

## ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВЕ ОПЛАВЛЕННЯ ЗЛИВКІВ ЖАРОМІЦНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ВТ9

О.М. Пікулін, С.В. Ахонін, В.О. Березос, А.Ю. Северин, О.Г. Єрохін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: akhonin.sv@gmail.com

За результатами проведеного комплексу дослідницьких робіт встановлено, що хімічний склад металу в оплавленому шарі жароміцного титанового сплаву ВТ9 відповідає вимогам стандарту, спостерігається зниження вмісту алюмінію, легуючого елемента з пружністю пари вище і підвищення вмісту молібдену, цирконію, легуючих елементів з пружністю пари нижче ніж у титану. Дослідження оплавленого шару показало, що глибина проплавлення поверхневого шару зливок жароміцного титанового сплаву ВТ9 діаметром 600 мм сягає до 8 мм, поверхня зливок має високу якість, дзеркального вигляду із характерним вакуумним травленням, рівного мікрорельєфу без тріщин, розривів та незлитин, шорсткість її знаходиться в межах 3...4 класів при хвилястості 0,2...0,6 мм. Оплавлений шар поверхні зливка має більш дрібнішу структуру порівняно з металом основи і складається з ділянок з одиничними  $\alpha$ -пластинами товщиною 1,0...2,5 мкм, де  $\alpha$ -пластини зібрані в колонії шириною 10...50 мкм, проміжки між якими займають дисперсні частинки розмірами 1...2 мкм, що можуть бути продуктами розпаду метастабільних фаз. Бібліогр. 13, табл. 1, рис. 10.

*Ключові слова:* жароміцний титановий сплав; зливки; дефект поверхні; електронно-променево оплавлення; хімічний склад; структура

**Вступ.** Останні десятиліття підвищена увага приділяється створенню сплавів на основі тугоплавких і хімічно активних металів. Аерокосмічна та авіаційна техніка потребує легких та міцних матеріалів, які зможуть доповнити жароміцні сплави, що традиційно використовуються в цих областях, на основі нікелю, кобальту та заліза. Використання жароміцних сплавів на основі титану — один із шляхів вирішення цього завдання. Світові тенденції розвитку технології отримання зливок жароміцних титанових сплавів та виробництва з них напівфабрикатів для виготовлення деталей є практично спільними для провідних авіаційних підприємств і саме технологія їх отримання є вирішальним фактором у забезпеченні стабільності та необхідного рівня експлуатаційних властивостей [1–4].

**Аналіз літературних даних та постановка задачі.** Зниження собівартості зливок жароміцних титанових сплавів як вихідної ланки для виробництва напівфабрикатів одночасно з підвищенням їх якості є актуальним завданням, оскільки визначальним фактором у прийнятті рішення про їх застосування замість традиційних конструкційних матеріалів є співвідношення ціна-якість [5, 6].

Одним з прогресивних напрямків металургійного виробництва жароміцних титанових сплавів є електронно-променево плавка, яка дозволяє не тільки очищати ці матеріали від газових та легких металевих домішок, але й суттєво спрощує процес металургійної переробки та забезпечує отримання виробів з якісно новими механічними властивостями. Електронно-променево плавка

також забезпечує можливість отримання зливок жароміцних титанових сплавів шляхом переплаву первинної шихти у вигляді губчастого титану та лігатури [5, 6]. Проте з ряду причин, зумовлених металургійними та технологічними особливостями, у процесі електронно-променевого переплаву на поверхні одержуваних зливок можуть виникати дефекти у вигляді гофр, тріщин, розривів та подовжньої смуги заливки металу (рис. 1) [7].

