

ВПЛИВ УМОВ ЗАХИСТУ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ВАННИ АРГОНОМ НА ВЛАСТИВОСТІ ШВІВ ПРИ TIG ЗВАРЮВАННІ ТИТАНУ

В.П. Прилуцький, Л.Є. Єрошенко

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

Розроблена методика, яка дозволяє при зварюванні титану в реальному масштабі часу експериментально встановити кореляційну залежність між підвищеною концентрацією кисню в аргоні зварювального пальника, інтенсивністю випромінювання атомних ліній кисню ОІ в дузі і відповідною зміною властивостей зварних швів. Встановлено, що збільшення вмісту кисню у аргоні до 0,34 об. % при порушенні захисту шва призводить до підвищення межі міцності металу шва на 30 % і одночасно зниженню пластичності на 65 %. Запропонована методика може бути використана для створення бази даних при розробці систем прогнозування експлуатаційної надійності зварних конструкцій з титанових сплавів за кількісними показниками зміни характеристик металу зварного шва під час зварювання. Бібліогр. 9, табл. 4, рис. 8.

Ключові слова: аргонодугове зварювання (TIG), сплав титана VT1-0, порушення захисту аргонем, газові домішки, прогнозування властивостей швів

Одним з найбільш поширених методів зварювання плавленням, який застосовується в промисловості при виготовленні відповідальних конструкцій з титанових сплавів, є метод дугового зварювання вольфрамовим електродом в інертному газі (зазвичай в аргоні). Для створення якісного захисту зварного з'єднання інертним газом, що виключає забруднення металу шва шкідливими домішками (киснем і азотом), окрім конструктивних особливостей зварювальних пальників і захисних пристосувань використовують аргон вищого сорту, що містить не менше 99,993 об. % основної речовини [1]. Перехід кисню, азоту і водню з аргону в метал шва вивчено у ряді робіт [2–4]. Показано, що відносне підвищення вмісту кисню і азоту в металі шва залежить головним чином від парціального тиску цих газів в аргоні і тривалості його контакту з рідким металом зварювальної ванни і остигаючим зварним з'єднанням. Отже, випадкові порушення аргонного захисту під час зварювання, як і недостатня чистота аргону, викликають збільшення концентрації домішок впровадження в металі шва, що знижує в тому або іншому ступені механічні властивості зварного з'єднання.

Відомі способи неруйнівного контролю не дозволяють в реальному масштабі часу встановити навіть сам факт переходу газових домішок із захисного середовища (аргону) в метал шва і, тим більше, прогнозувати міру зміни його властивостей в результаті цього переходу. Запропоновані методи діагностики дозволяють лише фіксувати відхилення параметрів зварювального процесу від номінальних значень і виявляти можливі дефекти в зварних з'єднаннях після зварювання [5, 6].

Тому розробка методу, що дозволяє під час зварювання не лише виявляти порушення захисту аргонем зварювальної ванни, але і встановлювати міру впливу цього порушення на механічні властивості зварного шва, є одним з важливих технологічних завдань. Його рішення може послужити основою для створення систем діагностики і прогнозування експлуатаційної надійності зварних конструкцій з титанових сплавів.

Мета роботи полягала в розробці методики створення експериментальної бази даних залежностей властивостей металу зварних швів при зварюванні титану марки VT1-0 від концентрації шкідливих домішок (кисню і азоту) в дуговому проміжку.

