

# ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЕКОНОМНОЛЕГОВАНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe

С.В. Ахонін, В.Ю. Білоус, В.А. Костін, С.Г. Григоренко, О.Л. Пузрін, Е.Л. Вржижевський

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

Найважливішою перевагою псевдо- $\beta$ -сплавів титану є їхня висока міцність, а до недоліків відноситься висока вартість легуючих елементів. Для зниження вартості титанових сплавів на основі  $\beta$ -фази розроблено економнолеговані сплави, такі як LCB, Timetal 125 та інші. Цей клас титанових сплавів є перспективним для застосування в недорогих конструкціях. Розробка технології зварювання та режимів термічної обробки з'єднань таких сплавів є важливим завданням. В роботі було проведено дослідження поверхні зламів зварних з'єднань титанового сплаву системи Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe, отриманих після випробувань на ударну в'язкість. Встановлено, що локальна термічна обробка в вакуумній камері зразків зварних з'єднань дослідного титанового сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe, отриманих ЕПЗ за режимом 4 (ЛТО у вакуумній камері при температурі 750 °C протягом 5 хв) дозволяє отримати більш високі пластичні властивості зварних з'єднань, а також запобігти утворенню холодних тріщин після зварювання. Така термообробка призводить до більш рівномірного розташування ділянок в'язкого руйнування на поверхні зламів. Бібліогр. 12, табл. 3, рис. 6.

*Ключові слова:* титан, псевдо- $\beta$ -титанові сплави, економнолеговані титанові сплави, зварні з'єднання, зварювання, електронно-променево зварювання, локальна термічна обробка, вольфрамівий електрод, термічна обробка, механічні властивості, поверхні зламів, критерій якості

**Вступ.** Економнолегований титановий сплав Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe завдяки своїм унікальним властивостям є перспективним для застосування в різних галузях промисловості. До економнолегованих титанових сплавів можна віднести сплави, що не містять дорогих і дефіцитних елементів, таких як ніобій, ванадій та інші, і мають в основі систем легування відносно дешеві компоненти: алюміній, залізо, кремній, кисень і т. п. [1–4]. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України були проведені роботи по виплавці зливок псевдо- $\beta$ -сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe з використанням електронно-променевої установки УЕ-208М з проміжною ємністю і порціонною подачею рідкого металу. Слід визначити, що отримані зливки псевдо- $\beta$ -сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe за хімічним складом близькі до сплаву, розробленому компанією «TIMET» (США), якому було присвоєно назву LCB (low cost beta) [5, 6].

Високоміцні економнолеговані титанові сплави знайшли широке застосування в аерокосмічній галузі (відповідальні та високонавантажені вузли і агрегати); військовій промисловості (елементи бронезахисту бойових машин та особового складу), транспортному машинобудуванні (деталі двигунів, диски коліс, ресорні пружини, силові конструкції спорткарів); при виробництві інтелек-

туальних товарів для спорту, медицини, широкого споживання [7].

Покращення механічних властивостей зварних з'єднань економнолегованих титанових сплавів потребує використання різних способів термічної або термомеханічної обробки (ТО, ТМО) [8].

У зв'язку з тим, що використання повної термічної обробки усього зварного з'єднання є економічно недоречним, то зазвичай використовують локальну термічну обробку (ЛТО) у ділянці з'єднання титанових сплавів. Основна мета ЛТО полягає у формуванні умов для запобігання утворення тріщин та інших дефектів на ділянці зварного з'єднання та в покращенні механічних властивостей при зварюванні за рахунок використання локального підігріву до певних температур та послідовного відпалу, що призводить до релаксації термічних напружень у зоні зварювання внаслідок зміни структурно-фазового складу металу та отримання заданих властивостей [9].

Традиційно для зварювання високоміцних титанових сплавів використовують електронно-променево та аргонодугове зварювання.

**Аргонодугове зварювання (АДЗ).** Аргонодугове зварювання вольфрамівим електродом у середовищі захисного інертного газу аргону (АДЗ) набуло найбільш широке застосування для

зварювання титанових сплавів завдяки тому, що цей спосіб зварювання є найбільш дешевим і універсальним. Він дозволяє виконувати з'єднання в різних просторових положеннях, в умовах обмеженого простору і не вимагає складного переналадження обладнання при зміні товщини зварюваного виробу і типу з'єднання. Зварювання може виконуватися як з застосуванням присадного металу, так і без нього. В якості присадного металу застосовують зварювальні дроти або прутки з титанових сплавів. Інертний газ аргон практично не вступає у хімічну взаємодію з розплавленим металом та іншими газами у зоні горіння дуги. Аргон має більшу вагу ніж повітря, тому він витискує його з зони зварювання та надійно захищає рідку зварну ванну та околосшовну зону зварного з'єднання від контакту з атмосферою.

