

# ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВЕ ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОЛИСТОВОГО ІНТЕРМЕТАЛІДНОГО СПЛАВУ З КОНТРОЛЬОВАНОЮ ШВИДКІСТЮ ОХОЛОДЖЕННЯ

Е.Л. Вржижевський, Н.В. Піскун, О.А. Великоіваненко, І.І. Статкевич, Т.Г. Таранова

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [oleh.makhnenko@gmail.com](mailto:oleh.makhnenko@gmail.com)

Метою даної роботи є створення і випробування елементів технологічного процесу електронно-променевого зварювання (ЕПЗ) інтерметалідних сплавів системи TiAl, який дозволяє за один прохід в одній камері виконувати зварювання, попередній підігрів та наступну локальну термічну обробку зварних з'єднань, що, завдяки контрольованій швидкості охолодження, дозволяє уникнути появи дефектів типу холодних тріщин. В роботі обґрунтовано, чому саме ЕПЗ більш придатне для зварювання інтерметалідних сплавів на основі титану. Запропонований та детально описаний метод зварювання, який здійснюється у всьому положенні при консольному закріпленні зразків у спеціальному пристрої, при цьому термообробка відбувається відразу після закінчення процесу зварювання, забезпечуючи оптимальну швидкість охолодження зварного з'єднання. Встановлено, що утворення холодних тріщин в зварних з'єднаннях інтерметалідів пов'язано з низькою пластичністю матеріалу в стані після зварювання. Для чисельного прогнозування кінетики температурного поля і розрахунків напруженого стану була розроблена математична модель, на підставі якої проведений обчислювальний експеримент і визначені теплові умови, що призводять до тріщиноутворення у процесі ЕПЗ. Показано, що найбільший рівень залишкових напружень формується безпосередньо після закінчення процесу зварювання, дорівнює 350 МПа і спостерігається у центрі шва. Для запобігання виникнення холодних тріщин в зварних з'єднаннях зразків алюмініду титану запропонований технологічний прийом, що об'єднує ЕПЗ інтерметаліду Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %) з попереднім підігрівом та наступною локальною термообробкою (ЛТО). 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 величину розтягуючих напружень. Детально описано, яким чином здійснюється процес та його вплив на напружений стан і структуру одержаних зварних з'єднань. В роботі наведено режими ЕПЗ тонколистового інтерметалідного сплаву з контрольованою швидкістю охолодження та результати структурних і механічних досліджень зварних з'єднань, які отримані за запропонованою технологією. Бібліогр. 15, табл. 3, рис. 11.

*Ключові слова:* електронно-променево зварювання, інтерметаліди системи TiAl, тонколистові пластини, регульована швидкість охолодження, напружений стан, зварювання «на вазі», локальна термічна обробка.

**Вступ. Актуальність.** Огляд літератури показав, що останнім часом інтерметалідні сплави системи TiAl все більше знаходять застосування при виготовленні деталей і вузлів газотурбінних авіаційних двигунів, а також в інших галузях промисловості.

На даному етапі розвитку зварювальних технологій значне місце посідає питання зварювання тонколистового металу. Використання тонких металів в різного роду конструкціях дає можливість знизити масу і габарити зварних конструкцій і, тим самим, зменшити їх собівартість, особливо це відчутно при використанні інтерметалідних матеріалів на основі титану.

Інтерметалідні сплави системи TiAl [1] мають найбільш несприятливі характеристики для зварювання в тонколистових конструкціях. Це пов'язано з низькою пластичністю даного матеріалу при нормальній температурі, а також із значною хімічною активністю.

Інтерметалідні сплави системи TiAl, які мають малу питому вагу, високу жароміцність, тривалу міцність і повзучість в інтервалі температур 750...850 °C знаходять застосування при виготовленні деталей і вузлів газотурбінних авіаційних двигунів, а також в інших галузях промисловості [2].

Оскільки даний сплав системи TiAl є перспективним матеріалом для широкого застосування його в конструкціях турбін авіаційних двигунів, деталях автомобільної промисловості і деяких інших галузях [2], то він потребує методів з'єднання, які дозволяють зварювати вироби різних геометричних форм, виконувати шви різної протяжності, а також перервані шви. Найбільш придатним способом отримання з'єднання інтерметалідів, на наш погляд, є електронно-променево зварювання (ЕПЗ), яке 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,

Вржижевський Е.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-8651-8510>, Піскун Н.В. – <https://orcid.org/0000-0003-1459-2310>, Великоіваненко О.А. – <https://orcid.org/0009-0007-3704-2000>, Статкевич І.І. – <https://orcid.org/0000-0001-9403-2123>, 2023  
Таранова Т.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-2656-4693>

© Е.Л. Вржижевський, Н.В. Піскун, О.А. Великоіваненко, І.І. Статкевич, Т.Г. Таранова, 2023

при ЕПЗ формується вузький шов і дуже незначна зона термічного впливу, що, в свою чергу, повинно призводити до мінімальних деформацій зварювального з'єднання [3].

Однак істотним недоліком цих сплавів є холодні тріщини, які виникають при охолодженні зварного з'єднання при температурах нижче 700 °С, коли матеріал переходить з в'язкого в крихкий [2].

Низька пластичність зварного з'єднання в стані після зварювання при наростанні зварювальних напружень в процесі охолодження призводить до появи дефектів типу холодних тріщин. У зв'язку з цим, для одержання якісного зварного з'єднання та уникнення холодних тріщин необхідно знизити температурний градієнт і, відповідно, зварювальні напруги, що забезпечується уповільненою швидкістю охолодження.

Сучасні методи і технології зварювання тонколистового металу передбачають застосування тепловідводів, різного роду формуючих підкладок [1] чи іншого обладнання, яке б запобігало пропалюванню тонкого металу. Такий процес характеризується досить малими швидкостями зварювання. Це, в свою чергу, негативно впливає на продуктивність, матеріальні витрати на виробництво та, зрештою, на собівартість виробу.

Автори роботи [4] застосовують мідні підкладки, при цьому важливо забезпечити щільне їх прилягання до зварювальних кромок по всій довжині, тому що у місцях, де між підкладкою і кромкою залишаються зазори, процес зварювання супроводжується пропалюванням та просіданням зварного шва. При зварюванні тонколистових матеріалів важливим є саме концентрація тепла джерела нагрівання, що позитивно впливає не тільки на формування зварного шва, а й на зону термічного впливу.

