

УДК 621.791.755.5

## ОТРИМАННЯ НЕРОЗ'ЄМНИХ З'ЄДНАНЬ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ЗІ СТАЛЯМИ (ОГЛЯД)

*В. М. КОРЖИК<sup>1</sup>, В. Ю. ХАСКІН<sup>2</sup>, В. В. КВАСНИЦЬКИЙ<sup>4</sup>,  
О. В. ГАНУЩАК<sup>3</sup>, І. Д. ГОС<sup>1</sup>, С. І. ПЕЛІШЕНКО<sup>2</sup>,  
О. І. ДЕМ'ЯНОВ<sup>1</sup>, О. В. КОНОРЕВА<sup>1</sup>, Н. М. ФІАЛКО<sup>5</sup>*

<sup>1</sup> Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ;

<sup>2</sup> Китайсько-український інститут зварювання ім. Є. О. Патона, Гуанчжоу, КНР;

<sup>3</sup> ТОВ "Зовнішньоекономічне представництво китайсько-українського інституту зварювання ім. Є. О. Патона", Київ;

<sup>4</sup> Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського";

<sup>5</sup> Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

Проаналізовано зварювання титанових сплавів зі сталями. Виділено такі напрямки: використання заздалегідь виготовлених біметалевих перехідних елементів (зварюють традиційними способами), мінімізація енерго- і тепловитрат у зоні з'єднання металів, застосування зварювальної металургійної інженерії. Показано, що прогрес в області зварювальних технологій призвів до появи таких інноваційних рішень, як зварювання тертям з перемішуванням, а також використання рідкофазних прошарків і 3D-друку наноструктурних прошарків на краях для прискорення дифузії за дифузійного зварювання. Нові методи в зварювальній металургійній інженерії підвищують ефективність з'єднань типу Ti-Fe внаслідок застосування багатошарових композицій з танталу або ніобію з боку титану і бронзи – з боку сталі, а також вставок з ванадію і його сплавів, наприклад, легованих вольфрамом або хромом. Відзначено актуальність подальшої розробки стандартів для підтримки і поширення промислових технологій зварювання з'єднань типу Ti-Fe, навчання і підготовки технічного персоналу для впровадження цих технологій.

**Ключові слова:** з'єднання титан–сталь, міжфазна взаємодія, інтерметаліди, проміжні прошарки, міцність з'єднань.

The analysis of welding processes of titanium alloys with steels is presented. There are such research directions: the use of prefabricated bimetallic transition elements (welded by traditional methods); minimization of energy and heat in the weld area of metals; the use of methods of welding metallurgical engineering. The advances in welding technology have led to innovative solutions such as friction welding with stirring, as well as the use of liquid-phase layers and 3D printing of nanostructured layers at the welded edges to accelerate diffusion processes in diffusion welding. The new methods in welding metallurgical engineering increase the efficiency of Ti-Fe compounds due to the use of multilayer compositions of tantalum or niobium from the side of titanium and bronze – from the side of steel, and also vanadium inserts and its alloys, for example, alloyed with tungsten or chromium. The urgency of further development of standards for support and dissemination of industrial technologies for welding of Ti-Fe joints, training and preparation of technical staff for the implementation of these technologies is noted.

**Keywords:** titanium-steel joints, interphase interaction, intermetallics, intermediate layers, strength of joints.

**Вступ.** Розвиток науки і техніки на сучасному етапі все частіше вимагає застосування нероз'ємних з'єднань різнорідних матеріалів, зокрема титанових сплавів зі сталями. Однак особливості металургійної взаємодії цих металів суттєво ускладнюють їх зварювання. Причиною цього є утворення крихких інтерметалідних фаз (ІМФ) з високою твердістю, які призводять до утворення тріщин і руйнування з'єднання.

На сьогодні існує чимало варіантів вирішення завдань зі зварювання титанових сплавів зі сталями, описаних в літературі. Ця робота присвячена систематизації і аналізу літературних джерел з цього питання.

**Формулювання проблеми.** Основною проблемою для з'єднання зварюванням плавленням різнорідних металів є їх металургійна несумісність. Це стосується різнорідних з'єднань титанових сплавів (Ti) і сталей (Fe). Металургійна несумісність виражена в утворенні ІМФ під час зварювання цих матеріалів. Згідно з бінарними фазовими діаграмами, в умовах рівноваги для конкретної комбінації матеріалів формуються різні ІМФ. Наприклад, відповідно до праць [1, 2] (зокрема фазової діаграми FeTi), за взаємодії заліза з титаном утворюються твердий розчин Fe в  $\alpha$ -Ti і такі ІМФ, як Fe<sub>2</sub>Ti, FeTi<sub>2</sub> і FeTi. У бінарній фазовій діаграмі Fe–Ti спостерігали також вкрай обмежену можливість отримання твердих розчинів Fe з Ti. У потрійній системі Fe–Cr–Ti за температур  $> 550^{\circ}\text{C}$  з'являються з'єднання кубічного FeTi і Fe<sub>3</sub>(Ti<sub>1-x</sub>Cr<sub>x</sub>) [3]. Потрапляння  $> 1\%$  Ti в зварні шви, отримані традиційними зварювальними методами, не бажане [4].

ІМФ впливають як на звичайну міцність, так і на жароміцність перехідного з'єднання. Дослідження нагріву з'єднання титановий сплав–нержавна сталь, отриманого гарячим вальцюванням з використанням прошарку нікелю, показують збільшення товщини шару ІМФ [5]. Між ним і прошарком нікелю утворювалися мікротріщини. Міцність на розрив перехідного шва зменшувалася зі збільшенням температури термообробки (до  $700\text{...}800^{\circ}\text{C}$ ) або тривалості витримки (до 30 min).