**Електронно-променеве зварювання (ЕПЗ)** – зварювання, при якому нагрівання та плавлення контактуючих поверхонь здійснюється високошвидкісними потоками електронів, що рухаються під дією електричного поля у вакуумі. Зварювання виконується в середині камери у вакуумі, який отримано за рахунок відкачування повітря до тиску порядку  $10^{-3} \dots 10^{-4}$  Па. Пучок електронів формується у спеціальному пристрої електронно-променевої пушки.

ЕПЗ відрізняється високою щільністю потужності, поступаючись за цим показником лише лазерному зварюванню, але значно перевершуючи зварювання електричною дугою. Крім того, ЕПЗ характеризується мінімальною площею плями нагріву. Схематично розміри зони зварювання для різних видів зварювання представлено на рис. 1.

Істотною перевагою ЕПЗ є повна дегазація робочої області, в результаті чого досягається високоякісне з'єднання хімічно активних металів. Відсутність впливу атмосферних кисню та водню на метал шва дозволяє домогтися його більш однорідної та щільної структури, а також уникнути подальшої корозії.

Основний недолік ЕПЗ – це високі витрати на створення умов вакууму для зварювання високоактивних металів та сплавів. Тому цей метод зварювання працює в вузькоспеціалізованому діапазоні завдань для зварювання титанових сплавів,

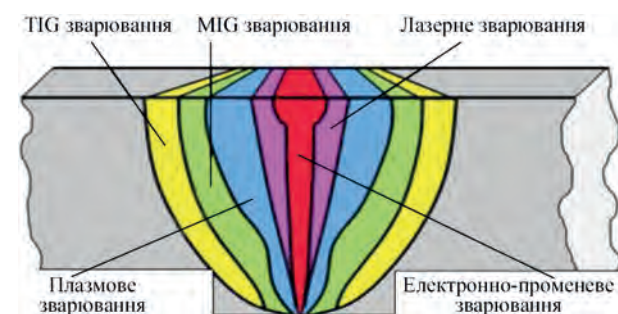


Рис. 1. Співставлення розмірів швів для різних видів зварювання

високотехнологічних дорогих деталей з цих сплавів з забезпеченням високих вимог по допускам та якості поверхні.

Метою роботи є визначення оптимальних режимів термічної обробки зварних з'єднань економнолегованого псевдо- $\beta$ -титанового сплаву системи Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe, виконаних електронно-променевим та аргонодуговим зварюванням вольфрамовим електродом.

**Матеріал та методика досліджень.** В роботі досліджували зварні з'єднання дослідного економнолегованого титанового сплаву 2,8Al–5,1Mo–4,9Fe. Для виплавки зливок титанового сплаву застосовано багатоцільову лабораторну електронно-променеву установку УЕ-208М [8]. Зливки круглого перетину діаметром 110 мм отримували за технологією електронно-променевого плавлення з проміжною ємністю (ЕПП) та порційним подаванням рідкого металу в водоохолоджуваній кристалізатор. Дослідження хімічного складу отриманих зливок показали, що розподіл легуючих елементів по довжині зливок рівномірний. Пластичну деформацію заготовок проводили на прокатному стані марки Skoda 355/500 до товщини 10 та 6 мм за стандартною методикою та піддано відпалу при температурі 750 °С. Хімічний склад дослідженого титанового сплаву представлено в табл. 1.

Зварювання цього сплаву виконували двома способами – ЕПЗ та АДЗ.

ЕПЗ зразків сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe завтовшки 10 мм виконували на установці ЕЛА60/60. Зварювання здійснювали за один прохід наскрізним проплавленням на режимі: прискорююча напруга  $U_{np} = 60$  кВт, струм променя  $I_n = 80$  мА, швидкість зварювання  $V_{зв} = 7$  мм/с. Контроль температури здійснювався за допомогою термопар, прикріплених з кореневої сторони шва. Для проведення попереднього підігріву перед зварюванням і локальної термічної обробки безпосередньо у вакуумній камері після зварювання зварні з'єднання обігрівалися електронним пучком, розгорнутим в прямокутний растр. Ширину ділянки, що прогривається при ЛТО, визначали таким чином, щоб вона перекривала шов і зону термічного впливу. В роботі ширина ділянки становила 30 мм. Потужність електронного променя в процесі попереднього підігріву і ЛТО становила близько 3 кВт, що дозволило забезпечити температуру в зоні обробки на рівні 750 °С. Режим зва-

Таблиця 1. Хімічний склад економнолегованого псевдо- $\beta$ -титанового сплаву [8]

Хімічний склад, мас %								
Al	Fe	Mo	Cr	Ni	Si	O	N	Ti (основа)
2,78	4,87	5,13	0,03	0,02	≤0,003	0,08	0,02	89,48

рювання з попереднім підігрівом та ЛТО є оптимальним з точки зору попередження утворення холодних тріщин та кращого формування шва.

