

ВПЛИВ ЧАСУ ІСНУВАННЯ РОЗПЛАВЛЕНОЇ ВАННИ ПРИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ ПРОЦЕСАХ НА ВИПАРОВУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ З ВИСОКОЮ ПРУЖНІСТЮ ПАРУ

Н.В. Піскун, Е.Л. Вржижевський, В.А. Костін, Т.Г. Таранова, І.Л. Богайчук, І.І. Статкевич

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

В роботі досліджено інтерметалідний сплав Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %), що був розроблений і виплавлений в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Досліджено процеси випаровування елементів з високою пружністю пара, таких як алюміній та хром для двох електронно-променевих процесів: плавлення та зварювання. Експериментально доведено і підтверджено дослідженнями, що використання спрямованої кристалізації методом електронно-променевої плавки, який відбувається в умовах глибокого вакууму, не дозволяє забезпечити рівномірність структури за довжиною зливка, що пов'язано з випаровуванням елементів з високою пружністю пара, таких як алюміній і хром. Встановлено, що при електронно-променевому зварюванні зразків інтерметалідного сплаву Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %) з'являлися тріщини, але, як доведено рентгеноспектральними дослідженнями, при цьому випаровування елементів не відбувається. Проведено порівняння параметрів цих двох процесів та показано, що на рівень випаровування елементів з високою пружністю пару при електронно-променевих процесах впливає час перебування матеріалу в рідкому стані та розміри розплавленої зони. Бібліогр. 17, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: інтерметалідний сплав системи TiAl, електронно-променева плавка, електронно-променеве зварювання, випаровування, елементи з високою пружністю пару, розплавлена зона, час кристалізації

Вступ. Відомо, що жароміцні інтерметалідні сплави мають високу міцність, жароміцність, повзучість та корозійну стійкість при високих температурах [1]. Через низьку щільність і питому міцність інтерметаліди на основі γ -TiAl є привабливими для застосування в газотурбінних двигунах [2]. Завдяки своїм унікальним властивостям вони також є перспективними для застосування в різних інших галузях промисловості. Наприклад, виготовлення лопатей турбіни низького тиску з цих сплавів дозволяє заощадити 180 кг на кожному двигуні в порівнянні з традиційними матеріалами [3]. Це, в свою чергу, дозволяє знизити вартість виробів аерокосмічної промисловості, що є дуже важливим.

Однак низька пластичність при кімнатній температурі і пов'язана з цим низька технологічність ускладнює, а в ряді випадків виключає можливість виготовлення напівфабрикатів і виробів з цих матеріалів. Широке використання алюмінідів титану в конструкціях різного призначення значною мірою залежить від створення ефективних способів їх отримання та наступних процесів їх механічної та механікотермічної обробки.

Оскільки використання алюмінідів титану TiAl є перспективним для широкого застосування його в конструкціях турбін авіаційних двигунів, деталей автомобільної промисловості і деяких інших

галузях [4], то впровадження інтерметалідних сплавів значною мірою залежить від розробки технологій їх з'єднання. В деталях і вузлах газотурбінних двигунів можливе використання зварювання з метою спрощення їх виготовлення. Найбільш придатним способом отримання з'єднання інтерметаліду є електронно-променеве зварювання [5], яке дозволяє зварювати вироби різних геометричних форм і виконувати шви різної протяжності. Крім того, в порівнянні з іншими видами зварювання плавленням має переваги: по-перше, оскільки воно проводиться у високому вакуумі, то повністю забезпечує захист такого активного матеріалу, яким є титан; по-друге, при електронно-променевому зварюванні формується вузький шов і дуже незначна зона термічного впливу, що, в свою чергу, повинно призводити до мінімальних деформацій зварювального з'єднання.

Тому відпрацювання та оптимізація технології зварювання, створення нових підходів до процесу зварювання з метою отримання бездефектних з'єднань вельми актуальна.

Основною проблемою при використанні електронно-променевих процесів для виробництва та обробки титанових сплавів є випаровування у вакуумі елементів з високою пружністю пари [6, 7]. До таких елементів відносяться, в першу чергу, алюміній та хром. Оскільки алюміній є одним

Піскун Н.В. – <https://orcid.org/0000-0003-1459-2310>, Вржижевський Е.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-8651-8510>,
Костін В.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>, Таранова Т.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-2656-4693>,
Статкевич І.І. – <https://orcid.org/0000-0001-9403-2123>

© Н.В. Піскун, Е.Л. Вржижевський, В.А. Костін, Т.Г. Таранова, І.Л. Богайчук, І.І. Статкевич, 2022

Хімічний склад дослідного сплаву

Сплав	Ti	Al	Nb	Cr	Zr
мас. %	52,82	28,8	11,72	3,51	3,16
ат. %	45,92	44,54	5,26	2,82	1,46

з основних елементів сплаву, його випаровування впливає на структуру і, відповідно, на механічні властивості сплаву.

