

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

**БЕРЕЗОС
ВОЛОДИМИР ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК 669.187.526

**ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ВИРОБНИЦТВА ЗЛИВКІВ ВИСОКОМІЦНИХ
КОНСТРУКЦІЙНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ТИТАНУ МЕТОДОМ
ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ**

05.16.02 - Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, м. Київ.

Науковий консультант: Доктор технічних наук, професор
Ахонін Сергій Володимирович
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
НАН України, заступник директора з наукової роботи

Офіційні опоненти: Доктор фізико-математичних наук, професор
Фірстов Сергій Олексійович
Інститут проблем матеріалознавства
ім. І.М. Францевича НАН України, заступник директора
з наукової роботи

Доктор технічних наук, професор
Грищенко Сергій Георгійович
Інститут біоколоїдної хімії ім. Ф.Д. Овчаренка
НАН України, в.о. завідувача лабораторії збагачення
мінеральної сировини

Доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Квасницька Юлія Георгіївна
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів
НАН України, провідний науковий співробітник відділу
координації науково-дослідних робіт

Захист відбудеться «28» квітня 2021 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.182.02 при Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України за адресою: вул. Казимира Малевича, 11, м. Київ, 03150

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: вул. Казимира Малевича, 11, м. Київ, 03150

Автореферат розіслано «22» березня 2021р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н.

С.Г. Григоренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Донині практично всі напівфабрикати з високоміцних сплавів титану виготовляються методом вакуумно-дугової плавки (ВДП) та поставляються в Україну із-за кордону. Хоча технологія ВДП титану є традиційним і найбільш поширеним в промисловості способом отримання зливок титану і сплавів на його основі, в останні роки все більше застосування в металургії титану знаходить технологія електронно-променевої плавки (ЕПП) з проміжною ємністю.

Роботи зі створення та впровадження технології ЕПП зливок титану в Україні проводилися такими науковцями як Тихоновський О.Л., Тригуб М.П., Ахонін С.В., Жук Г.В. та ін. Ними були проведені роботи зі створення нових технологій та обладнання ЕПП, розроблено математичні моделі переносу тепла та процесів випаровування легуючих елементів при одержанні зливок титанових сплавів під час ЕПП. Однак проведені роботи, з огляду на складність розрахунків та обмежені можливості обчислювальної техніки, мали певні недоліки. Так, при вивченні процесів випаровування під час ЕПП розглядалося випаровування лише одного елемента з високою пружністю пари, а саме алюмінію. Водночас, багато високоміцних титанових сплавів мають складну систему легування і окрім алюмінію мають ще й хром, який також інтенсивно випаровується під час ЕПП. Рішення задач тепло- та масообміну проводилося окремо від гідродинамічної задачі, що невпинно призводило до викривлення одержаних результатів, або, з метою спрощення розрахунків, вважалася осьова симетрія теплових, концентраційних і гідродинамічних полів в зливку, в результаті чого тривимірна модель зводилася до рішення двовимірної. При виплавці зливка під час ЕПП з проміжною ємністю відсутня осьова симетрія подачі рідкого розплаву в прохідний кристалізатор і перебіг теплофізичних процесів має виражений тривимірний характер. Тому докладне врахування розрахунковим шляхом таких теплофізичних процесів можливе тільки за допомогою рішення сполучених тривимірних теплової і гідродинамічної задач.

Слід зауважити, що Україна є однією з п'яти країн світу, які мають повний цикл виробництва титану: від видобутку титановмістких руд, їх збагачення і виробництва губчатого титану до виплавки зливок титану і виробництва титанових напівфабрикатів. Проте це стосується одержання або зливок технічно чистого титану (BT1-0, Grade 2), або малолегованих сплавів титану (BT5, BT6). Тому створення нової перспективної технології та впровадження її для виробництва вітчизняних напівфабрикатів високоміцних сплавів на основі титану методом ЕПП дозволить відмовитись від імпорту вартісних іноземних напівфабрикатів, та забезпечить розширення їх застосування підприємствами України. Крім того, впровадження технології ЕПП та розробка нових сплавів, легованих переважно дешевими легуючими елементами відкриває можливість створення виробництва зливок нових перспективних економолегованих високоміцних сплавів на основі титану в Україні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України відповідно до планів науково-дослідних робіт в рамках таких тем: «Створення нових

жароміцних сплавів на основі титану і технології їх виробництва методом ЕПП» №ДР 0106U011957 (2007-2009); «Дослідження особливостей пошарової кристалізації металу і розробка електронно-променевої технології одержання прогресивних конструкційних матеріалів на основі титану» №ДР 0107U003294 (2007-2011); «Дослідити вплив термічного циклу зварювання на структурно-фазові перетворення в ЗТВ і властивості зварних з'єднань сучасних складнолегованих титанових сплавів та на цій основі вдосконалити процеси зварювання і відновлювального наплавлення цих сплавів» №ДР 0112U000625 (2013-2014); «Створити новий високоміцний добре зварюваний титановий сплав конструкційного призначення з межею міцності не менше 1200 МПа та розробити оптимальні методи його зварювання» №ДР 0112U000620 (2012-2016); «Дослідити закономірності процесів випаровування і тепло переносу під час електронно-променевої плавки складнолегованих псевдо- β титанових сплавів та визначити особливості формування структури, фазового складу та механічних властивостей зварних з'єднань з цих сплавів» №ДР 0115U003142 (2015-2017); «Розробка технологічних основ виплавки методом електронно-променевої плавки конструкційних економнолегованих титанових сплавів та дослідження їх структури, механічних властивостей і здатності до зварювання» №ДР 0118U000182 (2018-2020).

Мета і завдання роботи. Метою роботи є встановлення закономірностей процесів тепло- та масопереносу при виплавці високоміцних конструкційних сплавів на основі титану в умовах вакууму та дії електронного променя, та розробка на цій основі технології їх одержання методом ЕПП з проміжною ємністю.

Відповідно до зазначеної мети були поставлені наступні **основні задачі**:

- методами математичного моделювання дослідити тепловий стан зливків сплавів титану при ЕПП з урахуванням гідродинамічних течій;
- встановити залежності впливу технологічних параметрів на процеси структуроутворення зливків високоміцних сплавів титану, що виплавляються методом ЕПП;
- дослідити процеси випаровування хімічних елементів під час ЕПП високоміцних конструкційних сплавів титану;
- дослідити закономірності формування структури при одержанні зливків економнолегованих сплавів титану методом ЕПП;
- визначити технологічні режими та розробити технологію ЕПП зливків високоміцних сплавів титану, що забезпечують більш високу якість металу та підвищення техніко-економічних показників технології;
- дослідити якість титанових сплавів, одержаних за визначеними режимами ЕПП, та виготовлених з цих зливків напівфабрикатів;
- визначити режими термодформаційної обробки нових високоміцних сплавів титану одержаних методом ЕПП.

Об'єктом дослідження є: процеси, що протікають при формуванні зливків високоміцних конструкційних сплавів на основі титану, які виплавляються методом ЕПП з проміжною ємністю.

Предметом досліджень є: закономірності структуроутворення при електронно-променевої плавці з проміжною ємністю; гідродинамічні і теплові процеси, що протікають в кристалізаторі під час ЕПП високоміцних сплавів титану.

Методи дослідження: для розв'язання поставлених задач і одержання основних результатів дисертаційної роботи використовували методи математичного моделювання пов'язаних гідродинамічних і теплових процесів в прохідному кристалізаторі та процесів масопереносу при ЕПП з проміжною ємністю, експериментальні дослідження здійснювали в заводських умовах на сучасних електронно-променевих установках із застосуванням методів газового, спектрального і хімічного аналізів, металографічних та механічних досліджень виплавленого металу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

1. Вперше методами математичного моделювання тривимірних процесів тепло- та масопереносу з урахуванням гідродинамічних та термогравітаційних процесів встановлено особливості кристалізації розплаву та конфігурації металеві ванни під час електронно-променевого плавлення з проміжною ємністю зливків сплавів титану та показана можливість формування плаского фронту кристалізації всередині зливка і твердого гарнісажу товщиною 5–7 мм на внутрішніх стінках кристалізатора при продуктивності процесу ЕПП від 30 кг/год для зливка $\varnothing 110$ мм до 300 кг/год для зливка $\varnothing 600$ мм.
2. Вперше методом рішення сполучених тривимірних теплової і гідродинамічної задач досліджено особливості руху рідкого металу в кристалізаторі під час електронно-променевого плавлення з проміжною ємністю, та встановлено, що він має турбулентний характер в області входження струменю рідкого металу з проміжної ємності в кристалізатор та ламінарний – в об'ємі розплаву, тобто визначальним механізмом теплопередачі в рідкій фазі зливка є тепломасообмін за рахунок усередненого руху розплаву, який має переважаючий ламінарний характер загалом.
3. Вперше визначено залежність впливу температури перегріву розплаву на 100–160 градусів та продуктивності процесу ЕПП в діапазоні 250–350 кг/год зливків сплавів титану на зміну глибини та форми рідкої ванни. Встановлено, що в досліджуваному діапазоні швидкостей процесу ЕПП зливків сплавів титану глибина рідкої ванни має прямо пропорційну залежність від продуктивності.
4. Вперше для умов ЕПП експериментально підтверджено форму плаского фронту кристалізації при лінійній швидкості витягування 7 мм/хв зливків титанових сплавів $\varnothing 600$ мм.
5. Вперше встановлено наявність заглиблення в пласкому фронті кристалізації в області входу струменю розплаву в кристалізатор, що може призводити до порушення суцільності гарнісажу під стінкою кристалізатора та виникнення дефектів ливарного походження на поверхні зливка.
6. Вперше для умов електронно-променевого плавлення з проміжною ємністю досліджено одночасне випаровування алюмінію та хрому з титанових сплавів систем легування Ti-Al-Cr-X та встановлено, що визначальною зоною випаровування цих елементів є проміжна ємність, що обумовлено температурними умовами та відношенням площі випаровування до об'єму розплаву, а процеси випаровування алюмінію та хрому проходять незалежно один від одного.
7. Отримало подальший розвиток уявлення про вплив легуючого елемента заліза

на механічні властивості сплавів системи Ti-Al-Mo-Fe, а саме — збільшення його вмісту в сплаві вище 4,5 ваг.% різко погіршує пластичність, а заміщення заліза на хром призводить до підвищення пластичних характеристик сплавів за рахунок різниці в дифузійній рухливості цих елементів у титановій матриці.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Для квазивстановленого режиму ЕПП з проміжною ємністю розроблена тривимірна математична модель пов'язаних гідродинамічних і теплових процесів твердіння металу при виплавці зливків сплавів титану в циліндричний прохідний кристалізатор.
2. Удосконалено математичну модель, яка встановлює залежність концентрації алюмінію, хрому, ванадію, молібдену, цирконію та титану в отриманому методом ЕПП з проміжною ємністю зливку сплаві титану, від швидкості плавки, концентрації легуючих елементів у витратній заготовці і температури розплаву.
3. Визначено технологічні режими ЕПП, які забезпечують одержання зливків промислових (BT14, BT22, BT23, BT19), вітчизняних (T110, T120) та нових економнолегованих високоміцних сплавів титану, що за хімічним складом цілком відповідають вимогам стандартів та технічних умов.
4. На основі встановлених закономірностей процесів твердіння металу та випаровування при ЕПП з проміжною ємністю розроблено технологію одержання високоміцних зливків на основі титана з рівномірним хімічним складом та рівноважною структурою.
5. Розроблено технологію деформаційної обробки високоміцних сплавів на основі титану одержаних за технологією ЕПП з проміжною ємністю.

Особистий внесок здобувача:

В наукових працях, опублікованих із співавторами, автору дисертації належить: у [1, 3, 4, 21, 26] — розраховано технологічні режими та розроблено технологію ЕПП економнолегованих сплавів титану, визначено схеми шихтування, проведено дослідні плавки, проведено виготовлення напівфабрикатів і дослідних зразків; у [2, 7, 8, 13, 14, 22, 27, 28, 32, 33] — визначено технологічні режими ведення процесу ЕПП промислових сплавів титану, за безпосередньої участі автора проведено дослідні плавки та виготовлення напівфабрикатів, дослідження хімічного складу та структури одержаних зливків; у [9, 12, 30, 31, 37] — проведено відпрацювання технологічних режимів ведення процесу та дослідження якості одержаних зливків; у [11, 16, 34, 36] — підготовка та проведення експериментальних плавок, одержання дослідних зразків та перевірка адекватності побудованої математичної моделі випаровування; у [25] — постановка задач дослідження, вибір наукових підходів до їх вирішення, перевірка адекватності побудованих моделей, аналіз одержаних результатів; у [15, 19, 20] — визначення режимів та розробка технології термодформаційної обробки високоміцних сплавів одержаних методом ЕПП, дослідження механічних властивостей одержаних зразків та аналіз отриманих результатів; у [17, 18, 24, 38] — визначення систем легування, розрахунок технологічних режимів ЕПП, підготовка та проведення дослідних плавок, дослідження хімічного складу та якості одержаних зливків.

При підготовці і обробці результатів експериментів, формулюванні висновків, підготовці публікацій і визначенні технологічних режимів ЕПП високоміцних сплавів титану внесок автора був визначальним. Автор брав безпосередню участь у впровадженні результатів досліджень у промислове виробництво зливків сплавів титану на Державному підприємстві «Науково-виробничий центр «Титан» інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України».

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях та семінарах: міжнародна конференція «Ti-2010 в СНД» (Єкатеринбург, Росія, травень, 2010), міжнародна конференція «Ti-2012 в СНД» (Казань, Росія, квітень, 2012), III науково-технічна конференція «Титан-2012 виробництво і застосування» (Запоріжжя, жовтень, 2012), VII науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології» (Київ, травень, 2013), міжнародна конференція «Ti-2013 в СНД» (Донецьк, травень, 2013), міжнародна конференція «Зварювання та споріднені технології – сьогодні і майбутнє» (Київ, листопад, 2013), міжнародна конференція «Ti-2014 в СНД» (Нижній Новгород, Росія, травень, 2014), The 13th World Conference on Titanium (Сан-Дієго, Каліфорнія, США, серпень, 2015), VIII міжнародна конференція «Променеві технології в зварюванні та обробці матеріалів» (Одеса, вересень, 2017), міжнародна конференція «Титан-2018. Виробництво і застосування в Україні» (Київ, червень, 2018).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 47 наукових працях, із них 26 – у фахових наукових періодичних виданнях України та закордоном (2 – без співавторів), 4 наукові праці проіндексовані у міжнародних науково-метричних базах Scopus та Web of Science, 26 праць задовольняють вимоги МОН України щодо публікації результатів дисертаційних робіт у фахових наукових виданнях, 12 – матеріали наукових конференцій. Отримано 9 патентів України на винахід.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 284 найменувань, містить 175 рисунків, 44 таблиці. Повний обсяг дисертації складає 350 сторінок, основний зміст викладено на 289 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і задачі досліджень, визначено шляхи їх досягнення, викладені основні одержані результати, з'ясовані їх наукова новизна та практична цінність, наведені відомості про публікації та апробацію роботи.

В першому розділі розглянуто світовий досвід та основні металургійні методи одержання зливків високоміцних сплавів титану, проведено їх порівняльний аналіз.