Відомий спосіб регульованої швидкості охолодження зварних з'єднань інтерметаліда описаний в роботі [5], при якому зразок зварюють на керамічній пластині, яка уповільнює швидкість охолодження зварного з'єднання, що впливає на величину зварювальних напружень. Недоліком цього способу є те, що теплопровідність і, відповідно, швидкість охолодження зварного з'єднання визначається теплофізичними властивостями даної керамічної підкладки, при цьому швидкість охолодження практично не регулюється.

Тому розробка і відпрацювання технологічного процесу, при якому завдяки розподілу потужностей теплової дії електронного пучка є можливість керування електронним променем для створення заданого температурного поля при ЕПЗ з одночасними попереднім підігрівом і подальшою термообробкою пластини, що зварюється, вельми важлива.

**Матеріал та методика досліджень.** В роботі досліджувався інтерметалідний сплав на-

Таблиця 1. 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

ступного складу: Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr ат. %, який був розроблений і виплавлений в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України методом електронно-променевої плавки з проміжною ємністю (табл. 1) [6].

Зварювання електронним променем інтерметаліду проводилося в зварювальній камері установки УЛ-144 об'ємом 2,16 м<sup>3</sup> (1200×1200×1500 мм). Вона має енергоблок потужністю 60 кВт при прискорюючій напрузі 60 кВ і широкі можливості регулювання для виконання додаткових технологічних процесів. Схема процесу ЕПЗ показана на рис. 1.

Для зварювання інтерметаліду Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %) була проведена модернізація маніпулятора зварювальної камери УЛ-144. Модернізований герметичний ввід забезпечує зменшення опору при обертанні вала шляхом масляного «клинку». На маніпуляторі встановлені шагові двигуни FL 86STH156-6204B з програмним забезпеченням для переміщення гармати. Така модернізація дозволяє задавати та відтворювати задані траєкторії руху з точністю 0,1 мм. Крім того, встановлено додаткове обладнання, що забезпечує консольне закріплення зразка, який зварюється.

Програмне забезпечення ЕПЗ та локальної термообробки було здійснено за допомогою промислового комп'ютера Advantech 610.

Зразки для дослідження було отримано після ЕПЗ (рис. 1). Зварювали пластини розміром 100×30 мм і завтовшки 3мм зі сплаву Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %). Перед зварюванням пластини шліфувалися з усіх боків і збиралися встик без зазору.

Для уникнення депланації пластин в процесі зварювання з двох сторін встановлювалися і приварювалися поперек зразка ввідні і вивідні планки з титанового сплаву ВТ1-0. Довжина вивідних планок, які закріплювалися в спеціальному пристосуванні, становила 160 мм. Зварний шов

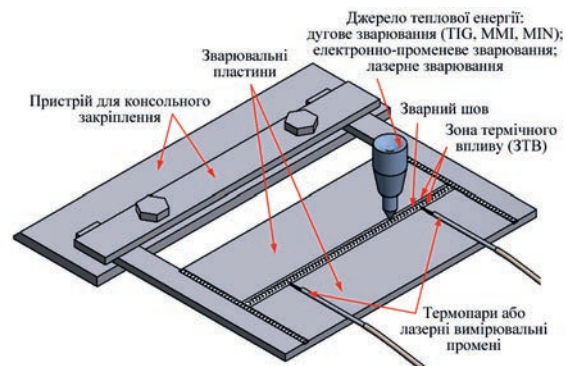


Рис. 1. Схема виконання процесу ЕПЗ

починався і закінчувався на ввідних і вивідних планках.

Мікроструктуру зливка виявляли в результаті травлення в розчині плавикової та азотної кислоти (1 частина плавикової (HF) і 3 частини азотної (HNO<sub>3</sub>)).

Твердість інтерметаліду вимірювалася на твердомірі «Лесо» при навантаженні 25 г.

Фактографічні дослідження проводили на скануючому електронному мікроскопі JSM-840, фірми JEOL (Японія), який забезпечений мікроаналізатором системи Link system 860/500 (Англія).

Оскільки розтріскування має місце не тільки на стадії охолодження, а й на стадії нагріву металу до початку процесу зварювання, необхідно створити технологію, яка дозволяє отримувати бездефектні зварювальні з'єднання. Експерименти по зварюванню і дослідженню зварних з'єднань інтерметалідного сплаву Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %) проводили на тонколистових зразках завтовшки 3 мм. Товщина зразків для відпрацювання режимів зварювання вибиралася виходячи з того, що товщини  $\delta = 3$  мм можуть бути використані для лопаток турбін високого і низького тиску.

ЕПЗ проводили без підігріву по схемі, яка вказана на рис. 1, на наступному режимі:

$$U_{\text{приск.}} = 60 \text{ кВ}; I_{\text{п}} = 35 \text{ мА}; V_{\text{зв}} = 7 \text{ мм/с}; P = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Па.}$$

Після проведення зварювання шов охолоджувався в камері до кімнатної температури.

З метою забезпечення рівномірного охолодження матеріалу зварювання виконується у вільному положенні зразка (на «вазі») [7]. Зварювання та термообробку здійснюють при консольному закріпленні зразків у спеціальному пристрої, при цьому термообробку проводять відразу після закінчення процесу зварювання, забезпечуючи швидкість охолодження не більше 70 °C/с. Такий метод дозволяє визначати форми температурного поля при зварюванні будь-яких зварних з'єднань з різних металів, характерною ознакою яких є те, що температурні поля визначають в умовах консольного закріплення без можливості відводу тепла за рахунок механічного контакту.

Формування зварного шва «на вазі» особливо важливо, тому що дозволяє уникнути значної кількості проблем, пов'язаних саме із зварюванням тонколистових матеріалів. При зварюванні стику у вільному положенні зразка без застосування формуючих пристроїв і підкладок досягаються кращі результати, тому що забезпечується двосторонній вихід газів і парів металу з каналу проплавлення, при якому полегшується газовиділення [8].

**Результати досліджень.** Візуальне дослідження зварних стиків показало, що у зварному шві спостерігаються поперечні холодні тріщини

(рис. 2, а), які проходять через зварне з'єднання і закінчуються з двох сторін зразка на основному матеріалі. Як вказано вище, основним джерелом виникнення тріщин є низька пластичність матеріалу при кімнатних температурах (температура в'язко-крихкого переходу становить 700 °C) і неможливість чинити опір появі тріщин внаслідок формування зварювальних напружень.

При дослідженні мікроструктури зони зварного шва спостерігається 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 також виявлені численні тріщини протяжністю від 100 до 300 мкм, розташовані паралельно лінії сплавлення (рис. 2, б). [9].