Матеріали і методи. Окрім домішки повітря в аргоні, додатковим джерелом попадання шкідливих домішок-газів в метал шва може бути забрудненість кромки зварюваних пластин і присадного дроту. Щоб уникнути впливу цих джерел, зварювання виконувалося наскрізним проплавленням пластин без застосування присадного дроту. Зварювання виконували на пластинах сплаву титану марки VT1-0 завтовшки 3 мм. Режими зварювання: $I_{зв} = 160$ А, $U_{д} = 10,5$ В, $v_{зв} = 12$ м/год, довжина дугового проміжку – 1,5 мм, діаметр вольфрамового електрода – 3 мм, кут заточування електрода – 30° , марка електрода – СВІ-1. До аргону [1], що поступає в пальник за схемою, приведеною на рис. 1, подавали шість концентрацій повітря (табл. 1). Витрату аргону і дозування повітря контролювали за допомогою ротаметрів РС-3 і РС-3А відповідно. Витрата аргону в пальник складала 12 л/хв, в захисну насадку – 27 л/хв. Вміст повітря в аргоні пальника змінювали в межах 0,25...1,58 об. %, при цьому вміст кисню зміню-

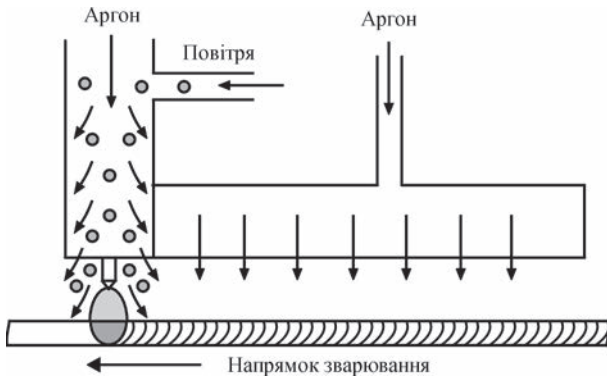


Рис. 1. Схема подання повітря в пальник

вався в межах 0,05...0,34 %. Критерієм оцінки властивостей металу зварних швів, отриманих при введенні в аргон дозованих концентрацій повітря, прийнято значення відношень показників меж міцності, відносних подовжень, поперечних звужень, твердості металу і вмісту газів в цих швах до відповідних показників металу швів, отриманих при зварюванні в аргоні без домішки повітря. Як видно з даних табл. 2, результати механічних випробувань зварних швів, отриманих при зварюванні в аргоні без домішки повітря показують певну кореляцію показників їх властивостей з відповідними показниками властивостей основного металу. Практично усі значення відношень показників властивостей швів до відповідних показників властивостей основного металу близькі до одиниці (табл. 3). Результати газового аналізу металу швів, отриманих при зварюванні в аргоні без домішки повітря (табл. 4), показують, що вміст в них кисню, азоту і водню практично залишається на рівні їх вмісту в основному металі. Тому отримані параметри властивостей металу зварних швів були взяті як базові параметри для порівняння якості металу зварних швів, отриманих при

Таблиця 1. Вміст повітря (кисню та азоту) у аргоні зварювального пальника

Номер п/п	Вміст повітря, об. %	Вміст кисню, об. %	Вміст азоту, об. %
1	0,25	0,05	0,20
2	0,40	0,08	0,32
3	0,66	0,14	0,52
4	1,00	0,21	0,78
5	1,08	0,23	0,84
6	1,58	0,33	1,23

Таблиця 2. Механічні властивості основного металу сплава ВТ1-0 та металу шва

σ_{02} , МПа	σ_B , МПа	δ , %	Ψ , %	H_{μ} , МПа
379,0	453,0	36,0	58,0	1580
390,5	430,0	33,0	64,0	1585

Примітка. Представлено середні значення результатів випробувань п'яти зразків. В чисельнику – показник металу шва, в знаменнику – основного металу.

Таблиця 3. Характеристики механічних властивостей металу швів (умовні одиниці)

σ_{02}	σ_B	d	y	H_{μ}
0,97	1,05	1,09	0,9	0,99

Таблиця 4. Показники газового аналізу основного металу сплава ВТ1-0 і металу шва

Вміст газів, мас. %		
O ₂	N ₂	H ₂
0,070	0,026	0,0027
0,067	0,025	0,0025

Примітка. Представлено середні значення результатів випробувань п'яти зразків. В чисельнику – показник металу шва, в знаменнику – основного металу.

зварюванні з введеними концентраціями повітря в аргон.

