

ВИРОБНИЦТВО ЗЛИВКІВ ВИСОКОМІЦНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ТИТАНУ СПОСОБОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

В.О. Березос

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Методами математичного моделювання досліджено тепловий стан зливків сплавів титану при електронно-променевої плавці з урахуванням гідродинамічних течій та процеси випаровування хімічних елементів під час електронно-променевої плавки високоміцних конструкційних сплавів титану. На основі проведених розрахунків в рамках математичних моделей визначено технологічні режими та розроблено технологію електронно-променевої плавки 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 електронно-променевої плавки. Бібліогр. 10, табл. 5, рис. 6.

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

Завдяки високій питомій міцності сплави на основі титану знайшли широке застосування в авіа- і ракетобудуванні, виробництві військової техніки, хімічному та енергетичному машинобудуванні, при виготовленні морської техніки [1–3].

Для подальшого розширення застосування сплавів на основі титану необхідно підвищувати їх механічні характеристики та знижувати вартість виробництва, що може бути досягнуто створенням і застосуванням нових високоефективних технологій, в першу чергу виплавки.

Донині практично всі напівфабрикати з високоміцних сплавів титану виготовляються способом вакуумно-дугової плавки (ВДП) та поставляються в Україну із-за кордону. Хоча технологія ВДП титану є традиційним і найбільш поширеним в промисловості способом отримання зливків титану і сплавів на його основі, в останні роки все більше застосування в металургії титану знаходить технологія електронно-променевої плавки (ЕПП) з проміжною ємністю [4, 5].

ЕПП дозволяє значно підвищити якість зливків з титанових сплавів за рахунок того, що процес здійснюється при більш високому, ніж ВДП, вакуумі і під час плавки не відбувається помітного насичення металу газовими домішками. При ЕПП розплавлений титан тривалий час знаходиться в рідкому стані, що сприяє його дегазації (видалення водню) і вирівнюванню хімічного складу. Однак при цьому існує проблема отримання зливків заданого хімічного складу, так як плавка у відносно глибокому вакуумі сприяє виборчому випаровуванню легуючих елементів з високою пружністю

пари. Тому при одержанні зливків сплавів титану способом ЕПП має велике значення забезпечення однорідності шихтової заготовки та постійність технологічних параметрів в процесі плавки.

Роботи зі створення та впровадження технології ЕПП зливків титану в Україні проводилися в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Так, були проведені роботи зі створення нових технологій та обладнання ЕПП, розроблено математичні моделі переносу тепла та процесів випаровування легуючих елементів при одержанні зливків титанових сплавів під час ЕПП [6–8]. 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 [6]. 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 тривимірний модель зводилася до рішення двовимірної [7]. 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 —

В.О. Березос — <https://orcid.org/0000-0002-5026-7366>

© В.О. Березос, 2021

від видобутку титановмістких руд, їх збагачення і виробництва губчастого титану до виплавки зливків титану і виробництва титанових напівфабрикатів. Проте це стосується одержання або зливків 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 способом ЕПП дозволить відмовитись від імпорту вартісних іноземних напівфабрикатів та забезпечить розширення їх застосування підприємствами України.

В ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України з метою розробки технології одержання якісних зливків високоміцних сплавів титану для проведення експериментів та досліджень були використані промислові високоміцні титанові сплави — BT14, BT22, BT23, BT19.

ЕПП дозволяє розділити процеси плавки і кристалізації і, таким чином, в широких межах змінювати нагрів металу в кристалізаторі при незмінній технологічній продуктивності плавки. В умовах сталої технологічної схеми виробництва зливків особливого значення набуває дослідження процесу тепломасопереносу і супутніх їм явищ, що визначають будову і в поєднанні з хімічним складом властивості зливків і деформованих виробів. Разом з тим, вплив процесів тепломасопереносу на структуроутворення зливка, формування структурної та хімічної неоднорідності при одержанні високоміцних сплавів титану способом ЕПП вивчені недостатньо.

При виплавці зливків титанових сплавів способом 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. Були проведені роботи по створенню математичної моделі [9], яка встановлює залежність концентрації елементів в отриманому способом ЕПП з проміжною ємністю зливку сплаву титану від швидкості плавки, концентрації легуючих елементів у витратній заготовці і температури розплаву. 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 замінюють масопотоками.

