

ЗАСТОСУВАННЯ А-TIG ЗВАРЮВАННЯ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА РЕМОНТУ ВУЗЛІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ І УСТАНОВОК ІЗ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

Д.В. Коваленко, І.В. Коваленко, Б.О. Задерій, Г.В. Звягінцева

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

Показано переваги застосування технології А-TIG зварювання (TIG зварювання по шару активуючого флюсу – активатора) конструктивно складних елементів з титанових сплавів, що включають стикові та точкові напусткові різновиди з'єднання, а також з'єднання зі змінним тепловідведенням. Досліджено співвідношення геометрії швів, структури та властивостей зварних з'єднань, виконаних TIG та А-TIG способами зварювання. Технологія А-TIG зварювання відпрацьована в промислових умовах при створенні та ремонті проблемних вузлів авіаційних та конвертованих газотурбінних двигунів. Спосіб А-TIG зварювання рекомендується для промислового впровадження при створенні зварювальних конструкцій з титанових сплавів складної геометрії. Бібліогр. 15, табл. 7, рис. 12.

Ключові слова: TIG та А-TIG зварювання, активатори, титанові сплави, стикові та точкові напусткові з'єднання, змінне тепловідведення, формування шва, структура та властивості

Вступ. Поліпшення якості, підвищення надійності та ресурсу роботи зварних конструкцій, зниження ваги та витрат при їх виготовленні постійно перебувають у центрі уваги в промисловому виробництві. Особливо актуальним, навіть критичним є необхідність вирішення вказаних питань при створенні складнонавантажених високо-відповідальних вузлів авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД). Використання складнолегованих сплавів та передових технологій виготовлення не завжди дозволяють досягти все зростаючих вимог та показників. Тому все частіше вирішення питань досягається за рахунок вдосконалення (при неминучому ускладненні) конструкції вузлів ГТД, створення яких за допомогою зварювання із окремих елементів в багатьох випадках виявляється найбільш економічним і технологічним, якщо не єдиним способом. Прикладом можуть бути цілнорозварні ротори, робочі колеса, складені лопатки та ін. З огляду та специфіки матеріалу та особливості конструкцій вузлів ГТД пошук технологічного, менш трудомісткого, безвідходного способу їх зварювання є досить актуальним.

Ціль роботи – дослідження можливостей та розробка технології А-TIG зварювання стикових та точкових напусткових з'єднань тонколистових (завтовшки $\delta = 1,2 \dots 2,0$ мм) титанових сплавів BT-20 та OT-4-1.

Дана робота використовує результати досліджень механізму проплавлення металу, що зварюється, і заснованих на них прогресивних підходів щодо вдосконалення технології зварювання. Одним із таких підходів є застосування А-TIG

зварювання (TIG зварювання по шару активуючого флюсу – активатора) при виготовленні конструкцій зі сталей [1–6], нікелевих [7] та титанових сплавів [8–15]. Основні позитивні ефекти застосування активаторів при А-TIG зварюванні усіх вказаних матеріалів, порівняно із звичайним TIG зварюванням, проявляються у підвищенні проплавляючої здатності процесу (глибоке проплавлення), зниженні погонної енергії, зменшенні протяжності ЗТВ, а також відсутності пор у швах (рис. 1 і 2). При А-TIG зварюванні титанових сплавів це відбувається в основному завдяки контрагуванню зварювальної дуги продуктами термічної дисоціації компонентів активатора, що розплавляється [8, 10, 11, 15]. При цьому також змінюється кінетика проплавлення, значно зменшується ширина, змінюється геометрія та форма проплавлення шва. При незмінній однаковій швидкості зварювання застосування активатора при А-TIG зварюванні дозволяє в 1,5...2,0 рази знизити величину струму зварювання без зміни (зі збереженням) проплавлення (рис. 3), а отже, зменшуються перегрів металу, що зварюється, зварювальні напруги і деформації.

Розглядаються наступні варіанти та переваги промислового застосування способу А-TIG зварювання при виготовленні вузлів газотурбінних двигунів та установок:

а) для стикових з'єднань при зварюванні вузлів з нерівномірним тепловідведенням від місця зварювання:

– підвищується у кілька разів стабільність формування швів;

Коваленко Д.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8544-588X>, Задерій Б.О. – <https://orcid.org/0000-0001-6695-6986>

© Д.В. Коваленко, І.В. Коваленко, Б.О. Задерій, Г.В. Звягінцева, 2022

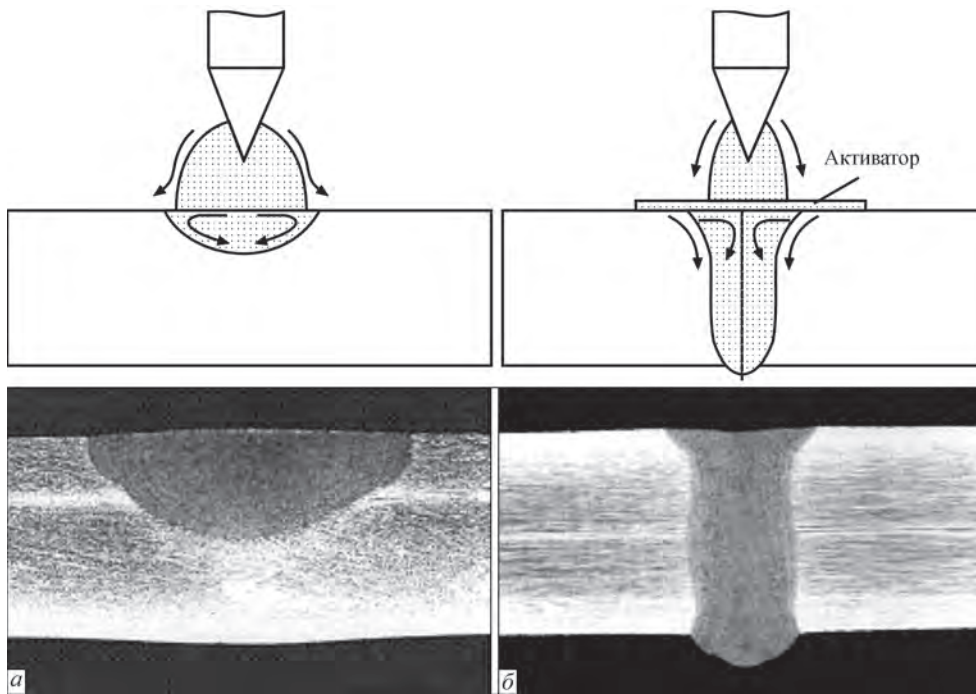


Рис. 1. Схематичні зображення та зовнішній вигляд зварних швів із нержавіючої сталі 04X18H10T завтовшки $\delta = 6$ мм, виконаних процесами TIG (а) та А-TIG (б) зварювання на одному режимі зварювання: струм зварювання $I_{зв} = 200$ А; швидкість зварювання $V_{зв} = 120$ мм/хв, довжина дуги $l_d = 1,5$ мм [1]

