

PACS numbers: 42.62.Cf, 61.72.Qq, 62.20.F-, 62.20.M-, 81.20.Vj, 81.70.Bt

## **Вплив технологічних особливостей лазерного зварювання титан-алюмінієвих конструкцій на структуроутворення зварних з'єднань**

В. Д. Шелягін, А. В. Бернацький, О. М. Берднікова,  
В. М. Сидорець, О. В. Сіора, С. Г. Григоренко

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,  
вул. Казимира Малевича, 11,  
03150 Київ, Україна*

Досліджено вплив технологічних особливостей лазерного зварювання титан-алюмінієвих конструкцій на структуроутворення зварних з'єднань. Встановлено, що для підвищення ефективності використання лазерного випромінювання та усунення порогового ефекту віддзеркалення–поглинання випромінювання алюмінієвими поверхнями доцільно вести зварювання титанових стопів з алюмінієвими таким чином, щоб за рахунок топлення титанового стопу здійснювалося часткове обтоплення алюмінієвого стопу. Доведено, що доцільним типом зварного з'єднання є напусткове з'єднання з розташуванням титанового елемента зверху, а алюмінієвого — знизу. Засобами аналітичної растрової електронної мікроскопії та енергодисперсійного аналізу встановлено, що уздовж всієї лінії стоплення зварного з'єднання розташовується інтерметалідний прошарок, товщина якого залежить від режиму зварювання. Показано, що при виконанні лазерного зварювання з напуском 6 мм та погонною енергією 350–400 Дж/мм товщина цього прошарку є мінімальною та складає 1–5 мкм. Збільшення погонної енергії вище значення 400 Дж/мм або зменшення величини напуску не є доцільними, тому що при цьому спостеріга-

---

Corresponding author: Volodymyr Dmytrovych Shelyagin  
E-mail: laser-77@online.ua

*E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,  
11 Kazymyr Malevych Str., UA-03150 Kyiv, Ukraine*

Citation: V. D. Shelyagin, A. V. Bernatskyi, O. M. Berdnikova, V. M. Sydorets, O. V. Siora, and S. G. Gryhorenko, Effect of Technological Features of Laser Welding of Titanium-Aluminium Structures on the Microstructure Formation of Welded Joints, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 3: 363–379 (2020) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.42.03.0363](https://doi.org/10.15407/mfint.42.03.0363).

ється зростання товщини інтерметалідного прошарку до 25–100 мкм, що, в свою чергу, призводить до зниження рівня механічних характеристик. При виборі технологічних режимів лазерного зварювання напусткових з'єднань титанових стопів з алюмінієвими слід керуватися критерієм мінімізації величини інтерметалідного прошарку. Для зниження крихкості з'єднання і підвищення його механічних характеристик розмір цієї зони не повинен перевищувати 10 мкм.

**Ключові слова:** титан, алюміній, інтерметаліди, лазерне зварювання, напусткове з'єднання, мікроструктура, механічні властивості.

The effect of the technological features of laser welding of titanium-aluminium structures on the microstructure formation in welded joints is investigated. As revealed, for the increasing of laser radiation usage efficiency and elimination a threshold effect of reflection-absorption by aluminium surfaces, it is expedient to weld titanium alloys with aluminium in such a way that partial melting of the aluminium alloy is carried out on account of melting the titanium alloy. As proven, a suitable type of welded joint is an overlap joint with the location of the titanium part on top and the aluminium one—on the bottom. By means of analytical scanning electron microscopy and energy dispersive analysis, it is revealed that along the entire fusion line of the welded joint, there is an intermetallic layer, the thickness of which depends on the welding mode. As shown, when the laser welding process is produced with an overlap of 6 mm and heat input of 350–400 J/mm, the thickness of this layer is minimal and is 1–5  $\mu\text{m}$ . An increase in the heat input value above 400 J/mm or a decrease in the amount of overlap is not advisable because of increasing in the thickness of intermetallic layer up to 25–100  $\mu\text{m}$ . This, in turn, leads to a decrease in the level of mechanical characteristics. When choosing the technological modes of laser welding of overlap joints of titanium alloys with aluminium ones, it should be guided by the criterion of minimizing the size of the intermetallic layer. To reduce the brittleness of the joint and increase its mechanical characteristics, the size of this area should not exceed 10  $\mu\text{m}$ .

**Key words:** titanium, aluminium, intermetallics, laser welding, lap joints, microstructure, mechanical properties.

Исследовано влияние технологических особенностей лазерной сварки титан-алюминиевых конструкций на структурообразование в сварных соединениях. Установлено, что для повышения эффективности использования лазерного излучения и устранения порогового эффекта отражения-поглощения алюминиевыми поверхностями целесообразно вести сварку титановых сплавов с алюминиевыми таким образом, чтобы за счёт плавления титанового сплава осуществлялось частичное плавление алюминиевого сплава. Доказано, что целесообразным типом сварного соединения является нахлесточное соединение с расположением титанового элемента сверху, а алюминиевого — снизу. Средствами аналитической растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа установлено, что вдоль всей линии сплавления сварного соединения располагается интерметаллидный слой, толщина которого зависит от режима сварки. По-

казано, что при выполнении лазерной сварки с напуском 6 мм и погонной энергией 350–400 Дж/мм толщина этого слоя минимальна и составляет 1–5 мкм. Увеличение погонной энергии выше значения 400 Дж/мм или уменьшение величины напуска не являются целесообразными, так как при этом наблюдается рост толщины интерметаллидной прослойки до 25–100 мкм, что, в свою очередь, приводит к снижению уровня механических характеристик. При выборе технологических режимов лазерной сварки нахлесточных соединений титановых сплавов с алюминиевыми следует руководствоваться критерием минимизации величины интерметаллидной прослойки. Для снижения хрупкости соединения и повышения его механических характеристик, размер этой зоны не должен превышать 10 мкм.

**Ключевые слова:** титан, алюминий, интерметаллиды, лазерная сварка, нахлесточное соединение, микроструктура, механические свойства.

