

ОТРИМАННЯ ЖАРОМІЦНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ СИСТЕМИ Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn СПОСОБОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

С.В. Ахонін¹, В.О. Березос¹, О.М. Пікулін¹, А.Ю. Северин¹, О.О. Котенко¹,
М.М. Кузьменко², Л.Д. Кулак², О.М. Шевченко²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України.

03142, м. Київ, вул. Академіка Кржижановського, 3. E-mail: rapid@materials.kiev.ua

На основі технології ЕПП проведено комплекс дослідницьких робіт по виплавці жароміцних складнолегованих титанових сплавів системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn із вмістом кремнію, що перевищує термодинамічно стабільну величину в твердому розчині. Сплави цієї системи є перспективними для створення нового класу матеріалів з високим рівнем жаростійких характеристик. Показано, що ЕПП дозволяє отримувати зливки жароміцних титанових сплавів системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn, які характеризуються достатньою хімічною однорідністю та відсутністю дефектів литого походження. Встановлено, що присутність олова знижує розчинність кремнію у дослідних сплавах і посилює виділення силіцидів, при цьому також подрібнюється структура. Встановлено, що на розчинність кремнію у титані впливають додаткові легуючі елементи, утворюючи в дослідних сплавах складні силіциди типу $(Zr, Ti)_3Si$ $(Ti, Zr)_3Si$. Показано, що мікроструктура дослідних литих сплавів представляє собою пакети пластинчастої α -фази у межах первинних β -зерен, що мають різне кристалографічне орієнтування. Бібліогр. 18, рис. 8.

Ключові слова: жароміцний титановий сплав; зливки; електронно-променева плавка; технологічні режими; хімічний склад; литий метал; структура

Вступ. В останні десятиліття підвищену увагу приділяють створенню сплавів на основі тугоплавких та високореакційних металів. Сьогодні атомна енергетика, газотурбобудування, аерокосмічна та авіаційна техніка потребують легких та міцних матеріалів, які зможуть доповнити перелік жароміцних сплавів на основі нікелю, кобальту та заліза, що традиційно використовуються в цих областях. Жароміцні сплави на основі титану — один із шляхів вирішення цього завдання. Особливий інтерес представляють складнолеговані сплави на основі титану, які мають високі питомі міцність, жаро- та корозійностійкі властивості у різних середовищах [1–3].

До деталей відповідального призначення пред'являються високі вимоги, які постійно удосконалюються і стають більш жорсткими. Це, в першу чергу, відноситься до якості використовуваних матеріалів. Тому з метою широкого застосування титанових сплавів в різних конструкціях необхідно не тільки створювати нові матеріали на основі титану з більш високими експлуатаційними характеристиками, але і в подальшому вдосконалювати виробництво напівфабрикатів з цих сплавів [4].

Будь-які недосконалості хімічної і структурної однорідності в титанових сплавах призводять до зниження міцності і довговічності виробів. Отри-

мання титанових сплавів пов'язано з труднощами, зумовленими високою чутливістю титану до домішок впровадження, особливо до кисню, азоту, водню, вуглецю, і взаємодією з багатьма хімічними елементами, в результаті чого утворюються тверді розчини або хімічні сполуки. Крім того, одним з основних структурних недосконалостей титанових сплавів є наявність неметалевих включень. Висока активність титану призводить до протікання фізико-хімічних процесів взаємодії з газами навіть в твердому стані. Тому неметалеві включення, зокрема нітриди і оксиди, можуть утворюватися як в процесі виплавки зливок, так і на різних етапах технологічного переділу в готову продукцію. Неметалеві включення в готовий виріб можуть бути внесені з шихтових матеріалів в процесі плавки, а також при термічній обробці готового виробу. Титан активно взаємодіє не тільки з газами, але і з іншими елементами, в тому числі з легуючими компонентами сплавів, тому локальне збагачення окремих об'ємів зливок легуючими елементами може призводити до утворення інтерметалідних включень, наприклад, Ti_3Al , $TiAl$, $TiCr$ та інших [5].

Актуальність роботи. Робочі температури сучасних промислових титанових сплавів не перевищують 600 °С, що обмежує їх використання [6].