Режим АДЗ зразків сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe завтовшки 6 мм був наступний: напруга дуги  $U = 12$  В, зварювання виконувалось автоматично на постійному струмі прямої полярності, струм зварювання складав  $I = 350$  А, швидкість зварювання  $v_{зв} = 10$  м/год, швидкість присадного дроту  $V_{пр} = 30$  м/год, напруга на дузі в процесі зварювання становила 12 В. Витрати захисного газу (аргону) 18 л/хв в соплі та 22 л/хв в захисній пристрій для захисту остигаючого металу шва. Зворотня сторона швів також захищалась аргонем від окислення за допомогою мідної формуючої підкладки. Загальні схеми ЕПЗ (а) та АДЗ (б) представлено на рис. 2.

В якості присадного металу при АДЗ використовували нелегований титановий зварювальний дріт ВТ1-00св діаметром 2 мм. Це дозволяє в невеликих межах змінювати ступінь легування металу шва. Визначали відносну кількість присадного металу в металі шва за допомогою визначення площини проплавлення металу з'єднання на поперечних шліфах зварних швів. В процесі зварювання присадний дріт подається у головну ча-

стину ванни. Для запалювання дуги паралельно джерелу живлення вмикається прилад осцилятор. Осцилятор подає на електрод високочастотні високочастотні імпульси, які іонізують дуговий проміжок та забезпечують підпалювання дуги після включення джерела живлення.

Застосування зазначених вище способів зварювання обумовлено властивостями зварюваних конструкцій та можливостями виробництва.

В роботі вивчали механізм руйнування зварних з'єднань дослідного економнолегованого псевдо-β-титанового сплаву системи Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe, які були отримані ЕПЗ та АДЗ, в тому числі після впливу різних режимів термообробки (табл. 2).

Механічні властивості зразків основного металу та зварних з'єднань, що досліджували, наведено в табл. 3 [10].

**Результати дослідження.** В роботі було проведено дослідження поверхні зламів зварних з'єднань титанового сплаву системи Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe, отриманих після випробувань на ударну в'язкість.

На рис. 3 наведено поверхні руйнування дослідних зразків. Аналіз зразків показав, що для всіх досліджених зразків руйнування відбувається за змішаним механізмом. Поверхня руйнування чітко виражена. Має крупнокристалічну будову.

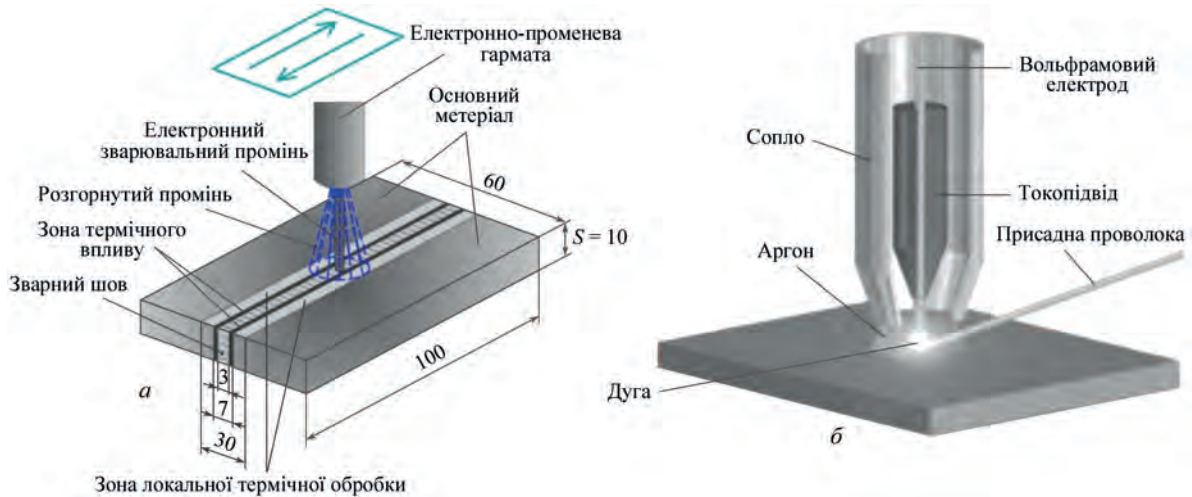


Рис. 2. Схема проведення зварювання економнолегованого титанового сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe: а – ЕПЗ; б – АДЗ

Таблиця 2. Режими термообробки зварних з'єднань титанового сплаву системи Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe

Номер зразка	Тип зразка	Термообробка
1	Основний метал	–
2	Зварне з'єднання ЕПЗ (без термообробки)	–
3	Зварне з'єднання ЕПЗ з попереднім підігрівом до температури 400 °С	–
4	Зварне з'єднання ЕПЗ з попереднім підігрівом до температури 400 °С	ЛТО при 750 °С протягом 5 хв
5	Зварне з'єднання ЕПЗ	Нагрівання до 760 °С, уповільнене охолодження зі швидкістю 1 °С/хв
6	Зварне з'єднання ЕПЗ	Нагрівання до 760 °С, гартування в воду, старіння 400 °С 10 год
7	Зварне з'єднання АДЗ, виконане з додаванням присадного дроту ВТ1-00св	Нагрівання до 760 °С, уповільнене охолодження зі швидкістю 1 °С/хв