Метою роботи є дослідження впливу режимів електронно-променевої зонної плавки та електронно-променевого зварювання інтерметалідного сплаву Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %) на процеси випаровування легуючих елементів, формування мікроструктури та властивості.

Матеріал та методика досліджень. В роботі досліджувався інтерметалідний сплав складу: Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %) (таблиця), який був розроблений і виплавлений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України [8].

Зразки для дослідження було отримано після електронно-променевої безтигельної зонної плавки (рис. 1) та після електронно-променевого зварювання (рис. 2).

Литі інтерметалідні сплави системи TiAl при кімнатній температурі є малопластичними матеріалами і при випробуванні їх на одновісьовий розтяг крихке руйнування зразка настає відразу в пружній області після розтягування.

Відомо, що перед використанням литого інтерметаліду для усунення зазначених дефектів його необхідно піддавати газостатичному ізотермічному пресуванню (ГПП), багатогодинній термічній обробці або прокатці [9]. Одним із способів поліпшення структури і підвищення механічних характеристик інтерметаліда є спрямована кристалізація.

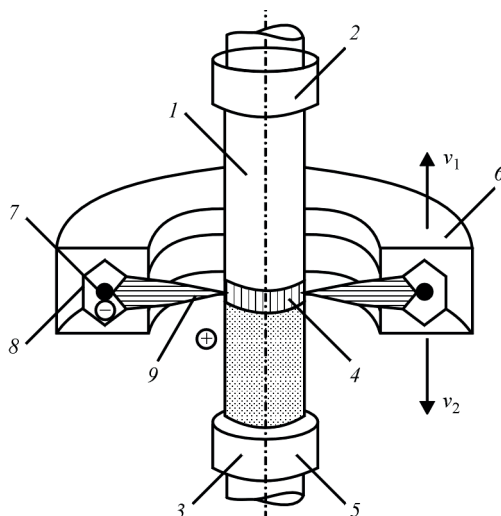


Рис. 1. Схема методу безтигельної електронно-променевої зонної плавки: 1 – зразок, що переплавляється; 2 – верхній утримувач; 3 – нижній утримувач; 4 – розплавлена зона; 5 – переплавлена ділянка; 6 – електронно-променевий нагрівач; 7 – катод; 8 – фокусуєчий пристрій; 9 – електронний пучок

Для проведення досліджень нами був застосований метод безтигельної електронно-променевої зонної плавки (рис. 1).

Використання методу безтигельної електронно-променевої зонної плавки на наш погляд є досить перспективним для зазначених цілей, тому що він має ряд відмінних особливостей:

- висока термічна ефективність (ККД процесу досягає 90 %), у зв'язку із цим невелика споживана потужність;

- зазначений метод дозволяє легко регулювати і утримувати задану довжину розплавленої зони, що є істотним при розробці як наукових основ, так і практичної реалізації процесу;

- обробка матеріалів може здійснюватися в широкому діапазоні температур – 250...2200 °С, що дозволяє переплавити інтерметалідний сплав, який має температуру плавлення 1460 °С;

- даний метод дозволяє легко керувати променем при його безпосередньому впливі на зразок. Скануючи промінь уздовж розплавленої зони з певною частотою і амплітудою, можна, відповідно, змінювати температурний градієнт зразків у процесі плавки.

Відзначимо також, що після спрямованої перекристалізації не потрібна ГПП-обробка, тому що в отриманих зливках відсутні мікрodefekти – несущільності, мікротріщини та інше; відсутня пористість, тому що усадка йде направлено на фронті кристалізації, а не в об'ємі зливка. Вона дозволяє забезпечувати її рівномірність структури за довжиною зливка. Крім того, умовами процесу забезпечується чистота матеріалу, який виплавляється (немає взаємодії з матеріалом тигля).

Як вказувалося вище, для подальшого використання цього сплаву в промисловості була розроблена технологія електронно-променевого зварювання (ЕПЗ) інтерметаліду наступного номінального складу Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %) – того ж сплаву, який намагалися обробляти методом електронно-променевої плавки.

Експерименти зі зварювання електронним променем інтерметаліду проводилися в зварювальній камері установки УЛ-144 по схемі, яка представлена на рис. 2.

Електронно-променеве зварювання проводили без підігріву на наступному режимі: $U_{\text{приск.}} = 60$ кВ; $I_{\text{п}} = 35$ мА; $v_{\text{зв}} = 7$ мм/с; $P = 5 \cdot 10^{-3}$ Па.

При отриманні зварних з'єднань інтерметалідів системи TiAl методом ЕПЗ істотним їх недоліком є можливість формування холодних тріщин, що виникають при температурах нижче 700 °С.