С.В. Ахонін — <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, В.О. Березос — <https://orcid.org/0000-0002-5026-7366>,
О.М. Пікулін — <https://orcid.org/0000-0001-6327-3848>, А.Ю. Северин — <https://orcid.org/0000-0003-4768-2363>,
О.О. Котенко — <https://orcid.org/0000-0002-0930-9536>, М.М. Кузьменко — <https://orcid.org/0000-0001-8108-7088>,
Л.Д. Кулак — <https://orcid.org/0000-0001-7861-0931>, О.М. Шевченко — <https://orcid.org/0000-0001-6726-7269>

Тому проблема поліпшення механічних характеристик титанових сплавів при температурах, що перевищують 600 °С, актуальна на цей момент і вимагає вирішення. Одним із перспективних напрямків вирішення проблеми є створення титанових композитів на основі системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn із вмістом кремнію, що перевищує термодинамічно стабільну величину в твердому розчині. Такі композити мають багатофазну структуру, де зміцнення титанової матриці тугоплавким з'єднанням Ti_3Si_3 відбувається природним чином у процесі кристалізації. Сплави цієї системи є перспективними для створення нового класу матеріалів з високим рівнем жаростійких характеристик [7–11].

Нині не всі методи виробництва зливків титанових сплавів дозволяють отримати якісний метал, а при порушенні технологічного процесу виробництва сплавів титану в зливках виявляються дефекти, які знижують якість металу. Головним фактором, що впливає на якість матеріалів, особливо, що мають низьку технологічну пластичність, є висока якість вихідного зливка. Забезпечити гідну якість одержуваного зливка з рівномірною, не грубою структурою та хорошою хімічною однорідністю здатний електронно-променевий переплав (ЕПП). При ЕПП можливо в широких межах регулювання швидкості плавки, завдяки незалежному джерелу нагріву, що, в свою чергу, дозволяє регулювати тривалість перебування металу в рідкому стані. ЕПП є технологією, що дозволяє практично повністю забезпечити видалення тугоплавких включень високої і низької щільності. Таким чином, ЕПП дозволяє підвищити якість зливків з титанових сплавів [12].

Тому відпрацювання технології виплавки жароміцних складнолегованих титанових сплавів системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn способом ЕПП є на теперішній час актуальною задачею.

Матеріали та методи дослідження. Більшість титанових сплавів містять в складі високу кількість легуючих елементів, що дещо ускладнює їх виробництво способом електронно-променевої плавки. Плавка в вакуумі сприяє виборчому випа-



Рис. 1. Процес плавки зливка титанового сплаву системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn діаметром 110 мм в електронно-променевій установці

руванню легуючих елементів з високою пружністю пари, тому при виплавці зливків складнолегованих титанових сплавів ЕПП виникає проблема забезпечення заданого хімічного складу зливка [13]. В цьому випадку до таких елементів відносяться алюміній. А концентрація у зливку елементів з пружністю пари нижче пружності пари титану (Nb, Mo, Zr і Si) може навіть дещо підвищуватися. На основі проведених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України фундаментальних досліджень процесів випаровування компонентів з розплаву у вакуумі [12] робили розрахунки прогнозованого хімічного складу зливків, за результатами яких здійснювали розрахунок ваги складових шихтової заготовки. Легуючий компонент з високою пружністю пари (Al) шихтували з урахуванням компенсації втрат на випаровування. Шихтову заготовку для виплавки зливків жароміцних складнолегованих титанових сплавів системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn формували в невитратний короб. Для проведення плавки використовували електронно-променеву установку УЕ-208М (рис. 1) [14].

Для відпрацювання технології виплавки жароміцних складнолегованих титанових сплавів системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn способом ЕПП були використані раніше відпрацьовані технологічні схеми шихтування витратної заготовки та режими плавки [15].

Технологічні параметри плавки зливків системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn діаметром 110 мм

Швидкість плавки, кг/год.	30
Висота порцій, що одночасно заливаються у кристалізатор, мм.	10
Потужність, кВт:	
у кристалізаторі.	20
у проміжній ємності.	90

Хімічний склад металу отриманих зливків визначали методом індуктивно-зв'язаної плазми в оптично-емісійній спектроскопії (ICP-OES) на ICP-спектроскопі ICAP 6500 DUO. Вміст кисню та азоту визначали методом плавлення аналізованого навішування стружки в вакуумі в графітовому тиглі, нагрів якого здійснювали при проходженні струму 900...1000 А, на приладах типу RO-316, TN-114, RH-3 фірми LECO (США).