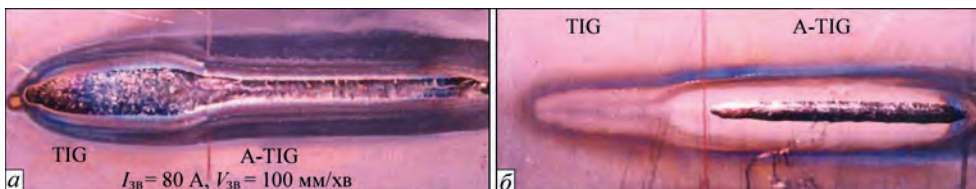


Рис. 2. Зовнішній вигляд зварних швів, виконаних TIG (ліворуч) та А-TIG (праворуч) зварюванням титанового сплаву ВТ-20 завтовшки $\delta = 3$ мм на одному режимі зварювання: струм зварювання $I_{зв} = 80$ А; швидкість зварювання $V_{зв} = 100$ мм/хв: а – зовнішня поверхня шва; б – зворотня поверхня (корінь) шва (результати особистих досліджень)

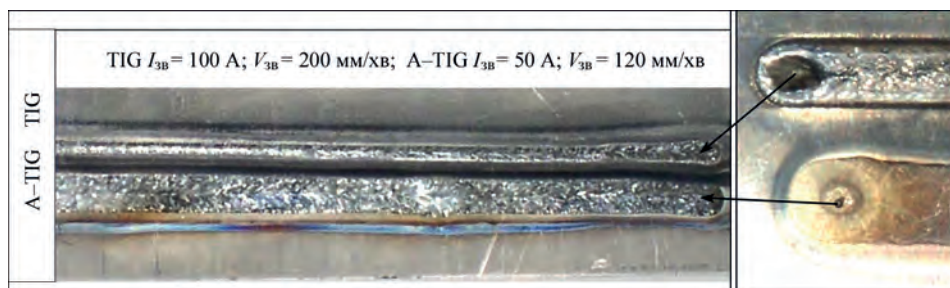


Рис. 3. Зовнішній вигляд поверхні зварних швів при повному проплавленні, виконаних TIG та А-TIG зварюванням титанового сплаву ВТ-20 завтовшки $\delta = 2$ мм при однаковій швидкості зварювання $V_{зв} = 200$ мм/хв: зверху – А-TIG шов, струм зварювання 50 А; знизу – TIG шов, струм зварювання $I_{зв} = 100$ А (результати особистих досліджень)

– з’являється можливість отримання якісних зварних швів конструкцій, товщина елементів, що з’єднуються, яких відрізняється в 2...3 рази.

б) для напусткових з’єднань:

– усувається необхідність у засверлівці елементів, що зварюються, в місці з’єднання;

– забезпечується можливість отримання якісних зварних точок при зазорі між елементами, що з’єднуються, до 0,5 товщини (δ) зварюваних металів, а із застосуванням присадки – до 1,0 δ ;

Технологія А-TIG зварювання може бути успішно застосована при зварюванні деталей

змінного перерізу, таврових та різнотовщинних вузлів. Особливо ефективно її застосування при зварюванні високоточних, складнонавантажених вузлів та деталей двигунів та установок із структурочутливих жароміцних сплавів на основі заліза, нікелю та титану.

Методи та матеріали досліджень. Основне завдання промислового впровадження нового способу А-TIG зварювання полягає в тому, щоб адаптувати запропоновані способи та реалізувати їх переваги стосовно конкретних умов, обладнання,

вузлів та сплавів. Типи зварних з'єднань визначалися ТУ на виріб.

Конструктивне оформлення – стикові (рис. 4, а, в) та напусткові точкові (рис. 4, б) з'єднання. Матеріал – сплави титану ВТ-20 та ОТ-4-1. Габарити вузлів та виробів: діаметр 1200...1500 мм, товщина $\delta = 1,2; 1,5; 2,0$ мм. Більшість експериментів проводилися на плоских зразках: стикові з'єднання, сплав ВТ-20, розмір зразків – $150 \times 150 \times 2$ мм, $220 \times 80 \times 2$ мм, $220 \times 50 \times 1,2$ мм; точкові напусткові з'єднання, сплави ВТ-20 та ОТ-4-1 у різномірному поєднанні, розмір зразків – 100×60 мм завтовшки $\delta = 2+2; 1,5+1,5; 1,5+1,2$ мм.

Вимоги до оформлення швів:

– стикові – геометрія та розмір швів відповідно до ГОСТ 1474-76;

– точкові – геометрія та розміри швів відповідно до ГОСТ 14776-79 (14778-76), діаметр точки з лицьового боку шва $6...10$ мм, кореневий $5...7$ мм, посилення (ослаблення) шва ($\pm 0, 2$ мм).

Механічні та службові характеристики зварних з'єднань повинні бути не нижче 0,9 від властивостей основного металу. Обмеження по деформаціям зварних з'єднань та напругою в них уточнюються у процесі освоєння розробки на конкретних вузлах з урахуванням існуючого оснащення та подальшої термообробки.

Методи, обсяг та норми контролю зварних швів: зовнішній огляд – 100 %.

Перевіряється наявність та величина підрізів, тріщин на поверхні, наявність бризок. Радіографічний контроль – 100 % зварних швів. Визначається наявність непроварів, несплавлень, тріщин, пор та раковин усередині зварного шва.

Розробка, крім виконання перерахованих технічних умов, повинна була забезпечити:

– для стикових з'єднань: виключення несплавлень, зміщення проплавлення від стику; попередження проплавів, спричинених нерівномірним тепловідведенням; підвищення стабільності формування швів;

– для напусткових з'єднань: виключення необхідності засвердлювання під зварювання; отримання якісних точкових з'єднань при підвищених зазорах.