Результати досліджень. Електронно-променево-безтигельна зонна плавка. При проведенні технологічних експериментів по електронно-променево-безтигельній плавці інтерметаліду системи

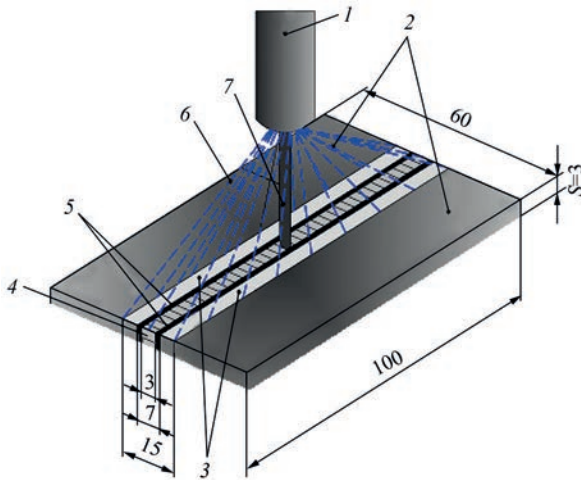


Рис. 2. Схема процесу електронно-променевого зварювання пластин інтерметалідного сплаву $Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr$ (ат. %) в зварювальній камері установки УЛ-144: 1 – електронно-променева гармата; 2 – основний матеріал; 3 – зона локальної термічної обробки; 4 – зварний шов; 5 – зона термічного впливу; 6 – розгорнутий пучок електронів; 7 – електронний зварювальний пучок

$TiAl$ відбувалося сильне випаровування з розплавленої зони і ділянок твердої поверхні, що нагріваються. На жаль, елементи, що випаровувалися, осідали на вузлах електронно-променевого нагрівача, у тому числі і на такому важливому вузлі, як танталова спіраль, що імітує електрони; шибках ілюмінатора; стінках камери; арматури, що привело до неможливості закінчення процесу.

Мікрорентгеноспектральними дослідженнями встановлено, що в процесі електронно-променевої плавки інтерметаліду системи $Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr$ (ат. %) відбувається сильне випаровування алюмінію – одного з основних складових сплаву, який має високу пружність пари. Це відбувається з розплавленої зони і ділянок твердої поверхні, що нагріваються. Крім цього, досить інтенсивно випаровується також хром, що входить до складу алюмініду титану як легуючий елемент. Дослідження хімічного складу алюмініду титану, підданого перекристалізації при безтигельній електронно-променевої плавці, показали, що з матеріалу випаровується до 20 % алюмінію і до 18 % хрому.

Дослідження структури злиwkів алюмініду титану, отриманих за допомогою електронно-променевої безтигельної зонної плавки (рис. 3) показали, що структура містить ділянки двох типів: світло- та темнотравлених великих рівновісних зерен (рис. 3, а).

Дослідження мікроструктури зливка показало наявність ділянок зразка, на якій колонії ламелей γ -фази розташовані в різних напрямках (рис. 3, б). На рис. 3, в представлена макроструктура поперечного перерізу зразка. Спостерігаються дрібні пори, від яких поширюються мікротріщини в центральну частину зразка, що викликано, очевидно, інтенсивним випаровуванням алюмінію. На протилежному краю поперечного перерізу зразка