Порівняння даних математичного моделювання з натурними експериментами показало, що побудована математична модель описує процес випаровування легуючих елементів з титанових сплавів при ЕПП з досить високим ступенем точності. Так, для зливків сплаву BT19, відносна похибка розрахункових результатів від експериментальних даних при ЕПП склала, відн. %: 4 для алюмінію та хрому; 2 для ванадію; 1,5 для молібдену і 1 для цирконію.

Структуроутворення зливка визначається не тільки марочним складом сплаву, але й теплофізичними умовами його кристалізації і вмістом у ньому домішок. Теплофізичні процеси в кристалізаторі вирішальним чином впливають на структуру зливків, тому необхідно проводити дослідження можливостей поліпшення структури зливків шляхом підвищення швидкостей охолодження при їх кристалізації.

Теплофізичні процеси, що протікають при формуванні зливка в прохідному кристалізаторі під час ЕПП з проміжною ємністю, мають явно виражений тривимірний характер, що зумовлено відсутністю осової симетрії при подачі в нього розплаву. При локальній периферійній подачі розплаву в кристалізатор відбувається складний за структурою рух металу, який супроводжується тепломасопереносом як вздовж течії, так і в інших напрямках за рахунок турбулентних пульсацій розплаву. Докладне врахування розрахунковим шляхом таких теплофізичних процесів можливе тільки за допомогою сумісного рішення тривимірних теплової і гідродинамічної задач.

Для моделювання фізичних процесів, що відбуваються при неперервному литті титану, була сформульована математична модель [10], яка включає в себе закони збереження маси, імпульсу та енергії.

В рамках побудованої математичної моделі дослідження були спрямовані на визначення теплового стану зливка та положення фронту кристалізації при неперервній подачі рідкого титану з проміжною ємністю в кристалізатор в залежності від температури металу на вході та швидкості витягування зливка для ламінарного режиму гідродинамічної течії в рідкій ванні.

В цілому розрахунки показали, що форма рідкої ванни є несиметричною. Хоча фронт кристалізації наближається до плаского, в області входу струменя рідкого металу спостерігається промивання твердої фази біля стінки кристалізатора (рис. 1). 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».