Тип зварювального обладнання, його параметри, режими та умови зварювання вибирали виходячи з умов необхідності отримання якісного формування швів на металі відповідної товщини та марки, а також з урахуванням застосовуваних у виробництві обладнання та технологій. Як джерела живлення зварювальної дуги використовували випрямляч ВСУ-315. Точкові напусткові зварні з'єднання виконували в камерах з контрольною захисною атмосферою «Атмосфера-6м» та Об-427. Застосування таких камер викликано необхідністю надійного та стабільного захисту зварювальної ванни та зони термічного впливу від шкідливого впливу повітря, особливо у місці накладання одного листового елемента на інший. Крім того, у таких камерах можливе безперервний контроль складу захисної атмосфери. Зварювання зразків для визначення впливу тепловідведення виконували в зварювальному столі з вибіркою по стику 5×10 мм і притисками пластин, що зварюються, на відстані по 10 мм від лінії стику (рис. 5, а). Для захисту від окислення при зварюванні поза камерою застосовували піддув інертного газу (аргону), через вибірку в столі з кореневої части-

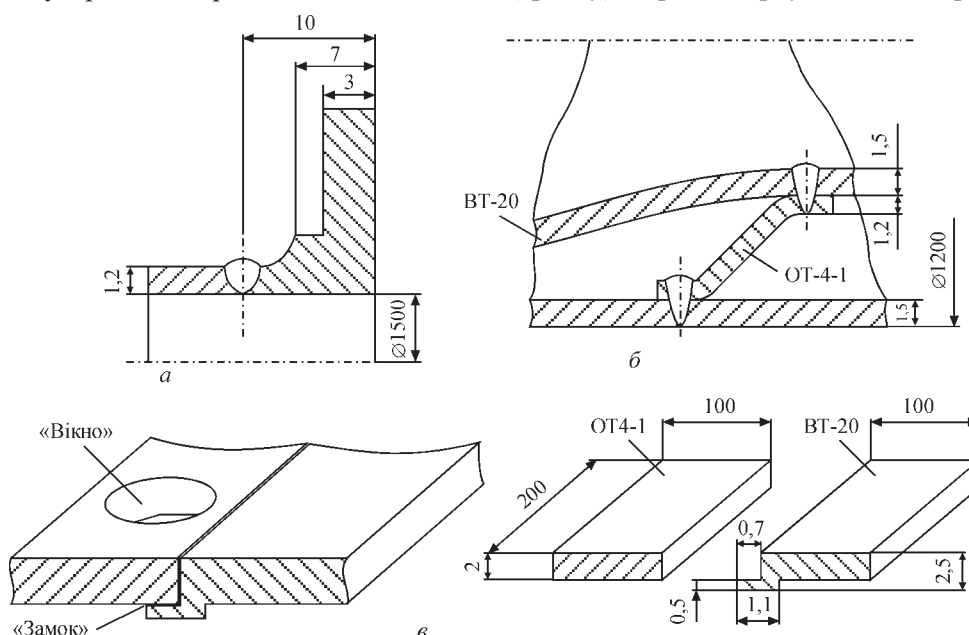


Рис. 4. Схеми фрагментів зварних вузлів: обичайка-фланець (несиметричне тепловідведення), стикове з'єднання зі сплавом ОТ-4 (а); обичайка з напустковими точковими з'єднаннями зі сплавів ОТ-4 та ВТ-20 (б); обичайка з вікном, стикове замкове з'єднання зі сплавів ОТ-4 і ВТ-20 (ескіз (ліворуч) та елементи (праворуч) зварного з'єднання (в))

Таблиця 1. Режими зварювання та характеристики стикових швів зі сплаву ВТ-20 завтовшки $\delta = 2$ мм

Номер п/п	Спосіб зварювання	Струм зварювання $I_{зв}$, А	Швидкість зварювання $V_{зв}$, мм/хв	Ширина шва B – поверхня/в – корінь, мм	Відхилення осі шва від лінії стику, мм		Прогин уздовж осі Δ , мм
					середні	випади*	
1	ТІГ	85	170	8,0...8,2 4,0...4,8	0,3 0,5	0,6 1,2	12,8
2	A-TIG	80	340	3,4...3,5 2,8...3,4	0,3 0,4	0,4 0,8	7,1

ни і «чобіток» довжиною 50 і шириною 20 мм з поверхні шва. Для зварювання застосовувалися: стандартний зварювальний ТІГ пальник з діаметром сопла 16 мм, витратою захисного газу (аргону) в сопло – 7...8 л/хв, у «чобіток» – 4...5 л/хв, на піддув – 5...6 л/хв; зварювальний електрод діаметром 2,1 мм марки WT20 (зі сплаву W – 2 % ThO₂). Для проведення експериментів із зварювання застосовували безкисневий галогенідний активатор ПАТІГ-Т. Режими зварювання (табл. 1) вибирали виходячи з необхідності забезпечення стабільного якісного проплавлення зразків, що зварюються.

Активатор у вигляді пасти наносився пензликом тонким рівномірним шаром на лицьову поверхню деталі, що зварюється, шириною по 8...10 мм на кожену сторону від зварюваного стику або на діаметрі ≈ 20 мм у місці постановки точки при напустковому з'єднанні. Товщину шару активатора визначали виходячи з необхідності отримання необхідної глибини проплавлення та стабільності процесу. При цьому враховувалося, що для певних областей значень зварювального струму існує оптимальна товщина шару активатора, при якій досягається максимальна глибина проплавлення при якісному формуванні шва. Надмірна товщина шару активатора, особливо на стикових з'єднаннях, призводить до небажаних результатів – порушення стабільності процесу, зашлакування вольфрамового електрода.

Як уже зазначалося, у виробничих умовах часто отримують неякісні зварні з'єднання через необхідність зміни тепловкладання та тепловідведення по довжині стику внаслідок зносу технологічного складально-зварювального оснащення, невдалої конструкції зварного з'єднання, неточності виготовлення вузлів, що зварюються, неточності ведення дуги по стику тощо. Враховуючи те, що наявність активатора змінює характер тепловкладання та проплавлення металу, що зварюється, а внаслідок чого стабілізує процес формування шва, були проведені експерименти з визначення наскільки застосування активаторів знижує вплив зазначених вище негативних факторів.