Таким чином, формування ІМФ залежить від температурно-часового впливу, якому піддають обидва метали [6]. Оскільки утворення ІМФ залежить від дифузії і реакції між вихідними металами, збільшення тривалості і температури циклів нагріву-охолодження підвищує рухливість атомів металів та сприяє утворенню фаз [7]. Традиційні зварювальні методики зазвичай мають такі цикли нагріву-охолодження, які призводять до утворення значної кількості ІМФ, розвитку тріщин, часто з повним руйнуванням з'єднання [8, 9]. Тому ці методи зварювання для з'єднання титанових сплавів зі сталями неефективні [10].

Згідно з літературними джерелами, щоб уникнути утворення крихких ІМФ під час зварювання плавленням, можна використовувати такі базові підходи: зварювання через біметалеві (Ti–Fe) перехідники або вставки, заздалегідь виготовлені відомим способом (наприклад, вальцюванням, дифузійним зварюванням або зварюванням вибухом); контроль енерго- і тепловитрат (їх мінімізація) під час зварювання, застосування паяння; зварювальна металургійна інженерія (використання інших матеріалів для створення проміжних бар'єрних шарів між Ti та Fe).

Однак зазначені підходи можна застосовувати далеко не завжди. І навіть для вирішення однакових завдань всі три методики можуть призводити до істотно різних результатів. Тому доцільно проаналізувати дослідження останніх років, згрупувавши їх за вказаними напрямками, і дати рекомендації щодо прийнятності тих чи інших технологічних прийомів для вирішення різних технічних завдань.

**Використання заздалегідь виготовлених біметалевих перехідних елементів.** Одним з найраніших способів отримання нероз'ємних з'єднань різнорідних матеріалів є зварювання через біметалеві перехідні елементи [11]. Такий підхід полягає у виготовленні перехідника Ti–Fe відповідної геометрії одним з відомих способів (вальцювання, зварювання вибухом тощо [12]), а потім зварю-

вання традиційним способом (наприклад, неплавким електродом). При цьому Тi-сплав зварюється з титановим сплавом, а сталь – зі сталлю.

У праці [13] отримане зварюванням вибухом композитне з'єднання ТА2/Q235 (ТА2 – технічний титан із 99,1% Тi, Q235 – конструкційна вуглецева сталь, аналог Ст.3) використовували як проміжний перехідник для запобігання утворення крихких ІМФ Тi–Fe за лазерного зварювання Тi-сплаву ТС4 з нержавною сталлю 304. Механічні випробування на розрив показали руйнування на межі поділу зварювання вибухом ТА2 / Q235 з максимальною міцністю 548 МПа.

Для біметалевих трубних з'єднань рекомендовано застосовувати трубчасті перехідники Тi–Fe, виготовлені методом дифузійного зварювання [14]. Такі перехідники успішно працюють у воді і перегрітій парі. Для виготовлення дифузійним зварюванням як перехідників, так і біметалевих з'єднань, можна застосовувати спеціальні прийоми. Наприклад, під час зварювання нержавної сталі з Тi-сплавом можна використати проміжний шар ультрадисперсного порошку нікелю [15]. На сьогодні дифузійне зварювання досить широко розповсюджене для виготовлення з'єднань і перехідних елементів з різнорідних матеріалів [16].

Ще одним способом виготовлення трубчастих перехідників Тi–Fe є зварювання вибухом. Виготовлені для Міжнародного лінійного колайдера трубчасті адаптери “нержавна сталь–титан” (SS–Ti) мають високі механічні характеристики (міцність > 300 МПа) за кімнатної температури і температури рідкого азоту [17]. Для з'єднання труб з нержавної сталі з титановим резервуаром рідкого гелію в кріомодулі LCLS-II виготовлено зварюванням вибухом біметалічні трубчасті перехідники із задовільними механічними характеристиками [18]. Показано [19], що отримане таким способом чотиришарове композитне з'єднання Тi–Cu–Nb–сталь з подальшою термообробкою має задовільний результат випробувань на розтяг.

Останнім часом все популярнішим стає зварювання тертям з перемішуванням. Цим способом успішно одержано стикові з'єднання листів завтовшки 2 mm Тi-сплаву Тi–6Al–4V зі середньовуглецевою сталлю 30CrMnSiNi2A для подальшого виготовлення перехідних елементів [20].

**Мінімізація енерго- і тепловитрат у зоні з'єднання металів.** Під час зварювання біметалевих з'єднань типу Тi–Fe мінімальні енергетичні і теплові витрати забезпечують такі способи зварювання: вибухом, тертя з перемішуванням, дифузійне. Однак навіть тоді можливе утворення певної кількості ІМФ, керувати якими можна витратами енергії. Наприклад, під час зварювання вибухом чистого титану з нержавною сталлю 304 через підвищення енергії формуються характерні завихрення, які призводять до утворення FeTi і Fe<sub>2</sub>Ti [21]. Контроль енергії процесу і зниження втрат кінетичної енергії дали змогу отримати хвилясту і плоску топографію межі розділу з'єднань Тi–Fe без утворення ІМФ.

Для дифузійного зварювання Тi-сплаву і нержавної сталі без прошарку оптимальна температура супутнього підігріву знаходиться в діапазоні 800...950°C, а тривалість процесу – 60...120 min [22]. При цьому можливо отримати з'єднання достатньої міцності, але з утворенням крихких ІМФ FeTi і Fe–Cr–Ti на межі розділу. Щоб підвищити механічні властивості з'єднання і знизити вміст фаз FeTi і Fe–Cr–Ti на межі розділу, можна використати проміжні шари Cu, Ni (або нікелевого сплаву) і Ag.