*(Отримано 21 червня 2019 р.; остаточн. варіант — 19 грудня 2019 р.)*

## 1. ВСТУП

### 1.1. Проблема зварювання різнорідних матеріалів

При виготовленні різноманітних конструкцій для досягнення високих показників їх експлуатаційних та механічних характеристик, широко застосовують комбіновані зварні вузли з різнорідних металевих матеріалів. У цьому випадку найбільш повно реалізуються переваги кожного з них та заощаджуються витрати кольорових металів. Так, наприклад, з'єднання з різнорідних металів все ширше впроваджуються в сучасних інноваційних енергетичних установках, у літальних апаратах та криогенній техніці, у водневій енергетиці тощо [1–3].

Природньо, зварювання різнорідних металів представляє більш складну задачу, ніж зварювання однорідних [3–5]. Кількість пар різнорідних металів, що легко зварюються, досить обмежена [1, 3, 6–11]. До їх числа відносяться композиції металів, що мають повну або досить широку область взаємної розчинності в твердому стані, наприклад, мідь–залізо, титан–ванадій, алюміній–срібло [3]. Тим часом вже зараз необхідно зварювати алюміній і його стопи зі сталлю, титаном, міддю; титан, ніобій, цирконій і його стопи — зі сталлю та іншими металами.

Для більшості пар різнорідних металів або стопів, що необхідно зварювати, характерні істотні відмінності температури топлення, густини, теплофізичних властивостей, особливо коефіцієнту лінійного розширення. Відрізняються також і кристалографічні характеристики — тип кристалічної ґратниці та її параметри [1, 3, 7, 9–11].

Для таких металів, як титан, ніобій, тантал, молібден, додаткові труднощі виникають у зв'язку з тим, що при нагріванні ці метали активно взаємодіють з газами атмосфери [1, 3]. При цьому суттєво погіршуються властивості зварних з'єднань. У більшості випадків при обмеженій взаємній розчинності для основних комбінацій поєднань матеріалів, що зварюються, надзвичайно важко уникнути утворення стійких інтерметалідних фаз, яким притаманна висока твердість та крихкість [3, 5, 7–11].

Залежно від фізико-хімічних властивостей металів, що з'єднуються, їх товщини, габаритів деталей, вимог, що пред'являються до з'єднання, та інших чинників, для різномірних металів можуть бути застосовані різні способи зварювання: зварювання плавленням, зварювання–паяння і зварювання тиском (дифузійне, вибухом, холодне, тертям тощо) [1–12].

Найбільшою проблемою є зварювання таких пар металів, що утворюють інтерметаліди. В цьому випадку слід враховувати температурно-часові умови утворення шару інтерметалідів. Технологія зварювання вибирається таким чином, щоб товщина шару інтерметалідів була мінімальною, цей шар не мав дефектів у вигляді тріщин і пор, а тривалість контакту різномірних металів при максимальних температурах не перевищувала часу латентного періоду (часу, необхідного для досягнення граничної концентрації, вище якої утворюються інтерметаліди) [3, 5, 7–10].

Найбільш поширеним способом зварювання топленням є аргонно-дугове зварювання [1–3, 13–15]. Однак використання аргонно-дугового зварювання не забезпечує необхідні показники якості та надійності цих конструкцій, а зварювання в твердій фазі (наприклад, дифузійне) має дуже низьку продуктивність. Для одержання високого рівня вказаних характеристик необхідно використовувати джерела висококонцентрованого нагріву, які забезпечують зварювальні цикли з короткочасними етапами нагріву та охолодження (електронний промінь, лазерне випромінювання, плазмовий струмінь, гібридне зварювання) та мінімізують розміри як самого шва, так і зони термічного впливу на метали, що з'єднуються [2, 5, 8, 16–18].

## 1.2. Проблема зварювання титанових стопів з алюмінієвими

Для подолання труднощів, що зустрічаються при з'єднанні титану з іншими металами, нерідко доводиться використовувати спеціальну технологію і техніку зварювання, які для кожного з перерахованих способів мають свої особливості.

До теперішнього часу досить детально вивчені особливості зварювання топленням і в твердій фазі титану та ряду його стопів з більшістю конструкційних металів [1, 3, 7, 9–13, 15]. Титан добре

зварюється зі своїми аналогами — цирконієм і гафнієм. Практично підтверджена задовільна зварюваність титану з металами V групи періодичної системи — ванадієм, ніобієм і танталом, які мають необмежену розчинність в  $\beta$ -модифікації титану, обмеженою в  $\alpha$ -модифікації, і не утворюють з титаном хімічні сполуки [3]. Діаграми стану лише наближено можуть охарактеризувати металургійні процеси в місцях контакту різнорідних металів, оскільки вони описують тільки рівноважні умови. Високі швидкості охолодження при зварюванні не забезпечують умов рівноважного стану. Тому для оцінки зварюваності титану з іншими металами необхідні додаткові дані, отримані з аналізу процесів в конкретних умовах зварювання.

Проблема зварювання з'єднань з титанових і алюмінієвих стопів присутня в сучасних конструкціях інноваційних енергетичних установок, літальних апаратів, кріогенної техніки, радіоелектронної промисловості та в інших галузях машинобудування для з'єднання деталей і вузлів, виконаних з цих різнорідних металів.

Титан і алюміній — метали, що різко відрізняються за фізико-хімічними та механічними властивостями. Характер їх взаємодії описується діаграмою стану, що відноситься до систем з перитектичним перетворенням [3, 19]. В системі титан–алюміній можливі три перитектичні реакції. Перша протікає при температурі  $1460^{\circ}\text{C}$  з утворенням  $\gamma$ -фази, що представляє собою хімічну сполуку типу  $\text{TiAl}$  з концентрацією Алюмінію 36,03%, друга — при температурі  $1340^{\circ}\text{C}$  (60–64% Al) супроводжується утворенням сполуки  $\text{TiAl}_3$ . В результаті третьої реакції зі стопу, що містить 0,15% Ti, утворюється твердий розчин титану в алюмінії. Гранична розчинність титану в алюмінії дуже мала і становить 0,26–0,28% при температурі перетворення, що дорівнює  $665^{\circ}\text{C}$ . Зі зниженням температури розчинність титану зменшується і досягає при  $20^{\circ}\text{C}$  величини 0,07%. Алюміній в титані дає обмежені області  $\beta$ - і  $\alpha$ -розчинів [3].