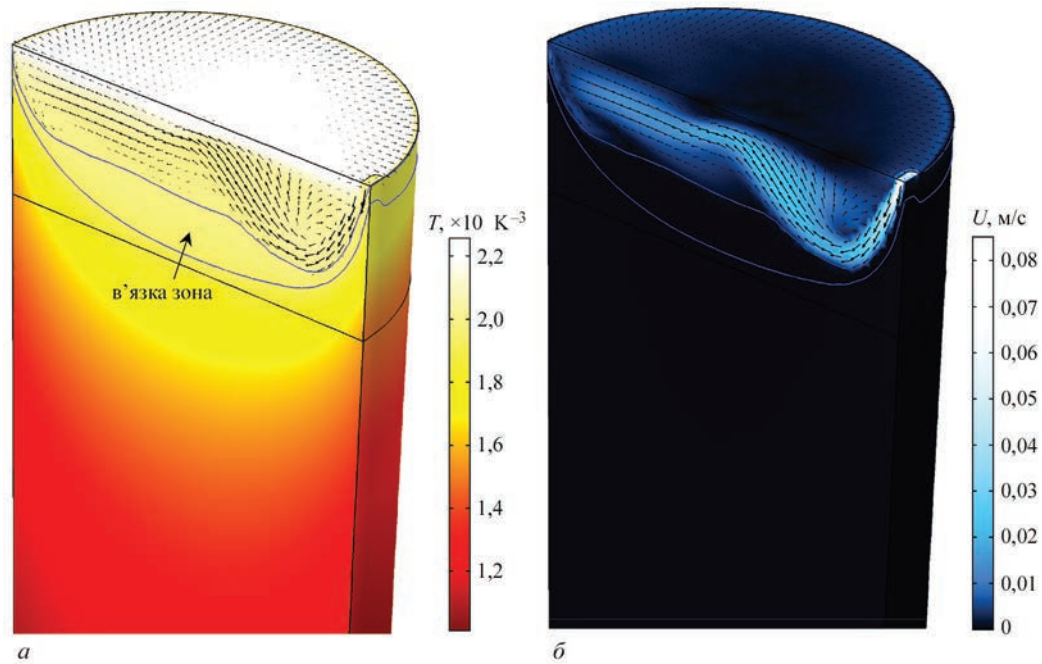


Рис. 1. Розподіл температури (а) та швидкості (б) у зливку під час ЕПП

При одержанні зливків способом 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. За допомогою проведених в рамках математичної моделі розрахунків побудовано залежність глибини рідкої ванни від продуктивності процесу при ЕПП зливка титану (рис. 2).

Порівняння даних математичного моделювання з результатами експерименту показало, що модель в цілому реально відображає фізичне явище формування рідкої ванни в зливках. Розраховані глибини рідких ванн збігаються з експериментально встановленими в межах 5...12 %.

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

Технологічні параметри ЕПП високоміцних сплавів титану

| | | | |
|-------------------------------------|-----|-----|-----|
| Діаметри зливків, мм | 100 | 400 | 600 |
| 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 способом ЕПП зливків

складнолегованих сплавів титану проводили при виплавці партії зливків сплавів ВТ14, ВТ22, ВТ23, ВТ19. Отримали зливки круглого перетину діаметрами 110, 400 та 600 мм.

Для оцінки якості металу отриманих зливків проводили дослідження хімічного складу зразків, відібраних по довжині зливка. Результати аналізу хімічного складу металу отриманих зливків (табл. 1) показали, що розподіл легуючих елементів по довжині зливків рівномірний і відповідає марочному складу.

Структура металу зливків (рис. 3) щільна, однорідна, з відсутністю зон, що по різному травляться по перетину зливка. Істотної різниці в структурі центральної зони зливка і периферійної не спостерігається. Характерною для зливків ВДП сегрегації легуючих елементів в жодному із одержаних зливків не виявлено. Кристалічна будова металу зливків однакова по усьому перетину і характеризується кристалами за формою близькими до рівновісних. Ділянки стовбчастої структури відсутні у всіх випадках.

Проведені за допомогою ультразвукового контролю дослідження показали, що у виплавлен-

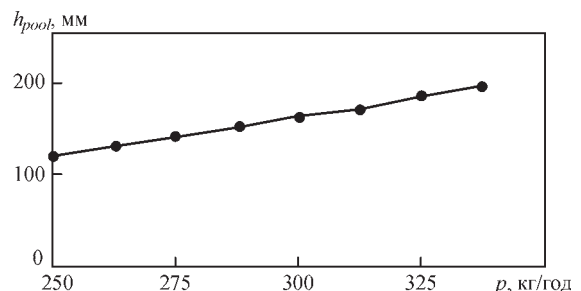


Рис. 2. Залежність глибини рідкої ванни (h_{pool}) від продуктивності (p) при ЕПП зливка титану діаметром 400 мм

Таблиця 1. Розподіл легуючих елементів по довжині зливків титанових сплавів, мас. %

| Марка сплаву | Частина зливка | Al | Mo | V | Fe | Zr | Cr | O | N |
|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|--------|
| BT22 | Верх | 5,1 | 4,2 | 4,9 | 0,90 | 0,01 | 1,3 | 0,11 | 0,012 |
| | Середина | 5,2 | 4,5 | 4,7 | 1,0 | —»— | 1,4 | — | — |
| | Низ | 5,0 | 4,1 | 5,0 | —»— | —»— | —»— | 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 | Верх | 4,5 | 2,0 | 4,7 | 0,5 | 0,01 | 0,9 | 0,10 | 0,010 |
| | Середина | 4,7 | 2,1 | 5,0 | 0,6 | —»— | —»— | — | — |
| | Низ | 4,3 | 1,9 | 4,7 | 0,5 | —»— | —»— | 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 | Верх | 3,2 | 5,3 | 3,8 | — | 0,8 | 4,0 | 0,08 | 0,006 |
| | Середина | 3,4 | 5,2 | 3,6 | — | 0,9 | 4,2 | — | — |
| | Низ | 3,5 | —»— | 3,3 | — | —»— | 4,4 | 0,10 | 0,005 |
| Вимоги | | 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 | Верх | 5,1 | 3,1 | 1,5 | 0,16 | 0,08 | — | 0,10 | 0,02 |
| | Середина | 5,2 | 3,3 | —»— | 0,19 | 0,10 | — | — | — |
| | Низ | 5,4 | —»— | 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 |

них способом 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.