Є способи зварювання плавленням здатні забезпечити досить невеликі енерго- і тепловитрати для того, щоб мінімізувати утворення ІМФ і забезпечити отримання з'єднань прийнятної міцності. У праці [23] лазерне зварювання Тi-сплаву ТС4 (Ti) з аустенітною нержавною сталлю 304 (SS) виконували, використовуючи дріт зі сплаву 38Zn–61Cu як присаджувальний метал. Внаслідок утворення за один прохід двох зварних швів (отриманих плавленням і дифузією без плавлення

Ti-сплаву) одержали з'єднання з максимальною межею міцності 128 МПа (руйнування в дифузійному шві).

Зварювання Nd:YAG-лазером Ti-сплаву TC4 і нержавної сталі SUS301L виконували без присаджувального металу за допомогою зміщення лазерного випромінювання в бік сталі відносно осі з'єднання [24]. Внаслідок теплопровідності нерозплавленого Ti-сплаву формувалися ІМФ TiFe (TiFe, TiFe<sub>2</sub>) на межі поділу Ti-SS. Міцність шва на розрив сягала 336 МПа за відносного видовження 0,13%.

Аналогічним прийомом зміщення променю стосовно осі стику користуються й за електронно-променевого зварювання [25]. При цьому також можуть застосовувати прошарки з міді [26], нікелю і ванадію [27]. Найвищу границю міцності на розрив спостерігали у з'єднанні, звареному з присаджувальним металом Ag – ~ 310 МПа [27].

Однак мінімізація енерговитрат під час зварювання плавленням з'єднань типу Ti-Fe не завжди здатна забезпечити позитивний результат. Так, за лазерного зварювання нержавної сталі 316 з титаном спостерігали крихке руйнування з'єднань через утворення великих інтерметалідних дендритів TiFe в матриці β-Ti і однофазного пересиченого β-Ti(Fe) [28].

Для зменшення кількості крихких ІМФ в з'єднаннях Ti-6Al-4V / 304L запропонували використовувати метод СМТ (cold metal transfer) дугового зварювання-паяння з використанням дроту ERCuSi-A [29]. При цьому міцність з'єднання на розрив сягала 216,28...261,69 МПа.

Ще одним підходом для отримання з'єднань Ti-Fe з низькою тепловтратою є паяння. Наприклад, вакуумне паяння з'єднань технічно чистого титану і низьковуглецевої сталі з використанням припоїв на основі міді (наприклад, Cu-12Mn-2Ni) або срібла (Ag-34Cu-2Ti, Ag-27,25Cu-12,5In-1,25Ti тощо). Досягнуто максимальну міцність з'єднань на зсув 113 МПа для паяння при 750°C з використанням присаджувального сплаву Ag-27,25Cu-12,5In-1,25Ti [30].

**Застосування зварювальної металургійної інженерії.** Для отримання задовільних механічних характеристик з'єднань типу Ti-Fe можна застосовувати певні технологічні прийоми, засновані на металургії багат шарових з'єднань [31]. Умовно назвемо їх зварювальною металургійною інженерією. Для їх реалізації в зварювальну ванну між Ti-сплавами і сталями вводять такі присаджувальні матеріали, як нікель, мідь, ванадій, кераміка тощо у вигляді прокладок (від фольг до пластин завтовшки 1...2 mm), дротів, порошоків [32]. Зварюють, здебільшого, плавленням за допомогою дугових або лазерних джерел. Товщина бар'єрних прошарків залежить від витрат тепла зварювальним джерелом і повинна бути достатньою для усунення контакту титану зі залізом.

У праці [33] як проміжний шар для запобігання утворення крихких ІМФ Ti-Fe за лазерного зварювання Ti-сплаву з нержавною сталлю (SS) використовували мідь. Середня мікротвердість з'єднання Ti-Cu-SS становила 260 HV. Границя міцності з'єднання на розрив досягала 320 МПа. У праці [34] для аналогічного лазерного зварювання Ti-сплаву із SS з фокусуванням випромінювання на стороні Ti використовували Nb.

У праці [35] СМТ зварювання Ti-сплаву TC4 із нержавною сталлю 304 за допомогою присаджувального дроту на основі міді дозволило одержати міцність з'єднання на розрив 365 МПа. При СМТ зварюванні сплаву AMS 4911L (Ti-6Al-4V) і нержавної сталі AISI 316L з використанням дроту CuSi-3 максимальна міцність за розтягу становила 200 МПа [36]. Двостороннє дугове MIG-TIG паяння стикового з'єднання TC4 (Ti-6Al-4V) / 304 з використанням дроту на основі міді дало змогу одержати з'єднання міцністю 278 МПа [37].