Змінне тепловідведення створювалося застосуванням складових по довжині зразка підкладок з теплопровідністю і теплоємністю матеріалів, що сильно відрізняються: титан-мідь-титан (рис. 5, а). Режими та умови зварювання вибирали

аналогічно описаним раніше. Швидкість зварювання при цьому дещо знизили (до 100 мм/хв), а струм підвищили (до 65 і 45 А при зварюванні з різним тепловідведенням), щоб посилити вплив тепловідведення. Крім того, для зміни умов тепловідведення тепловідвідні притиски розташовували на різній (2 та 3 мм) відстані від осі шва. Режими зварювання та результати дослідження зведені в табл. 2 та рис. 5.

У виробничих умовах при складанні напусткових з'єднань обичайок великих діаметрів часто мають місце зазори між ними, що призводить до значних труднощів отримання якісних з'єднань. Крім того, для здійснення сплавлення відповідно до технологічного процесу верхній лист засвердлюють, а потім заплавляють отвір ТІГ зварюванням в камері, що значно збільшує трудо-, метало- та енергоємність виробництва.

Враховуючи значне підвищення проплавляючої здатності дуги та зменшення перегріву зварюваного металу при використанні А-ТІГ зварювання були проведені експерименти для з'ясування можливості усунення зазначених труднощів та недоліків. Основні дослідження виконували на пластинах зі сплаву ВТ-20 завтовшки 2 мм, а також сплаву ОТ-4 завтовшки 1 мм, накладених один на одного. Контрольні експерименти виконували на зразках, що імітують реальні зварні з'єднання: пластина зі сплаву ВТ-20 завтовшки 1,5 мм накладена на пластину зі сплаву ОТ-4-1 завтовшки 1,2 мм і навпаки. Зазори між пластинами задавали смужками фольги завтовшки 0,2; 0,5; 0,8; 1 мм між пластинами. Зразки збиралися прихватками по кутам пластин. Струм і час зварювання вибиралися з умов отримання повного проплавлення нижнього листа, при мінімально можливому діаметрі крапки та просіданні металу. Інші умови зварювання такі ж, як і при виконанні стикових з'єднань.

Результати досліджень. Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що у цілому при застосуванні А-ТІГ зварювання стикових з'єднань:

- зменшується ширина шва в 2...3 рази при одночасному зменшенні струму зварювання на 30...50 %;

- зменшується вплив тепловідведення, якщо судити по ширині шва з його поверхні, в 5...7 разів, а з кореня шва – в 9...12 разів.

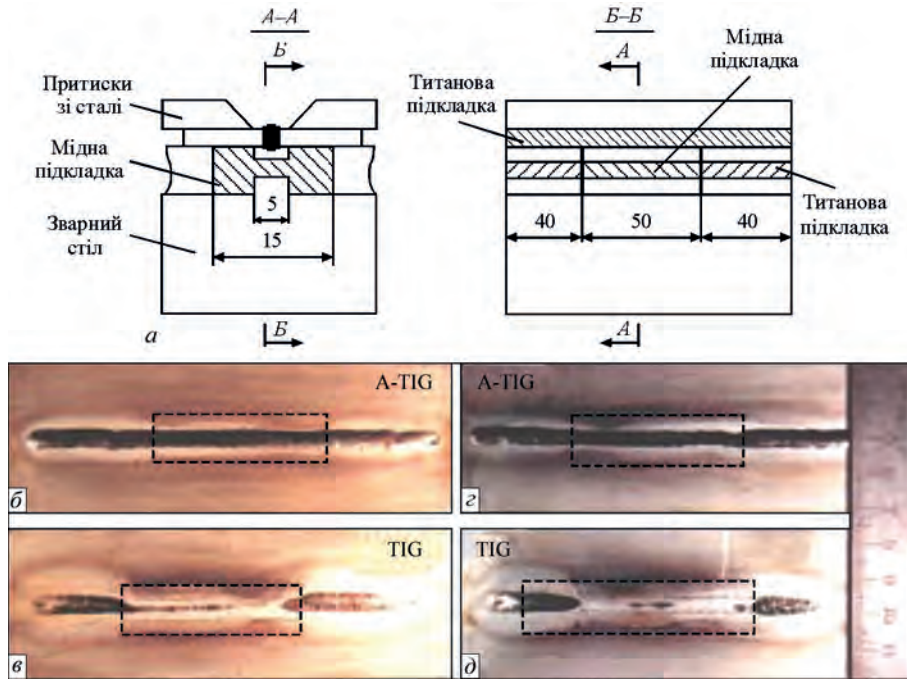


Рис. 5. Схема складання (а) та зовнішні вигляди зразків після зварювання сплаву ВТ-20 завтовшки $\delta = 2$ мм при повному проплавленні з боку коріня шва з тепловідведенням, що змінюється по довжині зразка: А-ТІГ зварювання (б, с); ТІГ зварювання (в, д); з меншим тепловідводом (б, в); з більшим тепловідводом (с, д). Пунктиром на рис. 5, б-д позначено місце розміщення мідної підкладки

Таблиця 2. Режими зварювання та результати дослідження стабільності формування швів стикових з'єднань зі сплаву Вт-20 завтовшки $\delta = 2$ мм при перемінному тепловідведенні (т/від) (див. рис. 5)

Номер зразка	Умови зварювання	Напруга на дузі $U_d, В$	$I_{зв}, А$	$V_{зв}, мм/хв$	Ширина шва, мм поверхня/корінь	Змінювання ширини шва поверхня/корінь	Примітка
ТІГ зварювання							
1-1	Без т/від	8,2...8,4	65	100	9,0...8,6 5,3...5,7		
1-2	Ті-Сu-Ті 3 т/від, відстань - 2 мм	-«-	-«-		7,8...7,2 0...1,2	<u>1,2...1,4</u> 5,3...4,5	Рис. 5, д
1-3	Ті-Сu-Ті 3 т/від, відстань - 3 мм	-«-	-«-		7,5...7,6 0...1,3	1,5...1,0 5,3...4,4	Рис. 5, в
А-ТІГ зварювання							
2-1	Без т/від	8,2...8,4	40	100	2,8 5,5...5,4		
2-2	Ті-Сu-Ті 3 т/від, відстань - 2 мм	-«-	-«-		2,6 5,0...4,9	0,2 0,5	Рис. 5, с
2-3	Ті-Сu-Ті 3 т/від, відстань - 3 мм	-«-	-«-		2,6 5,1	0,2 0,4...0,3	Рис. 5, б

Аналогічні результати отримані при зварюванні стикових з'єднань зразка-імітатора (завтовшки $\delta = 2$ мм) зі сплаву ВТ-20 – обичайки з вікнами. Режими зварювання та результати дослідження зведені в табл. 3 та рис. 6, 7. Застосування А-ТІГ зварювання дозволяє уникнути підплавлення металу в місці вікна.