Для того, щоб вибрати спектральні лінії азоту або кисню, по яких необхідно реєструвати інтенсивності випромінювання, був виконаний порівняльний аналіз характеристик спектральних ліній NI та NII, OI та OII у видимому діапазоні з характеристиками ліній ArI та ArII, що знаходяться поблизу. Аналіз виконувався по таблицях спектральних ліній [7], який показав, що у видимому діапазоні спектру (400...700 нм) дуже мало інтенсивних ліній азоту і кисню. Порівняння значень довжин хвиль випромінювання атомів і іонів азоту (NI, NII) та кисню (OI, OII) зі значеннями довжин хвиль атомів і іонів аргону (ArI, ArII) показало, що ці величини надзвичайно близькі. Крім того, інтенсивність випромінювання NI, NII і OI, OII дуже мала у порівнянні з інтенсивністю ліній аргону. Тому використати для реєстрації лінії азоту і кисню в цьому діапазоні на тлі сильного випромінювання іонів аргону недоцільно. Із даних аналізу спектру ближньої інфрачервоної області (700...800 нм) видно, що в ній знаходяться спектральні лінії випромінювання атомів азоту (NI) і кисню (OI) з нижчою енергією збудження, ніж у видимій області спектру. Рис. 2 ілюструє, що достатня різниця між довжинами хвиль випроміню-

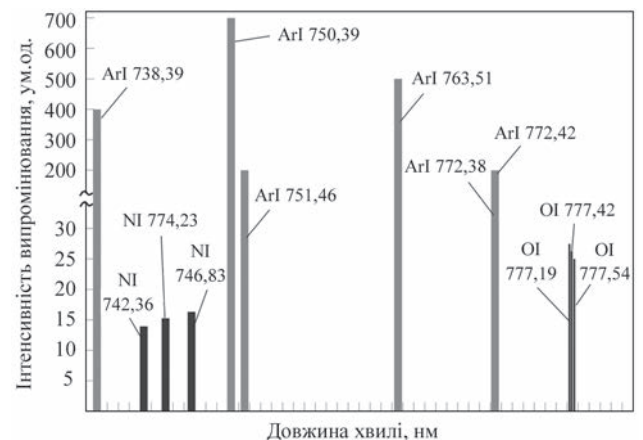


Рис. 2. Схема ближньої інфрачервоної області спектру (700...800 нм)

вання атомів азоту і кисню і найближчими лініями атомів аргону може знизити вплив випромінювання атомів аргону на випромінювання атомів азоту і кисню. Тому інтенсивність їх світіння в досліджуваних спектрах має бути значно вища, ніж у видимій області спектру. Для більшого зниження впливу випромінювання атомів аргону ArI і виділення спектральної області, в якій випромінюють атоми азоту NI і кисню OI, бажано використати вузькополосні світлофільтри.

Реєстрацію зміни інтенсивності випромінювання атомних ліній кисню і азоту в дуговому проміжку залежно від концентрації повітря в аргоні зварювального пальника виконували спектрографом СТЕ-1, діапазон реєстрації спектральних ліній якого знаходиться в межах 220...900 нм. Лінії спектру реєстрували на фотопластинах типу Інфра-780, потім обчислювали середні значення показників інтенсивності у кожному досліді. Таким чином були отримані величини інтенсивності випромінювання атомних ліній кисню OI і азоту NI в дуговому проміжку при введенні в аргон зварювального пальника шість концентрацій повітря. Це дозволило встановити такі кореляційні залежності: зміна концентрації кисню і азоту в аргоні зварювального пальника – інтенсивність випромінювання атомних ліній OI та NI в дузі; зміна інтенсивності випромінювання атомних ліній OI в дузі – властивості металу зварних швів.