Результати перших дослідів зі зварювання топленням титану з алюмінієм [3] показали, що при розтопленні титану неможливо уникнути окрихчування шва. Незначна величина розчинності титану в алюмінії і велика швидкість утворення хімічних сполук між металами сприяють отриманню крихких реактивних фаз у зварних швах. Зварні з'єднання з такими швами крихкі і не придатні до експлуатації. Використовуючи відмінність температур топлення титану і алюмінію, процес зварювання можна вести без розтоплення титану при наявності рідкої ванни алюмінію. При цьому короткочасність взаємодії рідкого алюмінію з титаном і застосування технологічних заходів можуть істотно зменшити кількість крихких фаз в зварному шві.

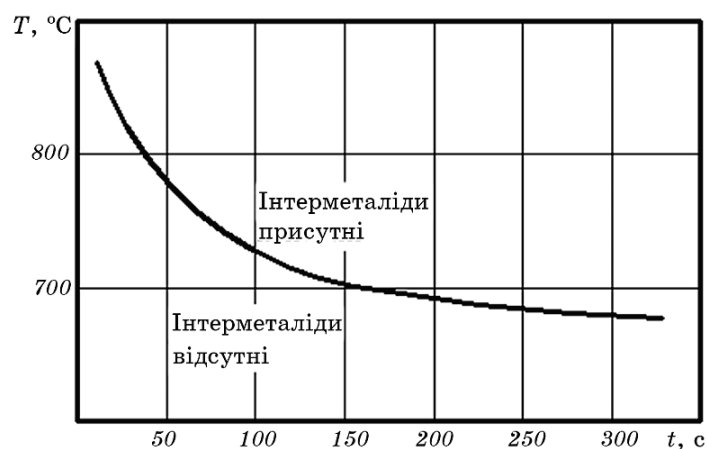
Розробка технологічних процесів зварювання, що забезпечують задовільні механічні властивості зварних з'єднань, правильний ви-

бір способу і параметрів процесу вимагають визначення гранично допустимих температурно-часових умов взаємодії зварюваних металів.

При зварюванні топленням титанових стопів з алюмінієвими важко уникнути утворення інтерметалідного прошарку значної товщини, який окрихчує зварний шов. У зв'язку з цим великого значення набуває розвиток альтернативних способів з'єднання цієї та інших пар різнорідних металів, що дозволяють уникнути утворення інтерметалідного прошарку або звести його товщину до мінімуму. В даний час одним з таких перспективних способів є зварювання лазерним випромінюванням.

При зварюванні титану з алюмінієм з використанням лазерного випромінювання, слід враховувати температурно-часові умови утворення шару інтерметалідів.

Виходячи з аналізу діаграми стану титан-алюміній [3, 19], а також температурної залежності латентного періоду утворення інтерметалідних прошарків  $\text{TiAl}_3$  в зоні контакту титану і алюмінію (рис. 1) [3], можна зробити висновок, що використовуючи відмінність температур топлення титану і алюмінію, процес лазерного зварювання можна вести без розтоплення титану при наявності рідкої ванни алюмінію. При цьому, завдяки короткочасності взаємодії рідкого алюмінію з титаном при лазерному зварюванні, концентрація рідкого алюмінію буде недостатня для утворення  $\gamma$ -фази, а кількість  $\text{TiAl}_3$  може бути істотно зменшена.



**Рис. 1.** Температурно-часові залежності утворення сполуки  $\text{TiAl}_3$  при контакті титану з рідким алюмінієм [3].

**Fig. 1.** Temperature-time dependence of the formation of compounds  $\text{TiAl}_3$  in contact of titanium with liquid aluminium [3].

### 1.3. Мета та завдання дослідження

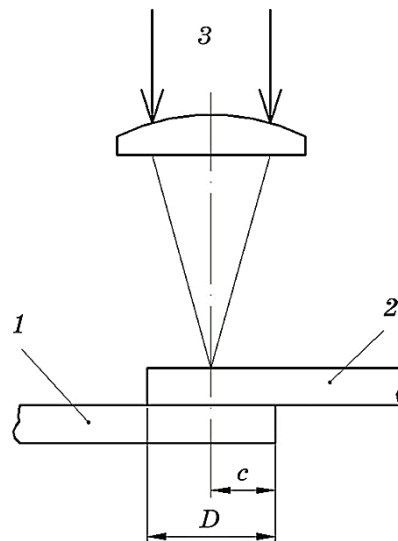
Шляхом проведення серії експериментальних досліджень по лазерному зварюванню титан-алюмінієвих напусткових з'єднань виявити характерні особливості технології, що забезпечують зварюваність з'єднань такого типу. Методами електронної мікроскопії отримати результати, що дозволять прояснити природу структуро- і фазоутворення в області контакту зварних з'єднань з різномірних матеріалів.

## 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1. Лазерне зварювання

Розробку технологічної методики лазерного зварювання з'єднань титанових стопів з алюмінієвими виконували з використанням зразків листового прокату з титанового стопу BT1-0 товщиною 1,0 мм і алюмінієвого стопу АМг6 товщиною 1,2 мм. Проведені раніше дослідження довели, що для підвищення якості зварного з'єднання алюмінієвого і титанового стопів необхідно зменшити розмір перехідної зони, яка містить інтерметалідні фази (такі як  $Ti_3Al$ ,  $TiAl$ ,  $TiAl_3$ ). Для підвищення ефективності використання лазерного випромінювання та усунення порогового ефекту віддзеркалення—поглинання випромінювання алюмінієвими поверхнями було запропоновано вести зварювання титанових стопів з алюмінієвими таким чином, щоб за рахунок топлення титанового стопу здійснювалося часткове топлення алюмінієвого. Виходячи з цього, доцільним типом зварного з'єднання є напусток. Для досягнення максимальних значень механічних характеристик в такому зварному з'єднанні титановий елемент в ньому розташовували зверху, а алюмінієвий стоп — знизу, як показано на рис. 2.

