із титанового сплаву ВТ14

Номер зразка	σ_s , МПа	δ , %	ψ , %	KCU , Дж/м ²
1	963	12.0	26.3	6.0
2	972	12.1	26.9	5.7
3	950	12.9	29.0	5.9
ГОСТ 21945	900...1100	>8.0	>25.0	>4.0

Механічні властивості гарячепресованих труб відповідають вимогам ГОСТ 21945 «Труби безшовні гарячекатані із сплавів на основі титану» (табл. 4.9).

Таким чином, проведені роботи показали, що якість труб, виготовлених зі сплаву титану ВТ14, отриманого методом ЕПП, відповідають вимогам стандартів, мають високу пластичність при збереженні міцності.

Отримані зливки з титанового сплаву ВТ14 можуть бути використані як для виготовлення гарячекатаних, так і пресованих труб.

4.2. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТЕРМОДЕФОРМАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ НОВОГО ВИСОКОМІЦНОГО СКЛАДНОЛЕГОВАНОГО СПЛАВУ ТИТАНУ Т120, ОТРИМАНОГО МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

Для ширшого використання високоміцних титанових сплавів у різних областях промисловості необхідно не тільки створювати нові матеріали на основі титану з вищими експлуатаційними характеристиками, але й в подальшому вдосконалювати виробництво титанових напівфабрикатів. Адже надійність та ефективність експлуатації деталей і вузлів із високоміцних титанових сплавів багато в чому визначається чутливістю їх механічних властивостей до відхилень технологічних параметрів у процесі обробки. Це стосується не тільки технології виготовлення тих чи інших деталей і вузлів, але й значною мірою технології виробництва напівфабрикатів.

Структура напівфабрикатів або виробів формується в процесі термомеханічної обробки, рекристалізації або фазових перетворень та істотно впливає на технологічні та експлуатаційні властивості.

Нагрівання $(\alpha+\beta)$ -сплавів титану до температур, що відповідають однофазній β -області, супроводжується значним підвищенням пластичності (особливо при деформації литого металу), зниженням опору деформації. Проте деформація тільки в β -області не дозволяє отримати структуру металу, що забезпечує його високі експлуатаційні властивості. Оптимальну структуру можна отримати при деформації в $(\alpha+\beta)$ -області, однак пластичність металу, особливо в литому стані, в цьому інтервалі температур значно нижче, а опір деформації вище. У практиці промислового виробництва це протиріччя долається при здійсненні деформації в

дві стадії: деформації зливків у β -області і подальшій деформації в $(\alpha+\beta)$ -області. Ступінь деформації на цих стадіях підбирають, виходячи з необхідного загального формозміннення металу при виготовленні напівфабрикату. Мінімальне значення ступеня деформації на першій стадії визначається необхідністю отримання дрібнозернистої макроструктури, на другій стадії — оптимальної мікроструктури. Стосовно різних видів напівфабрикатів цей принцип реалізується в різних варіантах значень ступеня та температури деформації.

З метою подальшого вивчення якості зливків були проведені комплексні дослідницькі роботи з відпрацювання технології термдеформаційної обробки та виготовлення напівфабрикатів із вітчизняних високоміцних титанових сплавів, отриманих методом ЕПП.

З метою забезпечення необхідного рівня механічних властивостей титанового сплаву Т110 були проведені роботи з визначення параметрів деформації та режимів подальшої термічної обробки. Для правильного вибору температурних умов деформування та режимів подальшої термічної обробки методом гартування визначали температуру поліморфного $\beta \leftrightarrow (\alpha+\beta)$ -перетворення литого металу, яка склала 905 °С.

Таким чином, режими деформаційної обробки заготовки циліндричної форми були наступними:

- нагрівання заготовки в печі при температурі 1000 °С (на 50 °С вище за $T_{\text{пп}}$) з наступною витримкою 2 год (часткова гомогенізація);
- осадження на пресі вздовж повздовжньої осі на 30...40 %;
- підігрівання за тієї ж температури;
- розворот на 90°, осадження не менше за 30 %;
- розворот ще на 90° (площинами, які ще не пресувалися) і осадження не менше за 30 %;
- остигання до 400...500 °С;
- нагрівання в печі до температури 830 °С (не вище ніж $T_{\text{пп}}$) з наступним прокатуванням до товщини 12...14 мм з проміжними підігрівками між проходами.

Загальний ступінь деформації заготовки склав приблизно 86 %. Усі перераховані вище етапи деформаційної обробки зливка Т110 представлені на рис. 4.17.

У результаті прокатування зливків ЕПП сплаву Т110 отримано деформовані напівфабрикати завтовшки 15 мм і завдовжки 1000...1200 мм, із яких методом механічного різання вирізано пластини розмірами 120×250×15 мм (рис. 4.18).

Таким чином, були відпрацьовані режими гарячої пластичної деформації литого сплаву Т110 із загальним ступенем деформації 86 %. Встановлено, що після деформаційної обробки зливків ЕПП сплаву Т110 можливе отримання якісних деформованих напівфабрикатів без видимих дефектів.

Для подрібнення вихідної литої структури за рахунок процесів рекристалізації, поліпшення хімічної однорідності матеріалу, а так само для усунення дефектів, що виникають при металургійному виробництві литих зливків, використовують традиційні методи обробки тиском — кування, прокатування, екструзію. Використання прокатування дозволяє отримувати листи, які можна



Рис. 4.17. Етапи деформаційної обробки сплаву Т110 ЕПП для забезпечення найкращого структурно-фазового стану металу: а, б — пресування; в — нагрівання; г — прокатування

зварювати в різні елементи конструкцій. Високоміцний титановий сплав Т120 було створено саме як високоміцний матеріал, що здатний забезпечити високі показники механічних і експлуатаційних властивостей і при цьому добре зва-



Рис. 4.18. Деформовані напівфабрикати завтовшки 15 мм зі сплаву Т110

рюється. Тому подальші роботи було спрямовано на розробку технології виготовлення термдеформованих напівфабрикатів у вигляді пластин.

Базуючись на попередньому досвіді деформаційної обробки вітчизняного високоміцного сплаву Т110, вихідні заготовки, виготовлені із отриманих методом ЕПП зливків \varnothing 150 мм нового високоміцного сплаву Т120 (рис. 4.19), піддавали пластичній деформації на прокатному стані Skoda за наступними технологічними режимами:

- нагрівання в печі до температури 1050 °С без застосування захисної атмосфери та захисних покриттів з витримкою впродовж 1 год;
- прокатування заготовки поперек осі зливка з розміру 145 мм до \sim 200 мм (рис. 4.20, *a*). Деформація заготовки за один прохід — 5 мм. Температура закінчення прокатування — не менше за 850 °С. При досягненні розміру \sim 200 мм



Рис. 4.19. Вихідні заготовки \varnothing 145 мм зі сплаву Т120 для термдеформаційної обробки

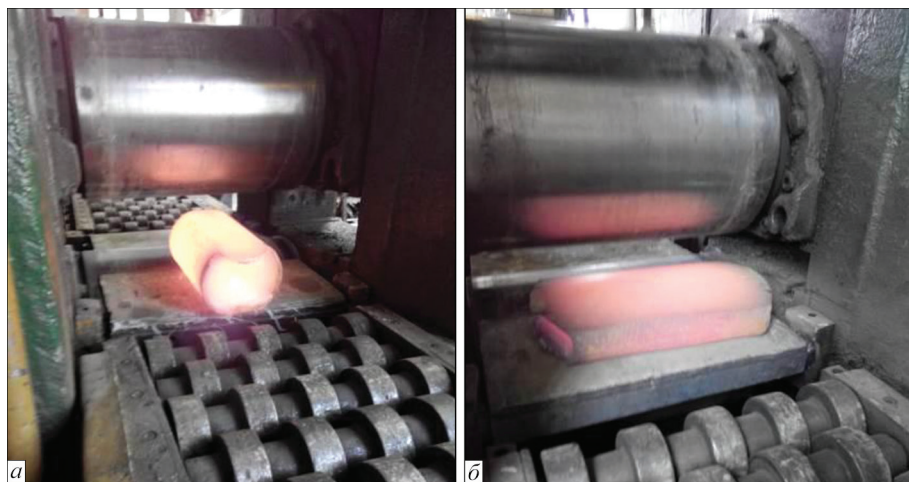


Рис. 4.20. Процес деформації заготовки \varnothing 145 мм зі сплаву Т120 у повздовжньому (а) та поперечному (б) напрямках

заготовка поверталася на 90° (рис. 4.20, б) і проводилася її докатування з проміжними підігрівками до досягнення ступеня деформації заготовки близько 60 %;

- нагрівання заготовок в печі до температури 960°C з витримкою 0.5 год;
- чистове докатування заготовок до товщини 8, 10, 13, 15 мм. Деформація заготовки за один прохід — 2...3 мм;
- рихтування на гідравлічному пресі з метою усунення прогинів. Охолодження заготовок здійснювалося на відкритому повітрі до температури навколишнього середовища.