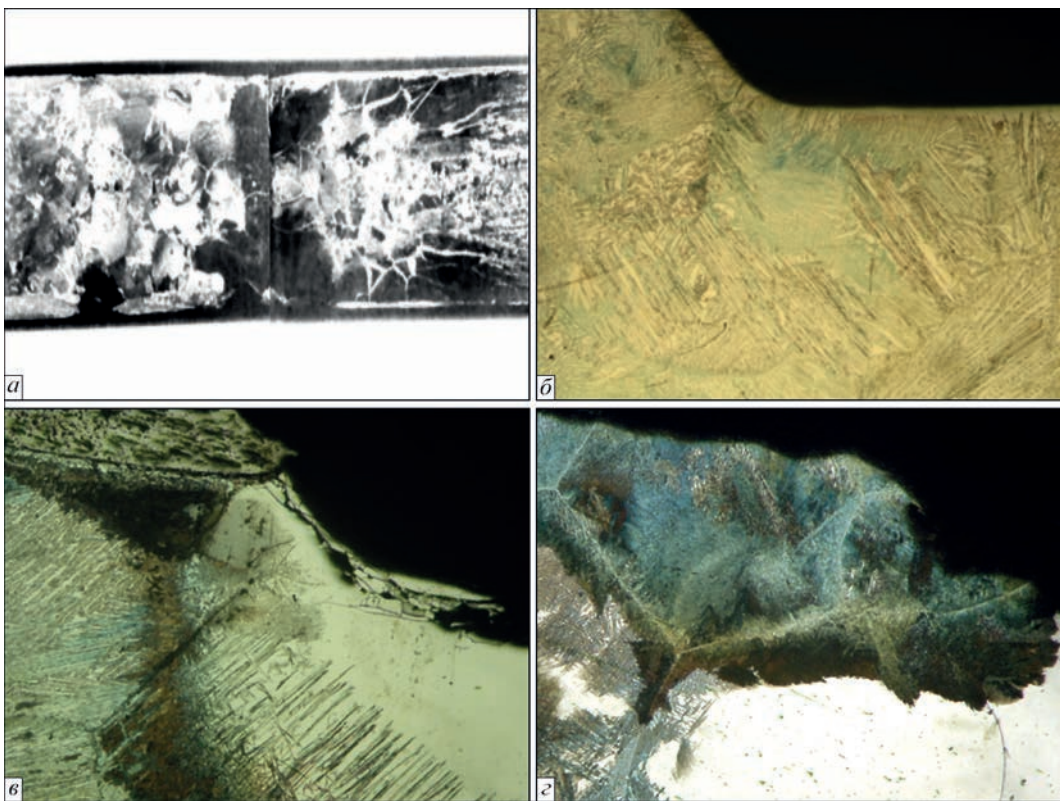


Рис. 3. Структура злиwkів алюмініду титану, отриманих за допомогою електронно-променевої безтигельної зонної плавки: а – макроструктура досліджених зразків; б – ділянка зразка, на якій видно колонії ламелей γ -фази, розташованих в різних напрямках; в, г – макро- та мікроструктура поперечного перерізу зразка після зонного переплаву

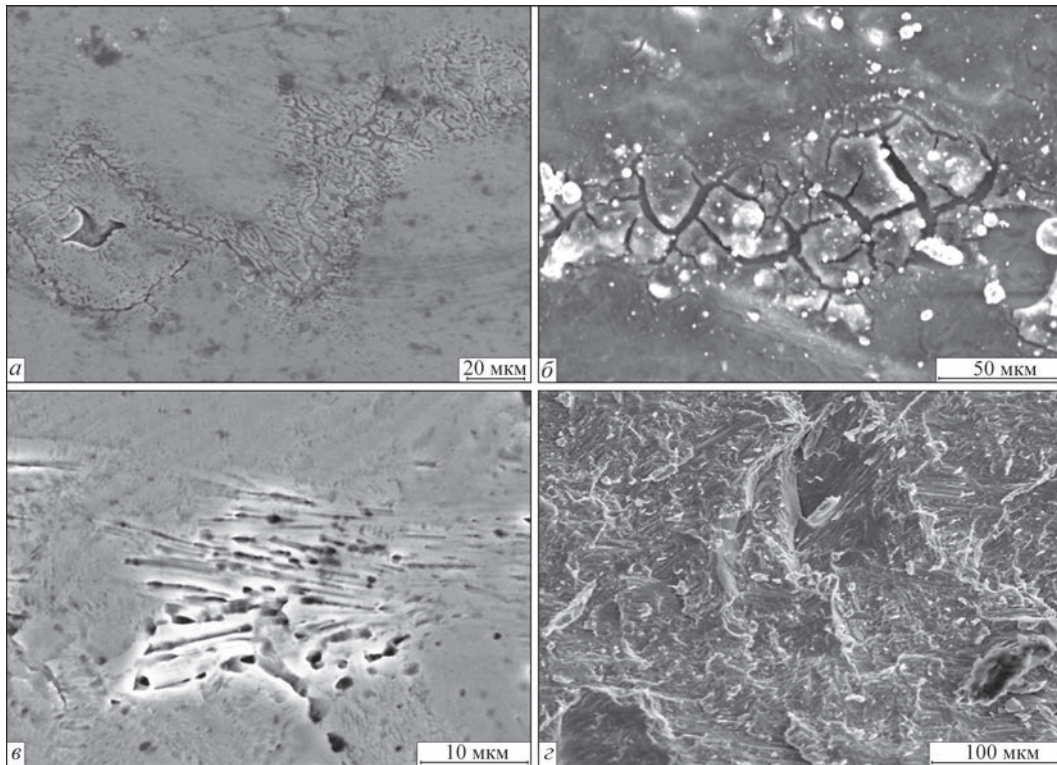


Рис. 4. Фрактографічні дослідження зразків інтерметалідного сплаву $\text{Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr}$ (ат. %) після електронно-променевої зонної плавки: *a-в* – ділянки дна пори інтерметаліду; *г* – поверхня зламу дна пори інтерметаліду

(рис. 3, *г*) розташовані ділянки крупних зерен, що складаються з суміші $\gamma+\alpha_2$ -фази.

Мікрорентгеноспектральний аналіз дна пори, проведений на електронному растровому мікроскопі JSM-840, показав, що вище зроблені припущення були вірні (рис. 4). Фрактографічні дослідження зразків інтерметалідного сплаву $\text{Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr}$ (ат. %) після електронно-променевої зонної плавки показали наявність великої кількості пор (рис. 4, *в*).

Дослідження показали, що на границях пори вміст алюмінію падає до 18...20 ат. % у порівнянні з 46...47 ат. % у матриці. На дні пор виявлені ділянки плівки з підвищеним вмістом алюмінію. У деяких точках вміст алюмінію доходив до 59 ат. %. Можливо, у цих місцях відбулося утворення оксидів алюмінію (рис. 4, *б*). При детальному дослідженні зламів знайдено ділянки у вигляді мікроскопічних часток. Як показав рентгеноспектральний аналіз, вміст хрому в цих виділеннях доходив до 18 %. Для порівняння – у сплаві вміст хрому 3 %.