У проведених експериментах використовували Nd:YAG-лазер «DY044» виробництва фірми «Rofin-Sinar» (Німеччина) з довжиною хвилі випромінювання 1,06 мкм. Безпосередньо перед проведенням експериментів з лазерного зварювання зразки з титанового і алюмінієвого стопів піддавали механічному очищенню від оксидів, шляхом шабрення. Процес зварювання титанових з алюмінієвими стопами вели з використанням спеціальної технологічної головки, що дозволяла захищати метали в зоні обробки від контакту з атмосферою. В якості захисних газів використовували аргон і гелій. Конструкція цієї головки дозволяла подавати різні гази як безпосередньо в зону обробки, так і в зону металу шва, що кристалізувався і охолоджується. Параметри технологічних режимів зварювання варіювалися в наступних діапазонах: потужність лазерного випромінювання 2–4,4 кВт, швидкість обробки 5–20 мм/с, витрати захи-



**Рис. 2.** Схема лазерного зварювання в напусток зразків з титанового і алюмінієвого стопів (1 — деталь з алюмінієвого стопу, 2 — деталь з титанового стопу, 3 — лазерний промінь, що падає на фокусуючу лінзу,  $D$  — величина напустку у зварному з'єднанні,  $c$  — відстань до осі зварного з'єднання відносно краєк деталей).

**Fig. 2.** The scheme of overlap laser welding of samples of titanium and aluminium alloys (1—the part from an aluminium alloy, 2—the part from a titanium alloy, 3—a laser beam falling on the focusing lens,  $D$ —overlap in the welded joint,  $c$ —distance to axis of the welded joint, relative to the edges of the parts).

сних газів — гелію в зоні обробки — 10 л/хв ( $167 \text{ см}^3/\text{с}$ ), аргону для захисту металу шва 14 л/хв ( $233 \text{ см}^3/\text{с}$ ). При проведенні експериментів лазерний промінь спрямовувався на титановий стоп, як показано на рис. 2. Величина напустку  $D$  титанового стопу ВТ1-0 на алюмінієвий стоп АМг6 у зварному з'єднанні варіювалася в межах 2–12 мм. Положення місця розташування осі зварного з'єднання відносно краєк деталей  $c$  відповідало половині величина напустку  $D$ , як показано на рис. 2.

## 2.2. Механічні випробування

Випробування на статичний одноосьовий поперечний розтяг одержаних зразків зварних з'єднань виконували у відповідності до ДСТУ EN ISO 4136:2014 «Випробування зварних з'єднань металевих матеріалів руйнівні» на розривній машині «LEIPZIG CD-4-400-2000-4000T» компанії «VEB WERKSTOFFPRUFMASCHINEN»



(Німеччина). Метою випробування було визначення навантаження, необхідного для руйнування зразка при статичному розтягуванні, і виявлення розташування місця руйнування зварного з'єднання.

### 2.3. Металографічні дослідження

Металографічні дослідження одержаних зварних з'єднань виконували відповідно до стандарту ISO 17639: 2003 «Випробування з руйнуванням зразка зварних швів в металевих матеріалах. Макро- і мікроскопічне дослідження зварних швів». За допомогою оптичної та скануючої електронної мікроскопії досліджено зразки зварних з'єднань, які відрізняються параметрами технологічних режимів зварювання.

Зразки для металографічних досліджень готували на високошвидкісних полірувальних кругах з використанням алмазних паст різної дисперсності. Виявлення структури зварного з'єднання проводилося шляхом йонного травлення на установці «Fine Coat Ion Sputter JFC- 1100» виробництва фірми «JEOL» (Японія).

Дослідження мікроструктури виконували на металографічному оптичному мікроскопі «Versamet-2» (виробник «Unitron», США) при різних збільшеннях. Зображення мікроструктур отримано за допомогою цифрової фотокамери «C-5050» фірми «Olympus» (Японія).

Твердість фазових складових вимірювали на мікротвердомірі «М-400» фірми «Лесо» (США) при навантаженні 25 г, час прикладання навантаження 10 с.

Аналітична растрова електронна мікроскопія зварних з'єднань виконана на мікроскопі «SEM-515» виробництва компанії «PHILIPS» (Голландія). Для енергодисперсійного аналізу застосовано спектрометр і системи компанії «LINK-SISTEM» (Великобританія).

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

За результатами проведення експериментальних досліджень з лазерного зварювання напусткових з'єднань з титанового стопу BT1-0 товщиною 1,0 мм та алюмінієвого стопу АМг6 товщиною 1,2 мм встановлено, що для виконання умови відсутності утворення рідкої фази титанового стопу і наявності рідкої ванни алюмінієвого стопу процес лазерного зварювання необхідно проводити з погонною енергією процесу у межах 350–400 Дж/мм. Зниження значень погонної енергії нижче 350 Дж/мм призводило до наявності окремих ділянок з відсутністю зони стоплення. У той же час збільшення погонної енергії процесу до значень, що перевищували 400 Дж/мм,

призводило до топлення титанового стопу та, як наслідок, до утворення великого за розмірами та крихкого інтерметалідного прошарку у зоні стоплення, як показали результати наступних досліджень.

З метою зменшення витрат матеріалів при зварюванні дослідних зразків (і матеріаломісткості конструкцій виробів в подальшому), спочатку було виконано дослідження зі встановлення мінімально допустимої величини напуску титанового стопу ВТ1-0 на алюмінієвий стоп АМг6 у зварному з'єднанні. Експериментальним шляхом було встановлено, що величина напуску титанового стопу ВТ1-0 на алюмінієвий стоп АМг6 у зварному з'єднанні повинна складати від 6 мм до 10 мм для обраних товщин вказаних матеріалів.

Збільшення величини напуску  $D$  більше 10 мм недоцільно з точки зору економії матеріалів.