Фрактографічні дослідження показали, що в металі шва розвиток магістральної тріщини приходив ступінчасто (рис. 3, а). Спостерігається зміна структури від лицевої сторони до зворотної сторони шва. Структура на ділянці лицевої сторони дрібнозерниста (рис. 3, а), а в металі зворотної сторони шва структура складається з витягнутих ламелей (рис. 3, б). Руйнування металу шва міжзеренне з невеликими вторинними тріщинами. Видно, що спостерігається дроблення  $\gamma$ -фази (рис. 3, б) за рахунок дисперсних виділень  $\alpha_2$ -фази. Також на поверхні зламу виявлені ділянки, в яких не відбулося дроблення  $\gamma$ -фази.

Як показав досвід попередніх дослідників, в зварних з'єднаннях при ЕПЗ формуються залишкові напруги, що в поєднанні зі структурою призводять до тріщиноутворення у шві.

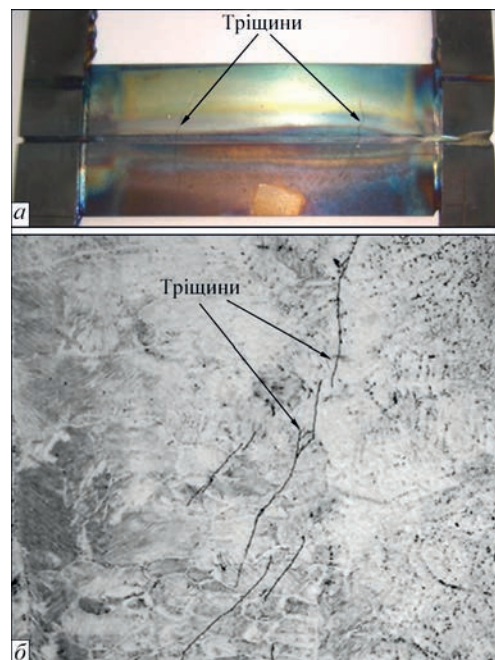


Рис. 2. Зразок зварного з'єднання інтерметалідного сплаву Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr, ат. % одержаний ЕПЗ: а – загальний вигляд; б – мікроструктура ( $\times 200$ ) металу шва [8]

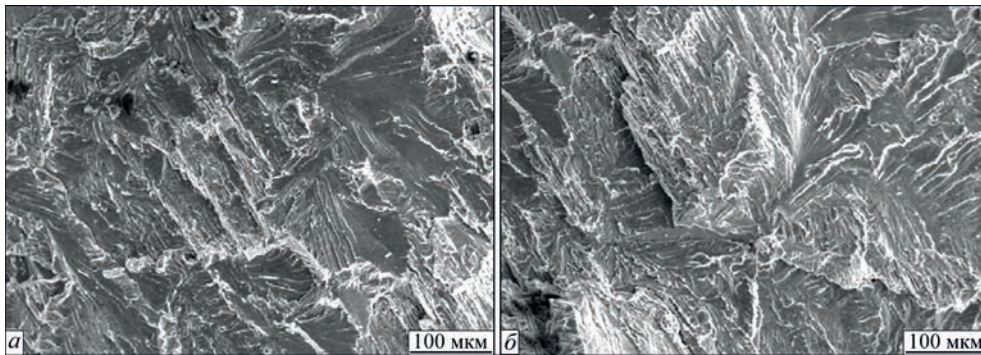


Рис. 3. Фрактограма поверхні зламу зварного шва зразка інтерметалідного сплаву Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr ат. %, завтовшки 3 мм: а – структура шва (лицева сторона),  $\times 200$ ; б – ділянка зламу з витягнутими ламелями на зворотній стороні,  $\times 200$

Виходячи з викладеного подальше дослідження полягало у розробці технології ЕПЗ, яка забезпечить зниження рівня залишкових зварювальних напруг і підвищить пластичність зварного шва, що дозволить уникнути появи холодних тріщин.

**Дослідження теплових умов, за яких утворюються дефекти в зварних з'єднаннях.** За допомогою чисельного експерименту були визначені теплові умови, при яких виникають напруження в зразках завтовшки 3 мм, що призводять до утворення тріщин [10].

Розглядалися кінетика температурних полів при попередньому підігріві зразків, зварюванні і подальшому охолодженні до кімнатної температури. На основі цих чисельних результатів прогнозувалася кінетика напружено-деформованого стану (НДС) зразка. При виникненні холодних тріщин визначальним є підвищений рівень розтягуючих зварювальних напружень.

Нижче наведені розрахункові графіки розподілу залишкових поздовжніх напружень у поперечному перетині зварного з'єднання по довжині пластини завтовшки 3 мм, які отримані за допомогою обчислювального експерименту (рис. 4, а). Дослідження напруженого стану зварних з'єднань показало, що в стані після зварювання в центрі зварного шва і в зоні сплавлення формуються розтягуючі напруження, рівень яких змінюється від 350 до 370 МПа. Поздовжні напруження розтягу, які діють уздовж шва нерівномірні. Це в середньому

на деяких ділянках на 5 % вище поперечних напружень (рис. 4, б). По мірі віддалення від центру шва рівень залишкових напружень знижується і на відстані 7 мм від центру (на основному металі) напруги стають менше, близько 100 МПа, а потім поступово знижуються до 0 і на кінцях пластини з розтягуючих переходять в стискаючі.

Таким чином, зародження холодних тріщин при зварюванні відбувається як на стадії охолодження, так і на стадії нагріву в результаті високих напружень в області шва і зони сплавлення, де формується поле розтягуючих напруг.

Характер розподілу залишкових поздовжніх зварювальних напружень у поперечному перетині зварного з'єднання, який отриманий за допомогою обчислювального експерименту, представлений на рис. 4, б. Видно, що залишкові поздовжні напруження розподілені в поперечному перерізі по ширині нерівномірно. У зварному шві і прилеглій до нього зоні діють напруги розтягнення, а в іншій частині перетину напруження стиснення.

Найбільший рівень залишкових небезпечних напружень розтягу формується в центрі зварного шва та ЗТВ і дорівнює 350 МПа, що підтверджується також даними, отриманими методом рентгеноструктурного аналізу 315 МПа, які на основному матеріалі переходять з розтягуючих в стискаючі. Як відомо, на величину напружень впливає хімічний і фазовий склад зварювальних матеріалів.