Уникнути утворення такого роду дефектів при ЕПП практично неможливо, а це, у свою чергу, ускладнює подальшу гарячу обробку зливок і заготовок, призводить до розвитку гарячих тріщин. Досягається необхідна якість поверхні зливок і заготовок шляхом видалення поверхневого шару при механічній обробці. Механічні властивості сплавів на основі титану такі, що продуктивність лезової обдирки на існуючих верстатах в 3...6 разів нижча, ніж при обдирці легованих конструкційних сталей, а мала теплопровідність сплавів на основі титану при-



Рис. 1. Зливки жароміцного титанового сплаву ВТ9 діаметром 600 мм, отриманого способом ЕПП

О.М. Пікулін — <https://orcid.org/0000-0001-6327-3848>, С.В. Ахонін — <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>,  
В.О. Березос — <https://orcid.org/0000-0002-5026-7366>, А.Ю. Северин — <https://orcid.org/0000-0003-4768-2363>,  
О.Г. Єрохін — <http://orcid.org/0000-0003-2105-5783>

зводить при лезовій обдирці до локального перегріву у місці контакту з різцем і, як наслідок, до окислення стружки. Високі вимоги до чистоти вихідних шихтових матеріалів накладають ряд обмежень на повторно використовувану стружку для зливоків, що призводить до безповоротних втрат металу [8, 9].

Таким чином, перспективними є роботи, в яких вивчається можливість безвідходного видалення поверхневих дефектів зливоків. Позитивні результати таких робіт дозволять скоротити втрати металу у вигляді некондиційних відходів (стружки) та цінних легуючих елементів. При цьому найбільш перспективним є шлях застосування нових технологічних процесів, які дозволяють виключити з виробничого ланцюжка деякі технологічні переділи, і за рахунок цього покращити якість поверхні зливоків, підвищити вихід придатного та значно знизити собівартість продукції.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України накопичено великий досвід щодо використання електронного променя для обробки поверхневого шару зливоків круглого і прямокутного перетину, проведено низку досліджень із застосуванням математичного моделювання процесів тепло- та масопереносу в оброблюваному електронним променем зливку [10]. На базі цих досліджень розроблено технологію електронно-променевого оплавлення та спеціалізоване обладнання для її реалізації [10].

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

Для досягнення поставленої мети вирішували наступні задачі:

дослідити хімічний склад і структуру металу основи та оплавленого шару зливоків;

визначити глибину проплавлення поверхневого шару зливоків.

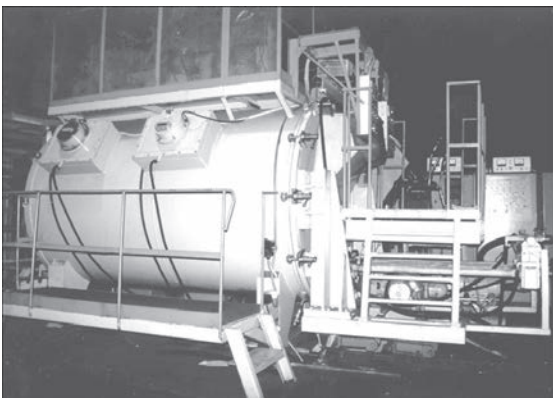


Рис. 2. Зовнішній вигляд спеціалізованої електронно-променевої установки для оплавлення зливоків

**Матеріали та методи досліджень.** Першим широко застосовуваним серійним жароміцним титановим сплавом був титановий ( $\alpha+\beta$ )-сплав ВТ3-1, розроблений у 1957 р. Сплав застосовувався для деталей ГТД, які тривалий час працюють при температурі до 450 °С. В 1958 р. були розроблені титанові сплави ВТ8 і ВТ9, призначені для тривалої роботи при 500 °С [11].

Сплав ВТ9 є двофазним ( $\alpha+\beta$ )-сплавом. Високий вміст алюмінію і легування кремнієм забезпечують більш високі жароміцні властивості в порівнянні зі сплавом ВТ6. Титановий сплав ВТ9 є сплавом, що деформується, і відноситься до матеріалів з високою жароміцністю та стійкістю до корозії. Сплав ВТ9 зміцнюється за допомогою термічної обробки — гартування і старіння. Оптимальне поєднання механічних властивостей забезпечує подвійний відпал. З нього можуть бути виготовлені деталі ГТД — диски, лопатки та інші деталі компресора [12, 13].