Викладено загальні відомості про властивості, класифікацію і області застосування високоміцних сплавів на основі титану. Розглянуто роботи, що проводилися в області досліджень особливостей кристалізації та поведінки легуючих елементів при одержанні зливків сплавів титану в умовах вакууму та дії електронно-променевого нагрівання.

На основі аналізу літературних джерел визначено проблеми при одержанні

високоміцних сплавів титану методом ЕПП, обґрунтовано актуальність теми дисертації та необхідність проведення досліджень, які здійснено у подальших розділах роботи.

У **другому розділі** наведено опис устаткування, на якому виконувалися експериментальні роботи, методики проведення експериментальних плавок і характеристика досліджуваних матеріалів, а також представлено методи дослідження якості одержаних матеріалів.

З метою розробки технології одержання якісних зливків високоміцних сплавів титану, для проведення експериментів та дослідження були використані промислові титанові сплави (BT14, BT22, BT23, BT19, ТИМЕТАЛ LCB), досліджено вітчизняні високоміцні титанові сплави T110 та T120. Крім того, були досліджені сплави титану наступних системи легування: Ti-Fe-O; Ti-Al-Mo-Fe; Ti-Al-Mo-Cr.

Для проведення експериментальних досліджень використовувалися:

- багатоцільова лабораторна електронно-променева установка УЕ-208М, яка оснащена газорозрядними електронно-променевими гарматами ВТР-300 та дозволяє одержувати зливки діаметром до 300 мм;

- промислова електронно-променева установка УЕ-5812, яка відрізняється від раніше розроблених і експлуатованих в промисловості України установок більш високим рівнем технічних та економічних характеристик, оснащена електронно-променевими гарматами аксіального типу «Патон-300» та дозволяє отримувати зливки діаметром до 600 мм;

- універсальна багатоцільова промислова електронно-променева установка УЕ-5810 з продуктивністю 1.5 тис. тон на рік, яка не має аналогів в світі, дозволяє

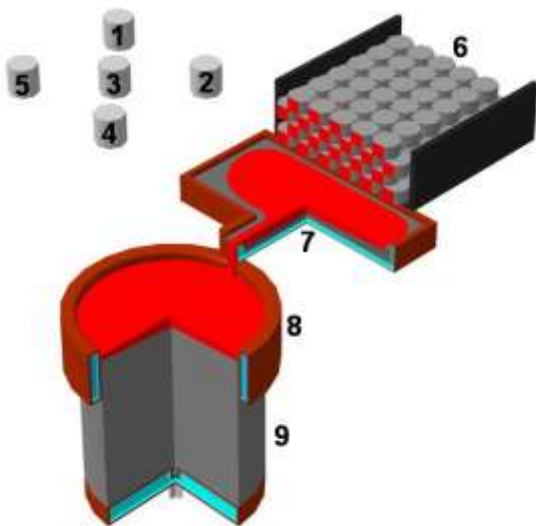


Рисунок 1 – Схема електронно-променевої плавки з проміжною ємністю: 1–5 – електронно-променеві гармати; 6 – витратна заготовка; 7 – проміжна ємність; 8 – кристалізатор; 9 – зливков

проводити переплав недроблених блоків титанової губки масою до 5 тон кожний, конструктивно дозволяє проводити технологічні процеси плавки зливків діаметром до 1200 мм та оплавляти їх бічну поверхню замість механічної обробки.

Сутність процесу електронно-променевої плавки (рисунок 1) полягає в горизонтальній подачі витратної заготовки 6 із заданою швидкістю в зону плавки, її плавлення електронними променями гармат 1–3 над проміжною ємністю 7. У міру наповнення проміжної ємності рідкий метал зливається в кристалізатор 8, де відбувається його нагрів електронними променями гармат 4–5 та формування зливка 9 необхідної довжини.

Для реалізації математичних моделей з використанням модульного принципу та процедурного програмування було використано програмне забезпечення COMSOL Multiphysics.

Третій розділ присвячений дослідженню гідродинамічних і теплових процесів в прохідному кристалізаторі та визначенню технологічних режимів ведення процесу ЕПП з проміжною ємністю.

Теплофізичні процеси, що протікають при формуванні зливка в прохідному кристалізаторі під час ЕПП з проміжною ємністю, мають явно виражений тривимірний характер, що зумовлено відсутністю осьової симетрії при подачі в нього розплаву. При локальній периферійній подачі розплаву в кристалізатор відбувається складний за структурою рух металу, який супроводжується тепло-масопереносом як вздовж течії, так і в інших напрямках за рахунок турбулентних пульсацій розплаву. Природно, що докладне врахування розрахунковим шляхом таких теплофізичних процесів можливе тільки за допомогою сумісного рішення тривимірних теплової і гідродинамічної задач. При розрахунках рідка фаза визначається температурою вище температури ліквідусу T_L , тверда область визначається температурою нижче температури солідусу T_S , а перехідна зона знаходиться між ними. При моделюванні об'ємна частка рідини F_L в перехідній зоні була описана в залежності від температури згладженої функції Хевісайда:

$$F_L = \begin{cases} 1 & T \geq T_L; \\ 0,5 + 0,9375 \frac{T - T_m}{\Delta T} - 0,625 \left(\frac{T - T_m}{\Delta T} \right)^3 + 0,1877 \left(\frac{T - T_m}{\Delta T} \right)^5 & T_L \geq T \geq T_S; \\ 0 & T \leq T_S, \end{cases} \quad (1)$$

де T_m температура плавлення, $\Delta T = T_L - T_S$ — температурний діапазон фазового переходу.

Розрахунок гідродинамічних процесів, які відбуваються при безперервній подачі титанового сплаву в кристалізатор, виконувався з наступними припущеннями — розплав вважався в'язкою нестисливою рідиною, рух приймався турбулентним. Для моделювання фізичних процесів, які відбуваються при неперервному литті титану, була сформульована математична модель, яка включає в себе закони збереження маси (18), імпульсу (19) та енергії (20):

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (2)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right) + \rho \mathbf{g} + \frac{C(1 - F_L)^2}{q + F_L^3} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_{cast}), \quad (3)$$

$$\rho C_p (\mathbf{u} \cdot \nabla) T = -(\nabla \cdot \mathbf{q}) \quad (4)$$

де ρ — густина, \mathbf{u} — швидкість, p — тиск, μ — динамічна в'язкість, \mathbf{I} — одинична матриця, \mathbf{g} — вектор гравітації, $C=10^5$ та $q=0,01$ — константи, співвідношення яких повинно бути достатнім, щоб придушити рух (за винятком швидкості плавки зливку \mathbf{u}_{cast}) в твердій області, F_L — частка рідкої фази, C_p — питома теплоємність, T — температура, $\mathbf{q} = -k \nabla T$ — тепловий потік за рахунок теплопровідності, k — коефіцієнт теплопровідності.

Положення фронту кристалізації визначалося у відповідності до методу фазового поля.

Розрахункова область для дослідження зазначених процесів представлена на рисунку 2, на якому $\Gamma_1 \dots \Gamma_7$ – границі розрахункової області, $d=0,4$ м, $h=0,15$ м, $l=2 \cdot d$, перетин струменю розплаву на вході в кристалізатор (Γ_1) – 10×40 мм.

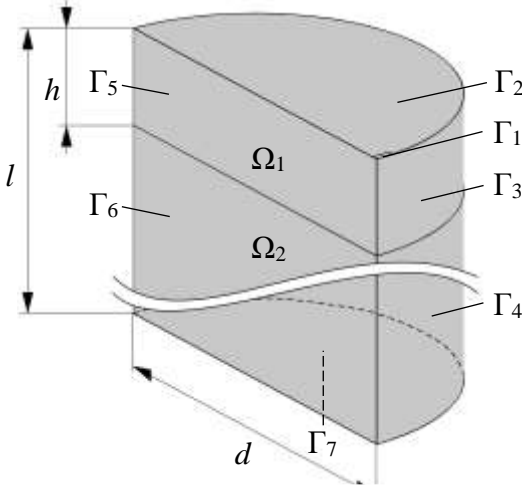


Рисунок 2 – Геометрія розрахункової моделі

Граничні умови для представленої на рисунку 2 розрахункової області наведені в таблиці 1, де \mathbf{n} – вектор нормалі до поверхні, U_{cast} – базова швидкість витягування зливку, q_{ev} – тепловий потік з поверхні рідкого металу за рахунок випаровування, ε – коефіцієнт випромінювання, h – коефіцієнт контактної тепловіддачі, $\sigma_{SB}=5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постійна Стефана-Больцмана, $T_{amb}=293,15$ К – температура навколишнього середовища.

Моделювався процес кристалізації зливка з титанового сплаву Ti-6-4 в циліндричному кристалізаторі діаметром $d=0,6$ м і висотою $h=0,15$ м.

Таблиця 1 – Граничні умови розрахункової області математичної моделі

Границя	Умови для швидкості	Умови для теплового потоку
Γ_1	$\mathbf{u} - (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} = 0$	$T = T_{in}$
Γ_2		$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \varepsilon_2 \sigma (T_{amb}^4 - T^4) - q_{ev} + \frac{P_{eb}}{\pi r^2}$ $\varepsilon_2 = 0.35$
Γ_3	$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0$ $\mathbf{K} - (\mathbf{K} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} = 0$ $\mathbf{K} = \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \mathbf{n}$	$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \varepsilon_3 \sigma (T_{amb}^4 - T^4) + h_3 (T_{amb} - T);$ $\varepsilon_3 = 0.35(1 - F_l); h_3 = h_s(1 - F_l) + h_l F_l;$ $h_s = 60 \cdot \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); h_l = 2000 \cdot \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
Γ_4		$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \varepsilon_4 \sigma (T_{amb}^4 - T^4); \varepsilon_4 = 0.35$
Γ_5		
Γ_6		$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0$
Γ_7	$\mathbf{u} = -\mathbf{n} U_{cast}$	$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = h_7 (T_{amb} - T); h_7 = 10 \cdot \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

Швидкість витягування зливка становила $u_{cast}=4$ мм/хв, що приблизно відповідає безперервному одержанню зливка з продуктивністю 300 кг/год. Температура металу на вході в кристалізатор – $T_{in} = 2000$ К, перетин струменя – 10 мм на 60 мм.

Потужність нагріву по верхній торцевій поверхні розподілялася таким чином: $W_1=100$ кВт рівномірно в центральній зоні з діаметром 0,5 м; $W_2=105$ кВт в периферійній зоні з максимумом питомого теплового потоку на діаметрі 550 мм і діаметром електронного пучка 50 мм. Коефіцієнт корисної дії електронно-променевого нагріву прийнятий рівним 0,75.

Розподіл температури по діаметру верхнього торця зливка при різних прийнятих у розрахунках значеннях числа Pr_T , яке визначає інтенсивність (обернено пропорційно) механізму турбулентної теплопровідності, представлено на рисунку 3.

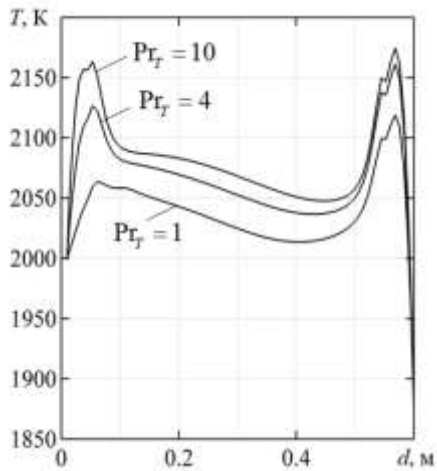


Рисунок 3 — Розподіл температури торцевої поверхні зливка по діаметру в площині симетрії при різних значеннях Pr_T

Зміна значення турбулентного числа Прандтля в діапазоні від 1 до 10 призводить до незначного підвищення рівня температури торцевої поверхні. Середня температура поверхні при цьому збільшується з 2052 К до 2088 К. Локально найбільш помітно внесок турбулентної теплопровідності проявляється в зоні навколо входу струменя розплаву в кристалізатор, де перепад значень максимальної температури досягає 100 К. В цілому зміна числа Прандтля досить незначно позначається на становищі ізотерм з температурою T_L і T_S , а також на величині глибини ванни рідкого металу, що свідчить про відносно слабкий вплив механізму турбулентної теплопровідності на процес кристалізації зливка.

Таким чином, в рамках побудованої математичної моделі було показано, що вплив турбулентної теплопровідності на положення фронту твердіння, а також на глибину рідкої ванни, є незначним для заданої швидкості одержання зливка. Це дозволяє в такому випадку зробити припущення про наявність турбулентності лише в області входження струменя рідкого металу з проміжної ємності в кристалізатор та про переважаючий ламінарний характер руху розплаву в рідкій ванні загалом.

Більш суттєво на форму та глибину рідкої ванни може впливати температура перегріву рідкого металу, що подається з проміжної ємності, та продуктивність процесу плавки. Тому подальші дослідження були спрямовані на визначення теплового стану зливка та положення фронту кристалізації при неперервній подачі рідкого титану з проміжної ємності в кристалізатор в залежності від температури металу на вході та швидкості витягування зливка для ламінарного режиму гідродинамічної течії в рідкій ванні.

Для визначення впливу температури перегріву рідкого металу, що подається з проміжної ємності, на глибину рідкої ванни в якості базових вихідних даних приймалися: кристалізатор діаметром $d=0,4$ м і висотою $h=0,15$ м; продуктивність витягування зливка – $G=250$ кг/год, температура рідкого металу на вході в кристалізатор $T_{in}=2061$ К та нагрівання зливка рівномірно розподіленим по поверхні тепловим потоком загальною потужністю $P_{eb}=90$ кВт з коефіцієнтом корисної дії електронно-променевого нагріву 0,75. Температурний діапазон фазового переходу становив $\Delta T=60$ К.

Були проведені розрахунки для різних температур рідкого металу на вході в кристалізатор ($T_{in}=\{2041, 2061, 2081, 2101\}$ К). В результаті були отримані розподіли температури та швидкості в досліджуваній області, які представлені на рисунку 4.

В цілому розрахунки показали, що форма рідкої ванни є несиметричною. Хоча фронт кристалізації наближається до плоского, в області входу струменя рідкого металу спостерігається промивання твердої фази біля стінки кристалізатора, що демонструється на рисунку 5. Товщина гарнісажу в цій зоні складає 2–3 мм, що в 2–3 рази менше товщини гарнісажу в інших зонах кристалізатора. При русі зливка вниз такий тонкий гарнісаж може руйнуватися та формувати на поверхні зливка добре відомі характерні дефекти типу «заплутування металу».