Крім мідного прошарку, в літературі рекомендують й інші матеріали. Лазерне двопрохідне зварювання пластин зі сплаву Ti-6Al-4V і нержавної сталі 316L

через вставку з чистого ванадію із зміщенням променя на сталеву сторону забезпечило міцність на статичний розтяг  $493 \pm 25$  МПа [38]. У разі заміни ванадію ніобієм міцність становила  $160 \pm 10$  МПа через утворення шарів сполук  $\text{Fe}_2\text{Nb}$  і  $\text{Fe}_7\text{Nb}_6$ . Додавання мідної вставки між ніобієм і сталлю дало можливість досягти міцності  $255 \pm 10$  МПа. Виконували [39] двопротинне імпульсне лазерне зварювання Ті-сплаву TC4 з нержавною сталлю SUS301L (SS) через проміжну вставку ванадію з отриманням швів Ті-V і V-SS з твердістю до 600 HV і міцністю 587 МПа. За трипротинного лазерного зварювання сплаву TC4 зі сталлю 301L (SS) через прошарки Nb і Ni отримували шви Ті-Nb, Nb-Ni і Ni-SS [40]. Міцність на розрив і відносне видовження становили 269 МПа і 1,5%, відповідно. Також лазерним способом зварили технічно чистий титан із нержавною сталлю через проміжну чотиришарову композитну вставку зварених вибухом пластин зі сталі, міді, ніобію і титану [41]. Міцність з'єднань становила до 475 МПа за відносного видовження 5,2...5,4%.

Задачу зварювання встик біметалу типу "сталь плакована титаном" вирішують, здебільшого, методами зварювальної металургійної інженерії. У праці [42] для усунення ІМФ за стикового зварювання такого біметалу рекомендовано імпульсним МАG-наплавленням між Ті та сталлю наносити сплав  $\text{CuSi3Mn1}$  як бар'єрний прошарок. У праці [43] наплавленням з коротким замиканням CSC-GMAW окремо або в поєднанні з імпульсним дуговим зварюванням GTAW-P за схемою Fe-X-Ti наносили технічно чистий нікель, нікель-мідний сплав, нікель-хромовий сплав, ванадій і технічно чисту мідь.

Для дифузійного зварювання порівняно недавно розробили такий прийом металургійної інженерії, як застосування перехідного рідкофазного прошарку – метод TLP (transient liquid phase) [44, 45]. При цьому з'єднання утворюється внаслідок дії на його межі рідкої фази, яка змочує поверхні і поширюється між ними капілярами. З'єднання сплаву Ті-6Al-4V і супердуплексної нержавної сталі (SDSS) UNS 32750 методом TLP з проміжним шаром Cu за температури  $890^\circ\text{C}$  за скорочений час (60 min) забезпечило міцність на зсув 271 МПа [46].

**Аналіз ефективності розглянутих технологічних рішень.** За останні кілька десятиліть відбувся суттєвий прогрес у галузі зварювання біметалевих з'єднань типу Ті-Fe. Так, більше 30 років тому для з'єднання плакованої титаном сталі використовували паяння припоями на основі срібла за температур  $820...990^\circ\text{C}$ , яке забезпечувало міцність на розрив до 140 МПа [47]. Зараз для забезпечення вакуумним паянням міцності на розрив 113 МПа достатньо температур  $\sim 750^\circ\text{C}$  [30]. Традиційне дугове зварювання з'єднань Ті-Fe через перехідники [47], отримані зварюванням вибухом, зараз замінюють лазерним [22–24, 27, 32–33, 39–40] і електронно-променевим [26–28], що дає змогу суттєво звзвити перехідне з'єднання. Детальніше особливості використання перехідних металевих вставок під час зварювання плавленням проаналізовані в табл. 1.

Використання нових зварювальних технологій суттєво розширило можливості виготовлення з'єднань типу Ті-Fe. Так, СМТ зварювання дало змогу замінити коштовні прошарки з Ta, Nb, V присадками на основі Cu, наприклад, дротами ERCuSi-A [27] або CuSi-3 [36]. Із застосуванням подібного матеріалу створено стикове двостороннє MIG-TIG паяння [37]. Інноваційний спосіб зварювання тертям з перемішуванням дозволив одержувати високоміцні з'єднання листів Ті-сплавів і сталей [20]. До найперспективніших способів отримання як біметалевих перехідників Ті-Fe, так і готових конструкцій, належать методи дифузійного зварювання [14–16, 22, 48] і зварювання вибухом [12, 13, 17–19]. Особливості виконання зварних з'єднань Ті-сплавів зі сталями наведені в табл. 2.

Можна припустити, що подальші дослідження з'єднання Ті-сплавів зі сталями збільшать як їх ефективність, так і кількість промислових технологій. Наприклад, заміна дифузійного зварювання аналогом з TLP [44–46] скорочує трива-

лість процесу до 60 min, а застосування при цьому наноструктурних прошарків, нанесених лазерним 3D-друком, – до 30 min [48, 49]. Далі вивчатимуть можливості створення інтелектуальних зварних швів / з'єднань, які можуть взаємодіяти зі системою, яку підключають зовні, для індикації завершення їх терміну служби.

**Таблиця 1. Характеристики з'єднань Тi-сплавів і сталей, отриманих зварюванням плавленням з використанням перехідних металів [31, 33, 35, 38]**