Метал жароміцного титанового сплаву ВТ9 отримували за розробленою в ІЕЗ ім. Е.О. Патона НАН України технологією електронно-променевої плавки з проміжною ємністю. Поверхню отриманих зливоків піддавали електронно-променевої обробці в спеціалізованій електронно-променевої установці УЕ-185 (рис. 2) для оплавлення поверхні зливоків за режимами, отриманими за результатами математичного моделювання процесів тепло- і масопереносу в зливках титанових сплавів при електронно-променевому оплавленні [10].

Оплавлення зливоків жароміцного титанового сплаву ВТ9 діаметром 600 мм здійснювали за схемою, при якій електронний промінь нерухомий, а зливков обертається навколо своєї осі (рис. 3). При цьому лінійна швидкість оплавлення становила 54 мм/хв, а питома потужність нагріву — 7,25 Вт/мм<sup>2</sup>.

Для дослідження впливу технологічних параметрів електронно-променевого оплавлення на хімічний склад і глибину проплавлення оброблюваного шару були відібрані проби у вигляді стружки та відрізних зразків до і після оплавлення (рис. 4).

Для точного аналізу вмісту легуючих елементів в зливках одержаних сплавів використовували метод оптичної емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою (ICP-OES) на ICP-спектрометрі ICAP 6500 DUO виробництва фірми «Thermo Electron Corporation». Для визначення вмісту кисню і азоту виготовляли зразки циліндричної форми діаметром і довжиною по 3 мм. Вміст визначали на приладах RO-316, TN-114 фірми «LECO» (США).

Макроструктуру зливоків вивчали на поперечних темплетгах, вирізаних з середини зливоків. Виявлення структури проводили травленням темплетів в 15%-ному розчині фтористої кислоти з

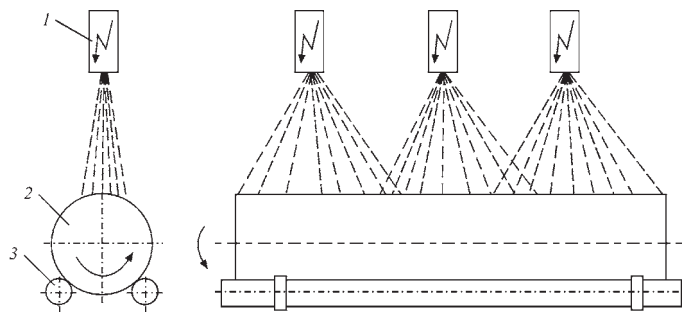


Рис. 3. Схема оплавлення зливка: 1 — електронно-променево гармата; 2 — зливко; 3 — валки

додаванням 3%-ного розчину азотної кислоти при кімнатній температурі.

Для виявлення мікроструктури зразків здійснювали травлення в спеціальному реактиві, який складався з суміші кислот в співвідношенні: 1 частина плавикової (HF) і 3 азотної (HNO<sub>3</sub>).

Огляд структури зразків здійснювали на світловому мікроскопі «Neophot-32» при різних збільшеннях. Фотографії мікроструктур отримані за допомогою цифрової фотокамери С-3000 фірми «OLYMPUS».

**Результати досліджень та їх обговорення.** З метою перевірки ефективності застосування електронно-променевого оплавлення поверхневого шару зливків жароміцного титанового сплаву на виробничих потужностях ДП «НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» були проведені комплексні дослідницькі роботи з виплавки партії зливків діаметром 600 мм і довжиною до 2 м та оплавлення їх бокової поверхні електронним променем (рис. 1, 5).