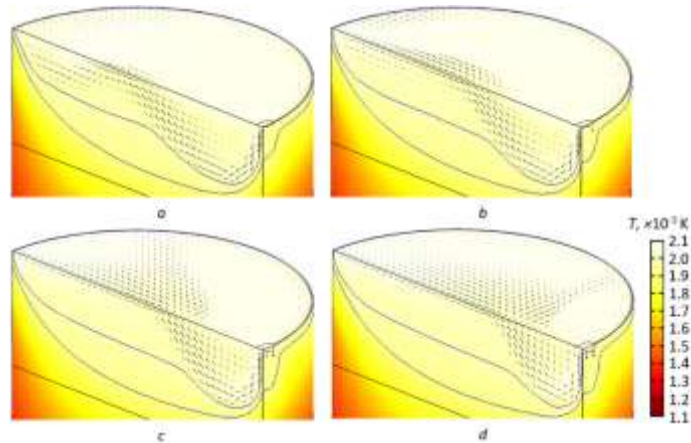


Рисунок 4 – Розподіл температури у зливку під час ЕПП:
 а – $T_{in} = 2041$ К, б – $T_{in} = 2061$ К, с – $T_{in} = 2081$ К, д – $T_{in} = 2101$ К

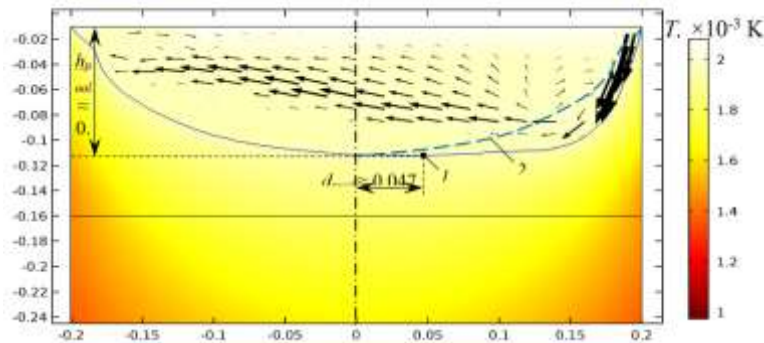


Рисунок 5 – Поздовжній переріз рідкої ванни у зливку $\varnothing 400$ мм титану під час ЕПП:
 1 – точка максимальної глибини рідкої ванни, 2 – дзеркальна проекція лівої половини ізотерми ($T_m = 1941$ К) відносно осі зливку для візуальної оцінки асиметрії рідкої ванни

Цікавим є те, що при збільшенні температури металу на вході в кристалізатор на ділянці досліджуваного діапазону зменшується зміщення точки максимальної глибини ванни від осі зливку (рисунок 6а). Хоча очікувалося, що при збільшенні температури перегріву рідкого металу, який подається з проміжної ємності, точка максимальної глибини рідкої ванни буде зміщуватися від осі зливку у бік вводу струменю рідкого металу. Що стосується глибини рідкої ванни, то вона практично не змінюється в досліджуваному діапазоні температури рідкого металу на вході в кристалізатор (рисунок 6б), з чого можна зробити висновок про їх слабку залежність. Проте, як видно з рисунку 4, зі збільшення температури рідкого металу на вході в кристалізатор суттєво змінюється характер його руху.

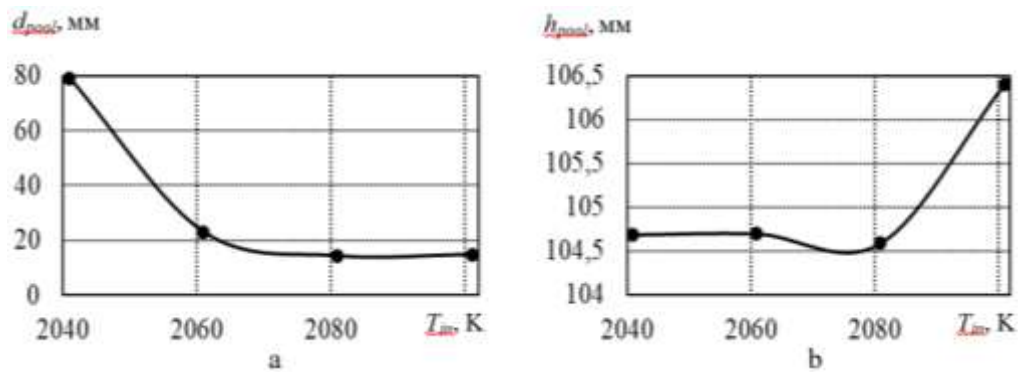


Рисунок 6 – Залежності зміщення точки максимальної глибини відносно осі зливку d_{pool} (а) та глибини рідкої ванни h_{pool} (б) в залежності від температури перегріву рідкого металу на вході в кристалізатор

При одержанні зливків методом ЕПП одним із важливих технологічних параметрів є продуктивність процесу. Тому подальші розрахунки були спрямовані на дослідження впливу швидкості подачі рідкого металу з проміжної ємності в кристалізатор на форму та глибину рідкої ванни.

При проведенні моделювання температура перегріву металу, що подається в кристалізатор, була прийнята $T_{in}=2061$ К. Положення ізотерм, що відповідають температурі плавлення титану T_m , для різних швидкостей витягування зливка в діапазоні $u_{cast} \dots 1,3 \cdot u_{cast}$ представлені на рисунку 7.

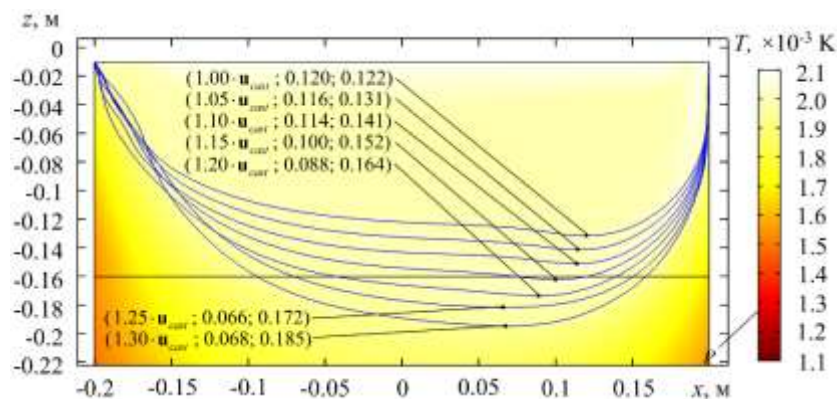


Рисунок 7 – Розподіл температури для різних швидкостей витягування зливка з кристалізатора (крапкою позначено місце максимальної глибини рідкої ванни та вказано його параметри в форматі (u_{cast} ; d_{pool} , м; h_{pool} , м))

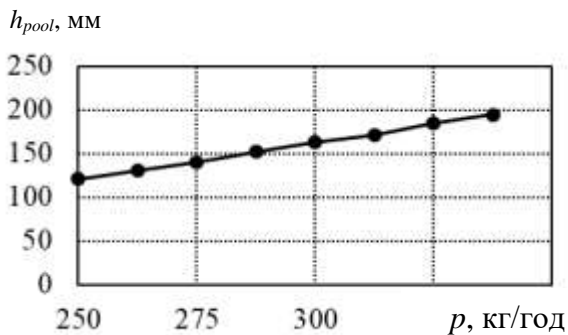


Рисунок 8 – Залежність глибини рідкої ванни h_{pool} від продуктивності p при ЕПП зливку титану $\varnothing 400$ мм

Для більш наглядної демонстрації результатів, одержаних за допомогою проведених в рамках математичної моделі розрахунків, було побудовано залежність глибини рідкої ванни від продуктивності процесу при ЕПП зливка титану (рисунок 8).

Як видно з рисунків 7 та 8 при збільшенні швидкості витягування зливка на 30% глибина рідкої ванни зростає більш ніж на 50% (з 0,122 м до 0,185 м).

Аналіз одержаних результатів показав, що збільшення продуктивності процесу, як і у випадку з підвищенням температури перегріву металу, що надходить у кристалізатор, спричиняє зміщення точки максимальної глибини рідкої ванни до осі зливку d_{pool} . Крім того, при збільшенні продуктивності процесу спостерігається суттєве зростання глибини рідкої ванни.

Перевірка адекватності представленої математичної моделі пов'язаних гідродинамічних і теплових процесів при одержанні зливка в прохідний водоохолоджуваній кристалізатор виконувалася шляхом зіставлення розрахункових і експериментальних даних про положення усадкової раковини при аварійній зупинці плавки і наступному охолодженні зливка.

На рисунку 9 наведені послідовні етапи теплового стану зливку з вирішення нестационарної теплової задачі. Виходячи з отриманих розрахункових даних поява усадкової раковини в зливку слід очікувати на глибині 130–140 мм.

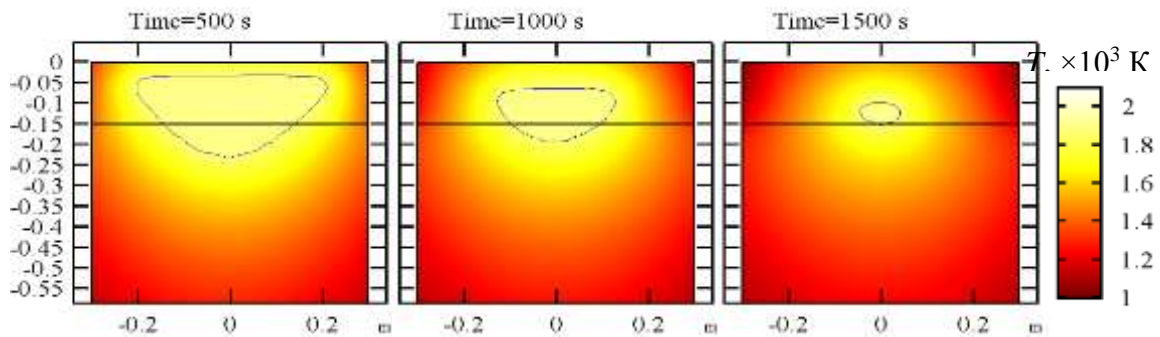


Рисунок 9 – Положення фронту кристалізації при охолодженні зливка в різні моменти часу після аварійної зупинки процесу ЕПП

Натурні експерименти аварійного завершення плавки з використанням розрахункових технологічних режимів показали, що усадкова раковина в зливку



Рисунок 10 – Виливок головної частини зливку $\varnothing 600$ мм

$\varnothing 600$ мм знаходиться відстані 120–150 мм від верхньої кромки зливка, що досить близько корелюється з розрахунковими даними. Крім того, експериментально було одержано виливок головної частини зливку, який показав, що фронт кристалізації є плоским і підтверджує розрахункові дані (рисунок 10).

Четвертий розділ присвячено вивченню особливостей процесів випаровування легуючих компонентів при електронно-променевої плавці злиwkів високоміцних складнолегованих сплавів титану та розробці технології одержання промислових (BT14, BT22, BT23, BT19) та вітчизняних (T110, T120) високоміцних складнолегованих сплавів титану методом ЕПП.

При виплавці злиwkів титанових сплавів методом ЕПП виникає проблема забезпечення заданого хімічного складу металу. Це викликано тим, що плавка в електронно-променевої установці здійснюється при більш високому вакуумі, ніж ВДП, і легуючі елементи з пружністю пари, що перевищує пружність пари титану,

випаровуються інтенсивніше. В першу чергу ця проблема стосується алюмінію, тому що у нього одне з найвищих значень пружності пари і цей елемент присутній практично у всіх титанових сплавах.

Характерною особливістю процесу ЕПП з проміжною ємністю є наявність трьох зон плавки – торець витратної заготовки, проміжна ємність і кристалізатор (рисунок 11).

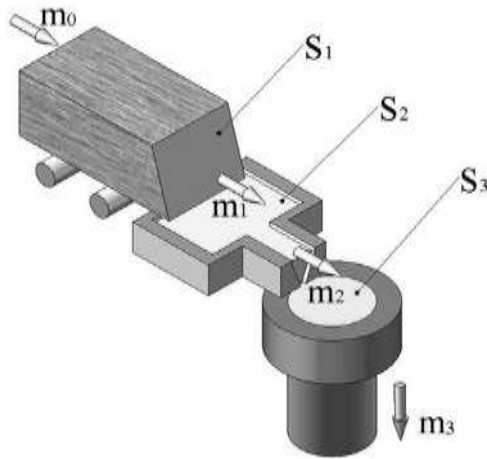


Рисунок 11 – Схема ЕПП з проміжною ємністю

Математична модель процесів випаровування при ЕПП будується на основі рівнянь матеріального балансу алюмінію, титану та інших легуючих елементів для кожної стадії плавлення, при цьому зв'язки між стадіями заміняють масопотоками.

Стосовно обраного модельного сплаву ВТ19 математична модель випаровування при ЕПП має наступний вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_j} \rho [X_i]_j dV = m_{j-1} [X_i]_{j-1} - S_j \pi_j^i - m_j [X_i]_j; \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_j} \rho [Ti]_j dV = m_{j-1} [Ti]_{j-1} - S_j \pi_j^{Ti} - m_j [Ti]_j,$$

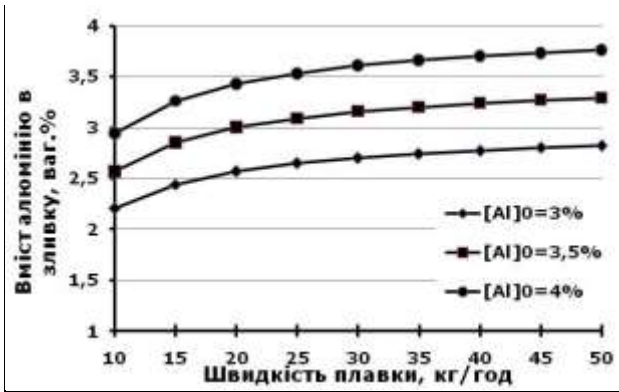
де $i=1,2,\dots,n$ позначають легуючі елементи; $j=1,2,3$ – зони плавки; V_j – об'єм рідкого металу у j -тій зоні плавки, m^3 ; ρ – щільність розплаву, $кг/м^3$; $[X_i]_j$ – концентрація i -того легуючого елемента у j -тій зоні плавки, масова доля; $[Ti]_j$ – концентрація титану у j -тій зоні плавки, масова доля; S_j – площа вільної поверхні рідкого металу у j -тій зоні плавки, $м^2$; π_j^i і π_j^{Ti} – питомі потоки легуючих елементів і титану через міжфазну поверхню в парову фазу у j -тій зоні плавки, $кг/(с \cdot м^2)$; m_{j-1} – масова швидкість надходження розплаву у j -тій зоні плавки, $кг/с$; m_3 – масова швидкість затвердіння розплаву в кристалізаторі, $кг/с$.

Математична модель (5) встановлює залежність концентрації елементів в отриманому методом ЕПП з проміжною ємністю зливку сплаву титану від швидкості плавки, концентрації легуючих елементів у витратній заготовці і температури розплаву.

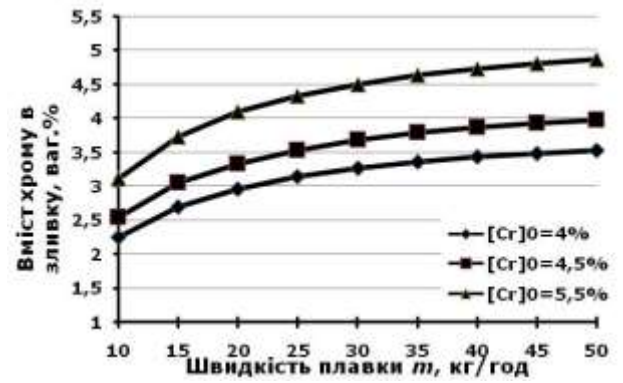
За допомогою математичної моделі процесів випаровування для сплаву ВТ19 були визначені залежності вмісту легуючих елементів в зливку, проміжній ємності і торці заготовки від швидкості плавки m при різному хімічному складі вихідної шихти $[Al]_0$, $[Cr]_0$, $[Mo]_0$, $[V]_0$, $[Zr]_0$ (рисунок 12).