Результати досліджень. З метою перевірки припущення про інтенсивність випромінювання ліній азоту NI і трьох ліній OI, що злилися в одну, був використаний метод фотографування спектру з видаленою щільною спектрографа [8]. Цей метод дає можливість спостерігати повне монохроматичне зображення дуги у світінні відповідної довжини хвилі. Отримані таким методом через вузькополосні фільтри зображення спектрограм при

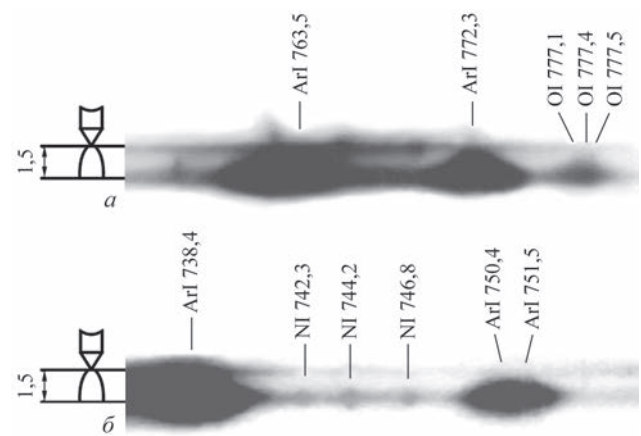


Рис. 3. Подовжні спектри дуги (Ar + 0,25 об. % повітря): а – спектр випромінювання атомів кисню OI; б – спектр випромінювання атомів азоту NI

введенні в аргон пальника мінімальної концентрації повітря (0,25 об. %) представлено на рис. 3. По щільності зображень спектрограм можна оцінити інтенсивність випромінювання виділених ліній атомів азоту NI і кисню OI за усім обсягом дугового проміжку. Як видно, щільність зображення кожної лінії азоту (рис. 3, а) значно слабкіша, ніж сумарна щільність зображення ліній кисню, видимих, як одна лінія (рис. 3, б). Для отримання додаткової інформації про розподіли інтенсивності випромінювання атомних ліній азоту і кисню по довжині дугового проміжку були досліджені поперечні спектри дуги, які фотографували на різній відстані від анода (рис. 4). З приведених даних видно, що інтенсивність випромінювання атомів азоту у напрямку від катода до анода знижується, в той час як інтенсивність випромінювання атомів кисню розподілена досить рівномірно по усьому дуговому проміжку. Тому було зроблено висновок, що сильніший сигнал випромінювання може бути отриманий при реєстрації сумарної інтенсивності спектру випромінювання атомів кисню OI у в дузі і викори-