Розмір прокатаних пластин по довжині становив понад 450 мм (рис. 4.21), що дозволило вирізати з однієї заготовки дві чистові пластини.

Термооброблені заготовки були піддані піскоструменевій обробці з метою усунення окисленого шару. Таким чином, було отримано партію пластин зі сплавів титану Т120 (рис. 4.22).



Рис. 4.21. Прокатана пластина зі сплаву Т120



Рис. 4.22. Партія пластин зі сплавів титану Т120

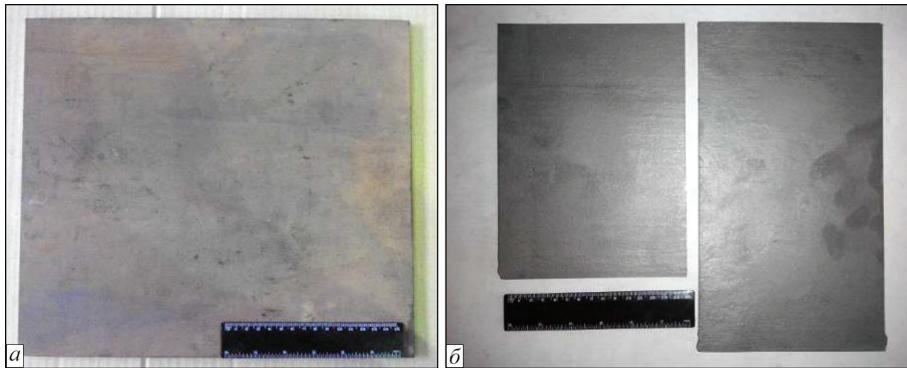


Рис. 4.23. Пластини 250×300×15 мм (а), 150×250×8 мм і 150×300×10 мм (б) із титанового сплаву Т120

Порізка в готовий розмір проводилася на строгальному верстаті. Вихід придатних готових пластин 250×300×8...15 мм, 150×250×8...15 мм, 150×300×8...15 мм із заготовок після пластичної деформації склав $\approx 70\%$ (рис. 4.23).

Таким чином, відпрацьовано режими та розроблено технологію деформаційної обробки зливків, отриманих методом ЕПП, нового високоміцного складнолегованого ($\alpha+\beta$)-сплаву титана Т120.

4.3. ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАПІВФАБРИКАТІВ ІЗ НОВИХ ВИСОКОМІЦНИХ СКЛАДНОЛЕГОВАНИХ СПЛАВІВ ТИТАНУ Т110 ТА Т120, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

З метою досягнення необхідного рівня механічних властивостей отриманих методом прокатування пластин із титанового сплаву Т110 були проведені роботи з термічної обробки. Пластини відпалювали або піддавали термічній обробці у двофазній ($\alpha+\beta$)-області при температурах $T = 750 \dots 850$ °С. Особливості тер-

Таблиця 4.10. Механічні властивості сплаву Т110 після різних режимів термічної обробки

Номер зразка	Вид термічної обробки	σ_b , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU , Дж/см ²
1	Відпал 750 °С, $t = 1$ год, охолодження з піччю	1100	1060	21	50	35...39
2	Гартування 800 °С, $t = 1$ год., у воду, старіння 600 °С, $t = 3$ год, охолодження на повітрі	1220	1115	19	60	28...29
3	Вакуумний відпал 850 °С, $t = 1$ год	1050	992	20	53	56...58

мічної обробки зразків і результати механічних випробувань матеріалу зразків після різних видів термічної обробки наведено в табл. 4.10.

Дослідження мікроструктури у поздовжньому та поперечному напрямках показало, що мікроструктура зразків після термічної обробки має глобулярну морфологію α -виділень усередині зерен (рис. 4.24). У зразках 1, 2 спостерігається структурна неоднорідність, пов'язана з частковою рекристалізацією в процесі термічної обробки. При цьому в зразках зберігалася текстура деформації. У зразку 3 спостерігається більш грубозерниста, рівновісна мікроструктура. Це пояснюється тим, що при вакуумній термообробці у результаті проходження збиральної рекристалізації глобуляризація виділень α -фази пройшла в більш повному обсязі. Пластинчастих виділень практично не спостерігається.

Таким чином, проведені дослідження свідчать про переваги термообробки зразків за режимами 1 і 2, які дозволяють отримати вищі показники міцності

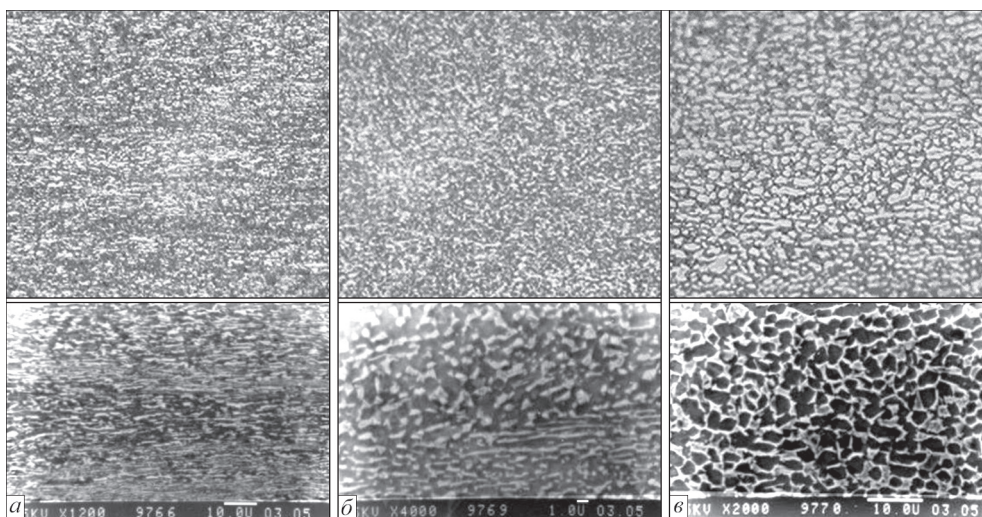


Рис. 4.24. Мікроструктура зразків сплаву Т110 після різних видів термічної обробки: *a* — зразок 1; *b* — зразок 2; *в* — зразок 3

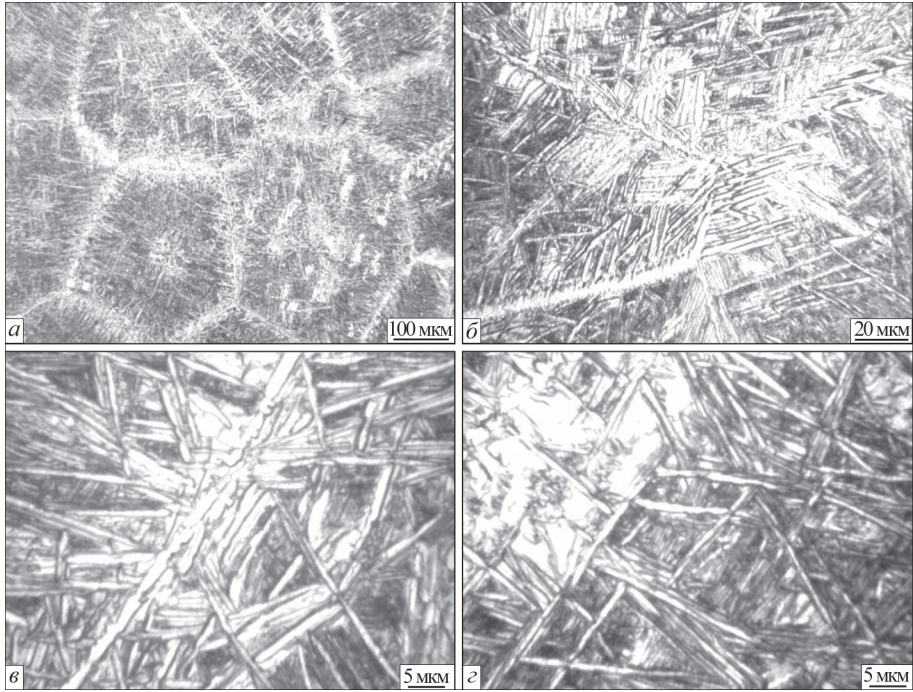


Рис. 4.25. Мікроструктура катаних пластин із титанового сплаву Т120

сплаву Т110. Вивчення якості металу дослідного сплаву Т120 проводилося після прокатування. Мікроструктуру катаних пластин із титанового сплаву Т120 наведено на рис. 4.25.