Якість поверхні зливків на наявність пор, раковин, неметалевих включень, тріщин визначали візуально без застосування збільшувальних приладів. Для визначення в титанових зливках внутрішніх дефектів у вигляді неметалевих включень, пор і нещільностей використовували метод ультразвукової дефектоскопії.

Структурні дослідження металу отриманих литих зливків проводили на поперечних темплетях, з яких були вирізані зразки для проведення металографічних досліджень. Шліфи досліджуваних

сплавів було виготовлено шляхом механічного шліфування абразивним папером різної зернистості та поліруванням зразків абразивною пастою з хімічним травленням реактивом наступного складу: 70 % H_2O , 25 % HNO_3 , 5 % HF .

Структуру сплавів досліджували методами оптичної та електронної мікроскопії. Металографічні дослідження проводили за допомогою оптичного мікроскопа Jenaphot-2000 методом скануючої електронної мікроскопії на растровому мікроаналізаторі JEOL Superprobe-733. Для вимірювання твердості при кімнатній температурі застосовували стандартний метод за Віккерсом відповідно Держстандарту 2999-75 при навантаженні 30 кг.

Результати досліджень та їх обговорення. Для забезпечення високих фізико-механічних характеристик експериментальних титанових сплавів при кімнатній та підвищених температурах проведено комплексне легування з метою забезпечення зміцнення твердого розчину за рахунок α -фази та дисперсних частинок вторинної фази, зокрема силіцидами. Згідно технічного завдання проведено серію плавок (рис. 1) та отримано литі

зливки жароміцних складнолегованих титанових сплавів системи Ti-Al-Zr-Si-Mo-Nb-Sn діаметром 110 мм та довжиною до 1000 мм (рис. 2) із різним вмістом легуючих елементів: плавка 812-208 — сплав Ti-5Al-5Zr-0,8Si-0,3Mo-0,1Nb; плавка 814-208 — сплав Ti-6,5Al-5Zr-0,5Si-1,5Sn-0,1Nb; плавка 815-208 — сплав Ti-6,5Al-5,5Zr-0,8Si-0,6Mo-0,5Nb-1,7Sn.

Бокова поверхня отриманих литих зливок після охолодження в вакуумі до температури нижче 300 °C чиста, підвищена концентрація домішкових елементів на поверхні у вигляді окисленого або альфвованого шару відсутня. Глибина поверхневих дефектів типу гофр становить 2...3 мм, дефекти у вигляді розривів, тріщин або несплавлень відсутні.

Для оцінки якості металу отриманих зливок проводили дослідження хімічного складу зразків, відібраних по довжині зливка з верхньої, середньої та нижньої частин. Результати аналізу хімічного складу металу отриманих зливок показали, що розподіл легуючих елементів по довжині зливок рівномірний.

В результаті було проведено механічну обробку бокової поверхні та відрізання верхньої та



Рис. 2. Зливки титанових сплавів системи Ti-Al-Zr-Si-Mo-Nb-Sn діаметром 110 мм після ЕПП: а — плавка 812-208; б — плавка 814-208; в — плавка 815-208



Рис. 3. Зовнішній вигляд зливок титанових сплавів системи Ti-Al-Zr-Si-Mo-Nb-Sn діаметром 110 мм після механічного оброблення бокової поверхні: а — плавка 812-208; б — плавка 814-208; в — плавка 815-208

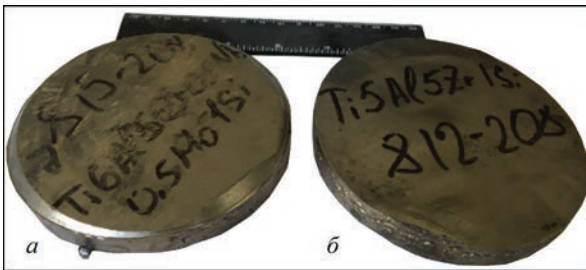


Рис. 4. Відрізані темплети із зливків плавок 815-208 (а) та 812-208 (б) для виготовлення зразків

донної частин зливків (рис. 3). Вирізано темплети для проведення металографічних досліджень та виготовлення зразків для випробувань механічних властивостей (рис. 4).

Виплавлені сплави відповідно до їх складу можна віднести до псевдо- α -сплавів: вони складаються

з α -фази та невеликої кількості залишкової β -фази, в структурі присутні також силіциди (рис. 5, 6).