Метали, які з'єднують	Міцність $\sigma_B$ , МПа	Кут загину, degree	Структурні особливості з'єднання
Сплав OT4 (ST-A90)–Nb	$\leq 515$	90...180	За з'єднання зі сталлю в зоні Nb / Fe небезпека утворення ІМФ Fe <sub>2</sub> Nb
Сплав OT4 (ST-A90)– бронза БрБ2 (CuBe2)	400...650	40...180	Утворення евтектик типу TiCu, Ti <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> , Cu <sub>2</sub> Ti та Cu <sub>4</sub> Ti
Сплав VT14 (4Al–3Mo–1V–Ti)–Nb	$\leq 535$	80...125	За з'єднання зі сталлю у зоні Nb / Fe небезпека утворення ІМФ Fe <sub>2</sub> Nb
Сплав VT15 (5Al–2,5Sn–Ti)–Nb	$\leq 530$	$\leq 180$	– // –
Сплав Ti–6Al–4V–Nb–сталь 316L	$160 \pm 10$	–	Небезпека утворення ІМФ Fe <sub>7</sub> Nb <sub>6</sub> та Fe <sub>2</sub> Nb
Сплав Ti–6Al–4V–Nb–Cu– сталь 316L	$255 \pm 10$	–	Зона Nb / Cu містить 15 at.% Nb, складається з дендритів Nb, диспергованих в Cu-матриці. Зона Cu / 316L містить 17 at.% Cu, має структуру $\gamma$ -Fe з мікросегрегаціями Cu
Ti–Nb–бронза Бр.X0,5 (CuCr1)– сталь	310...325	120...180	Відсутність крихких фаз у системі Cu–Nb
Сплав OT4 (ST-A90)–Ta– бронза БрБ2 (CuBe2)– сталь 1X18H9T (AISI 321)	490...605	60...180	У зоні перемішування Ta з Cu спостерігали стрибок мікротвердості до 2800 МПа
Ti–сплав V	380...410	120...140	–
Сплав V–корозійнотривка сталь	440...480	75...90	Небезпека утворення крихкої $\sigma$ -фази (FeV) і виділень Ni <sub>2</sub> V <sub>3</sub> і NiV <sub>3</sub>
Сталь 08X15H5Д2Т (08Cr15Ni5Cu2Ti)–V-сплав BB8 (V8W)	60...510	10...140	Вузька зона з ІМФ з боку V-сплаву з мікротвердістю до 30000 МПа
V-сплав BB8 (V8W)–сплав OT4 (ST-A90)	500	180	–
Ti–Nb–бронза Бр.АМц9-2 (CuA19Mn2)–сталь	$255 \pm 10$	–	Мікротвердість в Ti біля межі з Nb 2900...3100 МПа; в Nb біля межі Nb–бронза 3100...3900 МПа, в бронзі – 1500...2200 МПа

Таблиця 2. Основні особливості виконання зварних з'єднань Ті-сплавів зі сталями

Вид зварювання	Матеріали, які з'єднують	Тип вставки	Присаджувальний матеріал	Міцність, МПа	Примітки	Джерело
1	2	3	4	5	6	7
Зварювання тертям з перемішуванням	Ті-6Al-4V і 30CrMnSiNi2A	Без вставки	–	600...800	Підвищення швидкості зварювання призводить до зменшення ширини прогарку ІМФ і підвищення міцності (більше, ніж для середньовуглецевої сталі)	[20]
Дифузійне зварювання	Титанові сплави і нержавні сталі	Без вставки або зі вставкою з кольорових металів	Без присадки і з присадкою Cu, Ni (Ni-сплав), Ag	194	Вплив прошарків Cu, Ni (Ni-сплав) і Ag на мікроструктуру і механічні властивості з'єднань. Можливість утворення сполук типу Cr <sub>2</sub> Ti, Fe <sub>0,2</sub> Ni <sub>4,8</sub> Ti <sub>5</sub> , Ti <sub>3</sub> Fe <sub>17</sub> Cr <sub>5</sub> тощо	[22]
Дифузійне зварювання з TLP	Титанові сплави і нержавні сталі	Вставка з кольорових металів	Cu, Ag тощо	271	Прошарок TLP пришвидшує дифузію; процес відбувається за температур 890...980°C	[44–46]
Лазерне зварювання	Ті-сплав TC4 і аустенітна сталь 304	Вставка з матеріалу на основі Cu	Дріт зі сплаву 38% Zn–61% Cu	128	Зсув лазерного променя на бік Ti; утворення різних ІМФ	[23]
	Ті-сплав TC4 і SUS301L	Без вставки	–	350	За максимальної температури 1116°C рідка фаза утворювалася і існувала тільки у вузькій області межі розділу з утворенням евтектичної фази і твердого розчину β-Ti	[24]

Продовження таблиці 2						
1	2	3	4	5	6	7
Електронно-променево зварювання	Титанові сплави і нержавні сталі	Вставки з кольорових металів на основі Cu, Ni, V, Ag	Cu, Ni, V, Ag	310	Зсув промено на бік Ti; утворення різних ІМФ	[25–27]
	Ті-сплав Ti–6Al–4V і нержавна сталь 304L	Вставка з матеріалу на основі Cu	Дріт ERCuSi–A	211...262	Шар ІМФ Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> завтовшки 81...118 μm залежно від співвідношення полярності зварювальних імпульсів	[29]
СМТ	Ті-сплав AMS 4911L (Ti–6Al–4V) і нержавна сталь AISI 316L	--/--	Дріт CuSi–3	200	Утворюються ІМФ з меншою крихкістю, ніж Ti–Fe	[36]
	Ті-сплав TC4 і аустенітна сталь 304	--/--	Дріт CuSi	278	Обмеження за міцністю через утворення ІМФ Ti–Fe	[37]
Вакуумне паяння	Титанові сплави і нержавні сталі	Вставки з кольорових металів на основі Cu, Ag	Припої Cu–12Mn–2Ni, Ag–34Cu–2Ti, Ag–27,25Cu–12,5In–1,25Ti	113 за паяння з температурою 750°C і присадкою Ag–27,25Cu–12,5In–1,25Ti	Утворення ІМФ типу CuTi, Cu <sub>2</sub> Ti, Cu <sub>4</sub> Ti <sub>3</sub> і FeTi	[30]



Актуальною є розробка стандартів для підтримки і поширення промислових технологій зварювання з'єднань типу Ti–Fe. Необхідно забезпечити навчання і підготовку технічного персоналу для впровадження цих технологій. Такі дії повинні гарантувати доступність і безпеку виготовлення та експлуатації з'єднань типу Ti–Fe.