Після прокатування при температурах β -області сплав Т120 складається з рівновісних поліедричних первинних β -зерен розміром 150...200 мкм (рис. 4.25, а). Внутришньозеренна структура представлена α - і β -фазами, причому α -фаза має пластинчасту морфологію з товщиною пластин ~ 0.5 мкм (рис. 4.25, б, в). У структурі сплаву зустрічаються ділянки з β -фазою, що не розпалася — так звані β -плями (рис. 4.25, г). Мікроструктура зразка титанового сплаву Т120 має задовільну однорідність по перерізу. По перерізу зразка виявлено рівновісні ($\alpha+\beta$)-зерна величиною 240...360 мкм, що відповідає 2–3 балу за ГОСТ 5639–82. Твердість за Віккерсом також висока й становить по перерізу зразка 4750...5170 МПа. У металі сплаву Т120 спостерігаються виділення по границях зерен (рис. 4.26), а також фіксуються неметалеві виділення (рис. 4.27).

Для стабілізації структури та для зняття наклепу після прокатування сплав Т120 піддавався відпалу при різних температурах. Мікроструктуру сплаву після вакуумного відпалу при 700 °С впродовж 1 год показано на рис. 4.28.

Після вакуумного відпалу при температурі 700 °С сплав має більш дисперсну структуру, ніж після прокатування. Мабуть, це частково результат розпаду метастабільних фаз, які могли зафіксуватися в процесі охолодження металу

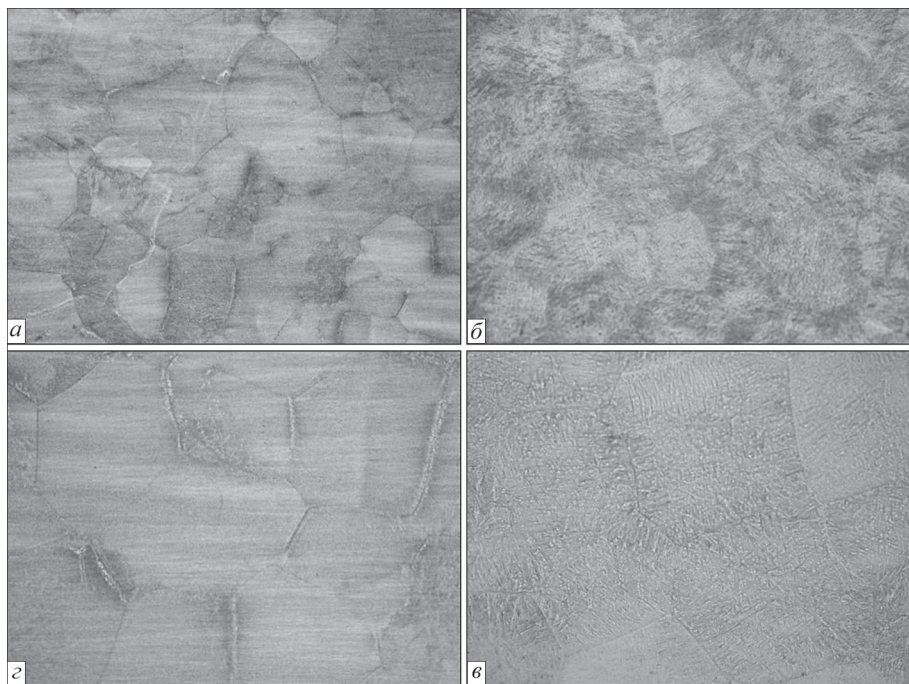


Рис. 4.26. Структура складнолегованого титанового сплаву T120 усередині листів: *a* — $\times 100$; *б*, *в* — $\times 200$; *г* — $\times 200$

після прокатування, однак після такого відпалу також спостерігається неоднорідність розпаду.

На рис. 4.29 представлено мікроструктуру сплаву T120 після вакуумного відпалу при $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 1 год.

Після вакуумного відпалу при температурі $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ пластини α -фази мають товщину $0.5\text{...}0.6\text{ }\mu\text{m}$. На деяких границях зерен спостерігається α -облямівка, структура є неоднорідною через однакову міру розпаду β -фази в різних зернах (рис. 4.29, *б*).

Мікроструктуру сплаву T120 після вакуумного відпалу при температурі $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 1 год показано на рис. 4.30. Після цього відпалу більшість границь первинних β -зерен мають α -облямівку (рис. 4.30, *а*) і структура є неоднорідною в межах одного зерна (рис. 4.30, *б*) через наявність так званих β -плям. Структура сплаву й при температурі відпалу $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ залишається дрібнодисперсною. Мікроструктуру сплаву T120 після пічного відпалу при температурі $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 1 год з наступним охолодженням на повітрі показано на рис. 4.31.

Після відпалу при температурі $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ розмір первинних β -зерен залишається таким же, як і до відпалу ($150\text{...}200\text{ }\mu\text{m}$), що видно на рис. 4.31, *а*. На всіх границях утворюється потовщена α -облямівка завширшки $2\text{...}4\text{ }\mu\text{m}$ (рис. 4.31, *в*, *г*). Зрідка виявляються β -плями (рис. 4.31, *б*). Відмінністю струк-

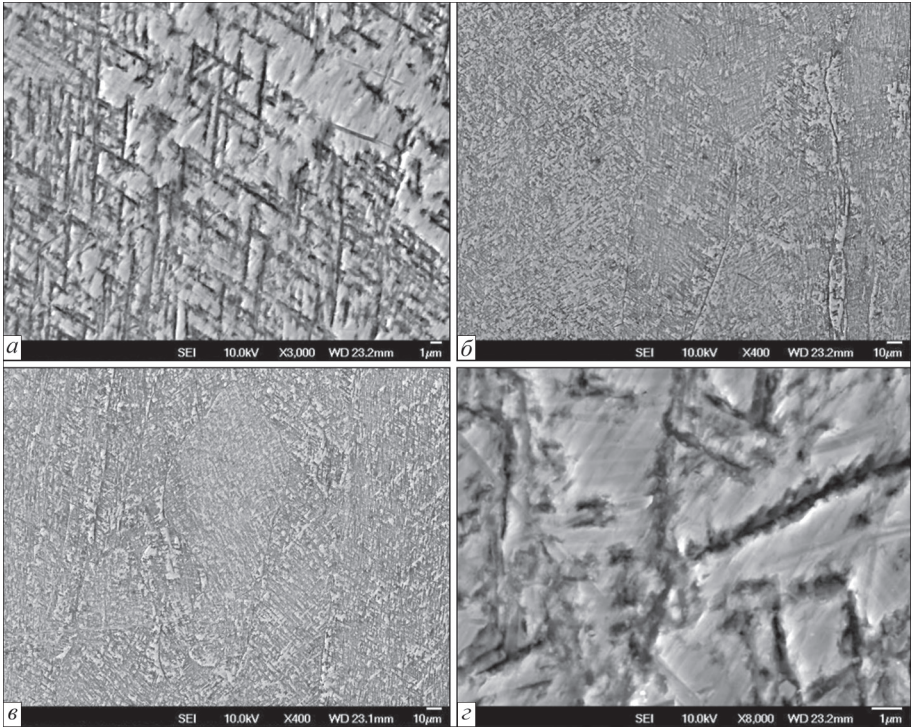


Рис. 4.27. Мікроструктура основного металу титанового сплаву T120 після іоно-вакуумного травлення

тури сплаву T120 після відпалу при температурі 900 °C від структури сплаву після відпалу при нижчій температурі є істотне збільшення розміру внутрішньозеренної структури. Так, у результаті коагуляції товщина пластин α -фази досягла величини 1...1.5 мкм. Такі структурні зміни повинні позитивно вплинути на механічні властивості сплаву. Механічні властивості складнолегованого титанового сплаву наведено в табл. 4.11.