Таблиця 3. Механічні властивості зварних з'єднань економнолегованого титанового сплаву системи Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe

Номер зразка	Межа міцності $\sigma_B$ , МПа	Межа плинності $\sigma_p$ , МПа	Відносне подовження $\delta$ , %	Відносне звуження $\psi$ , %	Ударна в'язкість KCV, Дж/см <sup>2</sup>
1	1015	939	1,9	-	3,6
2	960	921	3,8	-	6,4
3	992	959	5,1	-	3,6
4	997	964	6,5	-	5,4
5	964	905	4,7	12,6	7,1
6	1204	1199	8,6	1,7	4,2
7	958	958	1,3	2,4	6,5

Магістральна тріщина розповсюджувалась від нанесеного концентратора напружень у напрямку строго вздовж напрямку прикладеному навантаженню. Макроскопічний аналіз зразків показав, що немає утяжок та «губ» зрізу, що свідчить про малу макроскопічну пластичну деформацію на всіх стадіях руйнування [11]. Разом з тим, макроскопічний аналіз характеру руйнування показав, що частка пластичної деформації на поверхні руйнування суттєво залежить як від типу зварювання, так і від режиму термооброблення (рис. 3, а, е, ж).

Мікроскопічне дослідження поверхні руйнування зразків №№ 1–3 показало, що вона є неоднорідна та характеризується змішаним характером (рис. 4, а, б, г) [12]. Дослідження показали, що поверхня руйнування світла, крупнокристалічна, розвинена. Поверхня руйнування містить фасетки відколу, які перемежуються з ділянками міжзеренного та в'язкого руйнування. Спостерігаються фасетки відколу, які розділені ділянками відриву. Зразки відрізняються розміром фасеток руйнування (від 50 до 200 мкм) та часткою в'язкої складової у зламі (від 5 до 30 %). В зразках №№ 4–6 (рис. 3, б, г, д, е) поверхня руйнування плоска, слабо виражена, що свідчить про низьку швидкість розповсюдження трі-

щини, що утворена в умовах плоскодеформованого стану. Характер руйнування переважно крихкий, частка в'язкої складової не перевищує 20...25 %. Поверхня руйнування зразків № 6, 7 містить низку паралельно розташованих кристалографічних поверхонь у вигляді сходинок (рис. 4, е, ж).

Детальний аналіз поверхні руйнування зразків зварних з'єднань економнолегованого псевдо- $\beta$  титанового сплаву системи Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe показав, що деталі рельєфу поверхні руйнування містять одночасно як фасетки відколу, так і ямки, які сформувалися за механізмом коагуляції мікропор (рис. 4, б, г, ж). На фасетках відколу спостерігаються гребні відриву та струмкові візерунки. Також на поверхні зламів зразків, отриманих за режимами 4, 5, 6 знайдені елементи в'язкого руйнування. Це свідчить про те, що матеріал після відповідної термічної обробки стає більш пластичним (рис. 4, г, е).

Співставлення характеру руйнування зразків після відповідних режимів термообробки, виконаних ЕПЗ та АДЗ зварюванням, показало (рис. 4, е, ж), що зразки після ЕПЗ більш пластичні та мають більшу частку в'язкої складової у зламі.

Аналіз результатів механічних випробувань дослідного економнолегованого титанового сплаву