### ВИСНОВКИ

Застосування біметалевих перехідних елементів, які приварюються до відповідних сторін з'єднань типу Ti–Fe, забезпечує досить високу їх міцність (300...548 МПа). Виготовлення таких перехідних елементів зазвичай здійснюють вальцюванням, зварюванням вибухом, дифузійним зварюванням, а віднедавна ще тертям з перемішуванням. Для усунення основного недоліку (нагріву до 500°C і вище) традиційні дугові способи замінюють лазерними або електронно-променевими зварюваннями. Прогрес в області контролю і мінімізації енерго- і тепловитрат під час зварювання призвів до появи таких інноваційних рішень, як зварювання тертям з перемішуванням (міцність з'єднань 600...800 МПа), використання під час дифузійного зварювання рідкофазних прошарків (міцність 271 МПа) і 3D-друку наноструктурних прошарків. Застосування вакуумного паяння сплавами на основі срібла дає змогу одержати з'єднання з міцністю на розрив 113 МПа. Для підвищення ефективності методів зварювання плавленням розроблено низку прийомів зварювальної металургійної інженерії. Вони дають можливість досягти міцності з'єднань Ti-сплавів зі сталями від 128...320 МПа (лазерне зварювання) до 200...365 МПа (СМТ) завдяки застосуванню перехідних шарів з Cu-сплавів. За заміни Cu-сплавів сплавами на основі срібла можна досягти міцності до 310 МПа (електронно-променеве зварювання). За використання композитних шарів з кількох матеріалів міцність з'єднань типу Fe–Ti можна дещо збільшити, наприклад, за лазерного зварювання через Cu–Nb (255±10 МПа), Nb–Ni (269 МПа), сталь–Cu–Nb–Ti (475 МПа).

1. *Murray J. L.* The Fe–Ti (Iron-Titanium) system // *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*. – 1981. – 2. – P. 320–334. <https://doi.org/10.1007/BF02868286>.
2. *Thermodynamic re-assessment of Fe–Ti binary system / H. Bo, J. Wang, L. Duarte, C. Leinenbach, L.-B. Liu, H.-S. Liu, and Z.-P. Jin // Transact. of Nonferrous Metals Society of China*. – 2012. – 22, № 9. – P. 2204–2211. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61450-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61450-7).
3. *Ivanchenko V. and Pryadko T.* Chromium–Iron–Titanium. – Berlin: Springer-Verlag, 2008. – 11D3. – 17 p. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-74199-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74199-2_17).
4. *Mallaiah G., Reddy P. R., and Kumarc A.* Influence of titanium addition on mechanical properties, residual stresses and corrosion behaviour of AISI 430 grade ferritic stainless steel GTA welds // *Proc. Mat. Sci.* – 2014. – 6. – P. 1740–1751. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.204>
5. *Zhao D.-S., Yan J.-C., and Liu Y.-J.* Effect of intermetallic compounds on heat resistance of hot roll bonded titanium alloy–stainless steel transition joint // *Transact. of Nonferrous Metals Society of China*. – 2013. – 23, № I.7. – P. 1966–1970. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62684-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62684-9)
6. *Formation and thermal stability of ω-Ti(Fe) in α-phase-based Ti(Fe) alloys / M. J. Kriegel, M. Rudolph, A. Kilmametov, B. B. Straumal, J. Ivanisenko, O. Fabrichnaya, H. Hahn, and D. Rafaja // Metals*. – 2020. – 10, № 3. – P. 402–409. <https://doi.org/10.3390/met10030402>
7. *Electron structure and properties of intermetallic compounds in titanium – metal dissimilar joints / A. A. Chularis, A. B. Kolpachev, O. V. Kolpacheva, and V. M. Tomashevskii // Weld. Int.* – 1995. – 9, № I.10. – P. 812–814. <https://doi.org/10.1080/09507119509548899>
8. *Szymlek K.* Review of titanium and steel welding methods // *Adv. in Mat. Sci.* – 2008. – 8, № 1. – P. 186–194. <https://doi.org/10.2478/v10077-008-0023-4>