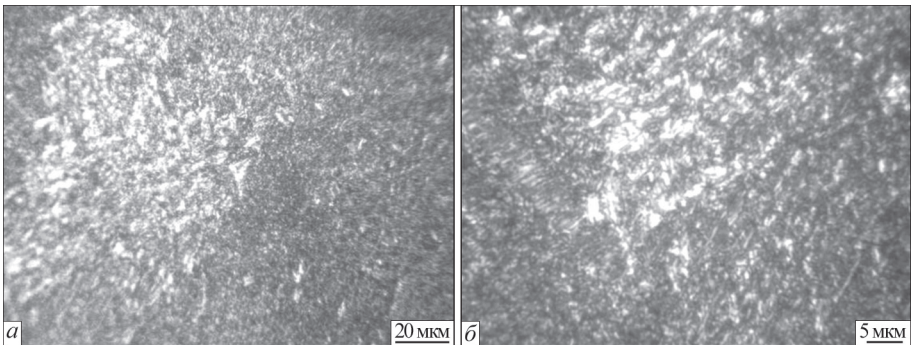


Рис. 4.28. Мікроструктура сплаву T120 після вакуумного відпалу при температурі 700 °C впродовж 1 год

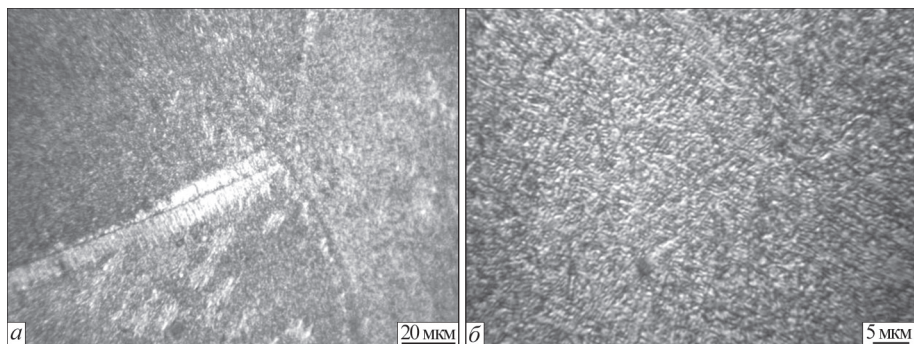


Рис. 4.29. Мікроструктура сплаву Т120 після вакуумного відпалу при температурі 750 °С впродовж 1 год

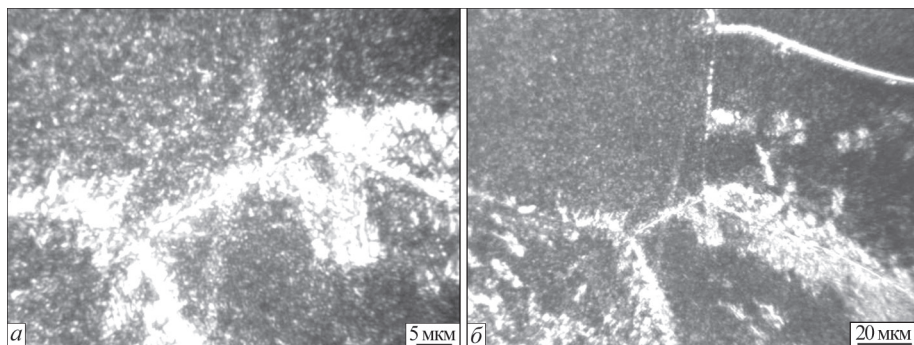


Рис. 4.30. Мікроструктура сплаву Т120 після вакуумного відпалу при температурі 800 °С впродовж 1 год

Проведені фрактографічні дослідження зламів ударних зразків з гострим надрізом металу високоміцного титанового сплаву Т120 показали, що руйнування зламів досліджуваних зразків сталося за міжзеренним механізмом змішаного типу (рис. 4.32).

Причиною руйнування по границях зерен є слабкість зв'язків у цих ділянках. Неоднорідність сегрегації на границях зерен може призвести до змішаного характеру руйнування, що характеризується появою в міжзеренному зламі ділянок

Таблиця 4.11. Механічні властивості складнолегованого титанового сплаву Т120

Номер зразка	Стан зразка	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	KCV , Дж/см ²
1	Відпал 800 °С (1 год)	1317.8	1262.3	2.7	12.9	6.7
2	Відпал 850 °С (1 год)	1214.9	1089.2	10.0	18.5	9.0
3	Відпал 900 °С (1 год)	1186.0	1123.6	13.3	19.0	13.5
4	Регламентований відпал 920 °С (1 год), охолодження з піччю до 840 °С (1 год), охолодження до 500 °С на повітрі	1270.8	1189.8	7.3	12.3	11.9

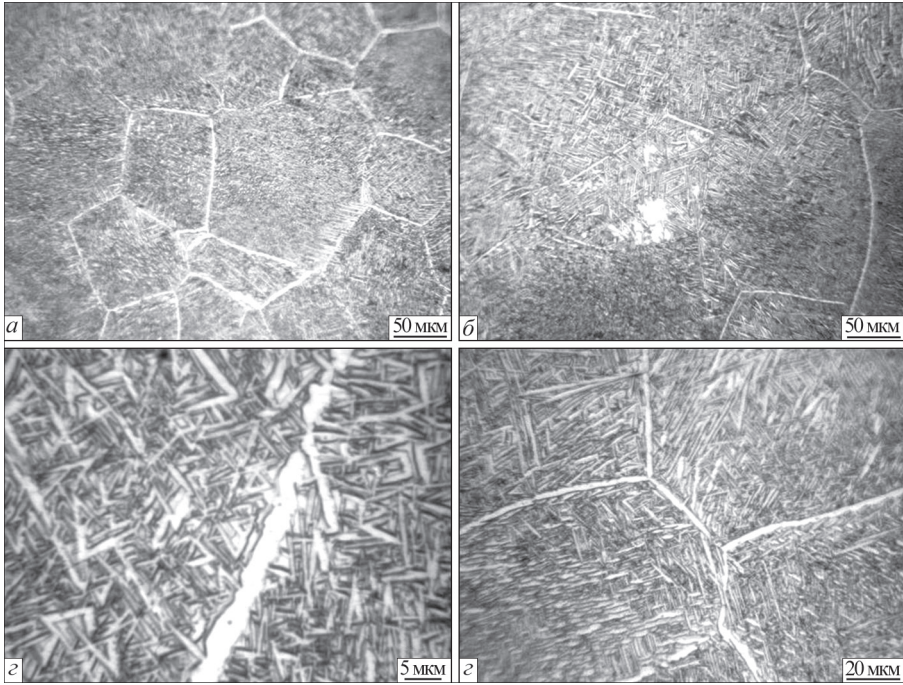


Рис. 4.31. Мікроструктура сплаву Т120 після пічного відпалу при 900 °С впродовж 1 год з наступним охолодженням на повітрі