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.

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 дефор-

мування зливків при виготовленні з них напівфабрикатів і режимам термічної обробки.

В даній роботі проведені комплексні дослідження з виготовлення напівфабрикатів із зливків промислових високоміцних сплавів титану, отриманих способом ЕПП.

Зі зливків діаметром 400 мм високоміцного титанового сплаву BT22 було виготовлено напівфабрикати у вигляді прутків діаметром 60 мм.

Спочатку із зливка діаметром 400 мм титанового сплаву BT22 на кувальному пресі були отримані ковани заготовки діаметром 180 мм. Нагрівання вихідних заготовок здійснювали в печі, оснащеній газовими пальниками, до температури 1020 °С. Перед початком кування нагрівали кувальний бойк до температури 250...300 °С. Кування на початковій стадії обробки зливків проводили до ступеня деформації заготовки 20...30 %. Температура кінця кування була не нижче 800 °С. В кінці першого етапу кування отриману заготовку перерубували на дві рівні частини, після чого клали в піч з наступним нагріванням до температури 980 °С.

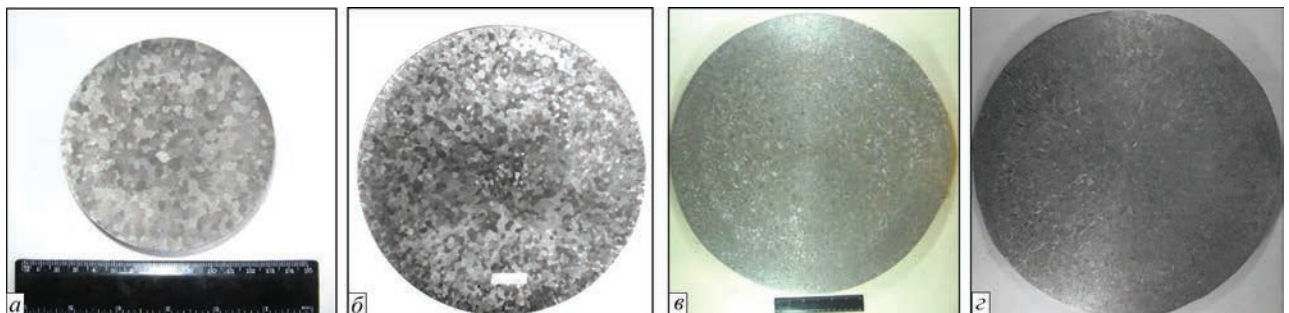


Рис. 3. Макроструктури зливків сплавів титану, одержаних способом ЕПП діаметрами, мм: а — 110 (BT19); б — 400 (BT22); в — 400 (BT23); з — 600 (BT14)

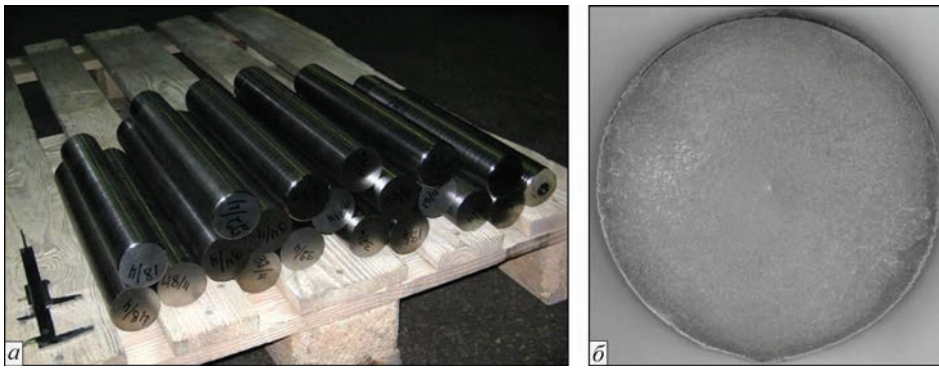


Рис. 4. Пресовані прутки діаметром 60 мм (а) та макроструктура пресованого прутка діаметром 60 мм (б) з титанового сплаву VT22