За результатами аналізу даних розрахунків встановлено, що концентрація таких елементів сплаву ВТ19 як молібден, ванадій і цирконій зі збільшенням швидкості плавки монотонно зменшується (рисунок 12 с–е), що обумовлено більш низькою пружністю парів цих елементів в порівнянні з іншими компонентами сплаву. Слід зазначити, що при швидкостях плавки понад 30 $кг/год$ вміст молібдену, ванадію і цирконію в зливку лише незначно збільшується в порівнянні з їх концентрацією в

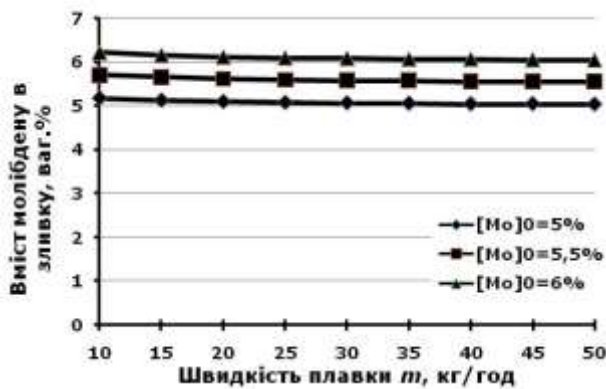
вихідній шихті, що пов'язано з меншими втратами алюмінію, хрому та основи сплаву – титану на цих швидкостях плавки.



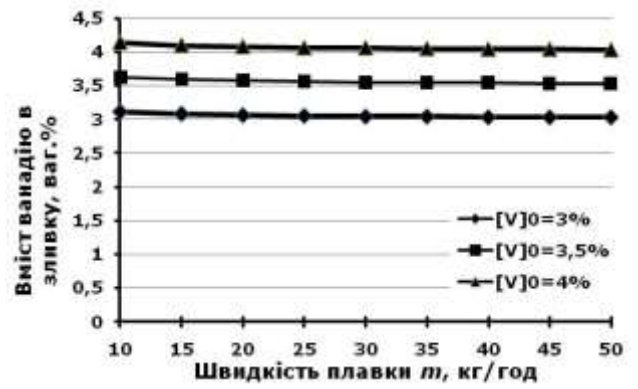
а



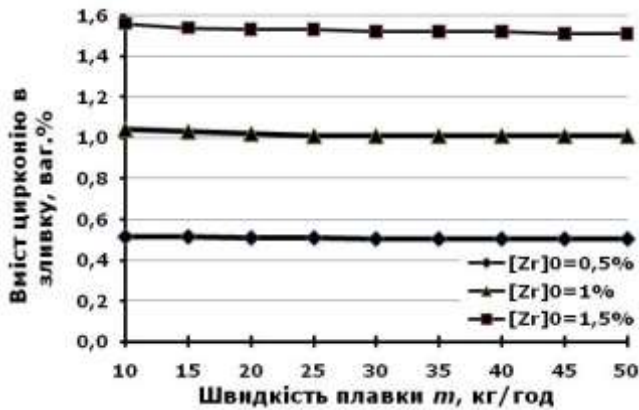
б



в



г



д

Рисунок – 12 Залежності вмісту легуючих елементів в зливку сплаву VT19 від швидкості плавки m при різному початковому вмісті цих елементів $[Al]_0$, $[Cr]_0$, $[Mo]_0$, $[V]_0$, $[Zr]_0$ в початковій шихті

Для перевірки адекватності математичної моделі і розрахованих технологічних режимів була проведена серія плавок злиwkів титанового сплаву VT19. Злиwки виплавлялися в кристалізатор $\varnothing 110$ мм на електронно-променевої установці UE-208M. Аналіз хімічного складу отриманих злиwkів показав, що побудована математична модель описує процес випаровування легуючих елементів з титанового сплаву VT19 при ЕПП з досить високим ступенем точності (таблиця 2).

Відносна похибка розрахункових результатів від експериментальних даних при ЕПП злиwkів сплаву VT19 складала: 4% (відн.) для алюмінію; 4% (відн.) для хрому; 2% (відн.) для ванадію; 1,5% (відн.) для молібдену і 1% (відн.) для цирконію.

Таблиця 2 – Фактичний і розрахунковий хімічний склад сплаву VT19

Характеристика металу	Вміст елементів, мас.%					
	Al	Cr	V	Mo	Zr	Ti
Вихідна шихта	3,57	5,29	3,38	5,23	0,88	основа
Зливok ЕПП (експеримент)	3,35	4,19	3,50	5,24	0,91	
Зливok ЕПП (розрахунок)	3,22	4,34	3,43	5,32	0,90	

Розрахунки в рамках побудованих математичних моделей при різних режимах ведення процесу виплавки зливоків титану $\varnothing 110$ мм, $\varnothing 400$ мм та $\varnothing 600$ мм, та аналіз отриманих даних дозволили визначити оптимальні технологічні режими ЕПП (таблиця 3), які забезпечують баланс між формуванням задовільної структури одержуваних зливоків та втратами легуючих елементів на випаровування, що позитивно позначається на якості одержуваних зливоків.

Таблиця 3 – Технологічні параметри ЕПП високоміцних сплавів титану

Технологічний параметр	$\varnothing 110$ мм	$\varnothing 400$ мм	$\varnothing 600$ мм
швидкість плавки, кг/год	30	250	300
швидкість витягування зливка, мм/хв	12	7	4
потужність в кристалізаторі, кВт	20	120	205
потужність в проміжній ємності, кВт	120	240	300

Відпрацювання визначених режимів та розробка технології одержання методом ЕПП зливоків складнолегованих сплавів титану проводилися при виплавці партії зливоків сплавів VT14, VT22, VT23, VT19. Отримували зливки круглого перетину діаметрами 110 мм, 400 мм та 600 мм.

Для оцінки якості металу отриманих зливоків проводилося дослідження хімічного складу зразків відібраних по довжині зливка. Результати аналізу хімічного складу металу отриманих зливоків (таблиця 4) показали, що розподіл легуючих елементів по довжині зливоків рівномірний і відповідає марочному складу.

Структура металу зливоків (рисунок 13) щільна, однорідна, з відсутністю зон, що по різному травляться по перетину зливка. Істотної різниці в структурі центральної зони зливка і периферійної зони не спостерігається. Характерною для зливоків ВДП сегрегації легуючих елементів в жодному із одержаних зливоків не виявлено. Кристалічна будова металу зливоків однакова по усьому перетину і характеризується кристалами, за формою близькими до рівновісної. Ділянки стовбчастої структури відсутні у всіх випадках.

В подальшому були проведені роботи по відпрацюванню розробленої технології для отримання зливоків вітчизняних високоміцних $(\alpha+\beta)$ -титанових сплавів T110 та T120.

Дослідження вмісту легуючих елементів зливоків сплавів T110 та T120 показало їх рівномірний розподіл як по довжині, так і по поперечному перетину зливка (таблиця 5).

Структура металу зливоків титанових сплавів T110 і T120 (рисунок 14) щільна, однорідна. Дефекти у вигляді пор, раковин, тріщин і неметалічних включень не виявлені.

Таблиця 4 – Розподіл легуючих елементів по довжині зливків титанових сплавів

Марка сплаву	Частина зливка	Вміст, % ваг.							
		Al	Mo	V	Fe	Zr	Cr	O	N
BT22	Верхня	5,1	4,2	4,9	0,90	0,01	1,3	0,11	0,012
	Середня	5,2	4,5	4,7	1,0	0,01	1,4		
	Нижня	5,0	4,1	5,0	1,0	0,01	1,4	0,12	0,012
ГОСТ 19807-91		4,4-5,7	4,0-5,5	4,0-5,5	0,5-1,5	<0,3	0,5-1,5	<0,15	<0,05
BT23	Верхня	4,5	2,0	4,7	0,5	0,01	0,9	0,10	0,010
	Середня	4,7	2,1	5,0	0,6	0,01	0,9		
	Нижня	4,3	1,9	4,7	0,5	0,01	0,9	0,12	0,011
ОСТ 1-90013 - 81		4,0-6,3	1,5-2,5	4,0-5,0	0,4-0,1	<0,3	0,8-1,4	<0,15	<0,05
BT19	Верхня	3,2	5,3	3,8	-	0,8	4,0	0,08	0,006
	Середня	3,4	5,2	3,6	-	0,9	4,2		
	Нижня	3,5	5,2	3,3	-	0,9	4,4	0,10	0,005
		2,5-3,5	5,0-6,0	3,0-4,0		0,5-1,5	4,0-5,0	<0,15	<0,015
BT14	Верхня	5,1	3,1	1,5	0,16	0,08	-	0,10	0,02
	Середня	5,2	3,3	1,5	0,19	0,10	-		
	Нижня	5,4	3,3	1,6	0,17	0,07	-	0,09	0,02
ГОСТ 19807-91		3,5-6,3	2,5-3,8	0,9-1,9	<0,25	<0,3	-	<0,15	<0,05

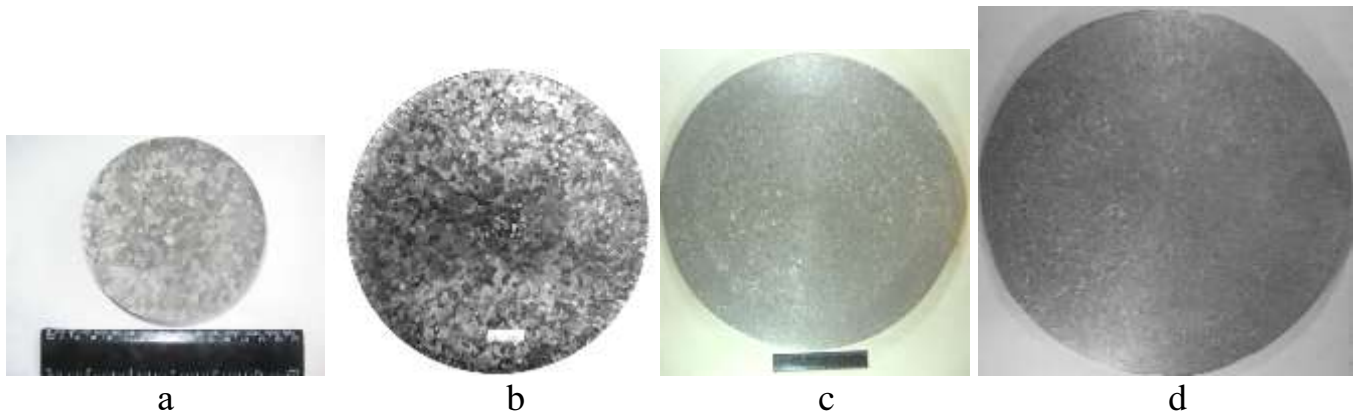


Рисунок 13 – Макроструктури зливків сплавів титану, одержаних методом ЕПП: а – Ø110 мм BT19; б – Ø400 мм BT22; в – Ø400 мм BT23; д – Ø600 мм BT14

Таблиця 5 – Розподіл легуючих елементів і домішок у зливках сплавів Т110 та Т120

Марка сплаву	Частина зливка	Вміст, % мас.							
		Al	Mo	V	Nb	Fe	Zr	Cr	O
Т-110	Верхня	5,51	1,27	1,31	4,04	1,96	0,59	-	0,12
	Середня	5,35	1,35	1,33	3,90	1,85	0,59	-	
	Нижня	5,30	1,38	1,31	3,88	1,80	0,57	-	0,14
ТУУ 27.4.05416923.071-2005		5,0-6,0	1,0-1,8	0,8-2,0	3,5-4,8	1,5-2,5	0,3-0,8	-	<0,20
Т-120	Верхня	4,90	2,97	2,30	4,29	1,02	2,60	1,15	0,11
	Середня	5,50	2,86	2,39	4,20	1,05	2,68	1,12	
	Нижня	5,0	2,69	2,44	4,12	1,11	2,67	1,28	
Технічне завдання		4,5-5,5	2,5-3,0	1,5-2,5	3,5-4,5	0,7-1,2	2,3-3,0	1,0-1,5	<0,15

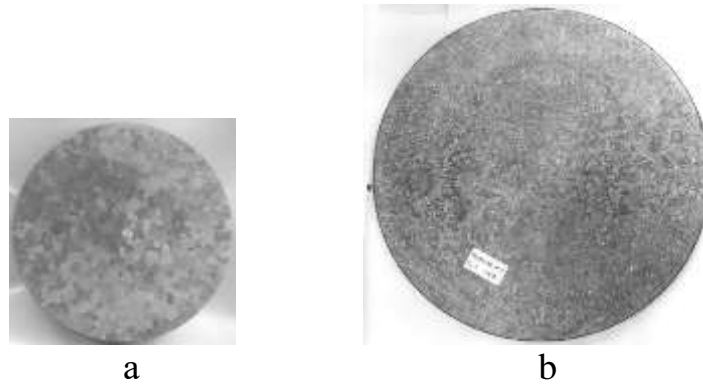


Рисунок 14 – Макроструктури зливок сплавів титану одержаних методом ЕПП:
а – Ø150 мм Т120; б – Ø400 мм Т110

Проведені за допомогою ультразвукового контролю дослідження показали, що у виплавлених методом ЕПП зливках відсутні нещільності, неметалеві включення з розміром більше 1 мм, а також щільні скупчення більш дрібних включень.

Таким чином, проведені роботи показали, що визначені технологічні режими ЕПП дозволяють одержати якісні бездефектні зливки промислових та вітчизняних високоміцних сплавів титану.

У **п'ятому розділі**, базуючись на проведених розрахунках в рамках побудованих математичних моделей, розроблено технологію отримання зливок економнолегованих сплавів титану методом ЕПП. Проведено дослідження якості зливок, структури та механічних властивостей економнолегованих сплавів титану одержаних за розробленою технологією та показано, що ЕПП з проміжною ємністю дозволяє отримати якісні зливки як за хімічним складом, так і за структурою.

Наразі в світі, поряд зі стабільною тенденцією збільшення застосування сплавів титану в різних галузях промисловості, залишається невирішеним питання високої вартості напівфабрикатів з цих сплавів, адже високоміцні титанові сплави мають складну систему легування і містять дефіцитні і дорогі легуючі елементи.

Вирішити задачу зменшення ціни виробів з високоміцних титанових сплавів можна шляхом застосування концепції економного легування титанових сплавів, яка полягає у використанні легуючих елементів, які мають відносно невелику вартість і входять до складу найбільш доступних лігатур.

Однією з найбільш важливих вимог до зливок економнолегованих титанових сплавів є висока однорідність за хімічним складом при їх отриманні. При використанні легуючих елементів низької якості зростає ризик отримання незадовільної якості напівфабрикатів і виробів із металу внаслідок наявності включень і концентраційних неоднорідностей. Тому освоєння технології отримання напівфабрикатів з економнолегованих сплавів титану у промислових умовах вимагає розробки і впровадження принципово нових технологій і обладнання – для виплавки зливок та виготовлення деформованих напівфабрикатів.

З метою дослідження впливу дії електронного-променевого нагріву на якість одержуваних економнолегованих сплавів титану були проведені роботи з виплавки зливка, деформаційній обробці та дослідженні якості одержаного металу сплаву ТІМЕТАЛ LCB (Ti-1,5Al-6,8Mo-4,5Fe).