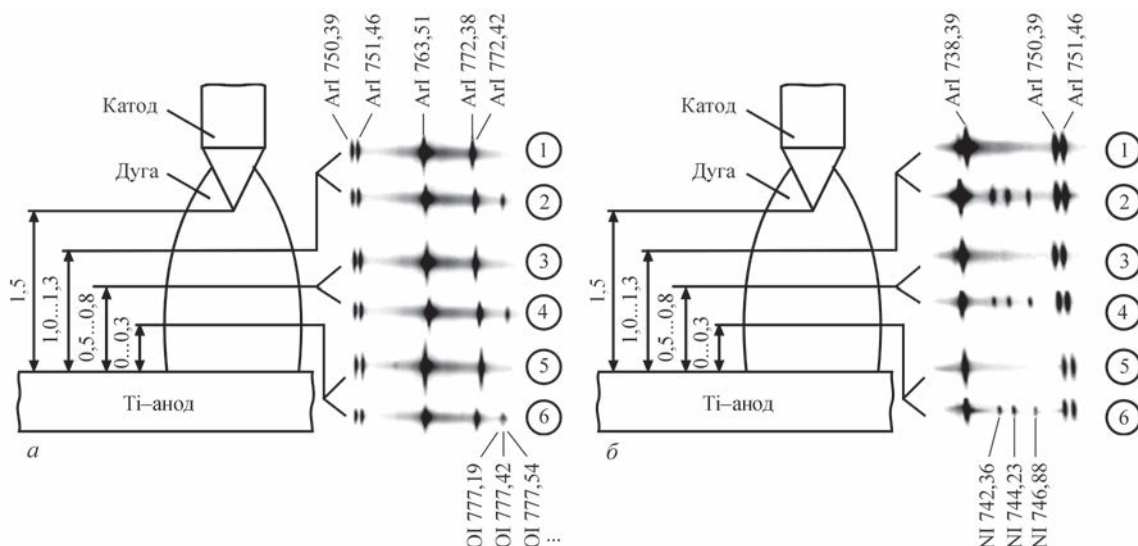


Рис. 4. Поперечні спектри дуги: а – спектр випромінювання атомів кисню OI; б – спектр випромінювання атомів азоту NI (1, 3, 5 – Ar 100 %; 2, 4, 6 – Ar + (0,25 об. % повітря)

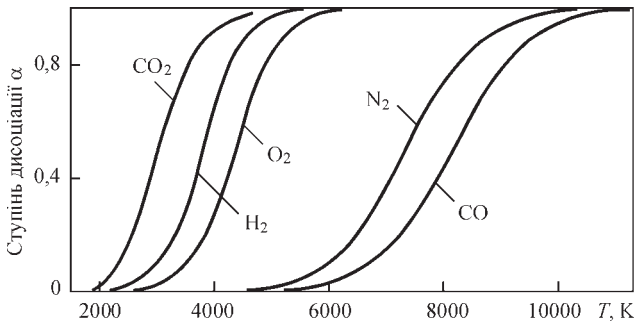


Рис. 5. Ступінь дисоціації α двоатомних газів в залежності від температури при тиску $p = 760$ мм рт. стовпа

станий як основний кількісний показник стану газового захисту аргоном зварювальної ванни.

Слід зазначити, що слабка інтенсивність випромінювання атомів азоту пов'язана, скоріш за все, з відносно невисокою температурою плазми поблизу анода, і, отже, недостатньою мірою для дисоціації молекул азоту (рис. 5) [9]. Експерименти показали, що при підвищенні вмісту кисню в аргоні зварювального пальника в діапазоні 0,05...0,34 об. % інтенсивність світіння ліній кисню лінійно зростає (рис. 6). Спостережуваний на графіку деякий розкид даних можна пояснити неконтрольованим явищем флуктуації домішки повітря і швидкості його потоку при виході із сопла пальника. При цьому деяка частина молекул кисню може потрапляти в низькотемпературні ділянки дуги, де міра їх дисоціації зни-

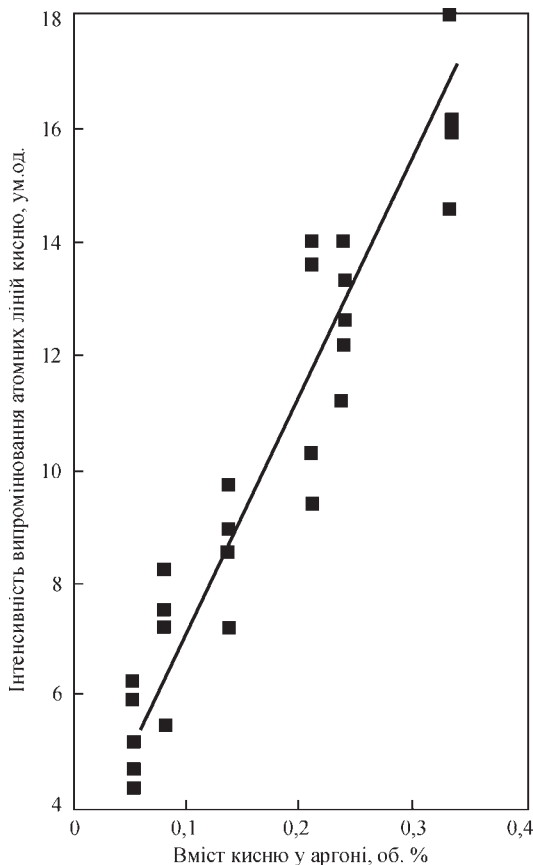


Рис. 6. Залежність сумарної інтенсивності випромінювання атомних ліній кисню OI 777,19, 777,42, 777,54 нм в дузі від його вмісту в аргоні зварювального пальника