Аналіз результатів металографічних досліджень показує, що позитивний вплив активатора проявляється у зменшенні ширини шва, значному зменшенні ЗТВ (рис. 8), а також у подрібненні як первинних β -зерен, так і α - та α' -пластин (рис. 9).

Позитивний вплив застосування активатора при А-ТІГ зварюванні стикових з'єднань при зміні

Таблиця 3. Режими зварювання та результати дослідження при зварюванні зразка-імітатора – обичайки з вікнами зі сплаву ВТ-20 завтовшки $\delta = 2$ мм (див. рис. 6)

Номер зразка	Умови зварювання Тип з'єднання	$U_d, В$	$I_{зв}, А$	$V_{зв}, мм/хв$	Ширина шва, мм поверхня/корінь	Примітка
TIG зварювання						
1	Пластина, 2 шви поруч	8	100	200	$\frac{7,5...7,9}{3,2...4,6}$	Рис. 3 знизу
A-TIG зварювання						
2		10,5	50	200	$\frac{2,2...3,2}{2,4...3,2}$	Рис. 3 зверху
A-TIG зварювання						
1	Стик з «вікном»	10,5	60	200	$\frac{3,5...3,6}{4,3...4,7}$	Рис. 6, з
A-TIG зварювання						
2		10,5	50	200	$\frac{3,6...3,7}{4,0...4,1}$	Рис. 7, б
TIG зварювання						
1	Стик з «вікном»	8	100	200	$\frac{7,6}{3,8}$	Рис. 6, б, 7, а
TIG зварювання						
2		8	110	12	$\frac{8,5}{6,0}$	Рис. 6, в

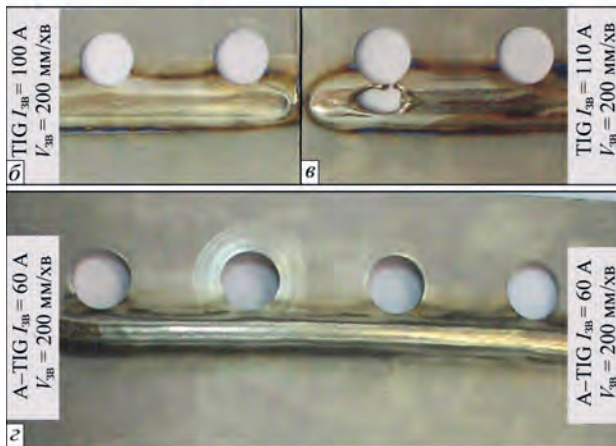
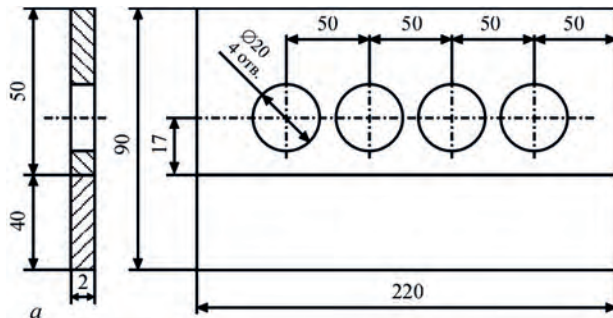


Рис. 6. Зовнішній вигляд фрагментів зварних зразків-імітаторів зі сплаву ВТ-20 завтовшки $\delta = 2$ мм при повному проплавленні: схема підготовки зразка-імітатора (а); TIG зварювання, струм зварювання – 100 А (б) та 110 А (в); A-TIG зварювання, струм зварювання – 60 А (з)

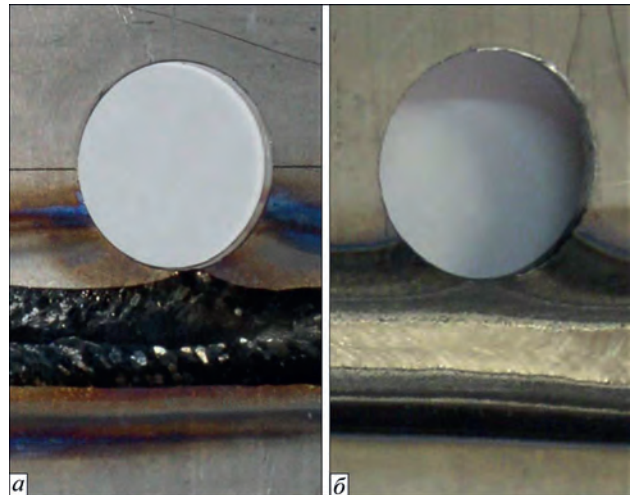


Рис. 7. Зовнішній вигляд фрагментів зварних зразків-імітаторів зі сплаву ВТ-20 завтовшки $\delta = 2$ мм при повному проплавленні: а – TIG зварювання, струм зварювання – 100 А; б – A-TIG зварювання, струм зварювання 50 А

тепловідведення по довжині зразка чітко видно в порівнянні рис. 5, б, з та 5, в, д. A-TIG шов стабільний по ширині вздовж всієї довжини зразка, а у TIG шва зникає проплавлення у місці знаходження підкладки.

З результатів експериментів, представлених у табл. 4, 5 видно, що навіть при складанні напусткових з'єднань без зазору не вдається отримати без активатора зварної точки з проваром нижнього листа

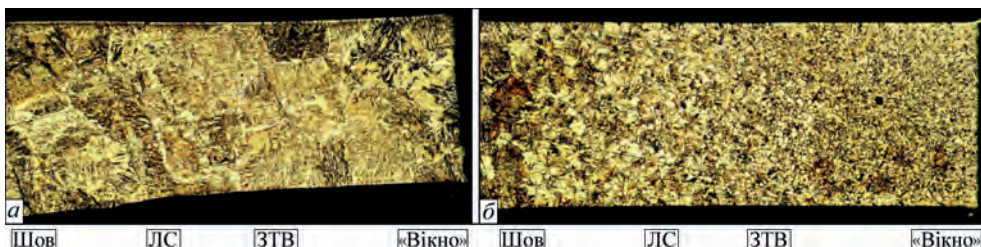


Рис. 8. Макроструктура ($\times 25$) зварних з'єднань сплаву титану ВТ-20: а – TIG зварювання; б – A-TIG зварювання, ЛС – лінія сплавлення, ЗТВ – зона термічного впливу