Зменшення ж величини напуску менше значення  $D = 6$  мм призводило до часткового обтоплення кромek зразків, що зварювались. Це було пов'язано з так званим крайовим ефектом, а саме накопиченням надлишкового тепла на крайках матеріалів, що зварюються. У зв'язку з тим, що доведення до температури топлення титанової частини з'єднання збільшувало ймовірність утворення інтерметалідного прошарку значної величини, здатного негативно вплинути на механічні властивості зварного з'єднання в процесі експлуатації, було прийнято рішення про вживання заходів для нівелювання наслідків «крайового» ефекту. Зменшення погонної енергії процесу зварювання шляхом збільшення швидкості обробки або зниження потужності лазерного випромінювання не призводили до бажаного результату, оскільки були отримані зразки зі значними по довжині ділянками непровару.

Позитивний результат було отримано при збільшенні величини напуску титанового стопу на алюмінієвий до 6 мм. Відстань від осі променя до торців зразків становила 3,0 мм. При збереженні інших параметрів технологічного процесу незмінними, були отримані якісно зварені зразки з заданою геометрією зварного з'єднання. Зовнішній вигляд зразків, зварених за даних умов, наведено на рис. 3.

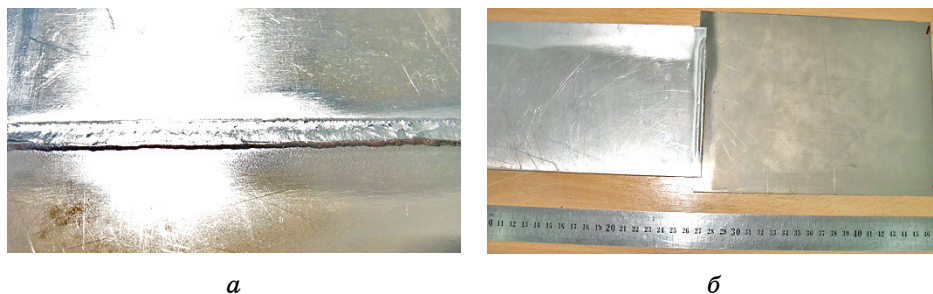
Механічні випробування на одноосьовий поперечний розтяг показали, що для зварних з'єднань внапусток зі стопів ВТ1-0 та АМг6, одержаних з величиною напуску менше 6 мм, або при значенні погонної енергії вище 400 Дж/мм, характерним є руйнування по металу шва зварного з'єднання. У цьому випадку величина тимчасового спротиву руйнуванню складає 190–270 МПа. У той час, коли для зварних з'єднань внапусток зі стопів ВТ1-0 та АМг6, одержаних з величиною напуску більше 6 мм при значенні погонної енергії 350–400 Дж/мм, характерно руйнування по основному металу (алюмінієвому стопу АМг6), при значенні тимчасового спротиву руйнуванню у 330–380 МПа.

Металографічні дослідження з'єднань стопів ВТ1-0 ( $\delta = 1,0$  мм) зі стопом АМг6 ( $\delta = 1,2$  мм), отриманих лазерним зварюванням, виконані на оптичному мікроскопі «Versamet-2» (рис. 4), показали відсутність таких дефектів, як пори і тріщини. У зоні стоплення було виявлено прошарок інтенсивного травлення. МікродюрOMETричний аналіз цього прошарку, виконаний на мікротвердомірі ПМТ-3, показав підвищення мікротвердості до  $HV_{0,025} = 421\text{--}572$  МПа при мікротвердості основного матеріалу АМг6  $HV_{0,025} = 105\text{--}110$  МПа, що дозволило припустити наявність інтерметалідних фаз в даній області.

Засобами аналітичної растрової електронної мікроскопії та енергодисперсійного аналізу були проведені дослідження структурних змін по лінії стоплення зварного з'єднання стопів АМг6 та ВТ1-0 в областях з фазовими утвореннями і без них. А саме, було визначено об'ємну частку і параметри фазових утворень уздовж лінії стоплення; встановлено розподіл хімічних елементів (за рахунок точкового аналізу з кроком від 1 до 5 мкм) в поперечному перерізі в напрямку від основного металу до лінії з'єднання.

Оцінка об'ємної частки поодиноких фазових утворень уздовж лінії стопу при невеликому збільшенні (рис. 5, а) показала, що при виконанні процесу лазерного зварювання з напуском 6 мм та погонною енергією 350–400 Дж/мм, для ділянки довжиною близько 1700 мкм, об'ємна частка поодиноких фазових утворень становить 18–20%.

Спостерігаються поодинокі фазові утворення довжиною 50–60 мкм і шириною 7–10 мкм (рис. 5, б, в). При великих збільшеннях (рис. 5, в, з), крім чистої лінії стоплення, чітко спостерігається тонкий прошарок по границі розділу «фазові утворення–алюмінієвий



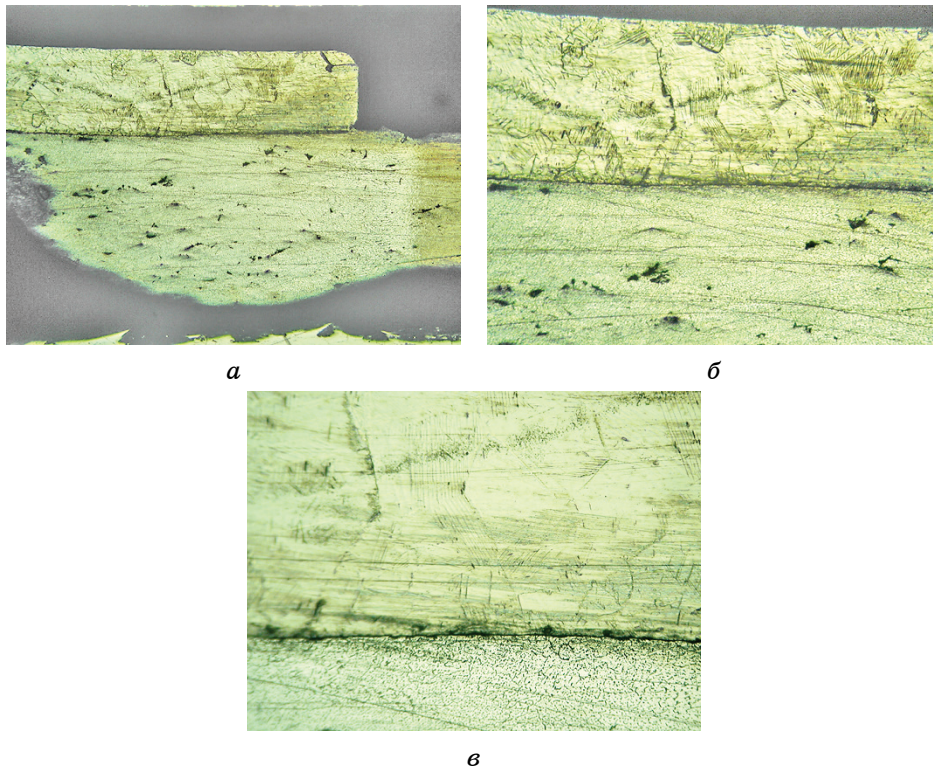
**Рис. 3.** Зовнішній вигляд чільної (а) і зворотної (б) сторін зразків після лазерного зварювання за допомогою Nd:YAG-лазера «DY044», при напуску титанового стопу ВТ1-0 на алюмінієвий стоп АМг6  $D = 6$  мм.