Рисунок 15 – Макроструктура зливка Ø110 мм сплаву титана TIMETAL LCB

Аналіз результатів хімічного складу металу зливка Ø110 мм (таблиця 6) показав, що розподіл легуючих елементів по довжині рівномірний і відповідає заданому складу. Структура металу зливка щільна, однорідна, з відсутністю зон по перетину зливка, що травляться по різному (рисунок 15). Величина зерна відповідає 6–7 балу за 10 бальною шкалою макроструктур ГОСТ 26492-85.

З метою вивчення якості одержаного методом ЕПП металу було проведено роботи з термодформаційної обробки. Основне завдання термодформаційної обробки полягало в максимальному подрібненні сформованої при кристалізації зерен структури і формування всередині β-зерен дисперсної і однорідної (α+β) мікроструктури глобулярного типу.

Таблиця 6 – Розподіл елементів в зливку Ø110мм сплаву TIMETAL LCB

Місце відбору проб	Вміст елементів, % ваг.				
	Al	Mo	Fe	Ti	O
Верх	1,5	6,3	4,4	осн.	0,11
Середина	1,7	6,4	4,3		
Низ	1,6	6,2	4,4		

Оскільки сплав має низьку температуру завершення поліморфного перетворення (нижче 800°C), то нагрів зливка до 900°C мав забезпечити початок пресування при температурах однофазної β-області. Для цього зливок Ø110 мм

піддавався первинному нагріванню до 900°C (вище температури поліморфного перетворення T_{III} в однофазну β-область) з наступним пресуванням до отримання заготовки розміром 120×120×200мм.

Після пресової обробки було проведено прокатку на прокатному стані, з метою отримання плити товщиною 10 мм. Крім формування плити заданої товщини, найважливішим завданням прокатки є трансформація литої мікроструктури, бажано в (α+β) структуру глобулярного типу. Для цього прокатку проводили не менше ніж 7–8 проходів з перехресною зміною напрямку прокатки.

При цьому, перші 2–3 проходу проводили з нагріву при 800°C. Наступні 5 і більше проходів (з сумарним ступенем деформації, тобто зменшенням початкової товщини пресування щодо кінцевої товщини плити, не менше 70%) проводили після нагрівання при температурі не більше 750°C. Після кожного проходу заготовку поміщати в піч. Кінцева товщина пластини в 10 мм була досягнута після 20 проходів через валки прокатного стану.

Для з'ясування стабільності отриманого прокаткою стану і можливості трансформації утвореної при цьому структури за рахунок рекристалізації при подальшій термообробці, прокатаний матеріал був підданий трьом різним видам відпалу (таблиця 7).

Температури відпалу були обрані виходячи з значення температури завершення поліморфного (α+β)₀→β перетворення (T_{III}), яка для даного сплаву складає 750°C.

Використані режими пресування і прокатки забезпечили формування високодисперсного внутризеренного стану, причому сформована α-фаза має глобулярну будову із середнім розміром часток не більше 3 мкм. Водночас,

подрібнення первинних зерен β -фази в результаті деформації не відбулося. β -зерна мали сплюснуту і витягнуту в напрямку прокатки форму.

Таблиця 7 – Механічні властивості сплаву TIMETAL LCB після різних обробок

Направлення випробування	Механічні властивості			
	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
Відпал, 700°C, 1,5 год., охолодження з піччю				
Уздовж	1125	1156	11,58	29,85
Поперек	1155	1160	8,69	23,11
Подвійний відпал, 700°C, 1,5 год. + 720°C, 1,5 год, охолодження з піччю				
Уздовж	1160	1166	11,31	23,05
Поперек	1156	1161	7,10	18,81
Відпал 900°C, 1 год., Гартування у воду				
Уздовж	1089	1090	15,22	46,50

Для перевірки можливості подрібнення зерен мікроструктури шляхом рекристалізації, частина зразків була піддана нагріванню в печі при 900°C протягом 60 хвилин з подальшим гартуванням в воду. Встановлено, що відпал при температурі однофазної β -області призводить до рекристалізації і деякого зростання β -зерен до 100–150 мкм. Однак, сформована під час прокатки полосчатість практично зникає, і отримана мікроструктура свідчить про більшу ізотропність сплаву після відпалу при температурах однофазної β -області. Результати механічних випробувань на розтяг показали досить високий загальний рівень властивостей, як міцності, так і пластичності, відпалених станів (таблиця 7).

Метою подальшої роботи була оцінка потенціалу та можливостей застосування розробленої технології ЕПП для отримання недорогих сплавів на основі системи Ti-Al-Mo-Fe (Cr) з різним рівнем легування β -стабілізуючими елементами (молібденовий еквівалент C_{Mo} від приблизно 3–4% до 8–10%) (таблиця 8), отриманих з використанням більш дешевих β -легуючих елементів і лігатур з подальшою відносно простою термомеханічною обробкою для досягнення кращого балансу між високою міцністю і достатньою пластичністю таких матеріалів.

Таблиця 8 – Хімічний склад сплавів системи Ti-Al-Mo-Fe і Ti-Al-Mo-Cr

№ сплаву	Вміст елементів, %ваг						C_{Mo} , %ваг.	T_{β} , °C
	Al	Mo	Fe	Cr	Інші	Ti		
1	3,9	0,9	0,9	-	<0,40	основа	3,8	945
2	4,3	1,9	1,7	-	<0,40	основа	6,5	920
3	5,0	5,0	1,7	-	<0,40	основа	9,8	850
4	5,0	5,0	-	2,7	<0,40	основа	8,6	865
5	1,5	-	1,0	7,2	<0,40	основа	12,5	

Одержані зливки піддавали тривимірному пресуванню при початковій температурі 1100°C із загальним ступенем деформації не менше 75%. Пресовані

напівфабрикати прокочували при температурах 820–840°C від 40 мм до 15 мм за 6 проходів зі зміною напрямку прокатки на кожному проході на 90°.

Вибір режимів термообробки (таблиця 9) ґрунтувався на температурах завершення фазового перетворення $(\alpha+\beta_0)\rightarrow\beta$ (T_β бета-переходу).

Таблиця 9 – Режими термічної обробки сплавів системи Ti-Al-Mo-Fe і Ti-Al-Mo-Cr

№ сплаву	Режим термообробки		
	Відпал	Звичайна термообробка (ЗТО)	Швидкісна термообробка (ШТО)
1	900°C, 2год., охол.в печі	900°C, 1год., вода, 550°C, 5год., охол.в печі	Нагрів 20°C/с до 1000°C, вода, 550°C, 5 год.
2	880°C, 2год., охол.в печі	880°C, 1год., вода, 550°C, 5год., охол.в печі	Нагрів 20°C/с до 950°C, вода, 550°C, 5 год.
3	820°C, 2год., охол.в печі	840°C, 1год., вода, 550°C, 5год., охол.в печі	Нагрів 20°C/с до 900°C, вода, 550°C, 5 год.
4	820°C, 2год., охол.в печі	840°C, 1год., вода, 550°C, 5год., охол.в печі	Нагрів 20°C/с до 900°C, вода, 550°C, 5 год.
5	800°C, 2год., охол.в печі	850°C, 1год., вода, 550°C, 5год., охол.в печі	-

У стані після прокатки всі сплави характеризувалися мікроструктурою, що складається з неперекристалізованої матриці β -фази з ламелями α -фази всередині, які мали сильну хвилястість і частково трансформувалися при гарячій деформаційній обробці в рівновісні частки (рисунок 16).

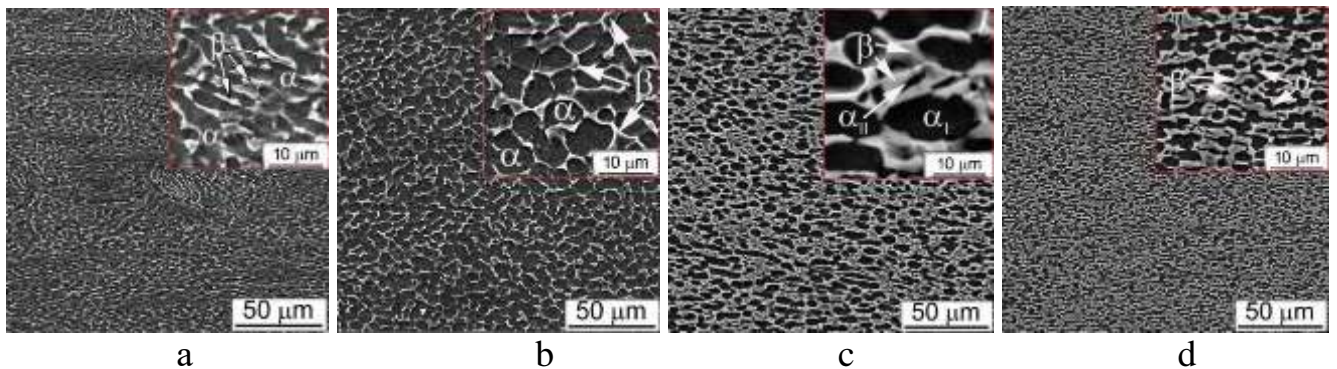
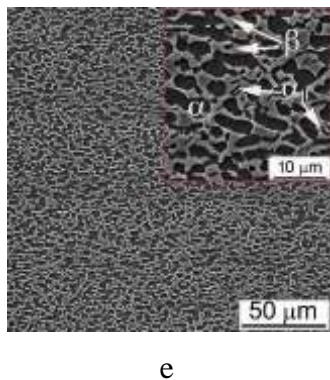


Рисунок 16 – Мікроструктура дослідних сплавів: a, b – № 1; c – № 2; d – № 3; e – № 4. (a) – в стані після прокатки, (b–e) в відпаленому стані



При подальшому відпалі при температурах верхньої частини $(\alpha+\beta)$ області (приблизно на 50°C нижче T_β) в низьколегованому сплаві № 1 відбувається практично повне перетворення в мікроструктуру глобулярного типу (рисунок 16b). У більш легованих сплавах таке перетворення в глобулярну мікроструктуру не було повним – в відпалених сплавах все ще присутні деякі залишки попередніх α -ламелей, орієнтованих, в основному, вздовж напрямку прокатки, можливо, через відносно більш низькі T_β і, отже, температур відпалу

(рисунок 16с–16d). Середній розмір первинних α_1 -частинок в відпалених сплавах змінювався в межах 7–10 мкм.

Крім того, присутність деякої кількості вторинних α -голок всередині β -матриці спостерігалось в сплавах, що містять більше β -стабілізаторів, очевидно, в результаті поєднання нижчої температури відпалу і більш повільного дифузійного перерозподілу легуючих елементів при охолодженні в печі.

Результати випробувань на розтяг отриманих матеріалів представлені в таблиці 10. Дані для більш легovanого сплаву №5 були додані для порівняння, щоб показати вплив молібденового еквіваленту C_{Mo} , що перевищує 10 ваг. %.

Таблиця 10 – Властивості при розтягуванні (швидкість деформації $8 \cdot 10^{-4} \text{с}^{-1}$)

№ сплаву	C_{Mo}	Обробка	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
1	3,8	Прокатаний	946	983	14,2	36,7
		Відпалений	944	987	16,5	49,0
		ЗТО	948	992	11,5	38,6
		ШТО	951	1010	10,4	36,9
2	6,5	Прокатаний	1012	1034	10,7	30,3
		Відпалений	988	1022	16,2	42,6
		ЗТО	1114	1182	8,7	24,8
		ШТО	1195	1267	7,9	26,4
3	9,8	Прокатаний	1098	1187	9,8	32,5
		Відпалений	998	1065	14,6	42,4
		ЗТО	1340	1363	7,5	22,1
		ШТО	1400	1428	6,9	21,5
4	8,6	Прокатаний	1143	1168	13,2	34,2
		Відпалений	1098	1121	18,6	48,6
		ЗТО	1365	1412	8,8	27,5
		ШТО	1488	1512	7,9	27,8
5	12,5	Прокатаний	1027	1085	10,3	26,7
		Відпалений	938	952	18,6	42,4
		ЗТО	1312	1328	9,5	28,8

Аналізуючи результати, які представлені в таблиці 10, можна зробити висновок, що всі сплави характеризуються високими механічними характеристиками після прокатки, а також після всіх видів термообробки. Наприклад, менш легований сплав №1 ($C_{Mo}=3,8\%$) характеризується рівнями міцності і пластичності, які цілком можна порівняти з властивостями широко вживаного сплаву Ti-6-4. Підвищення вмісту заліза в сплавах даної системи легування призводить до значного збільшення міцності при збереженні пластичності на досить високому рівні (5–12 в таблиці 10). Заміщення заліза на хром в найбільш легovanому сплаві №4 забезпечує досягнення найкращого рівня механічних характеристик (пп. 13–16 таблиця 10, рисунок 17).

У стані після прокатки (рисунок 17а) максимальна міцність була отримана для сплаву №3 ($C_{Mo}=9,8\%$), а у всіх інших випадках (після відпалу – рисунок 17b і зміцнення обох видів – рисунок 17c і 17d) максимум міцності відповідав сплаву №4 ($C_{Mo}=8,6\%$). Це явище можна пояснити також відмінністю дифузійної рухливості

заліза і хрому в титановій матриці, що в багатьох випадках досить суттєво впливає на структурні і фазові перетворення і, таким чином, на механічні властивості сплавів титану. Зокрема, залізо схильне до утворення локальних флуктуацій, збагачених цим елементом, аж до утворення високодисперсних частинок інтерметалідних сполук, що викликає тенденцію до охрупчування через такі локальні зони, особливо якщо вони утворюються по межах зерен.