9. *Karim M. A. and Park Y.-D.* A Review on welding of dissimilar metals in car body manufacturing // *J. of Weld. and Join.* – 2020. – **38**, № 1. – P. 8–23.  
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2020.38.1.1>
10. *Dohogne C. L.* Titanium welding problem // *Biomaterials, Medical Devices, and Artificial Organs.* – 1977. – **5**, № I.3. – P. 303–307. <https://doi.org/10.3109/10731197709118680>
11. *Рабкин Д. М., Рябов В. Р., Гуревич С. М.* Сварка разнородных металлов. – К.: Техніка, 1975. – 208 с.
12. *Interface* characteristic of explosive-welded and hot-rolled TA1/X65 bimetallic plate / M.-X. Xie, X.-T. Shang, L.-J. Zhang, Q.-L. Bai, and T.-T. Xu // *Metals.* – 2018. – **8**. – P. 159–173. <https://doi.org/10.3390/met8030159>
13. *Microstructure* and mechanical property improvement of dissimilar metal joints for TC4 Ti alloy to 304 stainless steel using TA2/Q235 composite interlayer / Y. Zhang, Y. Gao, J. Zhou, D. Q. Sun, and H. M. Li // *Met. Mat. Int.* – 2019. – 09 November. – P. 1–12.  
<https://doi.org/10.1007/s12540-019-00507-9>
14. *Production* of austenitic steel– $\alpha$ -titanium alloy bimetallic transition pieces / A. N. Semenov, S. N. Novozhilov, Yu. S. Cherepnin, M. I. Plyshevsky, N. S. Rassoshkina, and A. A. Uvarov // *Weld. Int.* – 2015. – **29**, № I.4. – P. 314–316. <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.921382>
15. *A study* of the structure of steel – titanium joints formed by diffusion welding with the use of ultrafine nickel powder / A. A. Uvarov, A. N. Semenov, N. S. Krestnikov, A. V. Lyushinskii, and E. V. Nikitina // *Met. Sci. Heat. Treat.* – 2017. – **59**. – P. 529–533.  
<https://doi.org/10.1007/s11041-017-0184-z>
16. *Experience* in HIP diffusion welding of dissimilar metals and alloys / V. N. Butrim, A. G. Beresnev, V. N. Denisov, A. S. Klyatskin, D. A. Medvedev, and D. N. Makhina // *Mat. Res. Proc.* – 2019. – **10**. – P. 65–72. <http://dx.doi.org/10.21741/9781644900031-9>
17. *Residual* stresses in a stainless steel – titanium alloy joint made with the explosive technique / Yu. V. Taran, A. M. Balagurov, B. M. Sabirov, A. Evans, V. Davydov, and A. M. Venter // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2012. – **340**, № 012105. – P. 1–8.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/340/1/012105>
18. *Kaluzny J. A., Grimm C., and Passarelli D.* Stainless steel to titanium bimetallic transitions // *IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. and Eng.* – 2015. – **101**, № 012022. – P. 1–8.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/101/1/012022>
19. *Investigation* of the rupture of ti/steel laminated composite with soft interlayers / Y. Trykov, L. Gurevich, D. Pronichev, and M. Trunov // *Faculty of Mech. Eng., Transact.* – 2016. – **44**. – P. 16–21. <https://doi.org/10.5937/fmet1601016T>
20. *Interfacial* microstructures and mechanical properties of dissimilar titanium alloy and steel friction stir butt-welds / S. Liab, Y. Chena, J. Kang, Y. Huang, J. A. Gianetto, and L. Yin // *J. of Manufact. Proc.* – 2019. – **40**. – P. 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.03.015>
21. *Explosive* welding of titanium/stainless steel by controlling energetic conditions / P. Manikandan, K. Hokamoto, A. A. Deribas, K. Raghukandan, and R. Tomoshige // *Mat. Transact.* – 2006. – **47**, № 8. – P. 2049–2055. <https://doi.org/10.2320/matertrans.47.2049>
22. *A review* on diffusion bonding between titanium alloys and stainless steels / D.-F. Mo, T.-F. Song, Y.-J. Fang, X.-S. Jiang, C. Q. Luo, M. D. Simpson, and Z.-P. Luo // *Adv. in Mat. Sci. and Eng.* – 2018. – **2018**. – P. 1–15. <https://doi.org/10.1155/2018/8701890>
23. *Zhang Y., Chen Y. K., and Zhou J. P.* Characterization of laser beam offset welding of titanium to steel with 38Zn–61Cu alloy filler // *Optics & Laser Techn.* – 2020. – **127**. – P. 106–195.  
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106195>
24. *Nd:YAG laser* welding of dissimilar metals of titanium alloy to stainless steel without filler metal based on a hybrid connection mechanism / Y. Zhang, J. P. Zhou, D. Q. Sun, and X. Y. Gu // *J. of Mat. Res. and Techn.* – 2020. – **9**, № I.2. – P. 1662–1672.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.001>
25. *Yeganeh V. E. and Li P.* Effect of beam offset on microstructure and mechanical properties of dissimilar electron beam welded high temperature titanium alloys // *Materials & Design.* – 2017. – **124**. – P. 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.056>