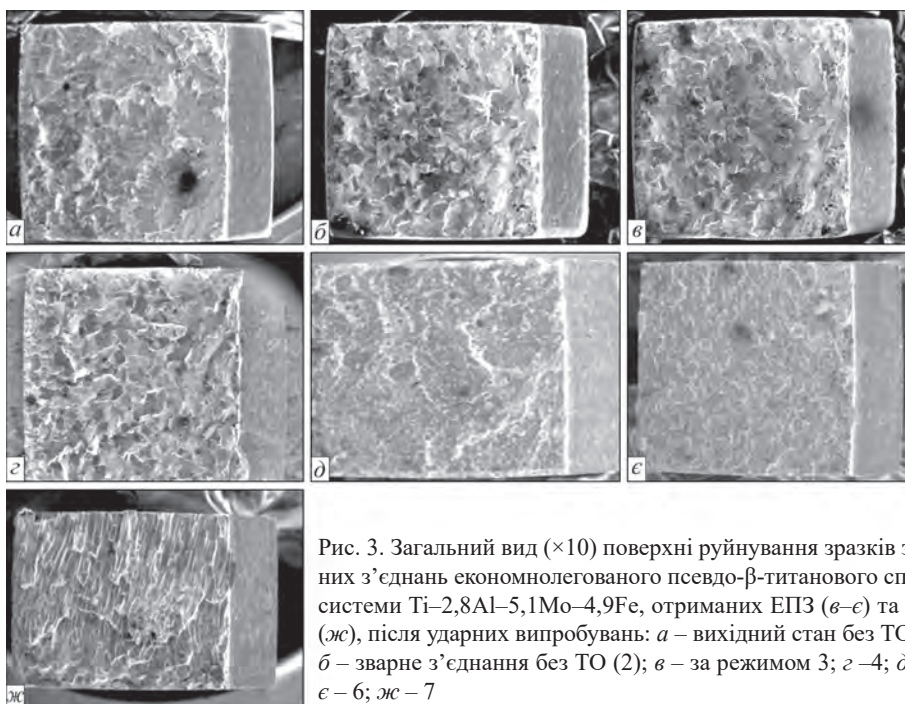


Рис. 3. Загальний вид ( $\times 10$ ) поверхні руйнування зразків зварних з'єднань економнолегованого псевдо- $\beta$ -титанового сплаву системи Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe, отриманих ЕПЗ (б–е) та АДЗ (ж), після ударних випробувань: а – вихідний стан без ТО (1); б – зварне з'єднання без ТО (2); в – за режимом 3; г – 4; д – 5; е – 6; ж – 7

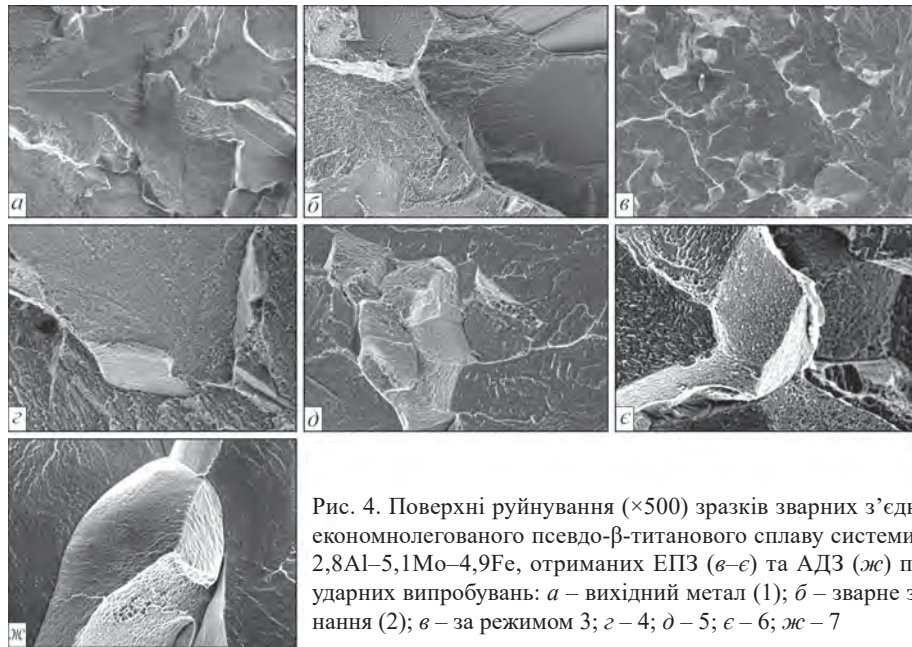


Рис. 4. Поверхні руйнування ( $\times 500$ ) зразків зварних з'єднань економнолегованого псевдо- $\beta$ -титанового сплаву системи Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe, отриманих ЕПЗ (б-е) та АДЗ (ж) після ударних випробувань: а – вихідний метал (1); б – зварне з'єднання (2); в – за режимом 3; г – 4; д – 5; е – 6; ж – 7

Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe після різних режимів термообробки показав (табл. 3), що термообробка цього сплаву дозволяє у достатньо широкому діапазоні параметрів змінювати його механічні властивості. Так, для зварних з'єднань, виконаних ЕПЗ в стані після термообробки, найбільшу межу міцності дослідного титанового сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe було отримано за режимом 6 (гартування при температурі 760 °C + охолодження в воду + старіння при 400 °C) – 1204 МПа, а найменшу – 964 МПа за режимом 5 (повільне охолодження з температури 760 °C зі швидкістю 1 °C/хв). Тобто відповідною термічною обробкою можливо отримати властивості як більше (режим 6), так і менше (режим 5) нетермообробленого зварного з'єднання (режим 2, 960 МПа). Відповідні результати було отримано і для межі плинності: найбільше значення отримано на режимі 6 – 1199 МПа, а найменше значення на режимі 5 – 905 МПа.

Показники пластичності (відносне подовження та звуження) у дослідного титанового сплаву

Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe після термообробки залишаються низькими. Максимальне відносне подовження було отримано на зразках після термообробки за режимом 6 – 8,6 % (більше на 126 %), а найменше за режимом 7 – всього 1,3 % (менше на 66 %). Зразок, термооброблений за режимом 5, набув найбільше відносне звуження 12,6 % (більше на 92 %) при відповідному подовженні (4,7 %) (рис. 5).