Таблиця 2. Механічні властивості напівфабрикатів з високоміцного титанового сплаву VT22, одержаного способом ЕПП

| Заготовка | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | ψ , % | KCU, Дж/см ² | HB |
|-------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|-------------------------|-----------|
| Пресований пруток | 1250 | 1200 | 10 | 35 | 40 | 320 |
| ОСТ 1 90266–86 | >1200 | – | >6 | >14 | >18 | 300...340 |

Після нагріву заготовку протягували на діаметр приблизно 180 мм з подальшою правкою.

Далі заготовки діаметром 180 мм були піддані пресуванню в пруток діаметром 60 мм. Нагрівання перед пресуванням здійснювали в електропечі до температури 1050...1100 °С в (α+β)-області. Від отриманих прутків були відібрані проби для визначення макроструктури. У макроструктурі металу отриманих прутків тріщин, розшарувань, пустот, металевих і неметалевих включень не виявлено (рис. 4). Величина макрозерна відповідає 3-му балу відповідно до 10-бальної шкали макроструктур по ГОСТ 26492–85.

Отримані прутки були піддані термічній обробці за такими режимами: нагрів до температури 850 °С з подальшою витримкою 1,5 год; охолодження з піччю до 790 °С, витримка 2 год з подальшим охолодженням на повітрі; старіння при 600 °С, витримка 4 год з подальшим охолодженням на повітрі.

Дані проведених досліджень дозволяють зробити висновок, що механічні властивості напівфабрикатів зі сплаву VT22, одержаного способом ЕПП, повністю відповідають вимогам стандартів (табл. 2).

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 $T_{\text{пт}}$. Це дозволяє при наступній операції гартування з (α+β)-області отримати матеріал з підвищеними характеристиками міцності, пластичності і в'язкості.

В результаті проведеної термомеханічної обробки злиwkів ЕПП сплаву VT19 діаметром 110 мм отримані листи розмірами 300×350 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 до 125 мкм (рис. 5, а). Механічні властивості сплаву VT19 наведені в табл. 3.

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

Листи з титанового сплаву VT23 виготовляли із застосуванням поздовжньо-поперечної прокатки, а для отримання необхідної якості поверхні листів застосовували стандартні оздоблювальні операції.

Внутрішньозеренна структура отриманих листів сплаву VT23 (рис. 5, б) складається з пластин α-фази, між якими знаходилася β-фаза. Товщина α-пластин становить 0,7..1,0 мкм. По границях β-зерен спостерігалася α-облямівка товщиною до 1,5 мкм. Така мікроструктура характерна для титанових (α+β)-сплавів мартенситного типу, до якого відноситься і сплав VT23. Напрямок частинок α-фази ненаправлений.

Аналіз результатів механічних властивостей сплаву VT23 показав, що метал напівфабрикатів у вигляді листів відповідає вимогам стандартів (табл. 4).

Таблиця 3. Механічні властивості деформованого сплаву VT19 ЕПП

| Термообробка | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | ψ , % |
|----------------------|------------------|----------------------|--------------|------------|
| Відпал 750 °С, 1 год | 978 | 887 | 12 | 42 |