Бокова поверхня зливків, оплавлених електронним променем, мала рівний мікрорельєф, дзеркальний вигляд із характерним вакуумним травленням, без тріщин, розривів та незлитин, шорсткість поверхні була в межах 3...4 класів при хвилястості поверхні, що дорівнює 0,2...0,6 мм (рис. 5).

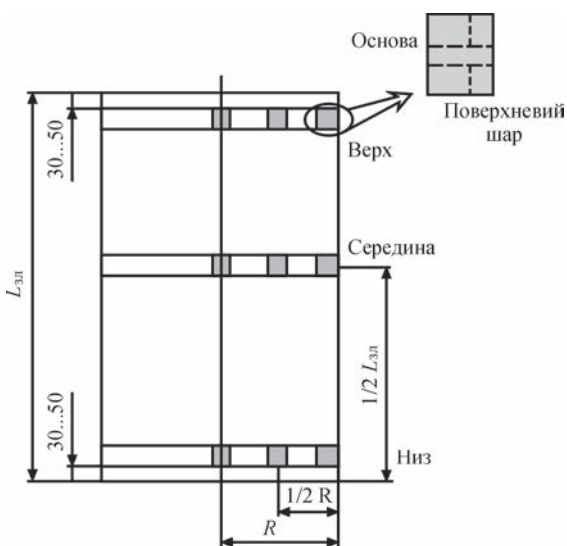


Рис. 4. Схема відбору проб для хімічного та металографічного аналізу

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

Експериментальну оцінку глибини проплавлення поверхневого шару зливків за вказаними вище режимами проводили на поперечних темплетах і вона становила до 8 мм (рис. 6). При цьому бокова поверхня зливків мала рівний мікрорельєф, дзеркальний вигляд із характерним вакуумним травленням, без тріщин, розривів та незлитин (рис. 5).

Металографічний аналіз металу оплавленого зливка титанового сплаву ВТ9 проводився з метою виявлення структурних змін, що пройшли в металі в результаті термічного впливу електронного променя на бокову поверхню та основу зливка. Досліджувані макрошліфи зливка сплаву ВТ9 діаметром 600 мм з оплавленим електронними променями шаром на поверхні не мали раковин та несудільностей. Макроструктура характеризувалася кристалами близькими до рівновісних, оплавлений шар утворений більш дрібнішими кристалами порівняно з основою зливка, витягнутими у бік кристалізації, тобто до центру зливка.

Поблизу поверхні зливка утворилися зерна розміром 0,8...1,2 мм, які спостерігалися до глибини



Рис. 5. Зливко жароміцного титанового сплаву ВТ9 діаметром 600 мм з оплавленою боковою поверхнею



Масова концентрація легуючих елементів у металі оплавленого шару зливоків жароміцного титанового сплаву ВТ9, мас. %

Місце відбору проб	Al	Mo	Fe	Zr	Si	O	N
Основа	6,64	3,63	0,21	1,64	0,32	0,11	0,012
Оплавлений шар	6,13	3,68	0,20	1,69	—»—	0,13	0,016
ОСТ1 90013–81	5,8...7,0	2,8...3,8	≤0,25	1,0...2,0	0,20...0,35	<0,15	<0,05



Рис. 6. Макроструктура металу зливка жароміцного титанового сплаву ВТ9 діаметром 600 мм з оплавленою боковою поверхнею

близько 8 мм від поверхні, далі в зливку були присутні зерна значно більшого розміру (рис. 7).

Мікроструктуру металу оплавленого шару при більшому збільшенні показано на рис. 8. Зона термічного впливу від дії електронного променя при

оплавленні поверхні ймовірно вузька і може становити частину зерна, що структурно не відрізняється від решти металу зливка. Величина зерна, що визначається за 10-бальною шкалою макроструктур Інструкції № 1054–76 ВІАМ, відповідає балу № 6–7 в оплавленому шарі та балу № 8–9 у зоні основного металу.