Мікроструктура дослідних литих сплавів представляє собою пакети пластинчастої α -фази у межах первинних β -зерен, що мають різне кристалографічне орієнтування. В процесі охолодження відбувається формування структури: внутрішній об'єм β -зерен заповнюється як хаотичними α -пластинами, так і зібраними у пачки (α -колонії), що свідчить про неоднорідність литої структури. Інтерметаліди починають виділятися у першу чергу на структурних дефектах і границях зерен та α -пластинах, стримуючи їх зростання. Первинні силіциди і силіцидні прошарки формуються при зниженні розчинності кремнію в β -фазі відповідно до діаграми фазової рівноваги системи

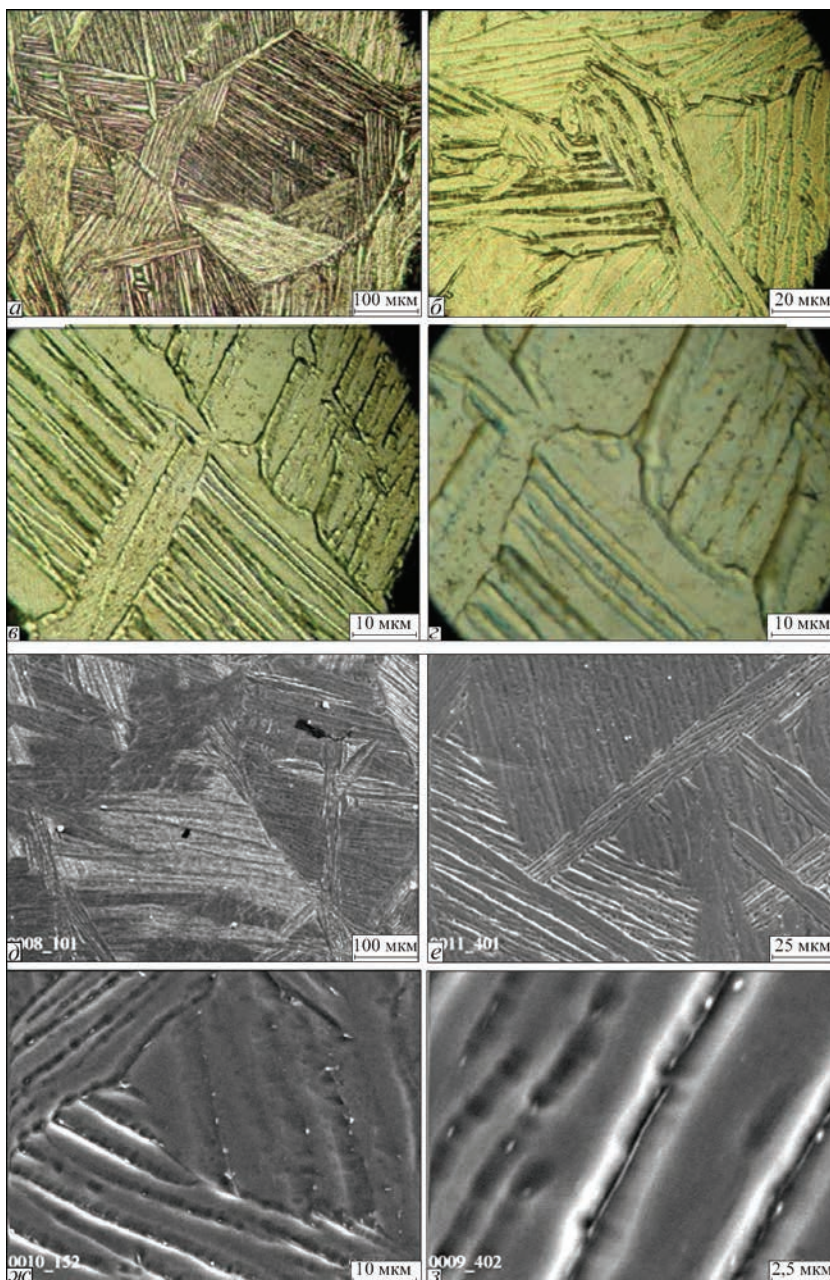


Рис. 5. Оптична (а–б) та растрова електронна (в–ф) мікроскопія литого сплаву Ti–5Al–5Zr–0,8Si–0,3Mo–0,1Nb (плавка 812-208)