Ударна в'язкість дослідних зразків була високою та коливалась в межах від 4,2 (режим 6) до 7,1 Дж/см<sup>2</sup> (режим 5), причому досліджені режими термічної обробки змінюють її незначно. Причиною низьких показників ударної в'язкості та пластичності може бути вміст в дослідному сплаві заліза – майже 5 % (див. табл. 1), що призводить до утворення в процесі виплавки часток інтерметалідів титан – залізо, які негативно впливають на рівень ударної в'язкості дослідного титанового сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe [11].

З метою вибору оптимального режиму термообробки дослідного титанового сплаву Ti-2,8Al-

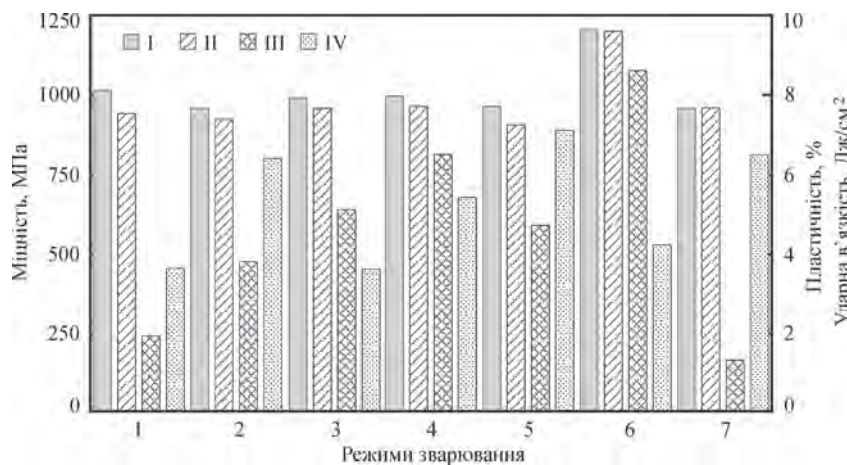


Рис. 5. Вплив режимів термообробки на показники міцності та пластичності титанового сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe (I – межа міцності; II – межа плинності; III – відносне звуження; IV – ударна в'язкість)

5,1Mo–4,9Fe було запропоновано критерій «якості» термообробки в умовних одиницях, який складається з вкладу режимів термообробки у комплексне підвищення (або зниження) сумарних показників міцності, пластичності та ударної в'язкості нового титанового сплаву відносно зразка без термообробки (зразок 2) (рис. 6). Тобто, зазвичай підвищення одних механічних властивостей, наприклад, міцності, визиває відповідне зниження пластичності. Але у деяких випадках це відбувається непропорційно. У зв'язку з цим було запропоновано критерій «якості»:

$$K_{\text{то}} = \sum \frac{(P_{\text{вихід}} - P_{\text{то}})}{P_{\text{вихід}}},$$

де  $K_{\text{то}}$  – критерій «якості»;  $P_{\text{вихід}}$  – вихідний параметр (межа міцності, межа плинності, відносне подовження, ударна в'язкість) зразка без термообробки;  $P_{\text{то}}$  – параметр термообробленого зразка.

Позитивні значення параметра  $K_{\text{то}}$  визначають комплексне підвищення властивостей, негативні – зниження.

Аналіз отриманих результатів показує, що комплексне підвищення властивостей зварних з'єднань при ЕПЗ можливо отримати при використанні режиму 5. При застосуванні термічної обробки при АДЗ зварюванні (режим 7) неможливо отримати оптимальне поєднання міцності, пластичності та ударної в'язкості.

Використання однакових режимів термообробки – нагрівання до 760 °С та наступне уповільнене охолодження зі швидкістю 1 °С/хв (режими 5 та 7) на зварних з'єднаннях, виконаних двома різними видами зварювання ЕПЗ та АДЗ показало, що механічні властивості відрізняються незначною мірою – межа міцності становила 964 МПа (ЕПЗ) проти 958 МПа (АДЗ) відповідно.

Значення ударної в'язкості зразків з гострим надрізом для двох термооброблених зразків змінюється також незначно – 7,1 Дж/см<sup>2</sup> (ЕПЗ) проти 6,5 Дж/см<sup>2</sup> (АДЗ). Основна відмінність після термообробки спостерігається у пластичних властивостях (відносне подовження та звуження). Термообробка зразків, виконаних ЕПЗ, призводить до

значно кращих пластичних властивостей (табл. 3). Це можливо пояснити тим, що пластичні властивості в термооброблених зразках, виконаних ЕПЗ, вище за рахунок збільшення в'язкої складової на поверхні руйнування (рис. 3, *ε*, *ж*). В зразках, виконаних ЕПЗ, злам містить 28 % в'язкої складової, а в зразках, виконаних АДЗ, менше 15 %.