Дослідження мікроструктури зразків показало, що оплавлений шар складається з ділянок з одиничними  $\alpha$ -пластинами, проміжки між якими займають дисперсні частинки. У металі оплавленого шару присутні також ділянки структури, де  $\alpha$ -пластини зібрані в колонії різних розмірів, а дисперсні частинки знаходяться в проміжках між паралельними пластинами (рис. 8). Ділянки з одиничними  $\alpha$ -пластинами переважають поблизу поверхні зливка, глибше в оплавленому шарі збільшується кількість  $\alpha$ -колоній. Ширина  $\alpha$ -колоній в оплавленому шарі становить 10...50 мкм, товщина  $\alpha$ -пластин — 1,0...2,5 мкм. У швидко охолодженому металі оплавленого шару можуть бути метастабільні  $\beta$ -фази і мартенситні фази. Дисперсні частинки можуть

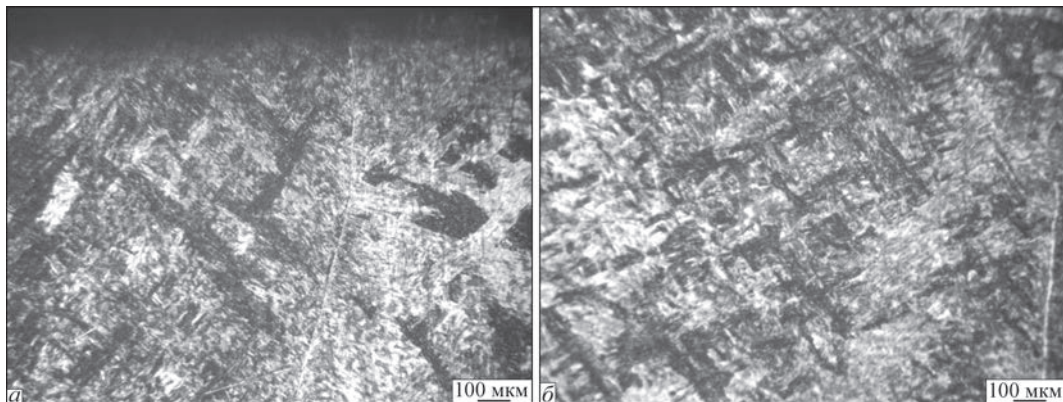


Рис. 7. Мікроструктура металу зливка жароміцного сплаву ВТ9 з оплавленою боковою поверхнею на глибині, мм: а — 0,5; б — 12,0