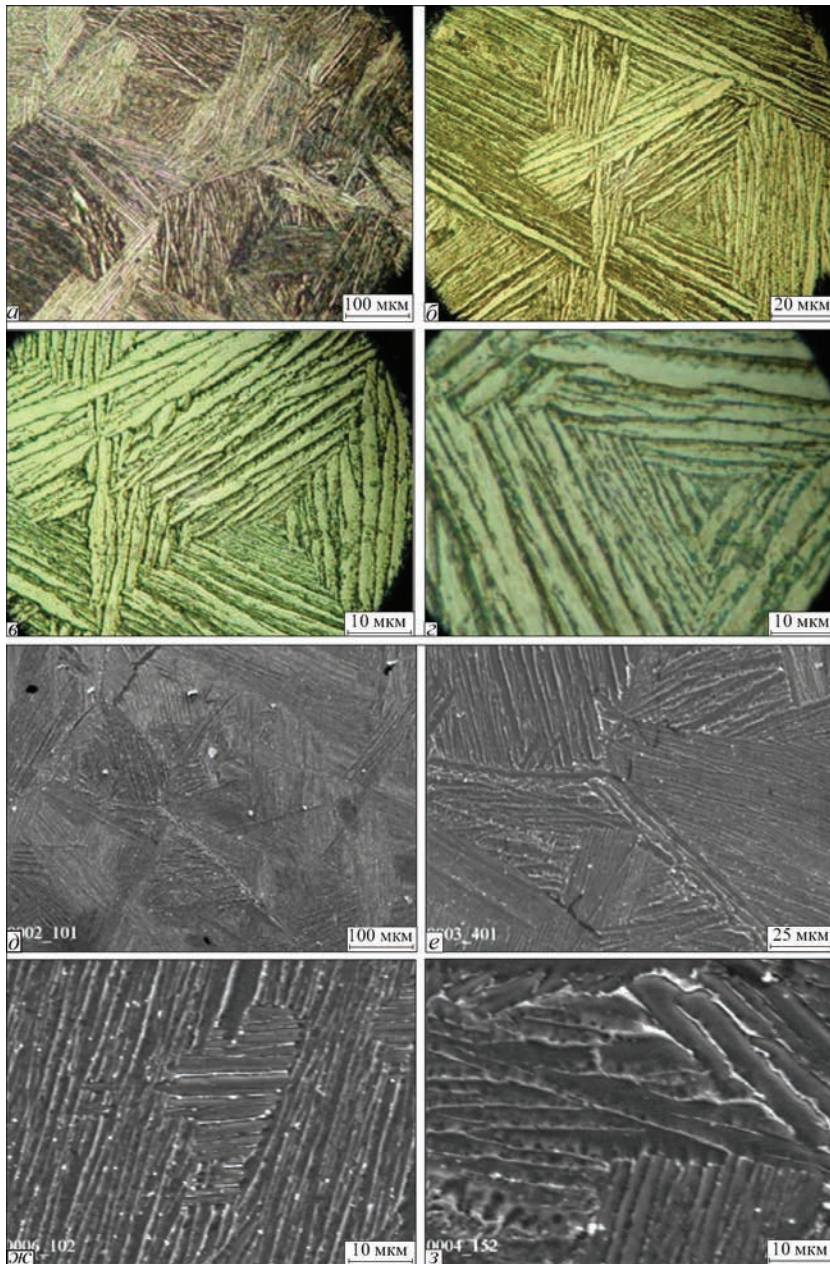


Рис. 6. Оптична (а–д) та растрова електронна (е–з) мікроскопія литого сплаву Ti–6,5Al–5,5Zr–0,8Si–0,6Mo–0,5Nb–1,7Sn (плавка 815-208)

Ti–Si у результаті ліквідаційних процесів при затвердінні зливків (рис. 7) [16].

Дрібні силіциди по межах α-пластин утворюються в процесі евтектоїдного перетворення і подальшого зниження розчинності кремнію у титановій α-матриці. На рис. 8 представлено розподіл основних легуючих елементів у литому сплаві плавки 812-208, з якого видно, що крім титану у силіцидах і їхніх прошарках на границях зерен міститься також цирконій, тобто у дослідних сплавах утворюються складні силіциди типу (Zr, Ti)₅Si₃ та (Ti, Zr)₃Si, які раніше були виявлені в сплавах системи Ti–Zr–Si–Nb [17]. Цирконій та кремній перебувають як у твердому розчині, так і в зміцнюючій силіцидній фазі, що розподіляється по границях колишніх β-зерен і