**Fig. 3.** The front (a) and reverse (b) sides of the samples after laser welding by Nd:YAG laser 'DY044', when overlap of titanium alloy VT1-0 on aluminium alloy AMg6 is  $D = 6$  mm.

стоп», товщиною 0,5–2 мкм (область з фазовими утвореннями на рис. 5, б) і по границі розділу «алюмінієвий стоп–титановий стоп» товщиною 0,5–1 мкм (область без фазових утворень). Максимальні розміри цього прошарку 3–5 мкм спостерігаються тільки в локальних ділянках з фазовими утвореннями.

Проведені дослідження характеру розподілу хімічних елементів в поперечному перерізі в напрямку від основного металу до лінії з'єднання (точковий аналіз з кроком від 1 мкм до 5 мкм, табл. 1) на ділянці з фазовими утвореннями представлено на рис. 5, в. Вони показали наступне.

На ділянці з фазовими утвореннями з боку алюмінію проникнення Ti (до 1%) відбувається на глибину до 10 мкм (від границі розді-



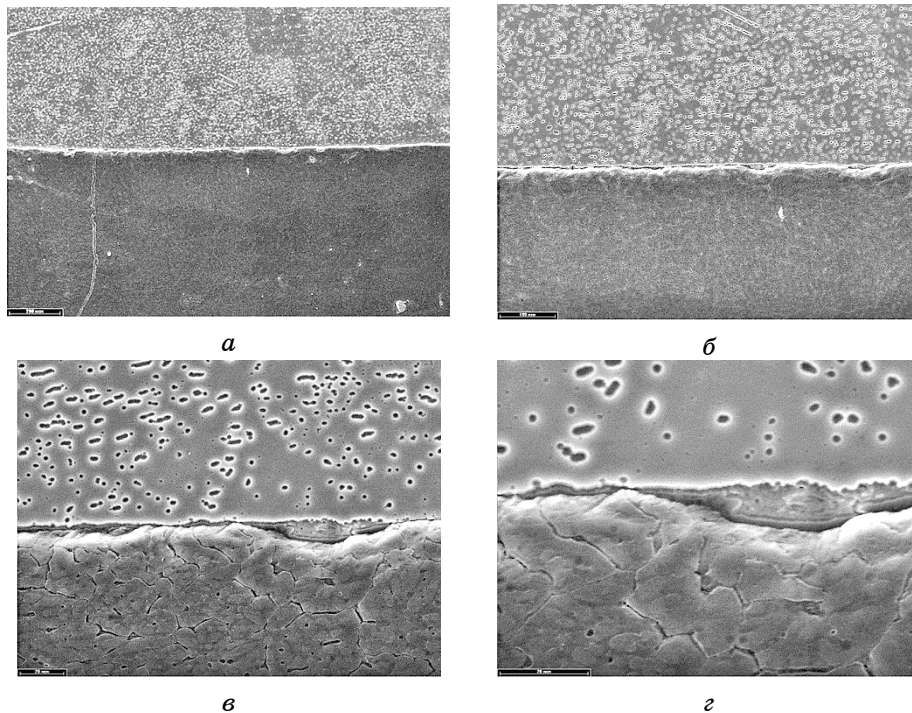
**Рис. 4.** Мікроструктура зварного з'єднання, одержаного зварюванням Nd:YAG-лазером «DY044», з напуском  $D = 6$  мм титанового стопу VT1-0 (товщиною 1,0 мм) на алюмінієвий стоп АМг6 (товщиною 1,2 мм);  $\times 25$  (а);  $\times 50$  (б);  $\times 100$  (в).

**Fig. 4.** Microstructure of the welded joint obtained by Nd:YAG welding with a 'DY044' laser at the overlap of  $D = 6$  mm of a VT1-0 titanium alloy (1.0 mm thick) and AMg6 aluminium alloy (1.2 mm thick);  $\times 25$  (a);  $\times 50$  (б);  $\times 100$  (в).



лу «фазові утворенні–алюмінієвий стоп»). Наявність Al в титановому стопі VT1-0 на відстані 10 мкм від границі розподілу «фазові утворення–титановий стоп» більш помітна (зафіксовано вміст Алюмінію до 1,36%).

В самих фазових утвореннях (рис. 5, *в, з*, рис. 6) спостерігається нерівномірний вміст Al і Ti (аналіз точок № 11–15). Тонкий прошарок по межі поділу «фазові утворенні–алюмінієвий стоп» на локальній ділянці з найбільшими її розмірами (товщиною до 5 мкм) характеризується рівномірним вмістом Al та Ti з наявністю біля 71–76% Al і 23–27% Ti (аналіз точок № 6–9). Такий вміст елементів (кількісно в масових %) найбільш наближений за складом до фазових виділень інтерметалідного типу  $TiAl_3$ . У точках № 5 і № 10 прошарку фазових виділень з товщиною 1,5–2,0 мкм вміст Al і Ti дещо відрізняється від точок № 6–9 в результаті збудження зондом прилеглих мікроб'ємів металу.