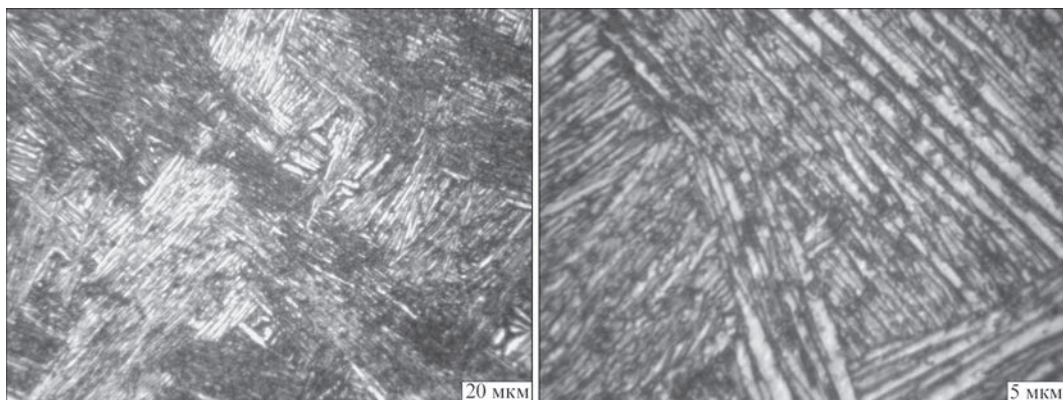


Рис. 8. Мікроструктура металу оплавленого шару зливка при різному збільшенні

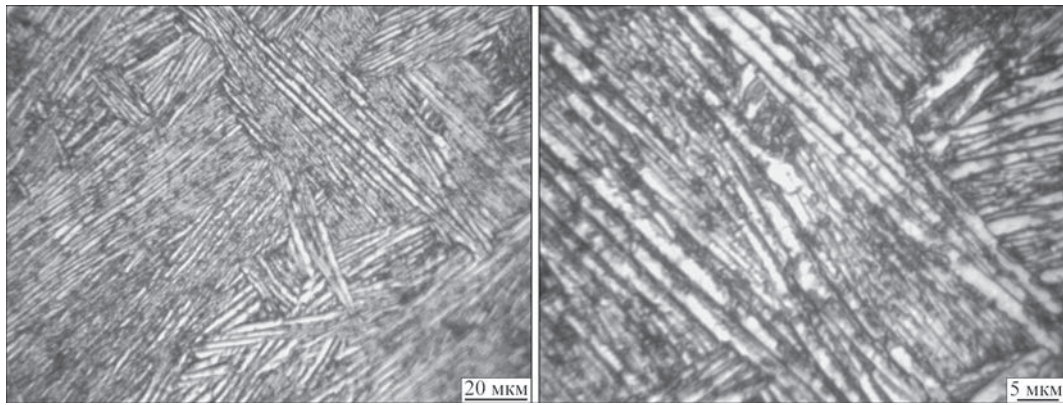


Рис. 9. Мікроструктура металу основи зливка при різному збільшенні

бути продуктами розпаду метастабільних фаз. Розмір дисперсних частинок 1...2 мкм.

Мікроструктура металу основи зливка показана на рис. 9, з якої видно, що в металі переважає крупнозерниста структура, утворенню якої сприяло повільне охолодження великого об'єму металу. Границі первинних  $\beta$ -зерен декоровані  $\alpha$ -оторочкою, яка місцями суцільна, а іноді переривчаста, при цьому її ширина становить до 7 мкм. Внутрішньозерниста структура складається в основному з  $\alpha$ -колоній розміром 10...60 мкм. У проміжках між колоніями спостерігаються ділянки із дисперсною структурою, розміри дисперсних частинок становлять до 1...2 мкм. Такі дрібні частинки є і між  $\alpha$ -пластинами в колонії. На нашу думку, це можна пояснити тим, що при повільному охолодженні габаритного зливка відбувається перерозподіл легуючих елементів між фазовими складовими, в результаті чого відбувається, очевидно, розпад метастабільних мартенситних фаз і  $\beta$ -метастабільної з виділенням дисперсних частинок стабільних  $\alpha$ - та  $\beta$ -фаз. Товщина пластин у колоніях становить 1...3 мкм.

Таким чином, результати аналізу мікроструктури оплавленого шару та основи зливка жароміцного титанового сплаву ВТ9 свідчать про те, що обробка поверхні зливка електронними променями на вказаних вище режимах призводить до подрібнення  $\alpha$ -колоній та  $\alpha$ -пластин зерен в оплавленому шарі порівняно з основою зливка.

За стандартною технологією дефекти, що утворюються на поверхні зливків титанових сплавів при їх виплавці, усуваються шляхом видалення поверхневого шару механічними способами. Товщина дефектного шару, що видаляється з поверхні зливків сягає до 9 мм (рис. 10), втрати в стружку при цьому складають до 100...140 кг для зливка діаметром 600 мм, що становить до 4,0...5,5 % від загальної маси зливка.