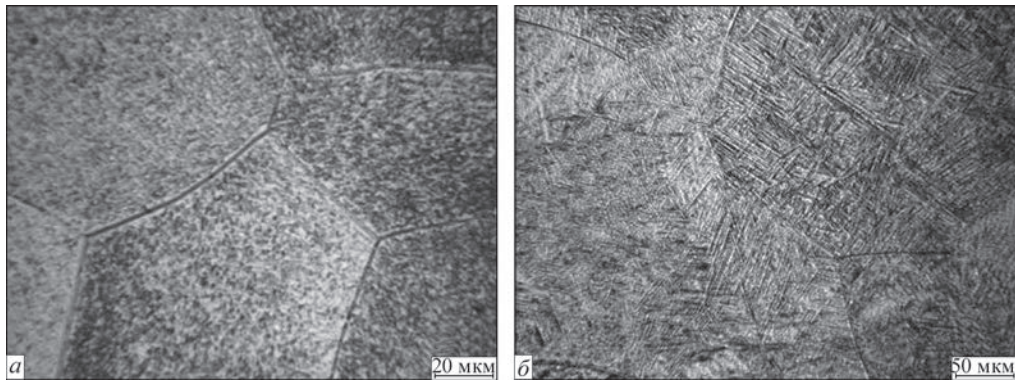


Рис. 5. Мікроструктура пластин деформованих сплавів: *a* — BT19; *б* — BT23

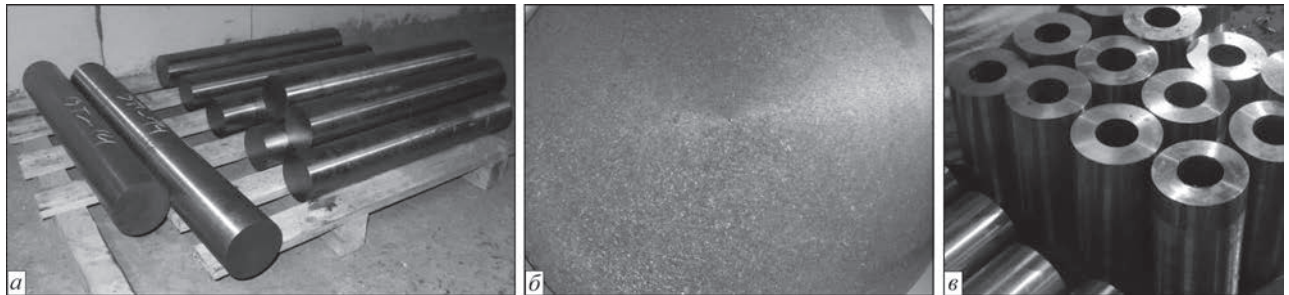


Рис. 6. Сплав BT14: *a* — ковани прутки діаметром 200 мм; *б* — макроструктура кованих прутків; *в* — трубні заготовки діаметром 190/90 мм

Таблиця 4. Механічні властивості металу листів сплаву BT23

| 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 | — | — |

Таблиця 5. Механічні властивості трубних заготовок діаметром 190/90 зі сплаву BT14

| Поковка | σ_b , МПа | δ , % | ψ , % | KCU, 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 |

Зі зливків діаметром 600 мм титанового сплаву BT14, виплавленого способом ЕПП, були отримані ковани прутки діаметром 200 мм (рис. 6, *a*).

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

Трубні заготовки отримували механічною обробкою кованих прутків. Способом свердління було отримано отвір діаметром 90 мм в центральній частині трубних заготовок (рис. 6, *в*).

Трубні заготовки діаметром 190/90 мм із титанового сплаву BT14 піддавали відпалу при тем-

пературі 750 °С протягом 1 год з наступним охолодженням на повітрі.

Механічні властивості трубних заготовок визначалися на зразках, вирізаних в поздовжньому напрямку (табл. 5). Як видно з таблиці, межа міцності трубних заготовок в поздовжньому напрямку дещо знижується, проте підвищуються показники пластичності.

Висновки

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

2. За розробленою технологією на ДП «НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» організовано промислове виробництво зливків високоміцних титанових сплавів діаметром від 110 до

600 мм та довжиною до 4 м. Продукція ДП «НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» постає як вітчизняним заводам, так і за кордон.