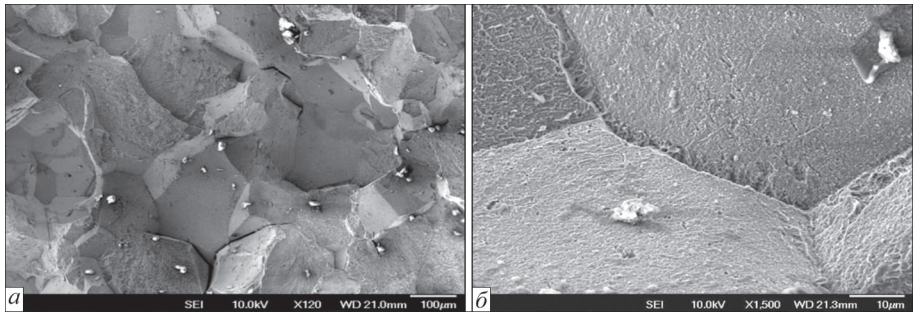


Рис. 4.32. Поверхня руйнування сплаву Т120: *a* — загальний вигляд, $\times 120$; *б* — руйнування по границях зерен, $\times 500$

ямкового рельєфу та ділянок крихкого руйнування, які призводять до розщеплення зерен по площинах скольного типу. При дослідженні поверхні руйнування зламів досліджуваного титанового сплаву Т120 виявлено неоднорідність сегрегації на границях зерен, яка призвела до змішаного механізму руйнування.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Белянчиков Л.Н. (1968) *Основы расчета дуговых вакуумных печей*. Москва, Металлургия.
2. Маквиллэн А.Д. (1958) *Титан*. Москва, Металлургиздат.
3. Бояршинов В.А., Шалимов А.Г., Щербаков А.А. и др. (1979) *Рафинирующие переплавы стали и сплавов в вакууме*. Москва, Металлургия.
4. Смелянский М.Я., Гуттерман К.Д. (1962) *Рабочий процесс и расчет вакуумных дуговых печей*. Москва, Госэнергоиздат.
5. Трубин А.Н., Кавтаев Е.Е., Новиков В.Ф. (2005) Изготовление цельнопрессованных с фланцем медных изложниц для вакуумных дуговых печей. *Титан*, **1**, 32–34.
6. Мороз Л.С., Чечулин Б.Б., Полин И.В. и др. (1960) *Титан и его сплавы*. Ленинград, Судпромгиз.
7. Андреев А.Л., Аношкин Н.Ф., Борзцовская К.М. и др. (1978) *Титановые сплавы. Плавка и литье титановых сплавов*. Москва, Металлургия.
8. Мовчан Б.А., Тихоновский А.Л., Курапов Ю.А. (1973) *Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов*. Киев, Наукова думка.
9. Патон Б.Е., Тихоновский А.Л., Тригуб Н.П. (1988) Электронно-лучевой переплав — ресурсосберегающий процесс вакуумной металлургии. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **1**, 44–49.
10. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Замков В.Н. и др. (2000) Развитие технологии электронно-лучевой плавки титана. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **2**, 34–40.
11. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В. (2008) Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорекрационных металлов. Киев, Наукова думка.
12. Ardene M., Jager G., Schiller S.Ein. (1963) 200-kW-elektronen stahl-mehrkammerofen. *Neue Hutte*, **1**, 2–5.
13. Schlatter R.-J. (1970) *Metals*, **22(4)**, 33–39.
14. Ахонин С.В. (2003) *Процессы рафинирования в вакууме и оптимизация режимов электронно-лучевой плавки высокорекрационных и тугоплавких металлов*: Автореф. дис. д-ра техн. наук. Киев.
15. Hering Mieczyslaw (1973) *Prz. Electroteh.*, **49(10)**, 473–475.
16. Guesne P. (1970) *Techn. Mod.*, **62(5)**, 219–221.
17. Furstenberger J. (1971) *Met. et Constr. Mec.*, **103(5)**, 247–249.
18. Stephan H. (1973) *Titanium Sci. and Technol.*, **1**, 343–352. Discuss. 517–518.
19. Ульянов В.Л. (1972) *Литейное производство*, **8**, 3–4.
20. (2007) *Электронно-лучевая плавка в литейном производстве*. Ладохин С.В. (ред.). Киев, Изд-во «Сталь».
21. Заборонок Г.Ф., Зеленцов Т.И., Ронжин А.С., Соколов Б.Г. (1972) *Электронная плавка металлов*. Москва, Металлургия.
22. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В. (2003) Перспективные технологии электронно-лучевой плавки титана. *Титан*, **2**, 20–25.
23. Смелянский М.Я. (1971) *Электронные плавильные печи*. Москва, Энергия.
24. Тихоновский А.Л., Тур А.А. (1984) *Рафинирование металлов и сплавов методом электронно-лучевой плавки*. Киев, Наукова думка.
25. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Козлитин Д.А. и др. (1997) *Электронно-лучевая плавка*. Киев, Наукова думка.
26. Harker H., Entekin C. (1987) Electron beam hearth refining of titanium. In: *Proc. of Techn. Programm. Inter. Conf. on Titanium 1986: Prod. and Appl., Dayton*, 939–947.

27. Тригуб Н.П., Дереча А.Я., Калинюк А.Н. и др. (1998) Рафинирование титана в электронно-лучевых печах с промежуточной емкостью. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **2**, 16–21.
28. Тригуб Н.П. (2003) Электронно-лучевая плавка титана. *Металлургия и машиностроение*, **1**, 20–23.
29. Ажажа В.М., Вьюгов П.Н., Лавриенко С.Д., Пилипенко Н.Н. (2002) *Получение высокочистых металлов. Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра*. Київ, Політехніка, 79–84.
30. Калинюк А.Н. (2002) *Развитие электронно-лучевой плавки титана и его сплавов. Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра*. Київ, Політехніка, 233–238.
31. Антонюк С.Л., Моляр А.Г., Калинюк А.Н., Замков В.Н. (2003) Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины. *Современная электрометаллургия*, **1**, 10–14.
32. Жук Г.В., Калинюк А.Н., Тригуб Н.П. (2004) Производство слитков-слябов методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. *Современная электрометаллургия*, **3**, 22–24.
33. Касумов А.М., Наконечный Н.Ф., Федоров В.Н., Щёкин-Кротов В.А. (2003) Ускоренное охлаждение слитков титана после ЭПП. *Современная электрометаллургия*, **2**, 20–22.
34. Ахонин С.В., Березос В.А., Пикулин А.Н. и др. (2014) Электронно-лучевое оплавление поверхности слитков сплавов титана. *Современная электрометаллургия*, **2**, 21–25.
35. Дембовский В. (1981) *Плазменная металлургия*. Москва, Металлургия.
36. Клюев М.М. (1980) *Плазменно-дуговой переплав*. Москва, Металлургия.
37. Латаш Ю.В., Торхов Г.Ф., Моделкин Ю.И. и др. (1983) К вопросу о плазменно-дуговом переплаве поверхностного слоя слитков вакуумно-дугового переплава. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **18**, 75–79.
38. Березин А.К., Файнберг Я.Б., Березина Г.П. и др. (1961) О взаимодействии интенсивных электронных пучков с плазмой. *Атом. энергия*, **11(6)**, 493–497.
39. Bhat G.K. (1972) New developments in plasma arc melting. *A. Vac. Soc. and Technol.*, **9(6)**, 1344–1350.
40. Denis I. (1964) Les chalumeaux a plasma. *Machine Moderne*, **668**, 59–64.
41. Арцимович Л.А. (1963) *Элементарная физика плазмы*. Москва, Госатомиздат.
42. Franz H., Biebricher U., Dzombic R. et al. (2017) Titanium melting with high-power plasma torch. In: *Proc. of the Conf. on Liquid Metal Processing & Casting, 2017, Philadelphia, PA, USA*, 37–44.
43. Ерохин А.А. (1975) *Плазменно-дуговая плавка металлов и сплавов*. Москва, Наука.
44. Финкельбург В., Меккер Г. (1961) *Электрические дуги и термическая плазма*. Москва, Изд-во иностр. лит.
45. Chandra U., Hartwig I., Ulrich K. (1973) Einsatz elektrisch erzeugter Gasplasmen in der metallurgischen Verfahrenstechnik Umschmelzen von Titan- und Eisen- Schwamm zu Blocken in einen Plasmaofen. *Techn. Mitt. Krupp Forschungsber*, **31(1)**, 1–7.
46. Латаш Ю.В., Константинов В.С., Галкин П.Н. и др. (1985) Применение плазменнотуговой технологии при выплавке слитков титана из отходов титанового производства. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **3**, 65–70.
47. Takei Hiromichi Ishigami Yuji.-J. (1971) *Vac. Sci. and Tehnol.*, **8(6)**, vm33–vm37.
48. Chandra U., Hartvig J., Ulrich K.H. (1973) *Tech. Mitt. Krupp*, **31(1)**, 1–8.
49. Латаш Ю.В., Константинов В.С., Тэлин В.В. и др. (1990) Реконструкция плазменнотуговой печи УП-100 для выплавки титановых слитков из некомпактной титановой шихты. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **1**, 72–75.
50. Тэлин В.В., Латаш Ю.В., Константинов В.С. и др. (1990) Применение независимых источников нагрева для утилизации отходов титанового производства. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **2**, 80–85.