### Висновки

1. Встановлено, що локальна термічна обробка у вакуумній камері зразків зварних з'єднань дослідного титанового сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe, отриманих ЕПЗ за режимом 4 (ЛТО у вакуумній камері при температурі 750 °С протягом 5 хв) дозволяє отримати більш високі пластичні властивості зварних з'єднань, а також запобігти утворенню холодних тріщин після зварювання. Така термообробка призводить до більш рівномірного розташування ділянок в'язкого руйнування на поверхні зламів.

2. Показано, що при використанні термічної обробки зразків титанового сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe за режимом 5 (нагрівання до 760 °С, уповільнене охолодження зі швидкістю 1 °С/хв) дозволяє отримати оптимальний комплекс пластичних ( $\delta = 4,7 \%$ ,  $\psi = 12,6 \%$ ) та ударних ( $KCV = 7,1$  Дж/см<sup>2</sup>) властивостей.

3. Встановлено, що повільне охолодження після АДЗ також забезпечує підвищення пластичних властивостей зварних з'єднань титанового сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe, але вони менші ніж при ЕПЗ з повільним охолодженням, що пов'язано з підвищеною швидкістю охолодження при АДЗ.

### Список літератури

- Lütjering, G., Williams, J.C. (2003) *Titanium (engineering materials and processes)*. Berlin, Springer-Verlag, 3.
- (2002) ЕНКTechnologies: «*Opportunities for low cost titanium in reduced fuel consumption, improved emissions, and enhanced durability heavy-duty vehicles*», Subcontract 4000013062, ЕНКTechnologies, Vancouver, WA, USA.
- Lavender, C.A. (2004) *Low-cost titanium evaluation*. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, USA.
- (2004) ЕНКTechnologies: «*Summary of emerging titanium cost reduction technologies. A study performed for US Department of Energy and Oak Ridge National Laboratory*», Subcontract 4000023694, ЕНКTechnologies, Vancouver, WA, USA.
- Ночовная Н.А., Анташев В.Г. (2007) Титановые сплавы серии «LOW-COST» и возможности их применения. *Сб. тр. Международной конференции «Ti-2007 в СНГ»*. Киев, РИО ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, сс. 191–192.
- Bania, P.J. (1993) Beta titanium alloys and their role in the titanium industry. In: *Beta Titanium Alloys in the 90's*, TMS Publications, Warrendale, PA, 3–14.
- Weiss, I., Semiatin, S.L. (1998) Thermomechanical processing of beta titanium alloys on overview. *Mat. Sci. Eng. A*, 243, 46–65. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00783-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00783-1)
- Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Березос В.О. та ін. (2020) Структура та властивості конструкційних економізованих сплавів на основі титану, одержаних способом ЕПП. *Сучасна електротехнологія*, 4, 7–15. <https://doi.org/10.37434/sem2020.04.02>