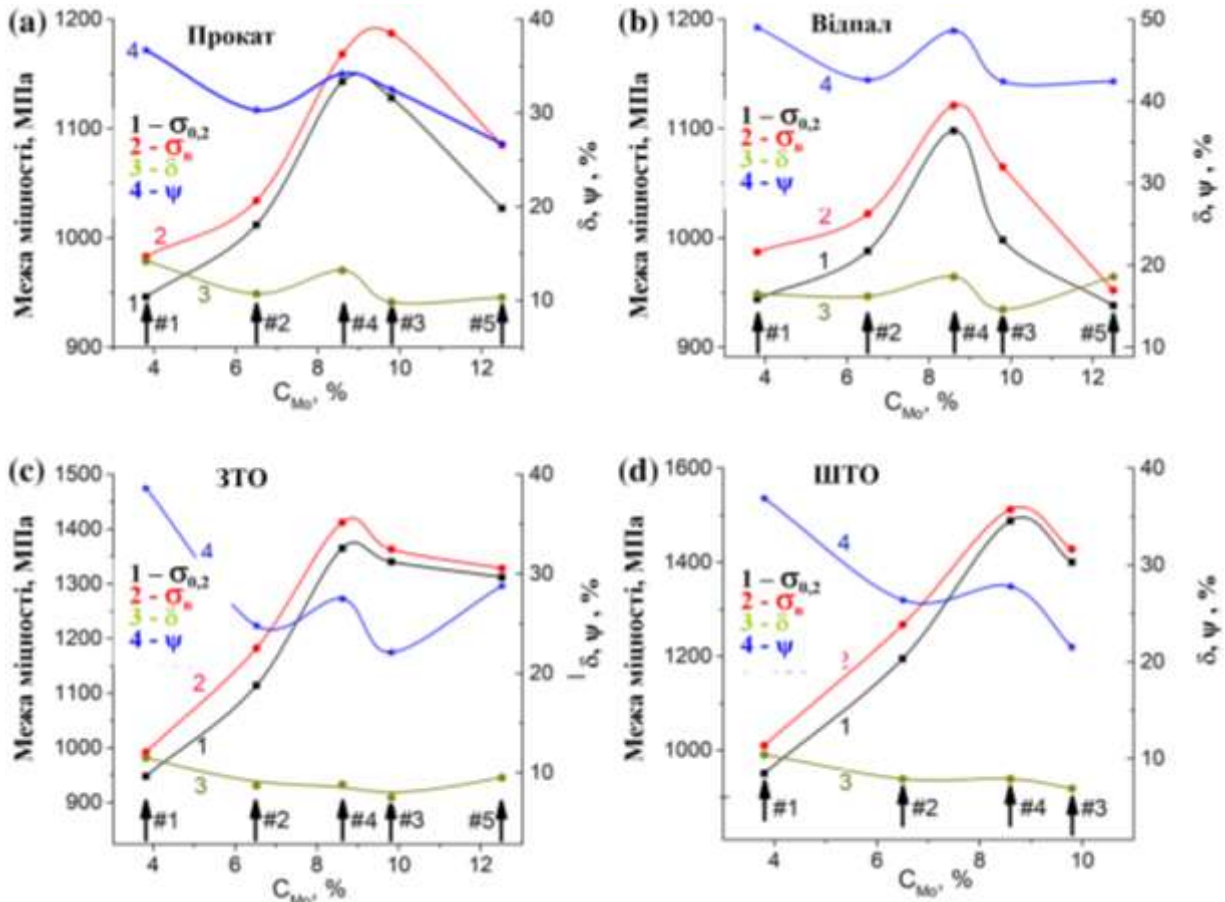


Рисунок 17 – Вплив вмісту β -стабілізуючих елементів на властивості при розтягуванні досліджуваних сплавів після різних обробок

Підводячи підсумки з вищевикладеного, можна зробити висновок, що запропоновані склади титанових сплавів з систем Ti-Al-Mo-Fe і Ti-Al-Mo-Cr одержаних за розробленою технологією ЕПП можуть забезпечити високий, надійний і конкурентоспроможний з відомими промисловими сплавами баланс механічних властивостей в гарячедеформованих, відпалених і термічно зміцнених станах. Беручи до уваги, що ці сплави можна виробляти з використанням відносно дешевих лігатур, наприклад, феромолібдена, який використовують в сталеливарній промисловості, в поєднанні з відносно простим методом ЕПП та термомеханічної обробки, вони можуть забезпечити високу рентабельність.

У шостому розділі розроблено технологію деформаційної та термічної обробки вітчизняного високоміцного сплаву Т120, одержаного за технологією ЕПП з проміжною ємністю. Досліджено якість напівфабрикатів з вітчизняного сплаву

титану Т110 та промислових високоміцних складнолегованих сплавів титану ВТ14, ВТ22, ВТ23, ВТ19, одержаних за розробленою технологією ЕПП.

Структура напівфабрикатів або виробів формується в процесі термодформаційної обробки, в ході протікання процесів рекристалізації або фазових перетворень і спричиняє істотний вплив на технологічні та експлуатаційні властивості.

З метою вивчення досягнення необхідного рівня механічних властивостей отриманих методом прокатки пластин з титанового сплаву Т110 були проведені роботи з термічної обробки. Пластини відпалювали або піддавали термічній обробці в двофазній ($\alpha+\beta$)–області при температурах $t = 750\text{--}850^\circ\text{C}$. Особливості термічної обробки зразків і результати механічних випробувань матеріалу зразків, після різних видів термічної обробки наведено в таблиці 11.

Таблиця 11 – Механічні властивості сплаву Т110 після термічної обробки

Вид термічної обробки	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²
Відпал 750°C , $\tau = 1$ год, охолодження з піччю	1100	1060	21	50	35–39
Гартування 800°C , $\tau = 1$ год., в воду, старіння 600°C , $\tau=3$ год., охолодження на повітрі	1220	1115	19	60	28–29
Вакуумний відпал 850°C , $\tau=1$ год	1050	992	20	53	56–58

Аналіз одержаних механічних характеристик високоміцного сплаву Т110, одержаного за розробленою технологією ЕПП показав, що при фактично таких же показниках міцності пластичність сплаву Т110 вище ніж сплаву ВТ22.

Титановий сплав Т120 було створено як високоміцний матеріал, який здатний забезпечити високий комплекс механічних і експлуатаційних властивостей і при цьому добре зварюється. Тому подальші роботи було спрямовано на розробку технології виготовлення термодформованих напівфабрикатів у вигляді пластин.

Вихідні заготовки виготовлені із одержаних методом ЕПП зливків $\varnothing 150$ мм, піддавали пластичній деформації за наступними технологічними режимами:

- нагрівання в печі до температури 1050°C без застосування захисної атмосфери і захисних покриттів з витримкою впродовж 1 години;

- прокат заготовки поперек осі зливка з розміру 145мм до ~ 200 мм. Деформація заготовки за один прохід - 5мм. Температура закінчення прокату не менше 850°C . При досягненні розміру ~ 200 мм заготовка поверталася на 90 градусів і проводилася її докатка з проміжними підігрівками до досягнення ступеня деформації заготовки близько 60%;

- нагрівання заготовок в печі до температури 960°C з витримкою 0,5 год;

- чистова докатка заготовок до товщини 8, 10, 13, 15мм. Деформація заготовки за один прохід – 2–3 мм;

- рихтовка на гідравлічному пресі, з метою усунення прогинів. Охолодження заготовок здійснювалося на відкритому повітрі до температури навколишнього середовища.

Мікроструктура катаних пластин з титанового сплаву Т120 приведена на рисунку 18.



Рисунок 18 – Мікроструктура катаних пластин з титанового сплаву T120

Після прокатки при температурах β -області сплав T120 складається з рівновісних поліедричних первинних β зерен розміром 150...200 мкм. Внутризеренна структура представлена α - і β -фазами, причому α -фаза має пластинчасту морфологію з товщиною пластин близько 0,5 мкм.

Для стабілізації структури і для зняття наклепу після прокатки сплав T120 піддавався відпалу при різних температурах (таблиця 12).

Таблиця 12 – Механічні властивості складнолегованого титанового сплаву T120

Стан зразка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCV Дж/см ²
відпал 800°C – 1 год.	1317,8	1262,3	2,7	12,9	6,7
відпал 850°C – 1 год.	1214,9	1089,2	10,0	18,5	9,0
відпал 900°C – 1 год.	1186,0	1123,6	13,3	19,0	13,5
регламентований відпал 920°C – 1 год., охолодження з піччю до 840°C – 1 год., охолодження до 500°C, повітря	1270,8	1189,8	7,3	12,3	11,9

Відмінністю структури пластин зі сплаву T120 після відпалу при температурі 900°C від структури сплаву після відпалу при більш низькій температурі є істотне збільшення розміру внутризеренної структури (рисунок 19). Так, в результаті коагуляції товщина пластин α -фази досягла величини 1–1,5 мкм. Такі структурні зміни позитивно вплинули на пластичні властивості сплаву (таблиця 12).

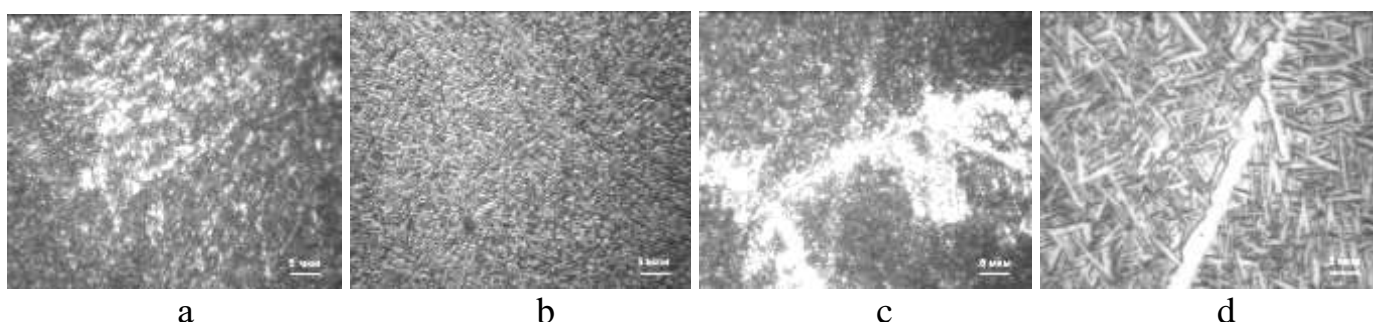


Рисунок 19 – Мікроструктура пластин сплаву T120 після вакуумного відпалу впродовж 1 години при температурі: a – 700°C; b – 750°C; c – 800°C; d – 900°C

Механічні властивості нового високоміцного складнолегованого ($\alpha+\beta$)-титанового сплаву T120, отриманого за розробленими технологіями ЕПП та термомеханічної обробки становлять: межа міцності щонайменше 1200 МПа, відносне подовження не менше 10%.

Міцність високоміцних титанових сплавів визначається не тільки ступенем легування, а й параметрами обробки тиском, подальшої термічної або термомеханічної обробки. Однак з підвищенням міцності сплаву, як правило, знижується його пластичність, що є істотним недоліком матеріалу при виготовленні з нього конструкцій, що працюють на вібрацію, повторну статику, вигин, ударні навантаження. Тому останнім часом все більша увага приділяється оптимізації параметрів деформування зливок при виготовленні з них напівфабрикатів і режимам термічної обробки.

Були проведені комплексні дослідницькі роботи з виготовлення напівфабрикатів із зливок промислових високоміцних сплавів титану, отриманих методом ЕПП.

Зі зливок $\varnothing 400$ мм високоміцного титанового сплаву ВТ22, одержаних методом ЕПП, було виготовлено напівфабрикати у вигляді прутків $\varnothing 60$ мм.

Спочатку із зливка $\varnothing 400$ мм титанового сплаву ВТ22 на кувальному пресі були отримані ковані заготовки $\varnothing 180$ мм. Нагрівання вихідних заготовок здійснювалося в печі, оснащених газовими пальниками до температури заготовки 1020°C . Перед початком кування здійснювався нагрів кувального бойка до температури $250\text{--}300^{\circ}\text{C}$. Кування на початковій стадії обробки зливок проводилося до ступеня деформації заготовки $20\text{--}30\%$. Температура кінця кування була не нижче 800°C . В кінці першого етапу кування отримана заготовка перерубувалася на дві рівні частини, після чого клалася в піч з наступним нагріванням до температури 980°C . Після нагріву заготовка протягувалася на діаметр ≈ 180 мм з подальшою правкою.

Далі заготовки $\varnothing 180$ мм були піддані пресуванню в пруток $\varnothing 60$ мм. Нагрівання перед пресуванням здійснювалося в електропечі до температури $1050\text{--}1100^{\circ}\text{C}$ в $(\alpha+\beta)$ області. Від отриманих прутків були відібрані проби для визначення макроструктури. У макроструктурі металу отриманих прутків тріщин, розшарувань, пустот, металевих і неметалевих включень не виявлено (рисунок 20). Величина макрозерна відповідає 3 балу відповідно до 10-бальної шкали макроструктур по ГОСТ 26492–85.

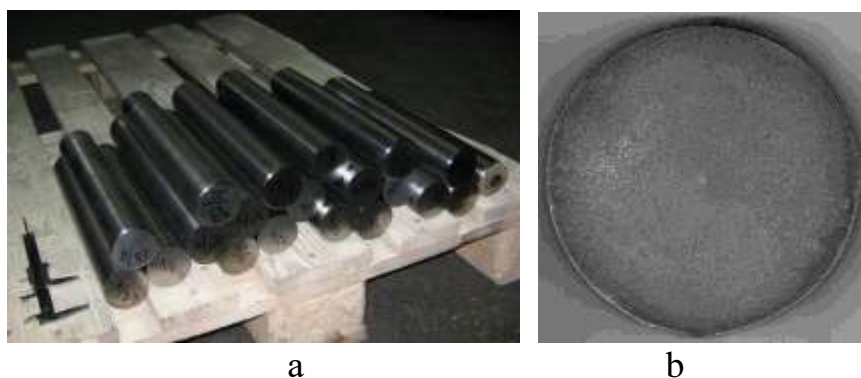


Рисунок 20 – Пресовані прутки $\varnothing 60$ мм (а) та макроструктура пресованого прутка $\varnothing 60$ мм (б) з титанового сплаву ВТ22

Отримані прутки були піддані термічній обробці за такими режимами: нагрів до температури 850°C з подальшою витримкою 1,5 години; охолодження з піччю до 790°C , витримка 2 години з подальшим охолодженням на повітрі; старіння при

600°C, витримка 4 години з подальшим охолодженням на повітрі.

Дані проведених досліджень дозволяють зробити висновок, що механічні властивості напівфабрикатів зі сплаву VT22, одержаного методом ЕПП повністю відповідають вимогам стандартів (таблиця 13).

Таблиця 13 – Механічні властивості напівфабрикатів з високоміцного титанового сплаву VT22, одержаного методом ЕПП

Вид заготовки	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	НВ
Пресований пруток	1250	1200	10	35	40	320
ОСТ 1 90266–86	>1200	-	>6	>14	>18	300–340

Вивчення процесів деформаційної обробки сплаву VT19 з метою отримання листових напівфабрикатів, які використовують в подальшому для зварювання конструкцій, є досить важливим завданням.

При виробництві деформованих напівфабрикатів з псевдо- β сплавів хороші результати отримують при прокатці заготовок нагрітих до температур β -області, при цьому заключні операції обробки необхідно проводити при температурі, трохи нижче точки $T_{пт}$. Це дозволяє при наступній операції гартування з $(\alpha+\beta)$ -області отримати матеріал з підвищеними характеристиками міцності, пластичності і в'язкості.

В результаті проведеної термомеханічної обробки зливоків $\varnothing 110$ мм ЕПП сплаву VT19 отримані листи розмірами 300x350 мм, товщиною 6 мм.

Дослідження деформованого металу сплаву VT19, отриманого зі зливка ЕПП показало, що після прокатки при температурах, що відповідають області існування β -фази структура складається з рівновісних поліедричних первинних β -зерен розмірами від 80 мкм до 125 мкм (рисунок 21а).

Механічні властивості сплаву VT19 наведені в таблиці 14.

Таблиця 14 – Механічні властивості деформованого сплаву VT19 ЕПП

Вид термообробки	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Відпал 750°C – 1 год.	978	887	12	42

Слід зауважити, що сплав VT19 зміцнюється шляхом проведення операції загартовування в воду і старінням. Після проведення вищевказаних операцій міцність матеріалу може підвищуватися до 1550 МПа.

Листи з титанового сплаву VT23 виготовлялися із застосуванням поздовжньо-поперечного прокатки, а для отримання необхідної якості поверхні листів застосовувалися стандартні оздоблювальні операції.

Внутризеренна структура отриманих листів сплаву VT23 (рисунок 21b) складається з пластин α -фази між якими знаходиться β -фаза. Товщина α -пластин становить 0,7–1,0 мкм. По межах β -зерен спостерігається α -облямівка товщиною до 1,5 мкм. Така мікроструктура характерна для титанових $(\alpha+\beta)$ -сплавів мартенситного типу, до якого відноситься і сплав VT23. Напрямок частинок α -фази ненаправлений.