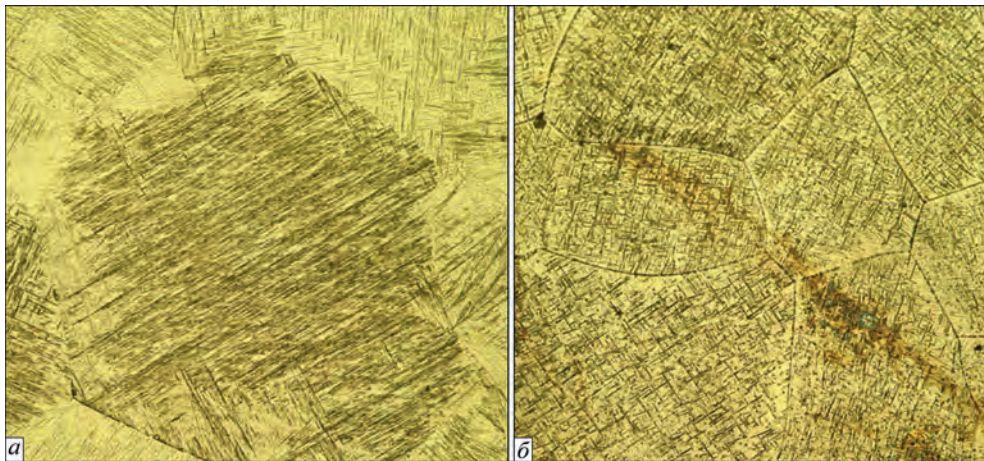


Рис. 9. Мікроструктура ($\times 100$) металу зварних швів (сплав ВТ-20): а – ТІГ шов; б – А-ТІГ шов

– формуються точки великого діаметра без наскрізного проплавлення. Значне збільшення струму або часу зварювання призводить до надмірного збільшення діаметра точки і пропалювання обох листів.

Застосування А-ТІГ зварювання дозволяє при менших значеннях струму зварювання отримати

наскрізний провар при невеликих (у межах ТУ) діаметрах точок (табл. 4, 5; рис. 10–12) та дотримання всіх вимог до подібних сполук. Збільшення проміжку викликає необхідність збільшення струму і часу зварювання, застосування присадки, оскільки при зазорах більш ніж 0,5 мм ослаблення

Таблиця 4. Режими зварювання та характеристики точкових напусткових швів на зразках ВТ20 ($\delta = 2 + 2$ мм) та ОТ-4 ($\delta = 1 + 1$ мм), без зазору

Номер зразка	Умови зварювання	$I_{зв}, A$	Час зварювання $t_{зв}, c$	Діаметр точки, поверхня/корінь, мм	Примітка
1-0	ВТ20 (2+2 мм) А-ТІГ зварювання	80	10	5,0/8,5	Ослаблення шва 0,1 мм
			5	5,0/5,0	Ослаблення шва 0,2 мм
2-0	ОТ-4 (1+1 мм) ТІГ зварювання	40	10	5,5/0	Непровар, посилення шва 0,2 мм
			5	5,0/0	Непровар, посилення шва 0,1 мм
	А-ТІГ зварювання		10	6,0/6,5	Ослаблення шва 0,2 мм
			5	3,6/2,5	Ослаблення шва 0,1 мм

Таблиця 5. Режими зварювання та характеристики точкових напусткових швів на зразках ВТ-20, $\delta = 1,5$ мм + ОТ-4-1, $\delta = 1,2$ мм із різними зазорами

Номер зразка	Умови зварювання (зазор між пластинами, що зварюються, мм)	$I_{зв}, A$	$t_{зв}, c$	Діаметр точки, поверхня/корінь, мм	Примітка
ТІГ зварювання					
1-1	Без зазору	50	4	7,5/0	Непровар
1-2		50	10	11/0	
1-3		75	5	9,5/0	
А-ТІГ зварювання					
1-4	Без зазору	40	4	4,1/2,6	Ослаблення 0,2 мм
1-5		50	4	4,1/6,0	
ТІГ зварювання					
2-1	0,25	70	4	12,0/0	Непровар
А-ТІГ зварювання					
2-2	0,25	50	3	4,0/5,2	
3-1	0,5	45	6	5,8/5,8	Ослаблення 0,3 мм
3-2		60	6	8,2/6,2	Ослаблення 0,4 мм
4-1	1,0	50	4	7,5/0	Непровар
4-2		60	5	6,0/4,7	Ослаблення 0,8 мм
4-3		60	6	8,0/8,5	Ослаблення 1,0 мм

шва перевищує допустимі (0,2...0,3 мм) значення. Слід зазначити, що значне збільшення струму зварювання призводить до надмірного зростання діаметра і до ослаблення шва в кореневій його части-

ні, а збільшення часу зварювання до відповідної зміни в лицьовій частині шва (рис. 12).

Механічні властивості стикових з'єднань оцінювали за в'язкістю, оскільки ця характеристика більш чутлива до технологічних та інших факторів і більш показова, ніж, скажімо, межа міцності. Випробовували плоскі зразки типу МІ-49 ГОСТ 9454-78 завтовшки 2 мм з круглим надрізом, виконаним по різних ділянках зварного з'єднання.

З результатів, представлених у табл. 6, можна зробити висновок, що застосування активаторів у

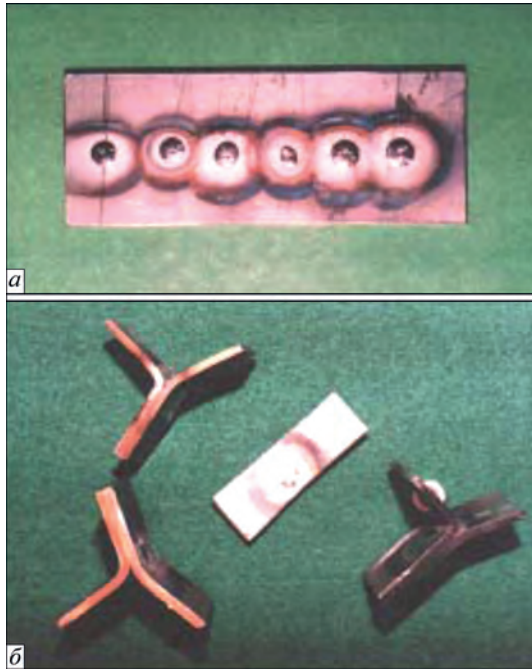


Рис. 10. Зовнішній вигляд точкових напусткових зварних з'єднань зі сплаву ВТ-20 завтовшки $\delta = 2 + 2$ мм: зворотня сторона з'єднання (корінь шва) (а); зразки після випробування на вигин (б)