**Рис. 5.** Мікроструктура з'єднання після лазерного зварювання VT1-0 з АМг6, отримана засобами електронної мікроскопії;  $\times 75$  (*а*);  $\times 170$  (*б*);  $\times 680$  (*в*);  $\times 1368$  (*з*).

**Fig. 5.** Microstructure of the joint after laser welding of VT1-0 with AMg6 obtained by electron microscopy;  $\times 75$  (*a*);  $\times 170$  (*б*);  $\times 680$  (*в*);  $\times 1368$  (*з*).

**ТАБЛИЦЯ 1.** Розподіл хімічних елементів в зоні зварного з'єднання титанового стопу VT1-0 з алюмінієвим стопом АМг6.**TABLE 1.** Chemical elements distribution in the zone of the welded joint of titanium alloy VT1-0 with aluminium alloy АМg6.

№	Ti	Al	Mg	Mn,	Fe	Si	Місце	Об'єкт***
	% мас.						мкм	мкм
1	0,63	98,74	0,19	0,13	0,07	0,36	10*	
2	2,74	93,9	0,7	0,23	0,11	0,5	5*	
3	6,9	91,3	0,9	0,3	0,3	0,4	2*	
4	16,32	81,9	0,4	0,23	0,8	0,5	1*	
5	37,85	61,2	—	0,14	0,34	0,56		2
6	26,9	71,1	1,39	0,1	0,28	0,26		5
7	22,7	75,6	1,02	0,2	0,24	0,3		5
8	27,44	71,4	0,7	—	0,14	0,3		5
9	24,4	73,77	1,38	0,1	0,2	0,2		5
10	50,7	46,48	1,12	0,13	1,6	—		1,5
11	80,79	18,49	—	0,46	0,54	0,14		9
12	90,8	8,3	0,16	0,15	0,32	0,2		9
13	92,5	6,7	0,3	—	0,4	0,1		9
14	92,2	6,5	0,5	0,05	0,6	0,07		9
15	94,2	4,6	—	—	1,07	0,1		9
16	90,18	9,15	0,23	0,01	0,34	0,08	1**	
17	97,04	2,77	—	0,06	0,1	0,03	2**	
18	96,5	2,46	0,68	0,08	0,1	0,15	5**	
19	98,26	1,36	—	0,16	0,06	0,16	10**	

\* — в алюмінієвому стопі від лінії стоплення,

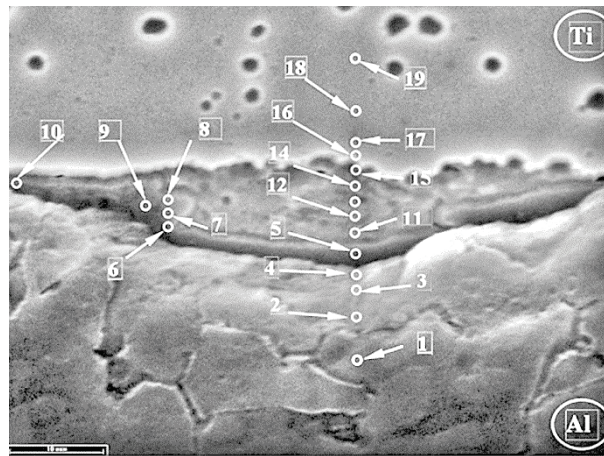
\*\* — в титановому стопі від лінії стоплення,

\*\*\* — фазові виділення по границям.

При збільшенні погонної енергії вище значення 400 Дж/мм або зменшенні величини напуску спостерігається зростання товщини інтерметалідного прошарку до 25–100 мкм. Це призводить до зниження рівня механічних характеристик, як було показано вище.

#### 4. ВИСНОВКИ

Для підвищення ефективності використання лазерного випроміню-



**Рис. 6.** Мікроструктура з'єднання після лазерного зварювання VT1-0 з АМг6, отримана засобами електронної мікроскопії,  $\times 2020$ .

**Fig. 6.** Microstructure of the joint after laser welding of VT1-0 with AMg6 obtained by electron microscopy,  $\times 2020$ .

вання та усунення порогового ефекту віддзеркалення–поглинання випромінювання алюмінієвими поверхнями доцільно вести зварювання титанових стопів з алюмінієвими таким чином, щоб за рахунок топлення титанового стопу здійснювалося часткове обтоплення алюмінієвого стопу. Виходячи з цього, доцільним типом зварного з'єднання є напусткове з'єднання, причому титановий елемент в ньому розташовується зверху, а алюмінієвий — знизу.

Засобами аналітичної растрової електронної мікроскопії і енергодисперсійного аналізу встановлено, що уздовж всієї лінії стоплення зварного з'єднання розташовується інтерметалідний прошарок, товщина якого залежить від режиму зварювання.

При виконанні процесу лазерного зварювання з напуском 6 мм та погонною енергією 350–400 Дж/мм товщина цього прошарку становить 1–5 мкм. В окремих місцях присутні зони фазових виділень товщиною до 10 мкм, в яких виявлена фаза  $\text{TiAl}_3$ .

Збільшення погонної енергії вище значення 400 Дж/мм або зменшення величини напуску не є доцільними, тому що при цьому спостерігається зростання товщини інтерметалідного прошарку до 25–100 мкм, що й призводить до зниження рівня механічних характеристик.

При виборі технологічних режимів лазерного зварювання напусткових з'єднань титанових стопів з алюмінієвими слід керуватися критерієм мінімізації величини інтерметалідного прошарку. Для зниження крихкості з'єднання і покращання його механічних ха-

рактистик розмір цієї зони не повинен перевищувати 10 мкм.