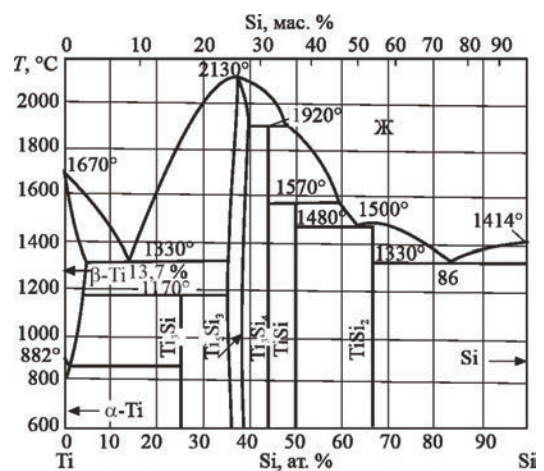


Рис. 7. Діаграма стану системи титан–кремній

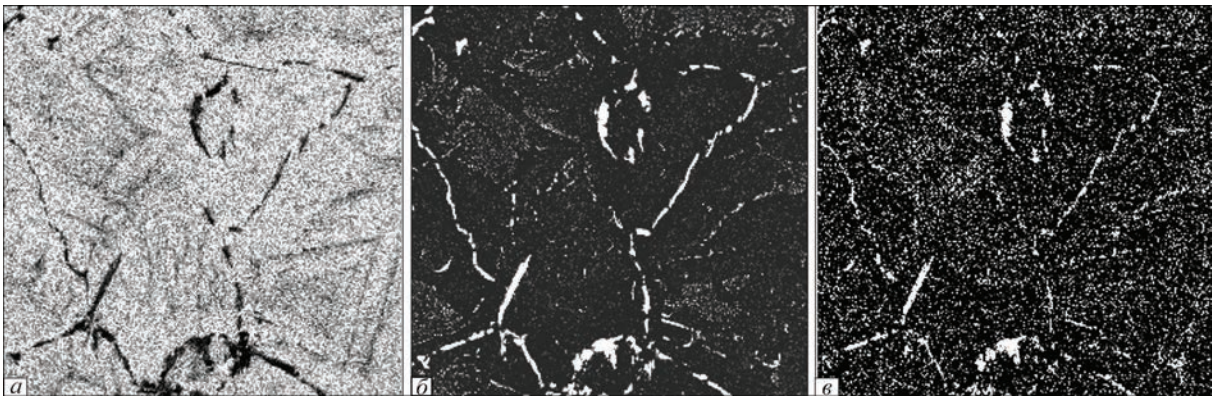


Рис. 8. Розподіл легуючих елементів (*a* — Al; *b* — Si; *c* — Zr) у литому сплаві Ti–5Al–5Zr–0,8Si–0,3Mo–0,1Nb (плавка 815-208)

α -пластин. Таким чином, на розчинність кремнію у титані істотний вплив мають легуючі елементи.

Алюміній у структурі розподілений досить рівномірно: він практично повністю перебуває у твердому розчині, майже відсутній на границях зерен і наявний у меншій кількості подекуди у проміжках пакетів α -пластин у місцях, де вірогідно, присутня залишкова β -фаза. Розмір зерен і пластин α -фази залежить як від вмісту кремнію, так і додаткового легування у дослідних литих титанових сплавах. Для кількісної оцінки пластинчастої структури використовують параметри D (розмір β -зерна), d (розмір колоній α -пластин) і b (ширина α -пластин). Середній розмір зерна литих сплавів складає приблизно 300...500 мкм, сплав 815-208 має дрібніші елементи структури (α -пластини та їх колонії) у порівнянні зі сплавом 812-208. Так, у сплаві 812-208 ширина α -пластин становить 3...5 мкм, а у сплаві 815-208 — 2...3 мкм (див. рис. 5, 6).

У структурі сплаву 812-208 кількість силіцидів по границях колишніх β -зерен і між α -пластинами менша, ніж у сплаві 815-208. Склад останнього відрізняється додатковим вмістом олова, яким часто легують титанові сплави з метою підвищення їх жароміцності. При введенні олова відбувається сповільнення процесів перерозподілу легуючих елементів між α - і β -фазами, що підвищує термічну стабільність жароміцних сплавів [18].