26. *Electron beam welding of Ti–15–3 titanium alloy to 304 stainless steel with copper interlayer sheet* / T. Wang, B.-G. Zhang, G.-Q. Chen, J.-C. Feng, and Q. Tang // *Transact. of Nonferrous Metals Soc. of China.* – 2010. – **20**, № I.10. – P. 1829–1834.  
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60381-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60381-2)
27. *Wang T., Zhang B.-G., and Feng J.-C. Influences of different filler metals on electron beam welding of titanium alloy to stainless steel* // *Transact. of Nonferrous Metals Soc. of China.* – 2014. – **24**, № I.1. – P. 108–114. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63034-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63034-X)
28. *Satoh G., Yao Y., and Qiu C. Strength and microstructure of laser fusion welded Ti–SS dissimilar material pair* // *Proc. of NAMRI/SME.* – 2011. – **39**. – P. 1–10.  
<https://doi.org/10.1007/S00170-012-4342-6>
29. *Effects of thermal distribution strategy on a Ti–6Al–4V/304L dissimilar joint fabricated using the variable polarity cold metal transfer arc-brazing method* / G. Mou, X. Hua, C. Shen, and M. Wang // *Materials & Design.* – 2020. – **191**, № 108619. – P. 1–13.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108619>
30. *Elrefaey A. and Tillmann W. Brazing of titanium to steel with different filler metals: analysis and comparison* // *J. of Mat. Sci.* – 2010. – **45**, № 16. – P. 4332–4338.  
<https://doi.org/10.1007/s10853-010-4357-z>
31. *Получение соединений сталей со сплавами титана сваркой плавлением* / А. В. Баранов, А. Е. Вайнерман, И. В. Чумакова, С. П. Чернобаев // *Вопр. материаловедения.* – 2004. – **38**, № 2. – С. 108–125.
32. *Patent US 2004/0182835A1 Method of welding titanium and titanium based alloys to ferrous metals* / Pstser C. Hall. – Publ. Sept. 23, 2004. – P. 1–8.
33. *Forming mechanism and mechanical property of pulsed laser welded Ti alloy and stainless steel joint using copper as interlayer* / Y. Zhang, Y. K. Chen, J. P. Zhou, D. Q. Sun, and X. Y. Gu // *J. of Mat. Res. and Tech.* – 2020. – **9**, № I.2. – P. 1425–1433.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.068>
34. *Characterization of pulsed laser welded titanium alloy and stainless steel joint using Nb as interlayer* / Y. Zhang, J. P. Zhou, D. Q. Sun, and X. Y. Gu // *Steel Res. Int.* – 2021. – 02 February. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1002/srin.202000635>
35. *Weld formation mechanism and microstructural evolution of TC4/304 stainless steel joint with Cu-based filler wire and preheating* / J. Li, Y. Liu, Z. Zhen, P. Jin, Q. Sun, and J. Feng // *Materials (Basel).* – 2019. – **12**, № 19. – P. 1–14.  
<https://doi.org/10.3390/ma12193071>
36. *Dissimilar metal joining of stainless steel and titanium using copper as transition metal* / G. Pardal, S. Ganguly, S. Williams, and J. Vaja // *Int. J. Adv. Manuf. Techn.* – 2016. – **86**. – P. 1139–1150. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8110-2>
37. *Butt brazing of titanium alloys/stainless steel plates by MIG–TIG double-sided arc welding process with copper filler metal* / Z. Cheng, J. Huang, Z. Ye, J. Yang, and S. Chen // *J. of Mat. Res. and Techn.* – 2019. – **8**, № I.1. – P. 1566–1570.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.06.009>
38. *Use of pure vanadium and niobium/copper inserts for laser welding of titanium to stainless steel* / A. Mannucci, I. Tomashchuk, A. Mathieu, R. Bolot, E. Cicala, S. Lafaye, and C. Roudeix // *J. of Adv. Join. Proc.* – 2020. – **1**, № 100022. – P. 1–29.  
<https://doi.org/10.1016/j.jajp.2020.100022>
39. *Two pass laser welding of TC4 titanium alloy to 301L stainless steel via pure V interlayer* / Y. Zhang, J. Zhou, D. Sun, and H. Li // *J. of Mat. Res. and Techn.* – 2020. – **9**, № 2. – P. 1400–1404. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.066>
40. *Three-pass laser welding of Ti alloy–stainless steel using Nb and Ni interlayers* / Y. Zhang, J. Zhou, D. Sun, and H. Li // *J. of Mat. Res. and Techn.* – 2020. – **9**, № 2. – P. 1780–1784.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.009>
41. *Welding of titanium and stainless steel using the composite insert* / A. N. Cherepanov, V. I. Mali, A. M. Orishich, A. G. Malikov, V. O. Drozdov, and Y. N. Malyutina // *AIP Conf. Proc.* 1783. – 2016. – P. 020023-1 – 020023-4. <https://doi.org/10.1063/1.4966316>

42. *Analyzing* metallurgical interaction during arc surfacing of barrier layers on titanium to prevent the formation of intermetallics in titanium-steel compounds / V. Korzhyk, V. Khaskin, A. Grynyuk, O. Ganushchak, V. Shcheretskiy, S. Peleshenko, O. Konoreva, O. Demianov, N. Fialko, and V. Kvasnytskyi // *Eastern-European J. of Enterprise Techn.* – 2021. – **113**, № 5/12. – P. 69–82. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.240154>
43. *Ramirez J. E.* Characterization of CSC-GMAW titanium-rich weld overlays // *Weld. J.* – 2014. – **93**. – P. 338-s–350-s.
44. *Gale W. F. and Butts D. A.* Transient liquid phase bonding // *Sci. Techn. Weld. Join.* – 2004. – **9**, № I.4. – P. 283–300. <https://doi.org/10.1179/136217104225021724>
45. *Elrefaey A. and Tillmann W.* Evaluation of transient liquid phase bonding between titanium and steel // *Adv. Eng. Mat.* – 2009. – **11**, № 7. – P. 556–560. <https://doi.org/10.1002/adem.200900021>
46. *Transient* liquid phase (TLP) bonding of Ti-6Al-4V/UNS 32750 super duplex stainless steel / A. Jalali, M. Atapour, M. Shamanian, and M. Vahman // *J. of Manufact. Proc.* – 2018. – **33**. – P. 194–202. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.05.014>
47. *Гуревич С. М.* Справочник по сварке цветных металлов / Отв. ред. В. Н. Замков. – К.: Наук. думка, 1990. – 512 с.
48. *A state-of-the-art* review on solid-state metal joining / W. Cai, G. Daehn, A. Vivek, J. Li, H. Khan, R. S. Mishra, and M. Komarasamy // *J. Manuf. Sci. Eng.* – 2019. – **141**, № 3. – 35 p. <https://doi.org/10.1115/1.4041182>
49. *Cooke K. O. and Atieh A. M.* Current trends in dissimilar diffusion bonding of titanium alloys to stainless steels, aluminium and magnesium // *J. Manuf. Mat. Proc.* – 2020. – **4**, № 39. – P. 1–21. <https://doi.org/10.3390/jmmp4020039>

*Одержано 19.04.2022*