жується. Тому знижується і загальна інтенсивність світіння ліній кисню OI. Після проходження високо-температурної зони дуги потік суміші аргону і повітря опускається до зварювальної ванни, в якій відбувається поглинання розплавленим металом домішок (кисню та азоту). Це підтверджується результатами газового аналізу металу швів (рис. 7). Як видно з приведених даних, вміст азоту і кисню в металі швів зростає пропорційно збільшенню вмісту кисню в аргоні.

На рис. 8 приведені залежності зміни відносних величин межі міцності і подовження металу зварних швів від вмісту кисню в аргоні зварювального пальника. Як видно, збільшення в дуговому проміжку кисню до 0,34 об. % (і відповідно азоту) призводить до підвищення межі міцності зварних швів на 30 %, а відносно подовження знижується на 65 %. Ці результати цілком узгоджуються з даними роботи [2].

З отриманих даних можна зробити висновок, що експериментально знайдено кореляційний зв'язок між зміною інтенсивності випромінюван-

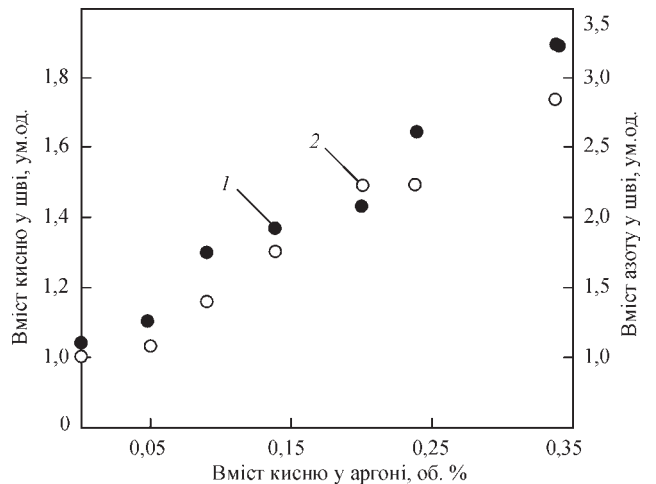


Рис. 7. Залежність відносного вмісту кисню (1) і азоту (2) в металі зварних швів від кількості кисню в аргоні зварювального пальника

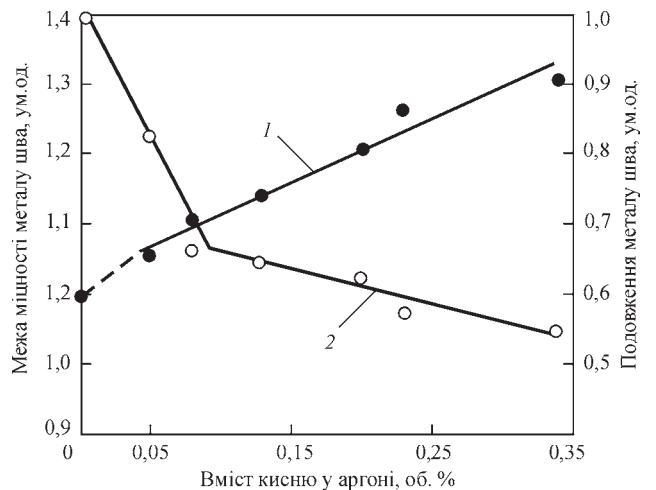


Рис. 8. Відносна зміна межі міцності (1) та подовження (2) металу швів залежно від вмісту кисню в аргоні зварювального пальника

ня атомних ліній кисню ОІ в дузі і зміною властивостей металу зварних швів. Запропонована методика може бути використана при розробці систем діагностики якості зварного з'єднання з прогнозуванням кількісних показників характеристик металу зварного шва в процесі зварювання.