Висновки

1. Проведений комплекс робіт показав, що електронно-променева плавка дозволяє отримувати метал зливків жароміцних титанових сплавів системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn, який характеризується достатньою хімічною однорідністю та відсутністю дефектів литого походження (пор, раковин, включень низької та високої щільності).

2. Показано, що мікроструктура дослідних литих сплавів представляє собою пакети пластинчастої α -фази у межах первинних β -зерен, що мають різне кристалографічне орієнтування.

3. Встановлено, що на розчинність кремнію у титані істотний вплив здійснюють додаткові легуючі елементи, утворюючи в дослідних сплавах складні силіциди типу $(Zr, Ti)_5Si_3$ та $(Ti, Zr)_3Si$.

4. Показано, що присутність олова знижує розчинність кремнію у дослідних сплавах і таким чином посилює виділення силіцидів, при цьому також подрібнюється структура.

Список літератури

1. Гармата В.А., Петрунько А.Н., Галицкий Н.В. и др. (1983) *Титан*. Москва, Металлургия.
2. Хорев А.И., Хорев М.А. (2005) Титановые сплавы, их применение и перспективы развития. *Материаловедение*, 7, 25–34.
3. Хорев А.И. (2007) Теория и практика создания титановых сплавов для перспективных конструкций. *Технология машиностроения*, 12, 5–13.
4. Антонюк С.Л., Моляр А.Г., Калинюк А.Н. и др. (2003) Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины. *Современная электрометаллургия*, 1, 10–14.
5. Бабенко Е.П., Долженкова Е.В. (2014) Исследование причин разрушения крупногабаритного изделия из сплава ВТ23. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 3, 82–85.
6. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Справочник. Москва, ВИЛС – МАТИ.
7. Фирстов С.О. (2004) Нове покоління матеріалів на базі титану. *Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій*. Панасюк В.В. (ред.). Львів, ФМІ НАН України, сс. 609–616.
8. Wu T., Beaven P., Wagner R. (1990) The $Ti_3(Al, Si)-Ti_5(Si, Al)_3$ eutectic reaction in the Ti–Al–Si system. *Scripta Metallurgica*, 24, 207–212.
9. Salpadoru H.H., Flower H.M. (1995) Phase equilibria and transformations in a Ti–Zr–Si system. *Metall. Mater. Transact.*, 26A(2), 243–257.
10. Кузьменко М.М. (2008) Структура та механічні властивості литих сплавів системи Ti–Si. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 44(1), 45–48.
11. Фірстов С.О., Кулак Л.Д., Кузьменко М.М., Шевченко О.М. (2018) Сплави системи Ti–Al–Zr–Si для експлуатації за високих температур. *Там само*, 54(6), 30–35.
12. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.
13. Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.А. и др. (2016) Особенности выплавки слитков титанового сплава ВТ19