Отже, технологія електронно-променевого оплавлення поверхневого шару зливків жароміцного титанового сплаву ВТ9 дозволяє з високою ефек-

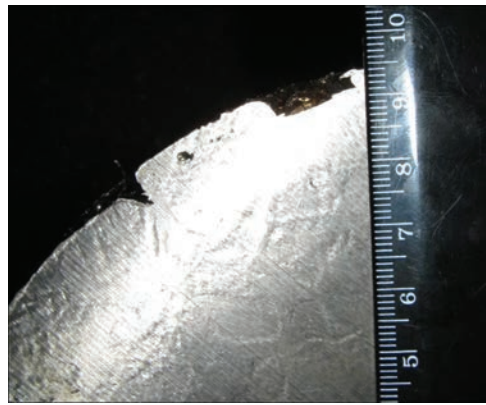


Рис. 10. Дефектний шар поверхні зливка

тивністю отримувати якісний метал в оплавленому шарі, який відповідає вимогам стандарту, та зберігати при цьому до 5,5 % від загальної маси зливка металу високої вартості.

## Висновки

1. Встановлено, що хімічний склад металу в оплавленому шарі жароміцного титанового сплаву ВТ9 відповідає вимогам стандарту, спостерігається зниження вмісту алюмінію, легуючого елемента з пружністю пари вище і підвищення вмісту молібдену, цирконію, легуючих елементів з пружністю пари нижче ніж у титану.

2. Показано, що глибина проплавлення поверхневого шару зливків жароміцного титанового сплаву ВТ9 діаметром 600 мм, оброблених за технологією електронно-променевого оплавлення, сягає до 8 мм, а поверхня зливків має високу якість, дзеркального вигляду із характерним вакуумним травленням, рівного мікрорельєфу без тріщин, розривів та незлитин, шорсткість її знаходиться в межах 3...4 класів при хвилястості 0,2...0,6 мм.

3. Показано, що оплавлений шар поверхні зливка має більш дрібнішу структуру порівняно з металом основи і складається з ділянок з одиничними  $\alpha$ -пластинами товщиною 1,0...2,5 мкм, де  $\alpha$ -пластини зібрані в колонії шириною 10...50 мкм, проміжки між якими займають дисперсні частинки



розмірами 1...2 мкм, що можуть бути продуктами розпаду метастабільних фаз.

### Список літератури

1. Niinomi M. (2011) Recent trends in titanium research and development in Japan. *Proc. 12<sup>th</sup> World Conf. on Titanium*, **1**, 30–37.
2. Bania P. (1993) Beta titanium alloys and their role in the titanium industry. *Beta Titanium Alloys in the 90's*. TMS Publ., Warrendale, PA, 3–14.
3. Cui C., Hu B.M., Zhao L., Liu S. (2011) Titanium alloy production technology, market prospects and industry development. *Mater. Des.*, **32**, 1684–1691. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.011>
4. Babenko E.P., Dolzhenkova E.V. (2014) Investigation of the causes of destruction of a large-sized product made of VT23 alloy. *Metallurgical and Mining Industry*, **3**, 82–85.
5. Хореев А.И. (2007) Теория и практика создания титановых сплавов для перспективных конструкций. *Технология машиностроения*, **12**, 5–13.
6. Антонок С.Л., Моляр А.Г., Калинин А.Н. и др. (2003) Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины. *Современная электрометаллургия*, **1**, 5–10.
7. Пикулин А.Н. (2016) Электронно-лучевое оплавление слитков сложнотермостойких титановых сплавов. *Там же*, **3**, 26–30.
8. Корягин С.И., Пименов И.В., Худяков В.К. (2000) *Способы обработки материалов: Учебное пособие*. Калининград, Калининградский университет.
9. Кривоухов В.А., Чубаров А.Д. (1990) *Обработка резанием титановых сплавов*. Москва, Машиностроение.
10. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.
11. Павлова Т.В., Кашапов О.С., Ночовная Н.А. (2012) *Титановые сплавы для газотурбинных двигателей. Все материалы*. Энциклопедический справочник.
12. Хореев А.И., Хореев М.А. (2005) Титановые сплавы, их применение и перспективы развития. *Материаловедение*, **7**, 25–34.
13. Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А. и др. (1979) *Полуфабрикаты из титановых сплавов*. Москва, Metallurgy.