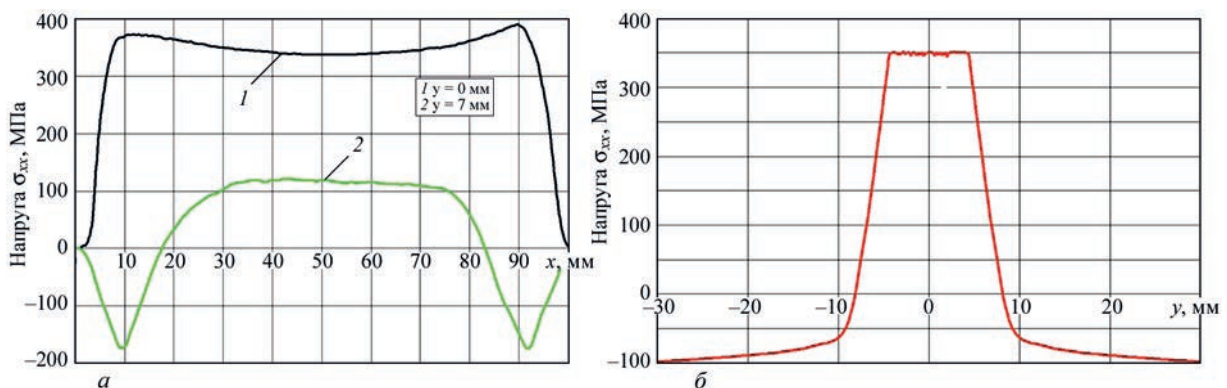


Рис. 4. Розподіл залишкових поздовжніх зварювальних напружень: а – за довжиною зварювальної пластини; б – у поперечному перетині зварного з'єднання

Фактором, що визначає процес формування залишкових напружень при зварюванні, є температурне поле на сталій стадії процесу в пластинах, які зварюються. В результаті нерівномірного нагріву зварного з'єднання при зварюванні виникає залишкова пластична деформація укорочення, що призводить до утворення залишкових напружень. Характер розподілу цих напружень залежить від багатьох факторів (геометричних розмірів зварного з'єднання, режиму зварювання та ін.). Зона, яка нагрівається при зварюванні, охоплена розтягувальними напруженнями. Найбільші градієнти напружень збігаються за напрямком з найбільшими градієнтами температур, тобто розподіл залишкових напружень типовими для поля власних напружень, сформованих в умовах нерівномірного нагріву і охолодження. В результаті утворення розтягуючих напружень, що викликані зварюванням, погіршується технологічна міцність зварного з'єднання, що може стати причиною утворення тріщин в зварних швах і колошовній зоні.

Раціональне проектування технології, спрямоване на зниження рівня залишкових зварювальних напружень внаслідок зменшення жорсткості зварних з'єднань і концентраторів напружень дозволяє уникнути утворення холодних тріщин або полегшити боротьбу з ними за допомогою технологічних прийомів.

**Розробка технології ЕПЗ з контрольованою швидкістю охолодження.** Дослідженнями авторів роботи [11], які проводилися в Інституті ім. Є.О. Патона, встановлено, що для попередження виникнення холодних тріщин в зварних швах на стадії нагріву потрібно перед виконанням ЕПЗ проводити попередній підігрів зразків до 450 °С.

З урахуванням сказаного вище нами була обрана температура попереднього підігріву сплаву при ЕПЗ – 450 °С. Цей метод зменшує швидкість наростання тимчасових напружень при зварюванні і зніжує рівень залишкових зварювальних напружень [11].

На рис. 5 представлений зразок інтерметаліду системи TiAl завтовшки 3 мм, який був одержа-

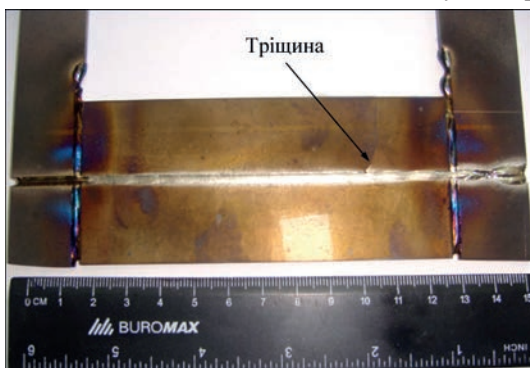


Рис. 5. Зварне з'єднання інтерметалідного сплаву Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr, ат. % завтовшки 3 мм ЕПЗ з попереднім підігрівом  $T = 450$  °С

ний ЕПЗ з попереднім підігрівом на наступному режимі:

$$T_{\text{підігріву}} = 450 \text{ °С}; U_{\text{приск.}} = 60 \text{ кВ}; I_{\text{п}} = 35 \text{ А}; \\ V_{\text{зв}} = 7 \text{ мм/с}; P = 5 \cdot 10^{-3}.$$

Попередній нагрів виконувався зворотно-поступальним рухом гармати розфокусованим пучком, який було розгорнуто за спеціальною програмою.

Як видно з рисунку, завдяки підігріву зразків до температури  $T = 450$  °С перед початком процесу зварювання на поверхні зразка завтовшки 3 мм (рис. 5) кількість холодних тріщин поперек зварного з'єднання зменшилася, але повністю позбутись від них не вдалося.

В результаті теоретичних досліджень напруженого стану методом чисельного експерименту було встановлено, що попередній підігрів при температурі 450 °С сприяє релаксації напружень, відбувається зниження залишкових напружень  $\sigma_{xx}$  майже на 40 % з 350 до 225 МПа (рис. 6).

Як було вказано вище, значну роль в утворенні тріщин грають напруження, які виникають у процесі зварювання, а також швидкість охолодження, що забезпечується за допомогою локальної термічної обробки (ЛТО). На підставі цього висновку був запропонований технологічний прийом зварювання тонколистових інтерметалідних пластин з регульованою швидкістю охолодження.

Цей процес дозволяв послідовно виконувати за один підхід попередній підігрів, зварювання пластин завтовшки 3 мм та післязварювальний відпал, який здійснювали нерухомою гарматою розгорнутим пучком на весь зразок.