Одержані результати свідчать, що використання лазерних технологій є досить перспективним для зварювання титанових стопів з алюмінієвими. Подальший розвиток досліджень в цьому напрямі є доцільним.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. K. Martinsen, S. J. Hu, and B. E. Carlson, *CIRP Annals*, **64**: 679 (2015).
2. T. E. Abioye, T. O. Olugbade, and T. I. Ogedengbe, *J. Emerging Trends in Engineering Appl. Sci.*, **8**, No. 6: 225 (2017).
3. С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блащук и др., *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов* (Киев: Наукова думка: 1986).
4. Л. И. Маркашова, В. В. Арсенюк, Е. Н. Бердникова, И. Л. Богайчук, *Металлофиз. новейшие технол.*, **23**, № 10: 1403 (2001).
5. А. В. Сиора, А. В. Бернацкий, *Металлофиз. новейшие технол.*, **33**, спец. выпуск: 569 (2011).
6. T. DebRoy and H. K. D. H. Bhadeshia, *Sci. Technol. of Welding and Joining*, **15**: 266 (2010).
7. Л. И. Маркашова, В. В. Арсенюк, Г. М. Григоренко, Е. Н. Бердникова, *Автоматическая сварка*, № 7: 43 (2002).
8. S. Katayama, *Handbook of Laser Welding Technologies* (Cambridge: Woodhead Publishing Limited: 2013).
9. Л. И. Маркашова, В. В. Арсенюк, Г. М. Григоренко, Е. Н. Бердникова, *Автоматическая сварка*, № 9: 12 (2002).
10. Л. И. Маркашова, Е. Н. Бердникова, И. И. Хомутская, *Автоматическая сварка*, № 1: 23 (2003).
11. L. I. Markashova, V. V. Arsenyuk, G. M. Grigorenko, and E. N. Berdnikova, *Welding International*, **18**: 730 (2004).
12. A. I. Ustinov, Yu. V. Falchenko, T. V. Melnichenko, and A. N. Muraveynik, *Intermetallics*, **16**, No. 8: 1043 (2008).
13. S. Akhonin, V. Belous, V. Berezos, and R. Selin, *Mater. Sci. Forum*, **927**: 112 (2018).
14. I. L. Semenov, I. V. Krivtsun, and U. Reisgen, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **49**, No. 10: 105204 (2016).
15. B. Paton, S. Akhonin, and V. Prilutsky, *Proc. of the 12th World Conference on Titanium (June 19–24, 2011, Beijing)* (Beijing: Science Press: 2011), vol. 2, p. 1585.
16. V. Shelyagin, V. Khaskin, A. Bernatskyi, A. Siора, V. Sydorets, and D. Chinakhov, *Mater. Sci. Forum*, **927**: 64 (2018).
17. V. Yerofeyev, R. Logvinov, V. Nesterenkov, and A. Mazo, *Welding International*, **28**: 557 (2014).
18. L. Markashova, O. Berdnikova, T. Alekseienco, A. Bernatskyi, and V. Sydorets, *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings* (Eds. A. D. Pogrebnjak and V. Novosad) (Singapore: Springer: 2019), p. 119.
19. Г. М. Григоренко, В. А. Костин, С. Г. Григоренко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **40**, № 1: 23 (2018).



## REFERENCES

1. K. Martinsen, S. J. Hu, and B. E. Carlson, *CIRP Annals*, **64**: 679 (2015).
2. T. E. Abioye, T. O. Olugbade, and T. I. Ogedengbe, *J. Emerging Trends in Engineering Appl. Sci.*, **8**, No. 6: 225 (2017).
3. S. M. Gurevich, V. N. Zamkov, V. E. Blashchuk et al., *Metallurgiya i Tekhnologiya Svarki Titana i Ego Splavov* [Metallurgy and Technology of Titanium and Its Alloys Welding] (Kiev: Naukova Dumka: 1986) (in Russian).
4. L. I. Markashova, V. V. Arsenyuk, Ye. N. Berdnikova, and I. L. Bogajchuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **23**, No. 10: 1403 (2001) (in Russian).
5. O. V. Siora and A. V. Bernatsky, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **33**, Special Iss.: 569 (2011) (in Russian).
6. T. DebRoy and H. K. D. H. Bhadeshia, *Sci. Technol. of Welding and Joining*, **15**: 266 (2010).
7. L. I. Markashova, V. V. Arsenyuk, G. M. Grigorenko, and E. N. Berdnikova, *Avtomaticheskaya Svarka*, No. 7: 43 (2002) (in Russian).
8. S. Katayama, *Handbook of Laser Welding Technologies* (Cambridge: Woodhead Publishing Limited: 2013).
9. L. I. Markashova, V. V. Arsenyuk, G. M. Grigorenko, and E. N. Berdnikova, *Avtomaticheskaya Svarka*, No. 9: 12 (2002) (in Russian).
10. L. I. Markashova, E. N. Berdnikova, and I. I. Khomutskaya, *Avtomaticheskaya Svarka*, No. 1: 23 (2003) (in Russian).
11. L. I. Markashova, V. V. Arsenyuk, G. M. Grigorenko, and E. N. Berdnikova, *Welding International*, **18**: 730 (2004).
12. A. I. Ustinov, Yu. V. Falchenko, T. V. Melnichenko, and A. N. Muraveynik, *Intermetallics*, **16**, No. 8: 1043 (2008).
13. S. Akhonin, V. Belous, V. Berezos, and R. Selin, *Mater. Sci. Forum*, **927**: 112 (2018).
14. I. L. Semenov, I. V. Krivtsun, and U. Reisgen, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **49**, No. 10: 105204 (2016).
15. B. Paton, S. Akhonin, and V. Prilutsky, *Proc. of the 12th World Conference on Titanium (June 19–24, 2011, Beijing)* (Beijing: Science Press: 2011), vol. 2, p. 1585.
16. V. Shelyagin, V. Khaskin, A. Bernatskyi, A. Siora, V. Sydorets, and D. Chinakhov, *Mater. Sci. Forum*, **927**: 64 (2018).
17. V. Yerofeyev, R. Logvinov, V. Nesterenkov, and A. Mazo, *Welding International*, **28**: 557 (2014).
18. L. Markashova, O. Berdnikova, T. Alekseienco, A. Bernatskyi, and V. Sydorets, *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings* (Eds. A. D. Pogrebnjak and V. Novosad) (Singapore: Springer: 2019), p. 119.
19. G. M. Gryhorenko, V. A. Kostin, and S. G. Gryhorenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 1: 23 (2018) (in Russian).