51. Фарнасов Г.А., Фридман А.Г., Каринский В.Н. (1968) *Плазменная плавка*. Москва, Металлургия.
52. Бабат Г.И. (1965) *Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение*. Москва-Ленинград, Энергия.
53. Вайнберг А.М. (1960) *Индукционные плавильные печи*. Москва, Госэнергоиздат.
54. Глебовский В.Г., Бурцев В.Т. (1974) *Плавка металлов и сплавов во взвешенном состоянии*. Москва, Металлургия.
55. Губченко АЛ, Кудрявцев Ю.Г. (1978) Выплавка литейных титановых сплавов в индукционной печи с холодным тиглем. *Прогрессивные способы плавки для фасонного литья*. Киев, Издательство АН УССР, 97–99.
56. Клайтес П.Дж. (1973) *Индукционно-шлаковый переплав. Вакуумная металлургия*. Москва, Металлургия, 93–103.
57. Клайтес П.Дж, Белл Р.А. (1977) *Выплавка слитков и фасонных отливок методом индукционно-шлаковой плавки. Электрошлаковый переплав*. Киев, Наукова думка, 264–274.
58. Clites P.G., Beall R.F. (1969) Inductoslag melting of titanium. *Rept. Investing Bur of Meines. U.S. Dept. Interiores*, **7268**, 19.
59. Schippereit G.H., Zehemen A.F., Everts D.R. (1961) Cold-censible induction melting of reactive metals. *J. of Metals*, **13(2)**, 140–144.
60. Петров Ю.В., Ратников Л.Г. (1972) *Холодные тигли*. Москва, Металлургия.
61. Андреев А.Е., Яценко А.П., Проценко В.М. и др. (2003) Основы создания непрерывного процесса получения губчатого титана. *Титан*, **2**, 16–19.
62. Арцимович Л.А. (1963) *Элементарная физика плазмы*. Москва, Госатомиздат.
63. Вяткин И.П., Зимин В.М., Кунчина Н.И. и др. (1973) Гарнисажная плавка брикетированной титановой губки. *Цветные металлы*, **10**, 41–42.
64. Вяткин И.П., Кунчина Н.И., Кузнецов Е.В. и др. (1977) Гарнисажная плавка спресованных взрывом электродов из титановой губки. *Цветные металлы*, **7**, 48–49.
65. Жадкевич М.Л., Латаш Ю.В., Шейко И.В. и др. (1997) К вопросу о возможности переплава губчатого титана с повышенным содержанием техногенных примесей. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **1**, 55–60.
66. Жадкевич М.Л., Латаш Ю.В., Шейко И.В. и др. (1997) К вопросу о возможности переплава губчатого титана с повышенным содержанием техногенных примесей. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **1**, 55–60.
67. Шейко И.В., Константинов В.С., Латаш Ю.В., Степаненко В.В. (1994) Индукционный переплав отходов титана и его сплавов в секционном кристаллизаторе. *Металл и литье Украины*, **5**, 17–20.
68. Sheiko I.V., Latash Yu.V. (1999) *Induction melting with an ingot formation in a sectional mould*. Vol. 11, Pt 4.
69. Морозов Е.И. (1976) *Плавка титановых сплавов. Аналитический обзор по отечественным и зарубежным источникам*. Москва, ВИЛС.
70. Гуревич С.М., Дидковский В.П. (1963) Свойства технического титана и сплавов типа ОТ-4, полученных электрошлаковой плавкой. *Автоматическая сварка*, **4**, 32–34.
71. Гуревич С.М., Дидковский В.П., Новиков Ю.К. (1963) Электрошлаковая выплавка слитков титановых сплавов. *Автоматическая сварка*, **10**, 37–42.
72. Морозов Е.И., Чучурюкин Л.Д. (1977) Электрошлаковая плавка титановых слитков. *Титан*, **1**, 105–109.
73. Ausmus S.I., Beall R.A. (1968) Electros slag melting of titanium stabs. In: *Transact. Int. Vacuum Metallurgy Conf., June, 1967*, 675–694.
74. Bhat G.K. (1971) *A manufacturing program for electros slag melting and casting of materials*. Air Force Materials Laboratory, Wright Pateson Air Force Base. Ohio. Technical Report AFML-TR-71-I 62.

75. Kasu S. (1969) New technique of titanium and titanium alloys production in ingots. *Jap. Titanium Soc.*, 17(10), 592–599.
76. Гисер Е.Н., Чекотило Л.В., Белецкий В.М. и др. (1977) Электрошлаковая отливка заготовок из высокопрочного титанового сплава ВТ22. *Проблемы специальной электрометаллургии*, 6, 21–23.
77. Медовар Б.И., Попов Б.Г., Чекотило Л.В. и др. (1978) Электрошлаковая выплавка опытных слитков в бескамерной печи ЭШП. *Проблемы специальной электрометаллургии*, 8, 41–45.
78. Медовар Б.И., Саенко В.Я., Кумыш В.И. и др. (1995) Свойства толстых плит, прокатанных из листового крупнотоннажного слитка титана ВТ 1–0 ДШП массой 4,5 т. *Проблемы специальной электрометаллургии*, 2, 18–29.
79. Медовар Л.Б., Саенко В.Я., Помарин Ю.М., Ус В.И. (2000) Перспективы применения металлургического кальция и РЗМ при ЭШП. *Проблемы специальной электрометаллургии*, 4, 18–19.
80. Радченко В.Н., Тарлов О.В., Максимов А.П. (1991) О поведении кислорода при электрошлаковом переплаве титана. *Проблемы специальной электрометаллургии*, 2, 15–19.
81. Рябцев А.Д., Троянский А.А., Тарлов О.В. и др. (2000) Исследование возможности получения титан-алюминиевого сплава методом электрошлакового переплава в инертной атмосфере под «активными» кальцийсодержащими флюсами. *Проблемы специальной электрометаллургии*, 1, 75–78.
82. Компан Я.Ю., Протокивиллов И.В. (2002) Некоторые технологические аспекты магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП) титановых сплавов. *Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра*. Київ, Політехніка, 256–262.
83. Патон Б.Е., Григоренко Г.М., Медовар Б.И. и др. (1995) О новых возможностях дугошлакового нагрева. *Проблемы специальной электрометаллургии*, 4, 3–6.
84. Патон Б.Е., Медовар Б.И., Бенц М.Г. и др. (1999) ЭШП титана: вчера, сегодня, завтра. *Проблемы специальной электрометаллургии*, 2, 3–7.
85. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Замков В.Н. и др. (2000) Развитие технологии электроннолучевой плавки титана. *Проблемы специальной электрометаллургии*, 2, 34–40.
86. Патон Б.Е., Саенко В.Я., Помарин Ю.М. и др. (2002) Возможности дугошлакового переплава как одного из методов специальной электрометаллургии. *Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра*. Киев, Політехніка, 102–108.
87. Medovar V.I., Saenko V.Ja., Grigorenko G.M., Pomarin Ju.M. (1996) *Arc-slag remelting of steel and alloys*. Cambridge International Science Publishing, 1–160.
88. Medovar V.I., Medovar L.B., Fedorovskii V.B. et al. (1998) Electroslag technology for Ti–Al indots. In: Proc. of Inter. Conf. on XITC 98, 15–18 Sept., 1998, Xtan, China.
89. Medovar V.I., Benz M.E. (1998) Electro-conductive crucible for ESR refining of titanium alloys with independent control of slag temperature, slag rotational velocity and electrode melt rate. In: Proc. of Inter. Conf. on XITC 98, 15–18 Sept., 1998, Xtan, China.
90. Рябцев А.Д., Троянский А.А., Рябцева О.А. и др. (2007) Получение новых материалов на основе титана с повышенными механическими характеристиками и биологической совместимостью путем легирования кислородом с использованием камерной электрошлаковой технологии. *Сб. тр. Междунар. конф. «Ti-2007 в СНГ»*, 89–93.
91. Рябцев А.Д., Давыдов С.И., Троянский А.А. и др. (2007) Получение титана повышенной прочности путем легирования кислородом в процессе камерного электрошлакового переплава. *Современная электрометаллургия*, 3, 3–6.
92. Ратиев С.Н., Рябцева О.А., Троянский А.А. и др. (2010) Легирование титана кислородом из газовой фазы при камерном электрошлаковом переплаве титановой губки. *Современная электрометаллургия*, 2, 8–12.