Електронно-променеве зварювання інтерметалідного сплаву. Дослідження зварних стиків після електронно-променевого зварювання (ЕПЗ) показало, що у зварному шві спостерігаються поперечні холодні тріщини (рис. 5, *a*), які проходять через зварне з'єднання і закінчуються з двох сторін зразка на основному матеріалі. Необхідно відзначити неоднорідність структури металу шва у вигляді колоній ($\gamma+\alpha_2$)-фази, які розташовані

уздовж зони сплавлення і мають мікротвердість 5110...5270 МПа. У цій області виявлені численні тріщини протяжністю від 100 до 300 мкм, розташовані паралельно лінії сплавлення (рис. 5, *б*).

Як було встановлено вище, якщо при електронно-променевої плавці відбувається значне випаровування алюмінію (до 20 %) і хрому (до 18 %), а при електронно-променевому зварюванні з'яв-

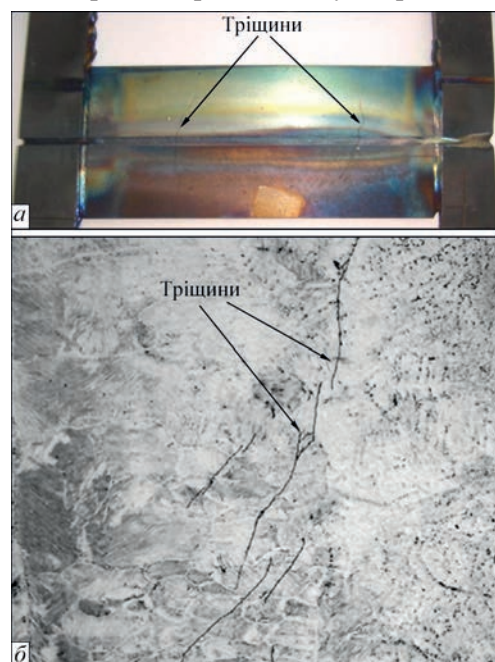


Рис. 5. Зразок зварного з'єднання інтерметалідного сплаву $\text{Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr}$ (ат. %), одержаний електронно-променевим зварюванням: *a* – загальний вигляд; *б* – мікроструктура ($\times 200$) металу шва

ляються тріщини, то встала потреба визначити причини утворення холодних тріщин. Можливо це пов'язано з проблемою випаровування елементів при електронно-променевому зварюванні, яке призводить до зміни складу алюмінію або хрому.

З метою визначення можливого випаровування елементів сплаву у процесі електронно-променевого зварювання був проведений кількісний рентгеноспектральний аналіз зварного з'єднання інтерметаліду, одержаного методом ЕПЗ.

Результати кількісного аналізу елементів зварного з'єднання інтерметаліду Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %) представлено на рис. 6.

Дослідження випару елементів у процесі зварювання практично не спостерігається. Розбіжність за елементним складом відбувається у алюмінії на 2,2 % і хромі на 1 %. При цьому відбувається перерозподіл складових елементів у зварному шві і титані приблизно на 2,5 % більше, ніж у вихідному стані. Хром і алюміній – це елементи з високою пружністю пару, а алюміній, крім того, має низьку температуру кипіння і встигає частково випаритися у процесі зварювання.

На поверхні зварного з'єднання інтерметаліду системи Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %), виконаного ЕПЗ, спостерігаються паралельні утворення як в основному металі, так і в металі шва (рис. 7, а).

Товщина цих фаз становить 1,36...2,5 мкм. Розтріскування на цих фазах не спостерігається. Кількісний аналіз фаз показав, що вони збагачені титаном (рис. 7, б).

Обговорення. Порівняння режимів процесу електронно-променевої плавки і електронно-променевого зварювання сплаву Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr. Таким чином, за даними хімічного аналізу і структурних досліджень, а також на основі детального вивчення літературних джерел, які присвячені темі випаровування елементів з високою пружністю пара при електронно-променевих процесах [6, 7], був зроблений висновок, що методом безтигельної електронно-променевої плавки не вдається одержати якісні зливки. У зв'язку з зазначеним вище, було прийнято рішення застосувати для зонної плавки інтерметаліду індукційний нагрів в середовищі аргону, який дозволив вирішити всі проблеми з випаровуванням елементів і отримати високоякісні зливки [10, 11].

Як показали результати попередніх досліджень, основним джерелом виникнення тріщин є низька пластичність інтерметаліду при кімнатних температурах (температура в'язко-крихкого переходу становить 700 °C) і неможливість чинити опір появі тріщин у результаті формування зварувальних напружень.