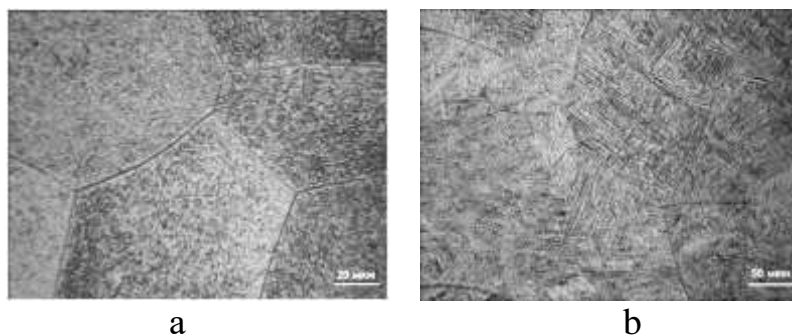


Рисунок 21 – Мікроструктура пластини деформованого сплаву: а – VT19; б – VT23

Аналіз результатів механічних властивостей сплаву VT23 показав, що метал напівфабрикатів у вигляді листів відповідає вимогам стандартів (таблиця 15).

Таблиця 15 – Механічні властивості металу листів сплаву VT23

Зразок №	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCV, Дж/см ²
1	1126	1072	11,2	19,5	43,7
2	1106	1054	12,7	24,9	47,9
3	1114	1065	10,7	19,7	43,3
ОСТ 1-90013 - 81	1100–1200	-	10–13	-	-

Зі зливків $\varnothing 600$ мм титанового сплаву VT14, виплавленого методом ЕПП, були отримані ковані прутки $\varnothing 200$ мм (рисунок 22а).

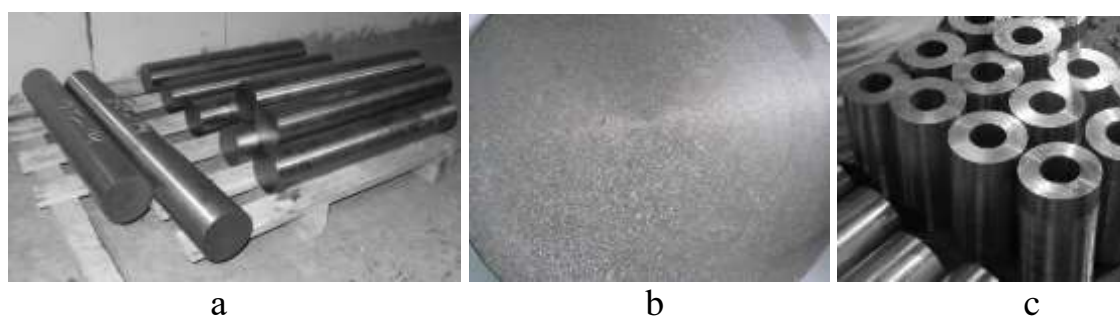


Рисунок 22 – Сплав VT14: а – ковані прутки $\varnothing 200$ мм; б – мікроструктура кованих прутків; с – трубні заготовки $\varnothing 190/90$ мм

Макроструктура кованої заготовки, виявлена на макротемплеті, не має тріщин, розшарувань, волосовин, пустот, металевих і неметалевих включень, видимих неозброєним оком і відповідає 6 балу шкали макроструктур (рисунок 22б).

Трубні заготовки отримували механічною обробкою кованих прутків. Методом свердління було отримано отвір $\varnothing 90$ мм в центральній частині трубних заготовок (рисунок 22с).

Трубні заготовки $\varnothing 190/90$ мм із титанового сплаву VT14 піддавалися відпалу при температурі 750°C протягом 1 години з наступним охолодженням на повітрі.

Механічні властивості трубних заготовок визначалися на зразках, вирізаних в поздовжньому напрямку (таблиця 16). Як видно з таблиці, межа міцності трубних заготовок в поздовжньому напрямку дещо знижується, проте підвищуються пластичні показники.

Таблиця 16 – Механічні властивості трубних заготовок $\varnothing 190/90$ зі сплаву ВТ14

Номер поковки	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/м ²
1	923	14,0	40,0	6,9
2	911	17,0	42,0	7,0
3	903	13,0	39,0	6,3
ТУ 1-5-127-73	900–1100	>10,0	>35,0	>5,0

Таким чином, проведені роботи показують, що розроблена технологія ЕПП є ефективним методом отримання якісних зливок промислових високоміцних сплавів титану, а якість напівфабрикатів у вигляді листів, прутків, трубних заготовок, виготовлених з цих зливок, відповідає вимогам стандартів. При цьому метал одержаних напівфабрикатів характеризується підвищеною пластичністю при високих показниках міцності.

За розробленою технологією на ДП «НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» було організовано промислове виробництво зливок високоміцних титанових сплавів. Продукція підприємства у вигляді зливок високоміцних сплавів титану діаметром від 110 мм до 600 мм та довжиною до 4 метрів постачаються як вітчизняним заводам, так і за кордон.

За умов науково-технологічної підтримки ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України у кооперації з підприємствами-партнерами (ДП «ВО ПМЗ ім. О.М. Макарова», ТОВ «ДНЕПРОПРЕСС СТАЛЬ» та ін.), зі зливок високоміцних сплавів титану, отриманих методом ЕПП, організовано виробництво кованих та катаних прутків, якість яких повністю відповідає вимогам стандартів. Це дозволило вирішити питання щодо імпортозаміщення прутків високоміцних титанових сплавів для потреб підприємств України.

Завдяки організації виробництва трубних заготовок зі зливок високоміцних сплавів титану, отриманих за розробленою технологією ЕПП, на виробничих потужностях колишнього «Нікопольського південно-трубного заводу» організовано виробництво пресованих труб, якість яких відповідає світовим стандартам.

Виконані дослідження дозволили створити технологію електронно-променевого плавлення зливок високоміцних титанових сплавів та обладнання для її реалізації і організувати в Україні конкурентоспроможне на світових ринках виробництво високоякісних зливок та напівфабрикатів з титану та сплавів на його основі, що вирішило питання імпортозаміщення виробів з високоміцних титанових сплавів.

ВИСНОВКИ

1. Розроблена тривимірна математична модель і методика чисельного розрахунку пов'язаних гідродинамічних і теплових процесів в металі, що кристалізується, при литті сплаву титану з проміжної ємності в циліндричний прохідний кристалізатор. Отримано тривимірні поля швидкості руху металу і його температури, визначено положення двофазної зони в зливку.
2. За допомогою проведених розрахунків в рамках побудованих математичних моделей встановлено, що врахування турбулентної теплопровідності майже не позначається на положенні ізотерм з температурою ліквідусу і солідусу, а

також на величині глибини ванни рідкого металу, що свідчить про відносно слабкий вплив турбулентних пульсацій розплаву на процес кристалізації зливка.

3. Одержано залежність глибини рідкої ванни від продуктивності процесу при ЕПП зливка титану. Встановлено, що при збільшенні швидкості витягування зливку $\varnothing 400$ мм на 30% глибина рідкої ванни зростає більш ніж на 50% (з 0,122 м до 0,185 м).
4. Шляхом вирішення нестационарної теплової задачі з фазовим переходом, початковою умовою якої є отриманий розподіл температури в зливку, розраховано положення усадкової раковини для ситуації миттєвого припинення зливу розплаву в кристалізатор і електронно-променевого обігріву торцевої поверхні зливка, що дозволило розробити технологічні режими виводу усадкової раковини при завершенні процесу ЕПП злиwkів високоміцних сплавів титану.
5. Проведені розрахунки в рамках математичної моделі процесу випаровування легуючих елементів з високою пружністю пара з високоміцних титанових сплавів при ЕПП, дозволили встановити, що основним фактором, що впливає на концентрацію алюмінію і хрому в зливку при незмінних технологічних параметрах плавки, є тільки їх початковий вміст у витратній заготовці.
6. Розроблено схеми шихтовки, що мінімізують втрати на випаровування легуючих елементів з високою пружністю пари та витікання легкоплавких елементів та дозволяють одержувати рівномірні за хімічним складом зливки сплавів титану навіть за один ЕПП переплав.
7. З використанням отриманих методом математичних моделювань даних ведення процесу ЕПП відпрацьовано технологічні режими та одержано зливки $\varnothing 110$ мм, $\varnothing 400$ мм та $\varnothing 600$ мм промислових (BT19, BT22, BT23, BT14) та вітчизняних (T110, T120, економнолегованих) високоміцних сплавів титану. Базуючись на одержаних результатах розроблено технологію отримання злиwkів економнолегованих сплавів титану методом ЕПП.
8. Відпрацьовано режими гарячої деформаційної обробки промислових високоміцних сплавів титану, які дозволили одержати достатньо високі показники міцності при достатньо високих показниках пластичності.
9. Розроблено технологію термдеформаційної обробки нового високоміцного складнолегованого $(\alpha+\beta)$ -титанового сплаву T120, яка забезпечує межу міцності щонайменше 1200 МПа в поєднанні з відносним подовженням не менше 10%.
10. Розроблена технологія впроваджена в промислове виробництво злиwkів діаметром від 110 мм до 600 мм та довжиною до 4 метрів високоміцних титанових сплавів, які постачаються як вітчизняним заводам, так і за кордон.
11. Вирішена важлива народногосподарська задача виробництва на вітчизняних підприємствах методом ЕПП конкурентоспроможних на світових ринках високоякісних злиwkів та напівфабрикатів з високоміцних конструкційних сплавів на основі титану, що, в свою чергу, вирішило питання імпортозаміщення виробів з цих матеріалів в Україні.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях, які індексуються у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science

1. Ivasishin O. M., Akhonin S. V., Savvakina D. G., **Berezos V. A.**, Bondarchuk V. I., Stasyuk O. O., Markovsky P. E. Effect of microstructure, deformation mode and rate on mechanical behaviour of electron-beam melted Ti-6Al-4V and Ti-1.5Al-6.8Mo-4.5Fe alloys. *Progress in Physics of Metals*. 2018. 19(3). P. 309–336. DOI: 10.15407/ufm.19.03.309. (*Scopus*).
2. Akhonin S.V., Belous V.Y., **Berezos V.A.**, Selin R.V. Effect of TIG-welding on the structure and mechanical properties of the pseudo- β titanium alloy VT19 welded joints. *Materials Science Forum*. 2018. 927 MSF. P. 112–118. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.927.112. (*Scopus*).
3. Akhonin S.V., **Berezos V.O.**, Severyn A.Yu., Tymoschenko Y.G., Davydchuk N.K. Structure and Properties of Titanium Modified Silicon-carbide at EBM. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 582(1). 012051. DOI: 10.1088/1757-899X/582/1/012051. (*Scopus*).
4. Markovsky P.E., Akhonin S.V., **Berezos V.A.**, Karasevska O.P., Gavrysh I.M. Microstructure and Tensile Properties of Cost-Efficient Thermally Hardenable $\alpha+\beta$ Alloys of Ti–Al–Mo–Fe and Ti–Al–Mo–Cr Systems. *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2020. 9(6). P. 856–872. DOI: 10.1007 / s13632-020-00705-7 (*Scopus*).

Статті у наукових фахових виданнях

5. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Жук Г.В., **Березос В.А.** Развитие электронно-лучевой плавки титана в ИЭС им. Е.О.Патона. *Современная электрометаллургия*. 2008. №3. С. 22–24.
6. **Березос В.А.** Проверка адекватности математической модели процесса кристаллизации титанового слитка ЭЛПЕ. *Современная электрометаллургия*. 2010. №3. С. 14–17.
7. Тригуб Н.П., **Березос В.А.**, Крыжановский В.А., Северин А.Ю. Исследование процесса изготовления горячекатаных труб из слитков титанового сплава ВТ20, полученных электронно-лучевой плавкой. *Современная электрометаллургия*. 2010. №4. С. 3–6.
8. Ахонин С.В., **Березос В.А.**, Крыжановский В.А., Корнийчук В.Д., Пикулин А.Н., Северин А.Ю. Производство дисков для энергетического машиностроения из титанового сплава ВТ6 полученного методом электронно-лучевой плавки. *Современная электрометаллургия*. 2012. №4. С. 15–20.
9. Ахонин С.В., Пикулин А.Н., **Березос В.А.** Электронно-лучевое оплавление поверхности слитков сложнолегированного титанового сплава. *Титан*. 2013. №1(39). С. 25–30.
10. **Березос В.А.** Экспериментальная проверка адекватности математической модели процесса кристаллизации титанового слитка при электронно-лучевой плавке. *Теория и практика металлургии*. 2013. №3-4. С.88–92.
11. Ахонин С.В., Северин А.Ю., **Березос В.А.**, Ерохин А.Г. Математическое моделирование процессов испарения при выплавке слитков многокомпонентных титановых сплавов в электронно-лучевой установке с

- промежуточной емкостью. *Современная электрометаллургия*. 2013. №4. С. 34–39.
12. Ахонин С.В., **Березос В.А.**, Пикулин А.Н., Северин А.Ю., Ерохин А.Г. Электронно-лучевое оплавление поверхности слитков сплавов титана. *Современная электрометаллургия*. 2014. №2. С. 21–25.
 13. Ахонин С.В., **Березос В.А.**, Крыжановский В.А., Пикулин А.Н., Ерохин А.Г. Получение трубных заготовок из титанового сплава ВТ14 методом ЭЛП. *Современная электрометаллургия*. 2014. №3. С. 21–25.
 14. Пикулин А.Н., Ахонин С.В., **Березос В.А.**, Селин Р.В. Получение слитков сложнолегированного титанового сплава ВТ23 способом ЭЛП. *Современная электрометаллургия*. 2015. №2. С. 17–20.
 15. Григоренко Г.М., Ахонин С.В., Лобода П.И., Григоренко С.Г., Северин А.Ю., **Березос В.А.**, Богомол Ю.И. Структура и свойства титанового сплава, легированного бором, полученного способом электронно-лучевого переплава. *Современная электрометаллургия*. 2016. №1. С. 21–25.
 16. Ахонин С.В., Северин А.Ю., **Березос В.А.**, Пикулин А.Н., Ерохин А.Г. Особенности выплавки слитков титанового сплава ВТ19 в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью. *Современная электрометаллургия*. 2016. №2. С. 23–27.
 17. Ахонин С.В., Селин Р.В., **Березос В.А.**, Пикулин А.Н., Северин А.Ю., Ерохин А.Г. Разработка нового высокопрочного титанового сплава. *Современная электрометаллургия*. 2016. №4. С. 22–27.
 18. Ахонин С.В., **Березос В.А.**, Пикулин А.Н., Северин А.Ю., Ерохин А.Г. Электронно-лучевая плавка нового высокопрочного титанового сплава Т120. *Современная электрометаллургия*. 2017. №1. С. 15–21.
 19. Ахонин С.В., Белоус В.Ю., Северин А.Ю., **Березос В.А.**, Пикулин А.Н., Ерохин А.Г. Структура и свойства нового высокопрочного титанового сплава Т120, полученного способом ЭЛП после деформационной и термической обработки. *Современная электрометаллургия*. 2017. №2. С. 11–16.
 20. Ахонин С.В., Северин А.Ю., Белоус В.Ю., **Березос В.А.**, Пикулин А.Н., Ерохин А.Г. Структура и свойства титанового сплава ВТ19, полученного способом электронно-лучевой плавки, после термомеханической обработки. *Современная электрометаллургия*. 2017. №3. С. 19–24.
 21. Ахонин С.В., Марковский П.Е., **Березос В.А.**, Стасюк А.А., Пикулин А.Н., Северин А.Ю., Антонюк С.Л. Получение высокопрочного титанового сплава Ti-1,5Al-6,8Mo-4,5Fe способом ЭЛП. *Современная электрометаллургия*. 2018. №1. С. 9–16.
 22. Ахонин С.В., **Березос В.А.**, Пикулин А.Н., Северин А.Ю., Шваб С.Л., А.Г.Ерохин. Получение высокопрочного титанового сплава ВТ22 способом электронно-лучевой плавки. *Современная электрометаллургия*. 2018г. №3. С. 8–15.
 23. Патон Б.Е., Ахонин С.В., **Березос В.А.** Развитие технологий электронно-лучевой плавки металлов в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. *Современная электрометаллургия*. 2018. №4 С. 19–35.