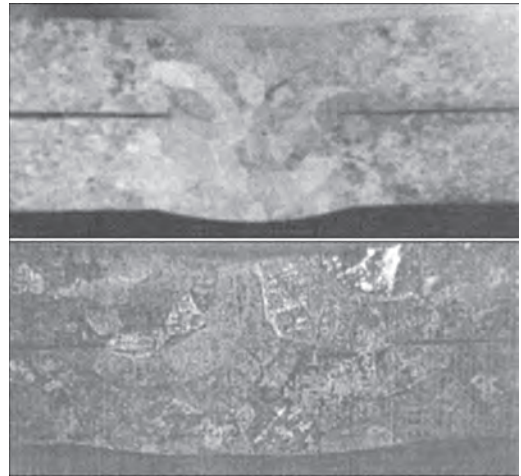


Рис. 11. Макроструктури поперечних перерізів точкових напусткових зварних з'єднань зі сплаву ВТ-20 завтовшки $\delta = 2 + 2$ мм, виконаних А-ТІГ зварюванням без зазору

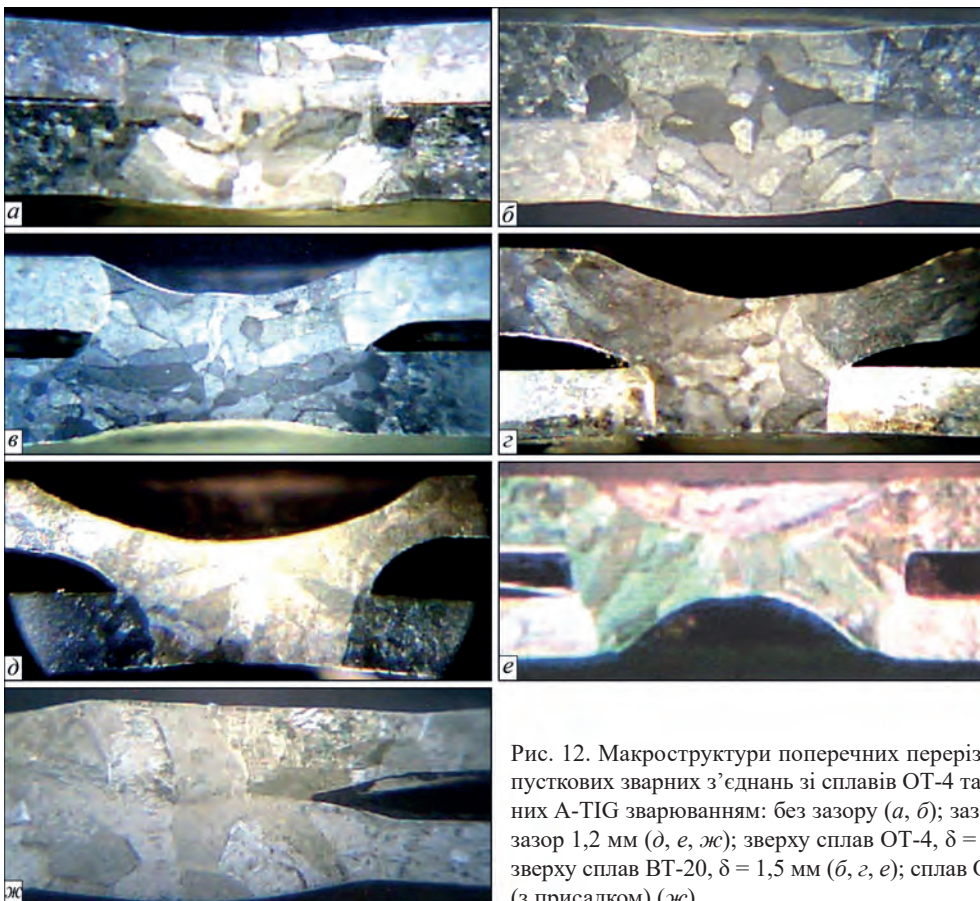


Рис. 12. Макроструктури поперечних перерізів точкових напусткових зварних з'єднань зі сплавів ОТ-4 та ВТ-20, виконаних А-ТІГ зварюванням: без зазору (а, б); зазор 0,5 мм (в, г); зазор 1,2 мм (д, е, ж); зверху сплав ОТ-4, $\delta = 1,2$ мм (а, в, д); зверху сплав ВТ-20, $\delta = 1,5$ мм (б, г, е); сплав ОТ-4, $\delta = 1,2$ мм (з присадком) (ж)

Таблиця 6. Механічні властивості стикових зварних з'єднань зі сплаву Вт-20 ($\delta = 2$ мм)

Номер п/п	Ділянка зварного з'єднання	Ударна в'язкість, Дж/см ²	Розкид значень, %
1	Основний метал	54,0...59,5/57,2	10
TIG зварювання			
2	ЗТВ	68,7...77,4/72,7	12,5
	ЛС – Шов	62,9...71,3/66,75	13,5
	Шов	69,9...87,5/78,5	25,0
А-TIG зварювання			
3	ЛС – Шов	57,9...63,3/61,0	9,2
	Шов	68,9...73,4/71,0	6,5

Таблиця 7. Властивості точкових напусткових зварних з'єднань зі сплаву Вт20 ($\delta = 2 + 2$ мм), отриманих А-TIG зварюванням

Номер п/п	Якість збирання	Руйнівні зусилля P , кгс	Напруження зрізу τ_{cp}^* , МПа	Діаметр зварної точки в місці руйнування, мм	Кут загину (випробування на ударний загин), град
1	Без зазору	1022,0	507	4,6	85
		1133,2	602	5,2	96
2	Зазор 1 мм	17289	467	6,8	98
		1558,6	541	5,9	95

*Вираз умовний, при руйнуванні має місце вирив точки, а не зріз.

більшості випадків незначно змінює властивості зварного металу.

Слід зазначити, що додатковий низькотемпературний відпал (650 °С, 30 хв) призводить до вирівнювання властивостей до значень основного металу.

Властивості точкових напусткових зварних з'єднань оцінювали як за результатами випробувань зразків МІ-25 (2 + 2 мм) тип ХХ за ГОСТ 6996-66 – на зріз, так і технологічної проби на ударний вигин. Результати випробувань представлені у табл. 7. Руйнування відбувається по основному металу (у деяких випадках – по ЗТВ) при значеннях навантаження і кутах загину більших, ніж обумовлено ТУ на виробі і ГОСТом.