93. Ryabtsev A.D., Troyansky O.A., Ratiev S.M. et al. (2011) The alloying of titanium by oxygen in the process of chamber electro-slag remelting. In: *Proc. of the 2011 Inter. Symp. on Liquid Metal Processing and Casting «LMPC 2011»*, 39–42.
94. Рябцев А.Д., Троянский А.А., Давыдов С.И. и др. (2012) Возможности камерного электрошлакового передела в получении титана коммерческой чистоты. *Современная электрометаллургия*, **1**, 7–11.
95. Хорев А.И., Хорев М.А. (1997) Современные титановые сплавы в авиакосмической технике. *НТЖ РИА «Авиакосмическая техника и технология»*, **1**, 15–22.
96. Пульцын Н.М. (1962) *Титановые сплавы и их применение в машиностроении*, Москва, Машгиз.
97. Хорев А.И. (2000) Титановые сплавы для авиакосмической техники и перспектива их развития. *НТС «Авиационные материалы и технологии. Перспективные алюминиевые и титановые сплавы для авиакосмической техники»*, 11–32.
98. Хорев А.И. (1977) *Опыт применения титановых сплавов в народном хозяйстве*. Москва, ЦНИИТЭМС.
99. (1983) *Авиационные материалы. Термическая обработка титановых сплавов*. Хорев А.И. (ред.). Москва, ВИАМ.
100. (1984) *Авиационные материалы. Титановые сплавы*. Хорев А.И. (ред.). Москва, ВИАМ.
101. Белов С.П., Хорев А.И., Хорев М.А. и др. (1992) *Металловедение титана и его сплавов*. Москва, Металлургия.
102. Хорев А.И. (1979) *Современные методы повышения конструкционной прочности титановых сплавов*. Москва, Воениздат.
103. Ivasyshyn O.M., Aleksandrov A.V. (2008) Status of the titanium production, research, and applications in the CIS. *Mater. Sci.*, **44(3)**, 311–27.
104. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.
105. Вейник А.И. (1958) *Теория особых видов литья*. Москва, Машгиз.
106. Гуляев Б.Б. (1950) *Затвердевание и неоднородность стали*. Москва, Metallurgizdat.
107. Добаткин В.И. (1960) *Слитки алюминиевых сплавов*. Москва, Metallurgizdat.
108. Ливанов В.А. (1945) *Металлургические основы непрерывного литья: Сб. тр. первой технологической конференции*. Москва, Оборонгиз.
109. Хворинов Н.И. (1955) *Затвердевание отливок*. Москва, Изд-во иностр. лит.
110. Тагеев В.М., Гуляев Б.Б. (1959) Затвердевание стального слитка. *Металлургия*, **8**, 23–38.
111. Чернов Д.К. (1950) *Наука о металлах: Труды Д.К. Чернова*. Гудцов Н.Т. (ред.). Москва-Ленинград: Metallurgizdat.
112. Трубин А.Н., Кавтаев Е.Е., Новиков В.Ф. (2005) Изготовление цельнопрессованных с фланцем медных изложниц для вакуумных дуговых печей. *Титан*, **1**, 32–34.
113. Добаткин В.И., Аношкин Н.Ф., Андреев А.Л. и др. (1966) *Слитки титановых сплавов*. Москва, Металлургия.
114. Bellot J.-P., Jourdan J., Kroll-Rabotin J.-S. et al. (2021) Thermal behavior of Ti-64 primary material in electron beam melting process. *Materials*, **14**, 2853. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14112853>
115. Shiller S., Heisig U., Panzer S. (1982) *Electron beam technology*. Publ. John Wiley&Sons, New York, NY, USA.
116. Choi W., Jourdan J., Matveichev A. et al. (2017) Kinetics of evaporation of alloying elements under vacuum: Application to Ti alloys in electron beam melting. *High Temp. Mater. Process.*, **36**, 815–823
117. Bellot J.P., Hess E., Ablitzer D. (2000) Aluminium volatilization and inclusion removal in the electron beam cold hearth melting of Ti alloys. *Met. Mater. Transact. B*, **31B**, 845–854.

118. Мюллер С.П., Харрингтон Т.Г. (1973) *Вопросы специальной электрометаллургии*. Киев-Москва, 127–137.
119. Башенко В.В. (1972) *Электронно-лучевые установки*. Ленинград, Машиностроение.
120. Жук Г.В. (2008) Моделирование процессов переноса тепла при формировании слитков ЭЛПЕ. *Современная электрометаллургия*, **4**, 14–17.
121. Ажажа В.М., Вьюгов П.Н., Лавриненко С.Д. и др. (2002) Электронно-лучевая плавка титана, циркония и гафния. *Вопросы атомной науки и техники*, **6**, 95–99.
122. Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.А. и др. (2016) Особенности выплавки слитков титанового сплава ВТ19 в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью. *Современная электрометаллургия*, **2**, 23–27.
123. Корнилов И.И. (1975) *Титан*. Москва, Наука.
124. Гармата В.А., Петрунько А.Н., Галицкий А.Н. и др. (1983) *Титан*. Москва, Metallургия.
125. Борисова Е.А., Бочвар Г.А., Брун М.Я. и др. (1980) *Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов*. Москва, Metallургия.
126. Арзамасов Б.Н., Брострем В.А., Буше Н.А. и др. (1990) *Конструкционные материалы: Справочник*. Москва, Машиностроение.
127. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Буханова А.А. (1974) *Механические свойства титана и его сплавов*. Москва, Metallургия.
128. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. (1981) *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*. Москва, Metallургия.
129. Масленков С.Б., Масленкова Е.А. (1991) *Стали и сплавы для высоких температур: Справочник*. Том. 2. Москва, Metallургия.
130. Гуськова Е.И., Ермолова М.И., Лашко Н.Ф., Хагинская И.М. (1972) Диффузионные и бездиффузионные превращения метастабильных фаз в титановых $\alpha+\beta$ -сплавах. *Новый конструкционный материал — титан*. Москва, Наука.
131. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Москва, ВИЛС–МАТИ.
132. Цвиккер У. (1979) *Титан и его сплавы*. Москва, Metallургия.
133. Хорев А.И. (2006) Титановый сплав ВТ23 и его сравнение с лучшими зарубежными сплавами. *Титан*, **18(1)**, 47–52.
134. Хорев А.И. (2007) Комплексно-легированный титановый сплав ВТ23 универсального применения. *Технология машиностроения*, **7**, 5–11.
135. Анташев В.Г., Ночовная Н.А., Ширяев А.А., Изотова А.Ю. (2011) Перспективы разработки новых титановых сплавов. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». Спец. вып. «Перспективные конструкционные материалы и технологии», 60–67.
136. Путьрский С.В., Арисланов А.А., Яковлев А.Л., Ночовная Н.А. (2018) Исследование механических свойств деформированных полуфабрикатов сплавов ВТ23М и ВТ43, оценка их климатической стойкости в условиях арктического климата. *Тр. ВИАМ*, **64(4)**, 101–110.
137. Моляр А.Г., Коцюба А.А., Бычков А.С. и др. (2015) *Конструкционные материалы в самолетостроении*. Киев, КВИЦ.
138. Замков В.Н., Топольский В.Ф., Тригуб Н.П. и др. (2001) *Высокопрочный титановый сплав*. Украина, Пат. 2000021117.
139. Антонюк С.Л., Король В.Н., Моляр А.Г. и др. (2003) Исследование механических свойств кованных полуфабрикатов опытного титанового сплава Т110. *Современная электрометаллургия*, **3**, 30–33.
140. Антонюк С.Л., Король В.Н., Моляр А.Г. и др. (2004) Сопrotивление усталости сварных соединений опытного титанового сплава Т110. *Автоматическая сварка*, **2**, 28–31.
141. Тихоновский А.Л., Ахонин С.В., Тур А.А., Туник А.В. (1993) Электронно-лучевой переплав титановой губки — новый способ получения титановых слитков и слябов. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **1**, 66–70.