Для запобігання виникнення холодних тріщин в зварних з'єднаннях зразків алюмініду титану і формування якісного шва необхідно було проводити попередній підігрів зразків [12, 13] і наступну локальну термообробку електронним променем, розгорнутим в одну та іншу сторону. Чисельно показано і підтверджено експериментально, що використання розподіленого джерела попереднього нагріву зразка перед зварюванням дозволяє реалізувати сприятливі умови під час зварювання і при подальшому охолодженні, а саме, знизити на 30 % величину розтягуючих напруг. Крім того, при застосуванні цієї технології відбувається фазова трансформація, завдяки якій в структурі з'являється додаткова β-(B2)-фаза, що представляє собою впорядковану фазу на основі Ti. Вона розташову-

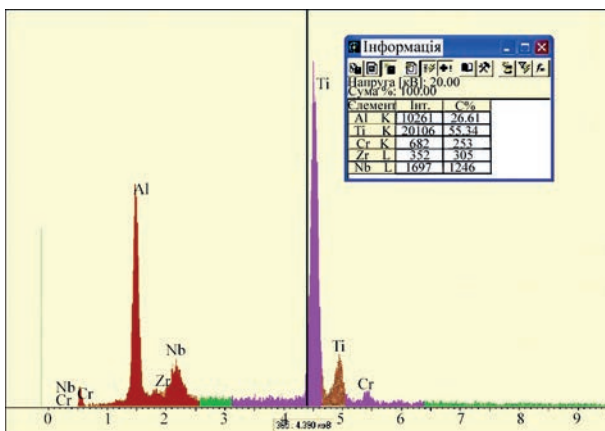


Рис. 6. Кількісний аналіз зони зварного з'єднання інтерметаліду системи Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %)

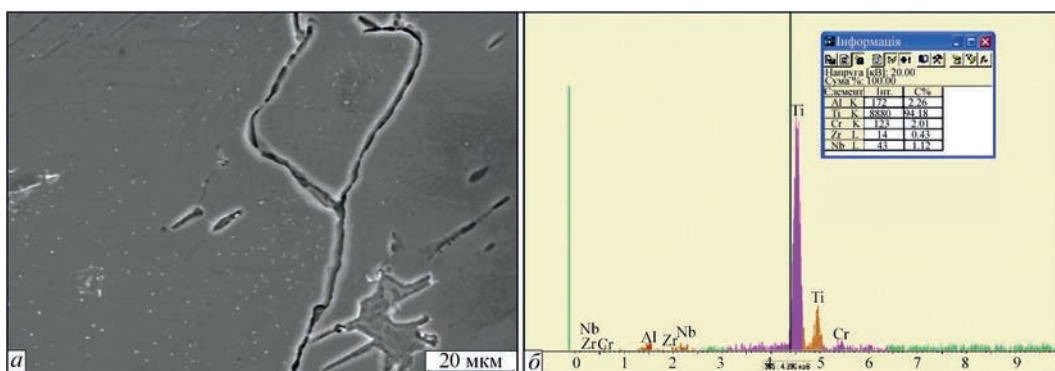


Рис. 7. Фази, що утворюються при ЕПЗ інтерметаліду системи Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %) у металі шва: а – мікроструктура; б – спектральний аналіз фаз

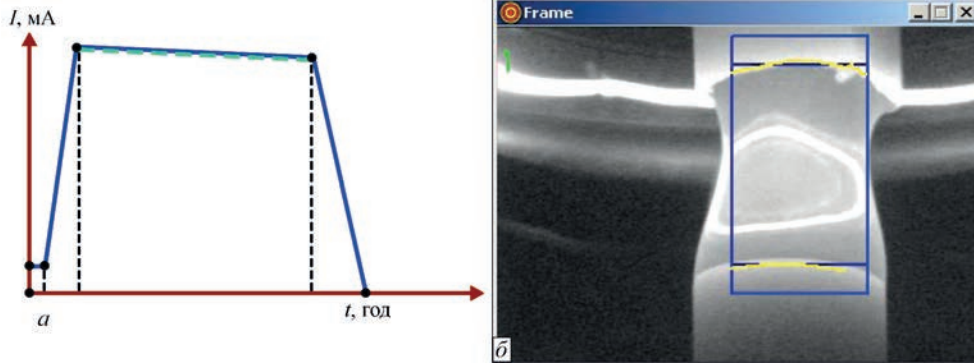


Рис. 8. Характеристики процесу електронно-променевої плавки: *a* – термічний цикл процесу зонної плавки інтерметаліду; *б* – розмір розплавленої зони в процесі зонної плавки становить 10 мм