Поперечні напруження також розподілені нерівномірно. Середня частина відчуває напруження розтягнення, а кінцеві ділянки – напруження стиснення. Величина максимальних напружень в зоні зварного шва  $\sigma_{\text{max}}$  залежить від довжини шва  $l$ , як правило, не перевищує значення  $0,3 \sigma_T$  вихідного матеріалу – 225 МПа у центрі зварного шва та  $837 \sigma_T$  МПа вихідного матеріалу. Таким чином, в поздовжньому напрямку в стиковому зварному

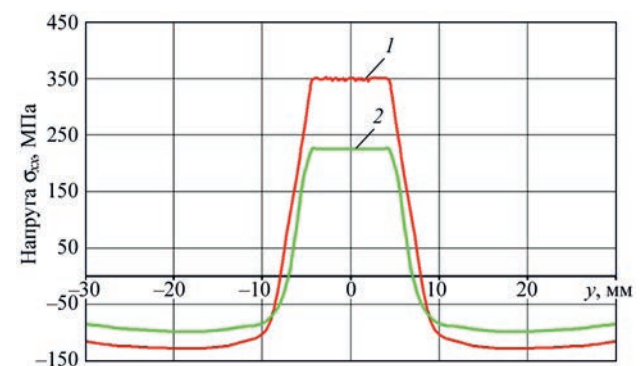


Рис. 6. Розрахункова оцінка розподілу поздовжніх залишкових напружень у поперечному перетині зварного з'єднання: 1 – без попереднього підігріву; 2 – з попереднім підігрівом зразка

з'єднанні можна виділити дві зони: зона дії напружень розтягу.

Схильність металів до утворення тріщин при зварюванні є одним з основних показників їх зварюваності. Вона обумовлює технологічну міцність матеріалів при зварюванні. В процесі фазових і структурних перетворень в твердому стані можуть виникати холодні тріщин, причому, практично, відразу ж після зварювання.

В результаті узагальнення попередніх досліджень було показано, що крім попереднього підігріву відразу після проведення зварювання необхідно проводити ЛТО шляхом сканування променя вздовж шва одразу після закінчення зварювання. Це дозволить знизити швидкість наростання тимчасових напружень при зварюванні, а також рівень залишкових зварювальних напруг, що дасть можливість зменшити вірогідність появи тріщин.

Для вирішення цієї важливої задачі, а також з метою оптимізації структурного і фазового стану інтерметаліду були розроблені режими ЛТО зварних з'єднань електронним променем.

В цьому випадку післязварювальна термообробка забезпечувалася за наступною програмою: безпосередньо після закінчення зварювання електронна гармата виводилася на середину зварного шва, за допомогою спеціальної комп'ютерної програми промінь розгортався і розфокусувався до необхідної конфігурації в одну та другу сторону від середини шва до його кінця. Він продовжував нагрів поверхні всього виробу на режимах, що дозволяли компенсувати надлишковий тепловідвід і забезпечити таку швидкість охолодження, яка була прийнята нами як оптимальна. Частота сканування електронного променя становить 100 Гц, а зварювальний струм знижується на 1/3.

Схема термообробки з регульованою швидкістю охолодження представлена на рис. 7.

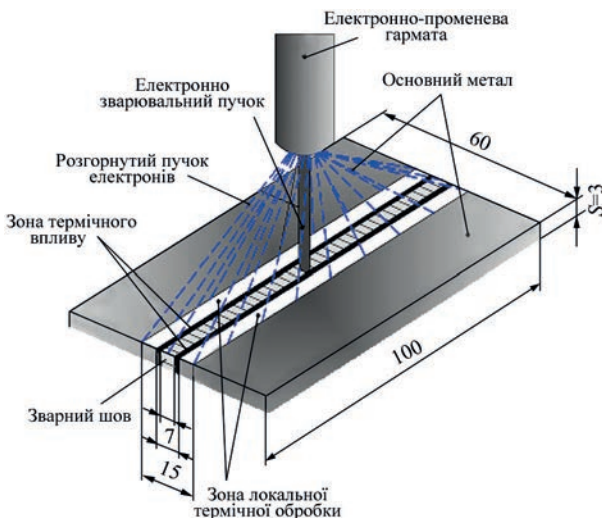


Рис. 7. Схема ЕПЗ з попереднім підігрівом та локальною термообробкою з регульованою швидкістю охолодження

Загальний час зазначеної термообробки становив 10 хв. При цьому температура зварного з'єднання 1000 °С підтримувалася протягом 5 хв. Температура 1000 °С обрана тому, що раніше було встановлено, що поява  $\beta$ -фази в результаті фазових трансформацій при охолодженні з температури  $\sim 1000$  °С має пластифікуючий вплив на метал шва, тим самим підвищуючи його пластичність і в'язкість. Після чого завдяки повільному ( $\sim 5$  хв) зменшенню струму по спеціальній програмі, відповідно до залежності, як показано на рис. 8, зварне з'єднання охолоджувалося до температури 500 °С [12]. Потім електронна гармата відключалася і йшло повільне охолодження зразка. При повільному охолодженні відбувається трансформація  $\alpha$ -фази в ламельну ( $\gamma + \alpha_2$ )-фазу, а також в сплав зберігається деяка кількість  $\beta_2$ -фази, яка є упорядкованою структурою  $\beta_0$ -фази [13].

В результаті проведеного за вказаною схемою ЕПЗ і ЛТО зменшуються швидкість наростання тимчасових напруг при зварюванні, а також рівень залишкових зварювальних напружень. Це дає можливість уникнути появи холодних тріщин і отримати бездефектне з'єднання. За даними технологічними рекомендаціями було одержано бездефектне зварне з'єднання пластин завтовшки  $\delta = 3$  мм (рис. 8). На рис. 9 представлено зовнішній вигляд зразка  $\delta = 3$  мм, звареного за запропонованою схемою. Термічний цикл процесу ЕПЗ інтерметаліду  $\delta = 3$  мм з попереднім підігрівом та

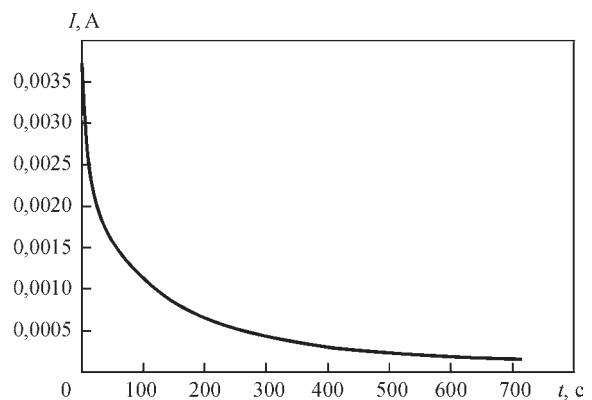


Рис. 8. Залежність зміни струму від часу для забезпечення контрольованого охолодження зварного шва на товщині  $\delta = 3$  мм [10]