Висновки

1. Позитивний ефект від застосування А-TIG зварювання тонколистових (1...2 мм) титанових сплавів полягає у зменшенні розмірів шва та ЗТВ, у меншому перегріві зварюваного металу і, як наслідок – деякому зниженні зварювальних напруг та деформацій, зменшенні чутливості до нерівномірного тепловідводу від зони зварювання і до різновисинності елементів, що зварюються.

2. Застосування способу А-TIG зварювання для точкових напусткових з'єднань дозволяє отримувати якісні з'єднання без засвердлювання верхнього елемента зварного з'єднання при знижених струмах зварювання, а застосовуючи TIG зварювання такі з'єднання неможливо отримати. Крім того, виконуючі А-TIG зварювання, стає можливим отримання з'єднань при порушеннях складан-

ня – зазорах між листами, що зварюються, які можуть досягати товщини верхнього елемента.

3. Результати виконаних досліджень дозволяють рекомендувати при створенні конструкцій складної геометрії з титанових сплавів малих товщин спосіб А-TIG зварювання з використанням запропонованого активатора ПАТІГ-Т.

Список літератури/References

1. Ющенко К.А., Коваленко Д.В., Коваленко І.В. (2001) Применение активаторов при дуговой сварке вольфрамовым электродом в инертных газах (А-TIG) сталей и сплавов. *Автоматическая сварка*, 7, 37–43.
Yushchenko, K.A., Kovalenko, D.V., Kovalenko, I.V. (2001) Application of activators for TIG welding of steels and alloys, 7, 37–43.
2. Lucas, W., Howse, D. (1996) Activating flux – increase the performance and productivity of the TIG and plasma processes. *Welding and Metal Fabrication*, 1, 11–17.
3. Lucas, W. (2000) Activating Flux – Improving the performance of the TIG process. *Welding and Metal Fabrication*, 2, 7–10.
4. Dong, C., Katayama, S. (2004) *Basic understanding of A-TIG welding process*. IIW Doc.1802-04/Doc.212-1055-04
5. Paton, B.E., Yushchenko, K.A., Kovalenko, D.V. et al. (2006) *Factors of increased penetrating capacity of A-TIG welding of stainless steel*. IIW Doc.XII-1911-06, 17–29.
6. Yushchenko, K.A., Kovalenko, D.V., Krivtsun, I.V. et al. (2008) *Experimental studies and mathematical modelling of metal penetration in TIG and A-TIG stationary arc welding*. IIW Doc.212-1117-08.
7. Ющенко К.А., Коваленко Д.В. и др. (2000) А-TIG сварка никелевого сплава НИМОНІК-75. *Сварщик*, 14, 4, 26–27.
Yushchenko, K.A., Kovalenko, I.V. Kovalenko, D.V. et al. (2000) A-TIG welding of nickel alloy NIMONIC-75. *Svarshchik*, 14(4), 26–27.
8. Гуревич С.М., Замков В.Н., Блещук В.Е. и др. (1986) *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. Киев, Наукова думка.

- Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Blashchuk, V.E. et al. (1986) *Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
9. Perry, N., Marya, S., Soutif, E. (1999) New perspectives of flux assisted GTA welding in titanium structures. *Reactive Metals in Corrosive Applications Conference Proceedings, Jack Tosdale, Editor, Wah Chang*, 55–62.
 10. Патон Б.Е., Замков В.Н., Прилуцкий В.П. и др. (2000) Контракция дуги флюсом при сварке вольфрамовым электродом в аргоне. *Автоматическая сварка*, **1**, 1–8.
Paton, B.E., Zamkov, V.N., Prilutsky, V.P. et al. (2000) Contraction of the welding arc caused by the flux in tungsten-electrode argon-arc welding. *The Paton Welding J.*, **1**, 1–8.
 11. Замков В.Н., Прилуцкий В.П. (2004) Теория и практика TIG-F сварки (A-TIG) (Обзор). *Автоматическая сварка*, **9**, 12–15.
 - Zamkov, V.N., Prilutsky, V.P. (2004) Theory and practice of TIG-F (A-TIG) welding (Review). *The Paton Welding J.*, **9**, 11–14.
 12. Sun, Z., Pan, D. (2004) Welding of titanium alloys with activating flux. *Science and Technology of Welding and Joining*, **9**, 4, 337–344.
 13. Leconte, S., Pillard, P., Chaelle, P. et al. (2007) Effect of flux containing fluorides on TIG welding process. *Ibid*, **12**, 2, 120–126.
 14. Niagaj, J. (2012) Peculiarities of A-TIG welding of titanium and its alloys. *Archives of metallurgy and materials*, **57**, 1, 39–44.
 15. Prilutsky, V.P., Akhonin, S.V. (2014) TIG welding of titanium alloys using fluxes. *Welding in the World*, **58**, 245–251.

APPLICATION OF A-TIG WELDING FOR IMPROVING THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING AND REPAIR OF UNITS OF GAS TURBINE ENGINES AND INSTALLATIONS FROM TITANIUM ALLOYS

D.V. Kovalenko, I.V. Kovalenko, B.O. Zaderii, G.V. Zvyagintseva

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 advantages of using the technology of A-TIG welding (TIG welding along the layer of activating flux – activator) of structurally complex elements of titanium alloys, including butt and spot overlapped joints of various thicknesses, as well as joints with variable heat dissipation, are shown. The relationship between the geometry of welds, structure and properties of welded joints produced by TIG and A-TIG welding methods was studied. A-TIG welding technology was tested in industrial conditions during creation and repair of problematic units of aircraft and convertible gas turbine engines. The A-TIG welding method is recommended for industrial implementation when creating welding structures from titanium alloys of a complex geometry. 15 Ref., 7 Tabl., 12 Fig.

Keywords: TIG and A-TIG welding, activators, titanium alloys, butt and spot overlapped joints, variable heat dissipation, weld formation, structure and properties

Надійшла до редакції 29.07.2022

WORLD TRADE FAIR FOR WELDING ENGINEERING —
JOINING, CUTTING, SURFACING

LET'S JOIN
THE WORLD!

11. – 15. September, 2023

REGISTER NOW!

www.schweissen-schneiden.com

DVS GERMAN WELDING SOCIETY

MESSE ESSEN