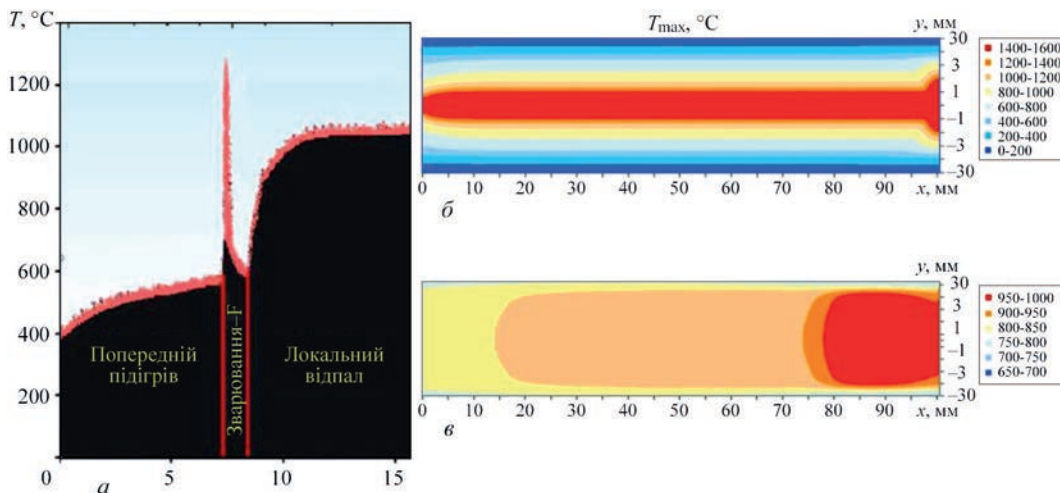


Рис. 9. Характеристики процесу електронно-променевого зварювання: *a* – термічний цикл процесу ЕПЗ зварювання інтерметаліду; *б* – розрахунок розподілу температур в зварному шві інтерметаліду товщиною 3 мм в процесі ЕПЗ; *в* – розрахунок розподілу температур у зварному шві інтерметаліду через 1 с після закінчення процесу зварювання

ється на границях колоній і блокує зародження і поширення тріщин в α_2 -фазі внаслідок зниження напруги. Утворення в зварному шві сприятливої трикомпонентної структури: γ -фази, $(\gamma+\alpha_2)$ -фази і β -фази сприяє збільшенню його міцності і пластичності [14, 15].

Для відповіді на запитання, чому при двох електронно-променевих процесах у вакуумі одного і того ж сплаву абсолютно різна поведінка елементів з високою пружністю пари було проведено співставлення основних характеристик цих процесів. На рис. 8, 9 представлено характеристики процесу електронно-променевої плавки та електронно-променевого зварювання.

Як видно з рис. 7 при електронно-променевої плавці зі швидкістю 50 мм/год тривалість перебування матеріалу в рідкому стані становить 720 с. При малій товщині зварюваного матеріалу можна прийняти, що геометричні розміри зварювальної ванни при дуговому і електронно-променевого зварюванні приблизно рівні [16].

Для оцінки часу середньої тривалості перебування металу в рідкому стані при електронно-променевого зварюванні використовували формули, наведені в [17], а розміри зварювальної ванни, які

завичай прийняті для дугового зварювання титану товщиною 3 мм. Розрахунками встановлено, що зварювальна ванна при електронно-променевого зварюванні перебуває в рідкому стані приблизно 0,7 с, що більш, як у 700 разів менше, ніж при електронно-променевої плавці.

Крім того, ширина розплавленої зони, яка кристалізується при електронно-променевої плавці, складає 10 мм (рис. 7, б), що значно більше ніж в процесі електронно-променевого зварювання, при якому ширина зварного шва з зоною термічного впливу становить не більш 3 мм. А вже через секунду після закінчення процесу зварювання (рис. 9, в) температура в зварному шві падає на 500 °С.

Висновки

Встановлено, що в процесі електронно-променевої плавки інтерметалідного сплаву $\text{Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr}$ відбувається сильний випар елементів, які мають високу пружність пару: алюмінію до 20 % та хрому до 18 %. Оскільки алюміній це один з основних складових елементів сплаву, то його випар впливає на структуру. При електронно-променевого зварюванні такого явища не спостерігається.

При порівнянні термоциклів двох електронно-променевих процесів виявилось, що тривалість перебування матеріалу в рідкому стані при електронно-променевій плавці становить 720 с, ширина розплавленої зони при цьому складає 10 мм, а при електронно-променевому зварюванні зварювальна ванна, яка кристалізується за 0,7 с має розміри приблизно 2 мм.

Таким чином, рівень випаровування елементів з високою пружністю пара при електронно-променевих процесах залежить від часу перебування матеріалу в рідкому стані та розмірів розплавленої зони.