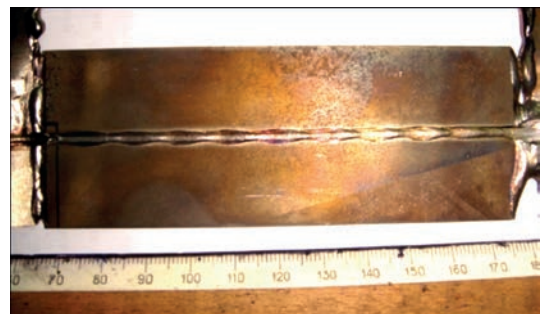


Рис. 9. Зразок інтерметалідного сплаву Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr, ат. %  $\delta = 3$  мм після ЕПЗ та термообробки за схемою, зображеною на рис. 7

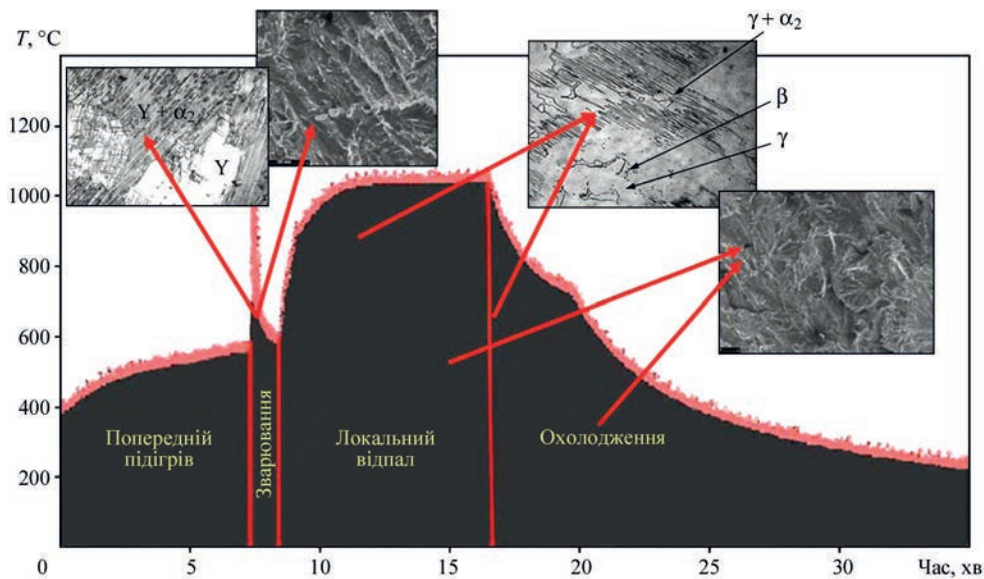


Рис. 10. Вплив локальної термообробки на структурний стан зварного з'єднання інтерметалідного сплаву Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr, ат. %

локальним контрольованим відпалом представлений на рис. 10.

На рис. 10 також представлені фазові трансформації в процесі ЕПЗ з попереднім підігрівом і подальшою локальною термообробкою зразків завтовшки 3 мм, які відображають структурні перетворення та поверхню зломів на різних стадіях процесу.

Як видно з рис. 10, метал зварного шва має трьохкомпонентну структуру: матриця  $\gamma$ -фази, колонії ( $\gamma + \alpha_2$ )-фази і виділення залишкової  $\beta$ -фази на межі колоній. Така структура призводить до збільшення пластичності ЗТВ в зразках завтовшки 3 мм.

Крім того, мікротвердість всіх ділянок цього зразка, що був підданий попередньому підігріву і наступній локальній термообробці, нижче твердості зразків, які були одержані без застосування ЛТО, тому що відбувається накопичення тепла, яке призводить до зменшення швидкості охолодження зразка і, відповідно, зменшення внутрішніх напружень.

В роботі [10] встановлено, що при охолодженні зварного шва інтерметаліда від температури 1000 °C відбувається фазова трансформація, завдяки якій в структурі з'являється додаткова  $\beta_0$  (B2) фаза, що представляє собою впорядковану фазу на основі Ti. Вона розташовується на границях колоній і блокує зародження та поширення тріщин в  $\alpha_2$ -фазі внаслідок зниження напружень. Утворення в зварному шві сприятливої трьохкомпонентної структури:  $\gamma$ -фази, ( $\gamma + \alpha_2$ )-фази і  $\beta$ -фази сприяє збільшенню його міцності і пластичності.

Злами зварних з'єднань алюмініду титану завтовшки 3 мм, які були зварені з регульованою швидкістю охолодження, мають змішаний характер руйнування (з  $\sim 30\%$  в'язкої складової).

Фрактограма поверхні зламу зварного з'єднання показує, що фасетки відколу, що спостері-

гаються у зламі, розділені ділянками відриву, що обумовлено пластичним зрушенням.

На рис. 11 показано напружений стан зварного з'єднання інтерметаліду  $\delta = 3$  мм після ЛТО, яка дозволяє знизити рівень залишкових зварювальних напружень, забезпечує повільну швидкість охолодження зварних з'єднань.

Швидкість охолодження в цьому випадку знижувалася до 0,7... 0,9 °C/с. В зв'язку з цим, зварювальні залишкові напруги знижувалися майже на 30 % і склали 162 МПа (рис. 11).

Дані для побудови графіку одержані за допомогою математичної моделі. Графік показує зміни температури, напруженого стану і швидкості охолодження при застосуванні даного виду термообробки зразків завтовшки 3 мм на стадії охолодження. Як видно з рисунка, після 500 °C зміна температури зразка відбувається дуже повільно. При цьому напруги складають 180 МПа.

Форма епюри  $\sigma_x$  пов'язана з малою шириною пластини, при якій напруження стиснення в її поперечному перерізі не досягають нульових значень.