- в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью. *Современная электрометаллургия*, **2**, 23–27.
14. Ахонин С.В., Пикулин А.Н., Березос В.А. и др. (2019) Лабораторная электронно-лучевая установка УЭ-208М. *Там же*, **3**, 15–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.03.03>
 15. Ахонин С.В., Фирстов С.А., Северин А.Ю. и др. (2019) Электронно-лучевая выплавка жаропрочных титановых композитов системы Ti–Si–Al–Zr–Sn. *Там же*, **2**, 7–12. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2019.02.02>
 16. (2000) *Диаграммы состояния двойных металлических систем*: Справочник: Т. 3. Лякишев Н.П. (ред.). Москва, Машиностроение.
 17. Шевченко О.М., Кулак Л.Д., Кузьменко М.М., Фирстов С.О. (2020) Вплив легування цирконієм на структуру та твердість загартованого литого біосумісного стопу Ti–18Nb–1Si. *Металофізика і новітні технології*, **42(2)**, 237–249.
 18. Солонина О.П., Глазунов С.Г. (1976) *Титановые сплавы. Жаропрочные титановые сплавы*. Москва, Металлургия.
 7. Firstov, S.O. (2004) *New generation of titanium-based materials*. In: *Fracture mechanics of materials and strength of structures*. Ed. by V.V. Panasyuk. Lviv, PMI, 609–616 [in Ukrainian].
 8. Wu, T., Beaven, P., Wagner, R. (1990) The Ti₃(Al, Si)–Ti₅(Si, Al)₃ eutectic reaction in the Ti–Al–Si system. *Scripta Metallurgica*, **24**, 207–212.
 9. Salpadoru, H.H., Flower, H.M. (1995) Phase equilibria and transformations in a Ti–Zr–Si system. *Metall. Mater. Transact.*, **26A(2)**, 243–257.
 10. Kuzmenko, M.M. (2008) Structure and mechanical properties of cast alloys of Ti–Si system. *Fizyko-Khimichna Mekhanika Materialiv*, **44(1)**, 45–48 [in Ukrainian].
 11. Firstov, S.O., Kulak, L.D., Kuzmenko, M.M., Shevchenko, O.M. (2018) Ti–Al–Zr–Si system alloys for high temperature operation. *Ibid.*, **54(6)**, 30–35 [in Ukrainian].
 12. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
 13. Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.A. et al. (2016) Peculiarities of melting of titanium alloy VT19 ingots in electron beam cold hearth installation. *Sovrem. Electrometall.*, **2**, 23–27 [in Russian].
 14. Akhonin, S.V., Pikulin, A.N., Berezos, V.A. et al. (2019) Laboratory electron beam unit UE-208M. *Ibid.*, **3**, 15–22 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.03.03>
 15. Akhonin, S.V., Firstov, S.A., Severin, A.Yu. et al. (2019) Electron beam melting of heat-resistant titanium composites of Ti–Si–Al–Zr–Sn. *Ibid.*, **2**, 7–12 [in Russian]. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2019.02.02>
 16. (2000) *State diagrams of binary metallic system*: Handbook, Vol. 3. Ed. by N.P. Lyakishev. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 17. Shevchenko, O.M., Kulak, L.D., Kuzmenko, M.M., Firstov, S.O. (2020) Influence of zirconium alloying on structure and hardness of quenched cast biocompatible Ti–18Nb–1Si alloy. *Metaloфізика і Novitni Tekhnologii*, **42(2)**, 237–249 [in Ukrainian].
 18. Solonina, O.P., Glazunov, S.G. (1976) Titanium alloys. Heat-resistant titanium alloys. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

References

1. Garmata, V.A., Petrunko, A.N., Galitsky, N.V. et al. (1983) *Titanium*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Khorev, A.I., Khorev, M.A. (2005) Titanium alloys, their application and prospects of development. *Materialovedenie*, **7**, 25–34 [in Russian].
3. Khorev, A.I. (2007) Theory and practice of producing of titanium alloys for prospective structures. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, **12**, 5–13 [in Russian].
4. Antonyuk, S.L., Molyar, A.G., Kalinyuk, A.N. et al. (2003) Titanium alloys for aircraft industry of Ukraine. *Sovrem. Elektrometal.*, **1**, 10–14 [in Russian].
5. Babenko, E.P., Dolzhenkova, E.V. (2014) Examination of fracture causes of VT23 alloy large-sized product. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost*, **3**, 82–85 [in Russian].
6. Ilin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: Handbook. Moscow, VILS-MATI [in Russian].

PRODUCING HIGH-TEMPERATURE TITANIUM ALLOYS OF Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn SYSTEM BY ELECTRON BEAM MELTING

S.V. Akhonin¹, V.O. Berezos¹, O.M. Pikulin¹, A.Yu. Severyn¹, O.O. Kotenko¹, M.M. Kuzmenko², L.D. Kulak², O.M. Shevchenko²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²I.M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine.

3 Acad. Krzhyzhanovskiy Str., 03142, Kyiv, Ukraine. E-mail: rapid@materials.kiev.ua

A complex of research work was performed on the base of EBM technology to produce high-strength complex-alloyed titanium alloys of Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn system with silicon content, higher than the thermodynamically stable value in the solid solution. Alloys of this system are promising for creation of a new class of materials with a high level of heat-resistant characteristics. It is shown that EBM allows producing ingots of high-temperature titanium alloys of Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn system, which are characterized by sufficient chemical homogeneity and absence of casting defects. It is found that tin presence lowers silicon solubility in the test alloys and intensifies silicide release. Here the structure is also refined. It is found that additional alloying elements influence silicon solubility in titanium, forming complex silicides of (Zr, Ti)₃Si (Ti, Zr)₃Si type in the test alloys. It is shown that the microstructure of the test cast alloys consists of platelike α-phase packets within primary β-grains, having different crystallographic orientation. Ref. 18, Fig. 8.

Key words: high-temperature titanium alloy; ingot; electron beam melting; technological modes; chemical composition; cast metal; structure

Надійшла до редакції 13.04.2022