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

Список літератури

1. Каблов Е.Н. (2012) Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. *Авиационные материалы и технологии*, **5**, 7–17.
2. Хорев А.И. (2000) Титановые сплавы для авиакосмической техники и перспектива их развития. *НТС «Авиационные материалы и технологии. Перспективные алюминиевые и титановые сплавы для авиакосмической техники»*, 11–32.
3. Моляр А.Г., Коцюба А.А., Бычков А.С. и др. (2015) *Конструкционные материалы в самолетостроении*. Киев, КВИЦ.
4. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.
5. Патон Б.Е., Ахонин С.В., Березос В.А. (2018) Развитие технологий электронно-лучевой плавки металлов в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. *Современная электрометаллургия*, **4**, 19–35. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2018.04.01>
6. Ахонин С.В. (2003) *Процессы рафинирования в вакууме и оптимизация режимов электронно-лучевой плавки высококреакционных и тугоплавких металлов*: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона.
7. Лесной А.Б., Демченко В.Ф. (2003) Моделирование гидродинамики и массообмена при электронно-лучевом переплаве титановых слитков. *Современная электрометаллургия*, **3**, 19–24.
8. Жук Г.В. (2008) Моделирование процессов переноса тепла при формировании слитков ЭЛПЕ. *Там же*, **4**, 14–17.
9. Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.А. и др. (2016) Особенности выплавки слитков титанового сплава BT19

в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью. *Там же*, **2**, 23–27.

10. Ахонин С.В., Березос В.О., Бондар О.І. та ін. (2021) Математичне моделювання гідродинамічних та теплових процесів при кристалізації титанових зливків ЕПП. *Сучасна електрометалургія*, **1**, 17–24. <https://doi.org/10.37434/sem2021.01.02>

References

1. Kablov, E.N. (2012) Strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period up to 2030. *Aviats. Materialy i Tekhnologii*, **5**, 7–17 [in Russian].
2. Khorev, A.I., (2000) Titanium alloys for aerospace engineering and prospect of their development. In: Promising aluminum and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviats. Materialy i Tekhnologii*, 11–32 [in Russian].
3. Molyar, A.G., Kotsyuba, A.A., Bychkov, A.S. et al. (2015) *Structural materials in aircraft construction*. Kiev, KVITs [in Russian].
4. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
5. Paton, B.E., Akhonin, S.V., Berezos, V.A. (2018) Development of technologies of electron beam melting of metals at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. *Suchasna Elektrometal.*, **4**, 19–35 [in Ukrainian]. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2018.04.01>
6. Akhonin, S.V. (2003) *Processes of refinement in vacuum and optimization of modes of electron beam melting of high-reactive and refractory metals*: Syn. of Thesis for Dr. of Tech. Sci. Degree. Kiev, PWI [in Russian].
7. Lesnoj, A.B., Demchenko, V.F. (2003) Modeling of hydrodynamics and mass exchange in electron beam remelting of titanium alloys. *Advances in Electrometallurgy*, **3**, 17–21.
8. Zhuk, G.V., Trigub, N.P., Fesan, A.A. (2008) Energy characteristics of EBCHM process of titanium alloys. *Ibid.*, **4**, 13–15.
9. 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. Elektrometall.*, **2**, 23–27 [in Russian].
10. Akhonin, S.V., Berezos, V.A., Bondar O.I. et al. (2021) Mathematical modeling of hydrodynamic and thermal processes at crystallization of titanium ingots produced by EBM. *Suchasna Elektrometal.*, **1**, 17–24 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37434/sem2021.01.02>

PRODUCTION OF INGOTS FROM HIGH-STRENGTH STRUCTURAL TITANIUM-BASE ALLOYS BY ELECTRON BEAM MELTING

V.O. Berezos

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

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

Mathematical modeling methods were used to study the thermal condition of titanium alloy ingots at electron beam melting, taking into account the hydrodynamic flows and processes of chemical element evaporation during electron beam melting of high-strength structural titanium alloys. Proceeding from calculations conducted within the scope of the mathematical models, technological modes were determined and technology was developed for electron beam melting of high-strength titanium alloy ingots, ensuring the high quality of the produced metal. Work to produce the semi-finished products was performed, and the high quality of titanium alloys, obtained by the developed electron beam melting technology, was demonstrated. Ref. 10, Tabl. 5, Fig. 6.

Key words: electron beam melting; cold hearth; ingot; high-strength titanium alloy; mathematical model; crystallization; evaporation; alloying components; chemical composition; structure; deformation treatment; heat treatment; mechanical properties

Надійшла до редакції 10.11.2021