Список літератури/References

- Schwaighofer, E., Clemens, H., Mayer, S., et al. (2014) Microstructural design and mechanical properties of a cast and heat-treated intermetallic multi-phase γ -TiAl based alloy. *Intermetallics*, 44, 128–140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.09.010>
- Bewlay, B.P., Nag, S., Suzuki, A., Weimer, M.J. (2016) TiAl alloys in commercial aircraft engines. *Materials at High Temperatures*, 33, 549–559. DOI: <https://doi.org/10.1080/09603409.2016.1183068>
- Clemens, H., Mayer, S. (2016) Intermetallic titanium aluminides in aerospace applications processing, microstructure and properties. *Mater. High Temp.*, 33, 560–570. DOI: <https://doi.org/10.1080/09603409.2016.1163792>
- Kablov, E.N., Lukin, V.I. (2008) Intermetallic based on titanium and nickel for advanced engineering product. *The Paton Welding J.*, 11, 65–71.
- (2013) Welding of titanium aluminide alloys (Review). *Ibid*, 8, 25–30.
- Варич І.Ю., Ахонин С.В., Тригуб Н.П. и др. (1997) Испарение алюминия из сплавов на основе титана в процессе электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. *Проблемы специальной электротехнологии*, 4, 15–21. Varich, I.Yu., Akhonin, S.V., Trigub, N.P. et al. (1997) Evaporation of aluminium from titanium-based alloys during cold-hearth electron beam melting. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, 4, 15–21 [in Russian].
- Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В. и др. (2006). *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V. et al. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
- Zhuk, G.V., Trigub, N.P., Zamkov, V.N. (2003) Producing of titanium gamma-aluminide ingots using EB'HM method. *Special Electrometallurgy*, 4, 19–21.
- Имаев В.М., Имаев Р.М., Хисматуллин Т.Г. (2008) Механические свойства литого интерметаллического сплава Ti–43Al–7(Nb,Mo)–0.2B (at. %) после термической обработки. *Физика металлов и металловедение*, 105, 5, 516–522. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0031918X08050098>
- Имаев, В.М., Имаев, Р.М., Хисматуллин, Т.Г. (2008) Mechanical properties of intermetallic alloy Ti–43Al–7(Nb,Mo)–0.2B (at. %) after heat treatment. *Fizika Metallov i Metallovedenie*, 105(5), 516–522.
- Kartavykh, A.V., Asnis, E.A., Piskun, N.V. et al. (2015) Microstructure and mechanical properties control of c-TiAl(Nb,Cr,Zr) intermetallic alloy by induction float zone processing. *Journal of Alloy and Compounds*, 643, 182–166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.210>
- Kartavykh, A.V., Asnis, E.A., Piskun, N.V. et al. (2017) Room-temperature tensile properties of float-zone processed β -stabilized γ -TiAl(Nb,Cr,Zr) intermetallic. *Journal Materials Letters*, 188, 88–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.10.103>
- Young-Won, Kim, Wilfried, Smarsly, Junpin, Lin et al. (2014) Electron beam joining of γ -titanium aluminide. Gamma Titanium Aluminide Alloys 2014. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 99–103.
- Vrzhizhevskiy, E.L., Piskun, N.V., Taranova, T.G. et al. (2019) Prevention of gold cracks formation during electron-beam welding of alloy based on TiAl system intermetallic compound. *Tekhnologicheskie Sistemy*, 1(86), 43–49. DOI: <https://doi.org/10.29010/86.6>
- Bin, Tang, Xian, Sheng Qi, Hong, Chao Kou et al. (2016) Recrystallization Behavior at Diffusion Bonding Interface of High Nb Containing TiAl Alloy. *Advanced Engineering Materials*, 18, 4, 657–664. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.201500457>
- Yang, K.L., Huang, J.C., Wang, Y.N. (2013) Phase transformation in the β -phase of super a2 Ti3Al base alloys during static annealing and super plastic deformation at 700...1000 °C. *Acta Mater.*, 51, 2577–2594. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00057-0](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00057-0)
- Патон Б.Е. (1987) *Электронно-лучевая сварка*. Киев, Наукова думка. Paton, B.E. (1987) *Electron beam welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
- Петров Г.Л., Тумарев А.С. (1977) *Теория сварочных процессов*. Уч. для вузов. Изд. 2-е. Москва, Высш. шк. Petrov, G.L., Tumarev, A.S. (1977) *Theory of welding processes: Manual for higher educ. inst.*, 2nd Ed. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].

INFLUENCE OF TIME OF EXISTENCE OF MOLTEN POOL IN ELECTRON RADIATION PROCESSES ON THE LEVEL OF EVAPORATION OF ELEMENTS WITH A HIGH VAPOR TENSION

N.V. Piskun, E.L. Vrzhizhevsky, V.A. Kostin, T.G. Taranova, I.L. Bogaichuk, I.I. Statkevich

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

The intermetallic Ti – 44Al – 5Nb – 3Cr – 1.5Zr alloy (at.%), developed and smelted at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, was studied. The processes of evaporation of elements with a high vapor tension, such as aluminum and chromium for two electron beam processes: melting and welding were studied. It was experimentally proven and confirmed by investigations that the use of directional crystallization by electron beam melting, which takes place in deep vacuum conditions, does not allow providing uniformity of structure along the length of the ingot, which is associated with evaporation of elements with a high vapor tension, such as aluminum and chromium. It was found that during electron beam welding of samples of intermetallic Ti – 44Al – 5Nb – 3Cr – 1.5Zr alloy (at.%), cracks appeared, but, as was proved by X-ray spectral studies, evaporation of elements does not occur. The parameters of these two processes were compared and it is shown that the level of evaporation of elements with a high vapor tension in electron beam processes is influenced by the time of existence of the material in a liquid state and the size of the molten zone. 17 Ref., 1 Tabl., 9 Fig.

Keywords: intermetallic alloy of TiAl system, electron beam melting, electron beam welding, evaporation, elements with a high vapor tension, molten zone, crystallization time

Надійшла до редакції 25.10.2021