142. Ахонін С.В., Дереча О.Я., Прозоровський А.І. (1997) *Способ электронно-променевої плавки титанової губки*. Україна, Пат. 93005469.
143. Тригуб М.П., Жук Г.В., Калинюк О.М., Пікулін О.М. (2003) *Способ отримання великогабаритних плоских зливків методом електронно-променевої плавки*. Україна Пат. 2000031294.
144. Тригуб Н.П., Жук Г.В., Корнейчук В.Д. и др. (2007) Промышленная электронно-лучевая установка УЭ-5812. *Современная электрометаллургия*, **1**, 11–14.
145. Тригуб Н.П., Жук Г.В., Пап П.А. и др. (2003) Электронно-лучевая установка УЭ-121. *Современная электрометаллургия*, **2**, 17–20.
146. Альперович М.Е. (1978) *Вакуумный дуговой переплав и его экономическая эффективность*. Москва, Metallurgy.
147. Антропов О.Ф., Устин К.П., Антропова Н.Г., Акулова Л.В. (1972) Причины образования трещин на слитках ЭЛП. *Специальная электрометаллургия*, **14**, 66–70.
148. Топилин В.В., Верзина В.К. (1979) Механизм образования гарнисажа на вакуумном слитке, морфология и фазовый состав дефекта «корона». *Сталь*, **12**, 919–921.
149. Лакомский В.И., Забарилло О.С., Жердев А.В. и др. (1976) Получение вторичного титана методом плазменно-дугового переплава. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **4**, 94–96.
150. Хмелев И.И., Исаев В.Ф., Белов Б.Ф. и др. (1970) Газовыделение из короны слитков вакуумно-дугового переплава. *Теория и практика металлургии*, Вып. 11. Челябинск, Челяб. Южно-Урал. кн. изд-во, 163–167.
151. Тригуб Н.П., Жук Г.В., Пикулин А.Н. и др. (2003) Электронно-лучевая установка УЭ-185 для оплавления поверхностного слоя слитков. *Современная электрометаллургия*, **3**, 12–14.
152. Тригуб М.П., Жук Г.В., Пікулін О.М., Корнійчук В.Д. (2005) *Установка для електронно-променевого оплавлення зливків*. Україна, Пат. 002065203.
153. Тригуб Н.П., Дереча А.Я., Калинюк А.Н. и др. (1998) Рафинирование титана в электронно-лучевых печах с промежуточной емкостью. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **2**, 25–32.
154. Ахонин С.В., Тихоновский А.Л., Тур А.А. (1986) Математическое описание процесса рафинирования при ЭЛП расходуемой заготовки с учетом реакции второго порядка на границе раздела фаз. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **2**, 43–49.
155. Мовчан Б.А., Ахонин С.В. (1996) Математическое моделирование процессов электронно-лучевого испарения многокомпонентного сплава на основе никеля из расплава ниобия. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **3**, 20–24.
156. Bellot J.P., Duval H., Ablitzer D. (1996) Validity of the Kinetic Langmuir's law for the volatilization of metallic element in vacuum metallurgy. In: *Proc. Symp. of Gas Enterection in Nonferrous Metals Processing, Anaheim, USA*, 109–124.
157. Bellot J.P., Duval H., Ritchie M., Ablitzer D. (1999) The use of mathematical models to determine parameters minimizing the volatilization losses in the electron beam melting process. In: *Proc. of the 9th World Conf. on Titanium, Sankt-Petersburg, Russia, CSIICM «Prometey»*, **1**, 1442–1449.
158. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. (1976) *Физическая химия*. Москва, Metallurgy.
159. Шиллер З., Гайзинг У., Панцер З. (1980) *Электронно-лучевая технология*. Москва, Энергия.
160. Ахонин С.В., Тихоновский А.Л. (1992) Кинетика процессов массообмена в системе реальный раствор — паровая фаза. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **2**, 61–64.
161. Ефимов А.И., Белорукова Л.П., Василькова И.В., Чечев В.П. (1983) *Свойства неорганических соединений*: Справочник. Ленинград, Химия.
162. Akhonin S.V., Trigub N.P., Zamkov V.N. et al. (2003) Mathematical modeling of aluminum evaporation during electron-beam cold-hearth melting of Ti–6Al–4V ingots. *Metall. Mater. Trans.*, **B 34**, 447–454. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-003-0071-4>
163. Иванченко Н.В., Устинов А.И., Мохорт В.А. (2003) Термодинамический анализ испарения в вакууме титана и никеля из расплава Ti–Ni. *Современная электрометаллургия*, **3**, 15–18.

164. Paton В.Е., Trygub N.P., Zhuk G.V. (2008) Crystallization of titanium ingots in the course of electron-beam melting. *Materials Sci.*, **44**, 328–335. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-008-9090-2>
165. Жук Г.В. (2008) О влиянии распределения мощности нагрева металла в кристаллизаторе в процессе ЭЛПЕ на структуру титановых слитков. *Современная электрометаллургия*, **2**, 17–20.
166. Бабенко Е.П., Долженкова Е.В. (2014) Исследование причин разрушения крупногабаритного изделия из сплава ВТ23. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, **3**, 82–85.
167. Хорев А.И. (2007) Влияния комплексного легирования на механические свойства сварных соединений и основного металла ($\alpha+\beta$)- и β -титановых сплавов. *Технология машиностроения*, **2**, 29–34.
168. Хорев А.И. (2006) Разработка титанового сплава методом комплексного легирования. *Физико-химическая механика материалов*, **42(5)**, 45–50.
169. Хорев А.И. (2006) Создание теории комплексного легирования и разработка титанового сплава ВТ23 универсального применения. *Вестник машиностроения*, **9**, 40–46.
170. Ахонін С.В., Березос В.О., Білоус В.Ю. та ін. *Високоміцний титановий сплав* (2006) Україна, Пат. а 2014 06878.
171. Ахонин С.В., Березос В.А., Пикулин А.Н. и др. (2014) Электронно-лучевое оплавление поверхности слитков сплавов титана. *Современная электрометаллургия*, **2**, 21–25.
172. Ахонін С.В., Северин А.Ю., Березос В.О. та ін. (2021) Дослідження якості деформованих напівфабрикатів титанового сплаву ВТ9, отриманого способом електронно-променевої плавки. *Сучасна електрометалургія*, **4**, 20–24. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2021.04.03>
173. Елагина Л.А., Гордиенко А.И., Ивашко В.В. и др. (1978) Влияние структуры на механические свойства сплавов ВТ9 и ВТ18. *Технология легких сплавов*, **12**, 33–38.
174. Инструкция № 1054–76: *Металлографический анализ титановых сплавов*. ВИАМ.
175. Калинин А.Н., Козловец О.Н., Ахонин С.В. (2002) Производство полуфабрикатов из титановых слитков, полученных методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **2**, 25–28.
176. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Жук Г.В., Березос В.А. (2008) Развитие электронно-лучевой плавки титана в ИЭС им. Е.О. Патона. *Современная электрометаллургия*, **3**, 22–24.
177. Тригуб Н.П., Жук Г.В., Чепинский А.А. и др. (2006) Исследование процесса изготовления горячекатаных и холоднодеформированных труб из литой недеформируемой трубной заготовки титанового сплава ВТ1-0 полученной способом электронно-лучевой плавки. *Современная электрометаллургия*, **3**, 11–14.
178. Аношкин Н.Ф., Ерманюк М.З., Агарков Г.Д. и др. (1979) *Полуфабрикаты из титановых сплавов*. Москва, Металлургия.