24. Ахонин С.В., **Березос В.А.**, Белоус В.Ю. Новые перспективные сплавы на основе титана. *Современная электрометаллургия*. 2019. №3. С. 35–44.
25. Ахонин С.В., Гориславец Ю.М., Глухенький А.И., **Березос В.А.**, Бондар А.И., Пикулин А.Н. Моделирование гидродинамических и тепловых процессов в кристаллизаторе при электронно-лучевой плавке с промежуточной емкостью. *Сучасна електрометалургія*. 2019. №4. С. 9–17.
26. Ахонін С.В., Білоус В.Ю., **Березос В.О.**, Петриченко І.К., Селін Р.В., Северин А.Ю., Пікулін О.М. Структура та властивості конструкційних економнолегованих сплавів на основі титану, одержаних способом ЕПП. *Сучасна електрометалургія*. 2020. №4. С. 7–15.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

27. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., **Березос В.А.**, Северин А.Ю., Крыжановский В.А. Производство в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины высококачественных крупногабаритных слитков жаропрочных сплавов на основе титана из первичной шихты методом электронно-лучевой плавки. *Международная конференция «Ti–2010 в СНГ»*, Россия, г. Екатеринбург, 16–19 мая. 2010 г. Киев: Сборник трудов, 2010.
28. Тригуб Н.П., **Березос В.А.**, Крыжановский В.А., Корнийчук В.Д. Производство крупногабаритных дисков для газотурбинных установок из жаропрочных сплавов титана, полученных методом электронно-лучевой плавки. *Международная конференция «Ti–2012 в СНГ»*, Россия, г. Казань, 22–25 апреля. 2012 г. Киев: Сборник трудов, 2012.
29. Тригуб Н.П., Ахонин С.В., **Березос В.А.** Развитие технологий электронно-лучевой плавки слитков титана и его сплавов в ИЭС им. Е.О. Патона. *III Науково-технічна конференція «Титан–2012 виробництво і застосування»*, Україна, м. Запоріжжя, 4–5 жовтня. 2012 р. Запоріжжя: Збірка тезисів, 2012.
30. Ахонин С.В., Пикулин А.Н., **Березос В.А.** Оплавление поверхности слитков-слябов титанового сплава ВТ6 электронным лучом. *VII науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології»*, Україна, м. Київ, 22–24 травня. 2013 р. Київ: Збірка тезисів, 2013.
31. Ахонин С.В., **Березос В.А.**, Корнийчук В.Д., Пикулин А.Н. Электронно-лучевое оплавление поверхности слитков титана – ресурсосберегающая технология современной спецэлектрометаллургии. *Международная конференция «Ti–2013 в СНГ»*, Украина, г. Донецк, 26–29 мая. 2013 г. Киев: Сборник трудов, 2013.
32. Ахонин С.В., **Березос В.А.**, Корнийчук В.Д., Пикулин А.Н., Северин А.Ю. Электронно-лучевые технологии получения слитков сплавов на основе титана. *Международная конференция «Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее»*, Украина, г. Киев, 25–26 ноября. 2013 г. Киев: Тез.докл. 2013. 222 с.
33. Ахонин С.В., **Березос В.А.**, Ерохин А.Г., Корнийчук В.Д., Крыжановский В.А. Получение труб из слитков титановых сплавов, выплавленных методом ЭПП. *Международная конференция «Титан–2014 в СНГ»*, Россия, г. Нижний Новгород, 25–28 мая. 2014 г. С. 25–30. Сб. трудов.
34. Paton B.E., Akhonin S.V., **Berezos V.A.** Production of Titanium Alloys Ingots by EBCHM Technology. *Proc. of the 13th World Conference on Titanium*, August 16–20, 2015, San Diego, California, USA. TMS, 2016. P. 359–364.

35. Ахонин С.В., **Березос В.А.**, Пикулин А.Н., Северин А.Ю., Ерохин А.Г. Получение высокопрочных сплавов титана методом электронно-лучевой плавки. *Сб. трудов восьмой международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов»*, Украина, г. Одесса, 11–15 сентября. 2017 г. Киев: Международная Ассоциация «Сварка», С. 11–18.
36. Кривцун И.В., Ахонин С.В., **Березос В.А.**, Северин А.Ю. Модель испарения многокомпонентных сплавов при электронно-лучевой плавке. *Сб. трудов восьмой международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов»*, Украина, г. Одесса, 11–15 сентября. 2017 г. Киев: Международная Ассоциация «Сварка», С. 53–58.
37. Ахонин С.В., Пикулин А.Н., **Березос В.А.**, Северин А.Ю., Ерохин А.Г. Электронно-лучевое оплавление слитков высокопрочных $\alpha+\beta$ и псевдо- β -сплавов титана. *Сб. трудов восьмой международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов»*, Украина, г. Одесса, 11–15 сентября. 2017 г. Киев: Международная Ассоциация «Сварка», С. 19–23.
38. Ахонин С.В., **Березос В.А.**, Белоус В.Ю. Разработка новых титановых сплавов и технологии их получения методом электронно-лучевой плавки. *Сб. трудов международной конференции «Титан—2018. Производство и применение в Украине»*, Украина, г. Киев, 11–13 июня. 2018 г. Киев: Международная Ассоциация «Сварка», С. 13–23.
- Публікації, які додатково відображають результати дисертації***
39. Патент України №75790 С22В9/22, Опубл. Бюл. №5 від 15.05.2006р. Спосіб одержання зливок титанових сплавів з якісною поверхнею. / **Березос В.О.**, Жук Г.В., Тригуб М.П., Северин А.Ю., Варич І.Ю.
40. Патент України №76873 С22В9/22, Опубл. Бюл. №9 від 15.09.2006р. Спосіб попередження включень низької щільності в зливках титанових сплавів. / Северин А.Ю., **Березос В.О.**, Жук Г.В., Тригуб М.П.
41. Патент України №78393 С22В9/22, Опубл. Бюл. №3 від 15.03.2007р. Спосіб одержання порожнистих зливок в установках електронно-променевого переплаву. / Тригуб М.П., Жук Г.В., Ахонін С.В., **Березос В.О.**
42. Патент України №91251 С22В34/12, Опубл. Бюл. №13 від 12.07.2010р. Спосіб одержання легованих алюмінієм титанових зливок. / Тригуб М.П., Жук Г.В., **Березос В.О.**, Фесан А.А., Самофалов О.В.
43. Патент України №100065 С21С5/56, С22В 9/22, С22В 34/12, Опубл. Бюл. №21 від 12.11.2012р. Спосіб одержання зливок титанових сплавів з якісною поверхнею. / Тригуб М.П., **Березос В.О.**, Северин А.Ю., Крижановський В.А.
44. Патент України №100279 С21С5/56, С22В34/12, С22В9/22, Опубл. Бюл. №21 від 12.11.2012р. Спосіб отримання зливка титанового сплаву пошаровою кристалізацією в електронно-променевій установці з проміжною ємністю. / Тригуб М.П., **Березос В.О.**, Северин А.Ю., Крижановський В.А.
45. Патент України №100279 С22В9/22, С22В1/02, С22В4/06, Опубл. Бюл. №23 від 10.12.2012р. Спосіб одержання сплавів на основі титану з рівномірним вмістом кисню. / Тригуб М.П., Корнійчук В.Д., **Березос В.О.**, Северин А.Ю.
46. Патент №106916, Україна, заявл. 21.12.2012; Опубл. Бюл. №12 від 25.06.2016р. Високоміцний титановий сплав. / Ахонін С.В., **Березос В.О.**, Білоус В.Ю.,

Пікулін О.М., Петриченко І.К., Селін Р.В., Єрохін О.Г.

47. Патент №118388, Україна, заявл. 23.02.2017; Опубл. Бюл. №16 від 27.08.2018р. Спосіб одержання зливків сплавів на основі титану. / Ахонін С.В., Пікулін О.М. **Березос В.О.**, Северин А.Ю., Єрохін О.Г.

АНОТАЦІЯ

Березос В.О. Теорія і практика виробництва зливків високоміцних конструкційних сплавів на основі титану методом електронно-променевої плавки. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів – Інститут електросварювання ім. Є.О.Патона НАН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-технічної задачі, що полягає у розвитку теорії і практики одержання якісних зливків високоміцних конструкційних сплавів на основі титану методом електронно-променевої плавки з проміжною ємністю.

Методами математичного моделювання досліджено тепловий стан зливків сплавів титану при ЕПП з урахуванням гідродинамічних течій та досліджено процеси випаровування хімічних елементів під час ЕПП високоміцних конструкційних сплавів титану. На основі проведених розрахунків в рамках математичних моделей, визначено технологічні режими та розроблено технологію ЕПП зливків високоміцних сплавів титану, що забезпечує високу якість одержуваного металу. Проведено роботи з одержання напівфабрикатів та показано високу якість титанових сплавів, одержаних за розробленою технологією ЕПП.

Практичне значення отриманих результатів дисертаційного дослідження полягає у тому, що розроблено нову перспективну технологію, застосування якої для виробництва вітчизняних напівфабрикатів високоміцних сплавів на основі титану дозволить відмовитись від імпорту вартісних іноземних напівфабрикатів, та забезпечить розширення їх застосування підприємствами України.

Ключові слова: електронно-променева плавка, проміжна ємність, зливки, високоміцний титановий сплав, економнолегований титановий сплав, математична модель, кристалізація, випаровування, легуючі компоненти, хімічний склад, структура, деформаційна обробка, термічна обробка, механічні властивості.

АННОТАЦИЯ

Березос В.А. Теория и практика производства слитков высокопрочных конструкционных сплавов на основе титана методом электронно-лучевой плавки. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 - Металлургия черных и цветных металлов и специальных сплавов - Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, Киев, 2021.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической задачи, которая заключается в развитии теории и практики получения качественных слитков высокопрочных конструкционных сплавов на основе титана методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью.

Методами математического моделирования исследовано тепловое состояние слитков сплавов титана при ЭЛП с учетом гидродинамических течений, исследованы процессы испарения химических элементов во время ЭЛП высокопрочных конструкционных сплавов титана. На основе проведенных расчетов в рамках математических моделей, определены технологические режимы и разработана технология ЭЛП слитков высокопрочных сплавов титана, которая обеспечивает высокое качество получаемого металла. Проведены работы по получению полуфабрикатов и показано высокое качество титановых сплавов, полученных по разработанной технологии ЭЛП.

Практическое значение полученных результатов диссертационного исследования заключается в том, что разработана новая перспективная технология, применение которой для производства отечественных полуфабрикатов высокопрочных сплавов на основе титана позволит отказаться от импорта дорогих иностранных полуфабрикатов, и обеспечит расширение их применения предприятиями Украины. Кроме того, внедрение разработанной технологии ЭЛП и получения с ее помощью новых сплавов, легированных преимущественно дешевыми легирующими элементами, открывает возможность создания производства слитков новых перспективных экономнолегированных высокопрочных сплавов на основе титана в Украине.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка, промежуточная емкость, слиток, высокопрочный титановый сплав, экономнолегированный титановый сплав, математическая модель, кристаллизация, испарение, легирующие компоненты, химический состав, структура, деформационная обработка, термическая обработка, механические свойства.

ANNOTATION

Berezos V.O. Theory and practice of production of titanium high-strength structural alloys ingots by the method of electron beam melting. – Manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences on specialty 05.16.02 - Metallurgy of ferrous and nonferrous metals and special alloys – E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The doctoral dissertation is devoted to the solution of an important scientific and technical problem which consists in the development of the theory and practice of obtaining high-quality ingots of high-strength structural alloys based on titanium by the method of electron beam melting (EBM) with intermediate capacity.

By the methods of mathematical modeling, the study of the thermal state of the ingot in the mold and the hydrodynamic processes that occur during the production of ingots of high-strength titanium alloys by EBM with intermediate capacity is conducted. For a quasi-established mode of continuous electron-beam melting, a three-dimensional mathematical model is developed, as well as the method of numerical calculation of related hydrodynamic and thermal processes in the crystallized metal during casting of titanium alloy from the intermediate capacity into a cylindrical bushing. Calculations are made within the framework of the constructed mathematical models and the influence of technological modes of EBM on the process of crystallization of titanium alloy ingots is determined. By solving a nonstationary thermal problem with a phase transition, the initial

condition of which is the obtained temperature distribution in the ingot, the position of the shrinkage shell for the situation of instantaneous cessation of melt discharge into the mold and electron beam heating of the ingot end surface is calculated.

The study of the peculiarities of evaporation of alloying components from ingots of high-strength complex-alloyed titanium alloys under vacuum and the action of electron beam heating is conducted. The technology of obtaining ingots of high-strength complex-alloyed titanium alloys by the method of EBM with intermediate capacity was developed. The developed technology was tested on the example of obtaining new domestic high-strength complex alloyed titanium alloys T110 and T120, as well as industrial widely used ($\alpha + \beta$) and pseudo- β titanium alloys (VT14, VT22, VT23, VT19). Recommendations for obtaining ingots of high-strength titanium alloys by the method of EBM with intermediate capacity are issued.

Based on the calculations within the framework of the constructed mathematical models, the technology of obtaining ingots of economically alloyed titanium alloys by the EBM method is developed. A study of the quality of ingots, structure and mechanical properties of economically alloyed titanium alloys obtained by EBM, and it is showed that the method of EBM with intermediate capacity allows to obtain high-quality ingots in both chemical composition and structure.

The technology of deformation and heat treatment of domestic high-strength alloy on the basis of titanium T120 obtained by the technology of EBM with intermediate capacity is developed. The quality of semi-finished products from the domestic titanium alloy T110 and industrial high-strength complex alloyed titanium alloys VT14, VT22, VT23, VT19 obtained by the developed EBM technology has been investigated. Works on research of mechanical properties and structure of the received semi-finished products in the form of plates, rods and pipes from high-strength difficult-alloyed titanium alloys are carried out.

The practical significance of the results of the doctoral dissertation is that a new advanced technology has been developed, the application of which for the production of domestic semi-finished alloys based on titanium will allow to waive the import of valuable foreign semi-finished products and expand their use by Ukrainian enterprises. In addition, the introduction of the developed EBM technology and obtaining with its help new alloys, doped mainly with cheap alloying elements, opens the possibility of creating the production of ingots of new promising economically alloyed high-strength titanium-based alloys in Ukraine.

Keywords: electron beam melting, intermediate capacity, ingot, high-strength titanium alloy, economically alloyed titanium alloy, mathematical model, crystallization, evaporation, alloying components, chemical composition, structure, deformation treatment, heat treatment, mechanical properties.