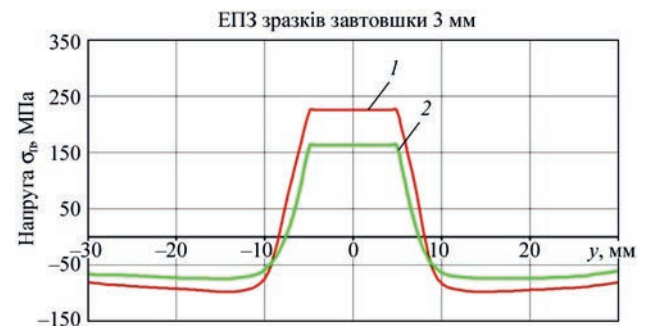


Рис. 11. Розрахункова оцінка розподілу залишкових поздовжніх напружень у поперечному перетині зварного з'єднання інтерметаліду  $\delta = 3$  мм після: 1 – ЕПЗ з попереднім підігрівом; 2 – ЕПЗ з попереднім підігрівом та відпалом  $T = 1000$  °C,  $t = 5$  хв

Таблиця 2. Межа міцності зварних з'єднань методом ЕПЗ з ЛТО

Номер зразка	Товщина $\delta$ , мм	Значення $\sigma_{\text{в}}$ , МПа	Місце руйнування
1	3	310,9	ОМ
2	3	319,1	ОМ

Таблиця 3. Межа міцності зварних з'єднань інтерметаліду, отриманого методом ЕПЗ без ЛТО

Номер зразка	Товщина $\delta$ , мм	Значення $\sigma_{\text{в}}$ , МПа	Місце руйнування
1	3	197,8	ОМ
2	3	152,1	ОМ
3	3	175,5	ОМ

Уникнення появи холодних тріщин і отримання бездефектного з'єднання завдяки контрольованій швидкості охолодження відбувається за рахунок зниження залишкових зварювальних напружень, а також за рахунок формування оптимальної структури [14].

Більш низький рівень напружень в зварному шві пояснюється утворенням в процесі охолодження після зварювання  $\beta$ -фази, яка сприяє значній релаксації тимчасових напружень [10].

Для оцінки міцності зварних з'єднань були проведені випробування на статичний розтяг [14]. Результати механічних випробувань зварних з'єднань зразків, отриманих при випробуваннях на розтяг, наведені в табл. 2.

Для порівняння були проведені механічні випробування зварних з'єднань зразків, які одержані ЕПЗ без застосування ЛТО. У табл. 3 наведені результати випробувань.

Як видно з табл. 2 і 3 значення межі міцності у зразків, які зварені з використанням післязварювальної локальної термообробки значно вище ніж для зразків, які одержані без використання ЛТО.

Аналіз даних, які отримані при випробуванні, показав, що наступна локальна термообробка позитивно впливає рівень міцності при механічних випробуваннях, а саме дозволяє збільшити межу міцності зварного з'єднання за середніми значеннями приблизно в 1,8 рази з 175 до 315 МПа [15].

Таким чином, попередній підігрів і подальший післязварювальний нагрів виробів, а також вибір оптимальних режимів зварювання позитивно впливають на зменшення можливості утворення тріщин.

## Висновки

1. Встановлено, що для запобігання виникнення холодних тріщин при зварюванні тонколистових пластин інтерметаліду системи TiAl необхідно проводити попередній підігрів зразків і наступну локальну термообробку зварних з'єднань. Чисельно показано і підтверджено експериментально, що використання розподіленого джерела попереднього підігріву зразка перед зварюванням дозволяє реалізувати сприятливі умови під час зварювання і при подальшому охолодженні, а саме, знизити величину розтягуючих напружень.

2. Створена технологія електронно-променевого зварювання інтерметаліда, що передбачає послідовне здійснення в одній камері попереднього підігріву, електронно-променевого зварювання інтерметаліда з наступною локальною термообробкою.

3. Запропоновані режими контрольованого охолодження пластин завтовшки 3 мм, що дозволяють компенсувати надлишкову поверхневу тепловіддачу.

4. При застосуванні цієї технології для зразків завтовшки 3 мм рекомендовано термообробку проводити електронним пучком, розгорнутим та розфокусованим в одну та другу сторону від середини шва до його кінця з поступовим зниженням його потужності за допомогою спеціальної комп'ютерної програми. При цьому оптимальна швидкість охолодження зварного з'єднання, яка знижує рівень залишкових зварювальних напружень майже на 30 % – з 225 до 160 МПа і дозволяє уникнути утворення тріщин у шві, є швидкість 0,7...0,9 °C/c.

5. Механічні випробування зварних з'єднань на розтягнення показали, що руйнування зразків відбувається по вихідному матеріалу. Застосування локальної термообробки збільшує рівень межі міцності зварного з'єднання приблизно у 1,8 рази.

**Список літератури**

1. Ночовная Н.А., Панин. П.В. (2014) *Анализ остаточных макронапряжений в сварных соединениях титановых сплавов различных классов*. Москва, ВИАМ.
2. Ильин А.А., Калачев Б.А., Полькин И.С. (2009). *Титановые сплавы – состав, структура, свойства*. Москва, ВИЛС-МАТИ.
3. Махненко В.И., Позняков В.Д., Великоиваненко Е.А. и др. (2009) Риск образования холодных трещин при сварке конструкционных высокопрочных сталей. *Збірник наукових праць НУК*, 3, 5–12.
4. Мандельберг С.Л., Гордонный В.Г. (1961) Односторонняя двухслойная аргоно-дуговая сварка тонколистовой легированной стали. *Автоматическая сварка*, 9, 68–73.
5. Chen Guoqing, Zhang Binggang, Liu Wei, Feng Jicai. (2011) Crack formation and control upon the electron beam welding of TiAl-based alloys. *Journal Intermetallics*, 19, 1857–1863.
6. Zhuk, G.V., Trigub, N.P., Zamkov, V.N. (2003) Producing of titanium gamma-aluminide ingots using EB<sup>TM</sup> method. *Special electrometallurgy*, 1, 19–21.
7. Нестеренков В.М., Бондарев А.А. (2014) Электронно-лучевая сварка крупногабаритных толстостенных конструкций из сплавов магния. *Автоматическая сварка*, 2, 39–43.
8. Ольшанская Т.В., Федосеева Е.М. (2019) Выбор основных критериев термического цикла для методов прогнозирования структуры сварных швов при электронно-лучевой сварке. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*, 21, 2, 73–81.
9. Пісун Н.В., Вржижевський Е.Л., Костін В.А. та ін. (2022) Вплив часу існування розплавленої ванни при електронно-променевих процесах на випаровування елементів з високою пружністю пару. *Автоматичне зварювання*, 1, 26–32. <https://doi.org/10.37434/as2022.01.04>



10. Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S, Rozyinka, G.F. et al. (2019) Forecasting of inclination of welded joints of titanium  $\gamma$ -aluminide based alloy towards cold cracking under electron beam welding. *Технологические системы*, **3**, 59–66. dx.doi.org/10.29010/88.9
11. Замков В.Н., Великоиваненко Е.А., Сабокарь В.К. и др. (2001) Выбор температуры предварительного подогрева  $\gamma$ -алюминидов титана при ЭЛС. *Автоматическая сварка*, **11**, 20–23.
12. Лобанов Л.М., Аснис Е.А., Пискун Н.В. и др. (2019) Исследование напряженно-деформированного состояния сварных соединений интерметаллидов системы TiAl. *Автоматическая сварка*, **11**, 11–15.
13. Имаев В.М., Имаев Р.М., Гайсин Р.А. и др. (2017) Жаропрочные интерметаллидные сплавы и композиты на основе титана: микроструктура, механические свойства и возможное применение. *Materials Physics and Mechanics*, **33**, 80–96.
14. Имаев В.М., Имаев Р.М., Хисматуллин Т.Г. (2008) Механические свойства литого интерметаллидного сплава Ti–43Al–7(Nb,Mo) – 0,2 В (ат. %) после термической обработки. *Физика металлов и металловедение*, **105**, **5**, 516–522. DOI: 10.1134/S0031918X08050098
15. Лобанов Л.М., Аснис Ю.А., Пискун Н.В. та ін. (2020) Вплив локальної термообробки на механічні властивості зварних з'єднань інтерметаліду системи TiAl, одержаного методом електронно-променевого зварювання. *Автоматичне зварювання*, **9**, 36–41.
5. Chen Guoqing, Zhang Binggang, Liu Wei, Feng Jicai. (2011) Crack formation and control upon the electron beam welding of TiAl-based alloys. *J. Intermetallics*, **19**, 1857–1863.
6. Zhuk, G.V., Trigub, N.P., Zamkov, V.N. (2003) Producing of titanium gamma-aluminide ingots using EB'HM method. *Special Electrometallurgy*, **1**, 19–21 [in Russian].
7. Nesterenkov, V.M., Bondarev, A.A. (2014) Electron beam welding of large-size thick-wall structures of magnesium alloys. *The Paton Welding J.*, **2**, 37–41.
8. Olshanskaya, T.V., Fedoseeva, E.M. (2019) Selection of main criteria of thermal cycle for methods of prediction of weld structure in electron beam welding. *Vestnik Permskogo NPU, Mashinostroenie, Materialovedenie*, **21**(2), 73–81 [in Russian].
9. Piskun, N.V., Vrzhezhevskiy, E.L., Kostin, V.A. et al. (2022) Influence of time of existence of molten pool in electron beam processes on the level of evaporation of elements with a high vapor tension. *The Paton Welding J.*, **1**, 26–32. <https://doi.org/10.37434/as2022.01.04>
10. Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S, Rozyinka, G.F. et al. (2019) Forecasting of inclination of welded joints of titanium  $\gamma$ -aluminide based alloy towards cold cracking under electron beam welding. *Tekhnologicheskie Sistemy*, **3**, 59–66 [in Russian]. dx.doi.org/10.29010/88.9
11. Zamkov, V.N., Velikoivanenko, E.A., Sabokar, V.K. et al. (2001) Selection of temperature of preheating of  $\gamma$ -titanium aluminide in electron beam welding. *The Paton Welding J.*, **11**, 17–20.
12. Lobanov, L.M., Asnis, A.E., Piskun, N.V. et al. (2019) Investigation of stress-strain state of welded joints of the system TiAl intermetallics. *The Paton Welding J.*, **11**, 8–11.
13. Имаев, В.М., Имаев, Р.М., Гайсин, Р.А. et al. (2017) Heat-resistant intermetallic alloys and composites based on titanium: Microstructure, mechanical properties and possible application. *Materials Physics and Mechanics*, **33**, 80–96.
14. Имаев, В.М., Имаев, Р.М., Хисматуллин, Т.Г. (2008) Mechanical properties of cast intermetallic alloy Ti–43Al–7(Nb,Mo) – 0,2 V (at. %) after heat treatment. *Fizika Metallor i Metallovedenie*, **105**(5), 516–522 [in Russian]. DOI: 10.1134/S0031918X08050098
15. Lobanov, L.M., Asnis, A.E., Piskun, N.V. et al. (2020) Influence of local heat treatment on mechanical properties of welded joints of TiAl system intermetallics produced by electron beam welding method. *Avtomat. Zvaryvannya*, **9**, 36–41 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.09.04>

## References

## ELECTRON BEAM WELDING OF SHEET INTERMETALLIC ALLOY WITH A CONTROLLED COOLING RATE

E.L.Vrzhezhevskiy, N.V. Piskun, O.A. Velykoivanenko, I.I. Statkevych, T.G. Taranova

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [oleh.makhnenko@gmail.com](mailto:oleh.makhnenko@gmail.com)

The objective of this study is development and testing of elements of the technological process of electron beam welding (EBW) of intermetallic alloys of TiAl system, which allows performance of welding, preheating and subsequent local heat treatment of welded joints in one pass in one chamber, that enables preventing defects of the type of cold cracks, due to a controlled cooling rate. The work explains why EBW is exactly the most suitable process for welding titanium-based intermetallic alloys. A welding method is proposed and described in detail, which is performed in the gravity position at cantilever fastening of the samples in a special device, while heat treatment is conducted immediately after the completion of the welding process, ensuring an optimal cooling rate of the welded joint. It is found that cold cracking in the intermetallic welded joints is related to a low ductility of as-welded material. A mathematical model was developed for numerical prediction of the temperature field kinetics and stressed state calculation. The model was used as a basis to conduct a computational experiment and to determine the thermal conditions leading to cracking in EBW process. It is shown that the highest level of residual stresses is formed directly after completion of the welding process, is equal to 350 MPa and is observed in the weld center. In order to prevent cold cracks in welded joints of titanium aluminide samples, a technological measure was proposed, which combines EBW of Ti–44Al–5Nb–3Cr–1.5Zr (at. %) intermetallic with preheating and postweld local heat treatment (LHT). It was numerically shown and experimentally confirmed that application of a distributed source of sample preheating before welding creates favorable conditions during welding and at further cooling, namely lowering the tensile stresses, namely lowering the magnitude of tensile stresses. The way the process is implemented and its influence on the stressed state and structure of the produced joints are described in detail. The work gives the modes of EBW of sheet intermetallic alloy with a controlled cooling rate and results of structural and mechanical studies of the welded joints, produced by the proposed technology. Ref. 15, Tabl. 3, Fig. 11.

*Keywords: electron beam welding, TiAl system intermetallics, sheet plates, controlled cooling rate, stressed state, «gravity» welding, local heat treatment.*

Надійшла до роботи 10.10.2023