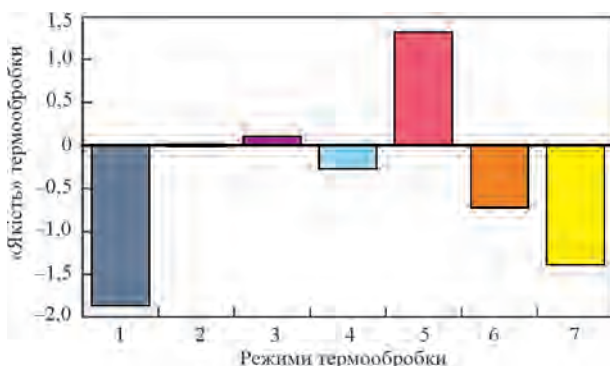


Рис. 6. Вплив режимів термообробки на «якість» термообробки

9. Ахонин С.В., Белоус В.Ю., Селин Р.В. и др. (2018) Электронно-лучевая сварка и термообработка сварных соединений высокопрочного псевдо-β-титанового сплава VT19. *Автоматическая сварка*, 7, 12–17. <https://doi.org/10.15407/as2018.07.02>
10. Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В. та ін. (2021) Вплив термічної обробки на структуру та властивості зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів на основі β-фази. *Сучасна електротехнологія*, 4, 51–58. <https://doi.org/10.37434/sem2020.04.11>
11. Григоренко С.Г., Таранова Т.Г., Костін В.А. та ін. (2021) Вплив термічної обробки на структуру та характер руйнування зварного з'єднання економнолегованого титанового сплаву. *Там само*, 3, 42–48.
12. Феллоуз Дж. (1982) *Фрактография и атлас фрактограмм*. Бернштейн М.Л. (ред.). Москва, Металлургия.
5. Nochovnaya, N.A., Antashev, V.G. (2007) Titanium alloys of «LOW-COST» series and possibilities of their application. In: Proc. of Int. Conf. on Ti-2007 in CIS (Kyiv, IMP), 191–192.
6. Bania, P.J. (1993) Beta titanium alloys and their role in the titanium industry. In: *Beta Titanium Alloys in the 90's*, TMS Publications, Warrendale, PA, 3–14.
7. Weiss, I., Semiatin, S.L. (1998) Thermomechanical processing of beta titanium alloys on overview. *Mat. Sci. Eng. A*, 243, 46–65. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00783-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00783-1)
8. Akhonin, S.V., Bilous, V.Yu., Berezos, V.O. et al. (2020) Structure and properties of structural sparsely-doped titanium-based alloys produced by EBM. *Suchasna Elektrometal.*, 4, 7–15 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37434/sem2020.04.02>
9. Akhonin, S.V., Belous, V.Yu., Selin, R.V. et al. (2018) Electron beam welding and heat treatment of welded joints of high-strength pseudo-β titanium alloy VT19. *The Paton Welding J.*, 7, 10-14. <https://doi.org/10.15407/as2018.07.02>
10. Akhonin, S.V., Belous, V.Yu., Selin, R.V. et al. (2021) Influence of heat treatment on the structure and properties of welded joints of high-strength titanium alloys based on β-phase. *Suchasna Elektrometal.*, 4, 51–58 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37434/sem2020.04.11>
11. Grigorenko, S.G., Taranova, T.G., Kostin, V.A. et al. (2021) Influence of heat treatment on the structure and fracture mode of welded joints of sparsely-alloyed titanium alloy. *Suchasna Elektrometal.*, 3, 42–48 [in Ukrainian].
12. Fellows, J. (1982) *Fractography and atlas of fractograms*. Ed. by Bernshtejn, M.L., Moscow, Metallurgiya [in Russian].

References

1. Lütjering, G., Williams, J.C. (2003) *Titanium (engineering materials and processes)*. Berlin, Springer-Verlag, 3.
2. (2002) EHKTechnologies: «Opportunities for low cost titanium in reduced fuel consumption, improved emissions, and enhanced durability heavy-duty vehicles», Subcontract 4000013062, EHKTechnologies, Vancouver, WA, USA.
3. Lavender, C.A. (2004) *Low-cost titanium evaluation*. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, USA.
4. (2004) EHKTechnologies: «Summary of emerging titanium cost reduction technologies. A study performed for US Department of Energy and Oak Ridge National Laboratory», Subcontract 4000023694, EHKTechnologies, Vancouver, WA, USA.

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON IMPROVEMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF SPARSELY-DOPED TITANIUM ALLOY Ti–2.8Al–5.1Mo–4.9Fe

S.V. Akhonin, V.Yu. Bilous, V.A. Kostin, S.G. Hrygorenko, O.L. Puzrin, E.L. Vrzhyzhevskiy

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 most important advantage of pseudo-β-titanium alloys is their high strength, and the disadvantages include the high cost of alloying elements. Sparsely-doped alloys, such as LCB, Timetal 125, etc. were developed to lower the titanium alloys cost. This class of titanium alloys is promising for application in inexpensive structures. Development of welding technology and modes of heat treatment of such alloy joints is an important task. In this work investigations were performed of the surface of fractures in welded joints of titanium alloy of Ti–2.8Al–5.1Mo–4.9Fe system, obtained after impact toughness testing. It was found that local heat treatment in the vacuum chamber of specimens of welded joints of test titanium alloy Ti–2.8Al–5.1Mo–4.9Fe produced by EBW by mode 4 (LHT in a vacuum chamber at the temperature of 750 °C for 5 min) allows producing higher ductility properties of welded joints, and preventing post-weld cold cracking. Such heat treatment leads to a more uniform arrangement of ductile fracture areas on fracture surfaces. 12 Ref., 3 Tabl., 6 Fig.

Keywords: titanium, pseudo-β-titanium alloys, sparsely-doped titanium alloys, welded joints, welding, electron beam welding, local heat treatment, tungsten electrode, heat treatment, mechanical properties, fractures surfaces, quality criterion

Надійшла до редакції 08.12.2022

Технічна діагностика Київської телевежі методом фотограметрії



Фахівці ІЕЗ ім. Є.О. Патона провели дистанційне обстеження руйнувань Київської телевежі внаслідок ракетного удару 1 березня 2022 р. За допомогою квадрокоптера DJI Air 2S було проведено фотозйомку нижнього ярусу телевежі та побудована її тривимірна модель методом фотограметрії з використанням програмного забезпечення 3DF Zephyr. Для розрахунку положень елементів конструкції у просторі використовувалось більше двох тисяч фотографій, які зроблені під різними кутами та відстанями відносно вежі. Особливістю метода фотограметрії є можливість проводити вимірювання розмірів окремих ділянок та кутів між визначеними елементами конструкції. Це дозволяє оцінити розміри дефектів, їх точне місцеположення. Проведене дистанційне дослідження Київської телевежі дозволило отримати дані про дефекти у вигляді отворів від 5 мм, візуалізувати пошкодження вузлів з'єднання несучих елементів конструкції. Отримані дані будуть використовуватись при проведенні технологічних заходів для відновлення та ремонту Київської телевежі.