### References

1. Niinomi, M. (2011) Recent trends in titanium research and development in Japan. *Proc. of 12<sup>th</sup> World Conf. on Titanium*, **1**, 30–37.
2. Bania, P. (1993) Beta titanium alloys and their role in the titanium industry. *Beta Titanium Alloys in the 90's*. TMS Publ., Warrendale, PA, 3–14.
3. Cui, C., Hu, B.M., Zhao, L., Liu, S. (2011) Titanium alloy production technology, market prospects and industry development. *Mater. Des.*, **32**, 1684–1691. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.011>
4. Babenko, E.P., Dolzhenkova, E.V. (2014) Investigation of the causes of destruction of a large-sized product made of VT23 alloy. *Metallurgical and Mining Industry*, **3**, 82–85.
5. Khoreev, A.I. (2007) Theory and practice of development of titanium alloys for promising structures. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, **12**, 5–13 [in Russian].
6. Antonyuk, S.L., Moyer, A.G., Kalinyuk A.N. et al. (2003) Titanium alloys for aircraft industry of Ukraine. *Advances in Electrometallurgy*, **1**, 9–13.
7. Pikulin, A.N. (2016) Electron beam fusion of complexly-alloyed titanium alloys. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 26–30 [in Russian].
8. Koryagin, S.I., Pimenov, I.V., Khudyakov, V.K. (2000) *Methods of treatment of materials: Manual*. Kaliningrad, Kaliningrad University [in Russian].
9. Krivoukhov, V.A., Chubarov, A.D. (1990) *Cutting of titanium alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
10. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
11. Pavlova, T.V., Kashapov, O.S., Nochovnaya, N.A. (2012) *Titanium alloys for gas turbine engines. All materials*. Encyclopaedic Handbook [in Russian].
12. Khoreev, A.I., Khoreev, M.A. (2005) Titanium alloys, their application and prospects of development. *Materialovedenie*, **7**, 25–34 [in Russian].
13. Aleksandrov, V.K., Anoshkin, N.F., Bochvar, G.A. et al. (1979) *Semi-finished products from titanium alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

## ELECTRON BEAM SURFACE MELTING OF INGOTS OF HIGH-TEMPERATURE TITANIUM ALLOY VT9

O.M. Pikulin, S.V. Akhonin, V.O. Berezos, A.Yu. Severyn, O.G. Erokhin  
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: akhonin.sv@gmail.com

Proceeding from the results of the performed package of research work, it was established that the chemical composition of metal in the surface-melted layer of high-temperature titanium alloy VT9 corresponds to standard requirements; and a lowering of aluminium content, an alloying element with vapour pressure higher, and an increase in the content of molybdenum and zirconium, alloying elements with vapour pressure lower than that of titanium, is observed. Investigations of the surface-melted layer showed that the depth of penetration of the surface layer in ingots of high-temperature titanium alloy VT9 of 600 mm diameter reaches 8 mm, the ingot surface is high-quality mirror-like with characteristic vacuum etching, even microrelief without cracks, tears or lacks-of-fusion, its roughness is in the range of 3...4 class at waviness of 0.2...0.6 mm. The surface-melted layer of the ingot has a finer structure, compared to base metal, and it consists of areas with isolated  $\alpha$ -plates of 1.0...2.5  $\mu\text{m}$  thickness, where the  $\alpha$ -plates are gathered into colonies of 10...50  $\mu\text{m}$  width, and the gaps between them are taken up by dispersed particles of 1...2  $\mu\text{m}$  size, which can be the products of metastable phase decomposition. Ref. 13, Tabl. 1, Fig. 10.

*Key words:* high-temperature titanium alloy; ingot; surface defect; electron beam surface melting; chemical composition; structure

Надійшла до редакції 02.12.2022