Список літератури

1. ДСТУ ГОСТ 10157:2019 *Аргон газоподібний та рідкий. Технічні умови* (ГОСТ 10157-2016, IDT).
2. Гуревич С.М., Замков В.Н., Блашук В. Е. и др. (1986) *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов. 2-е изд.* Киев, Наукова думка.
3. Mitra, T.K., Venkataraman, G. (1996) Effect of shielding on the properties titanium welds. *WRI Journal*, 17, **46**, 117–121.
4. Щипков М.Д., Зеленова М.И., Петров В.Н. (1974) *Обработка давлением и сварка. Влияние состава защитной среды на конечное содержание водорода в металле шва при сварке сплава ЗВ.* Ленинград, Машиностроение.
5. Зубрецкая Н.А., Федин С.С. (2014) Системи обробки інформації. *Прогнозування прочності сварних точечних з'єднань*, вип. 5 (121).
6. Лазоренко Я.П., Шаповалов Е.В., Коляда В.А. (2011) Анализ спектра излучения сварочной дуги для мониторинга дуговой сварки (обзор). *Автоматическая сварка*, **11**, 24–27.
7. Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М. и др. (1977) *Таблицы спектральных линий.* Москва, Наука.
8. Ерошенко Л.В., Прилуцкий В. П., Замков В.Н. (1994) Видео-спектральная методика исследования сварочной дуги в аргоне. *Автоматическая сварка*, **7-8**, 7–9.
9. Капцов Н.А. (1950) *Электрические явления в газах и вакууме.* Москва-Ленинград, Государственное издательство технико-теоретической литературы.

References

1. DSTU GOST 10157:2019: *Gaseous and liquid argon. Specifications* (GOST 10157-2016, IDT) [in Ukrainian].
2. Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Blashchuk, V.E. et al. (1986) *Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys. 2nd Ed.* Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
3. Mitra, T.K., Venkataraman, G. (1996) Effect of shielding on the properties titanium welds. *WRI J.*, 17(4), 117–121.
4. Shchipkov, M.D., Zelenova, M.I., Petrov, V.N. (1974) *Pressure treatment and welding. Influence of shielding atmosphere composition on final hydrogen content in weld of 3V alloy.* Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
5. Zubretskaya, N.A., Fedin, S.S. (2014) Information processing systems. *Prediction of strength of spot welded joints.* Issue 5 (121) [in Ukrainian].
6. Lazorenko, Ya.P., Shapovalov, E.V., Kolyada, V.A. (2011) Analysis of spectrum of the welding arc light for monitoring of arc welding (Review). *The Paton Welding J.*, **11**, 24–27.
7. Zajdel, A.N., Prokofiev, V.K., Rajskey, S.M. et al. (1977) *Tables of spectrum lines.* Moscow, Nauka [in Russian].
8. Eroshenko, L.V., Prilutsky, V.P., Zamkov, V.N. (1994) Video spectrum procedure for investigation of welding arc in argon. *Avtomatich. Svarka*, **7-8**, 7–9 [in Russian].
9. Kaptsov, N.A. (1950) *Electric phenomena in gases and vacuum.* Moscow-Leningrad, Tekh.-Teoretich. Lit-ra [in Russian].

INFLUENCE OF CONDITIONS OF WELDING POOL PROTECTION BY ARGON ON THE PROPERTIES OF WELDS IN TIG WELDING OF TITANIUM

V.P. Prilutsky, L.Ye. Yeroshenko

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

A procedure was developed that allows an experimental determination of a correlation between an increased oxygen concentration in the argon of welding torch, intensity of radiation of atomic oxygen lines OI in the arc and the corresponding change in the properties of welds in a real-time welding of titanium. It was found that an increase in oxygen content in argon to 0.34 vol. % during violation of the weld protection leads to an increase in the tensile strength of the weld metal by 30% and at the same time reduction in the ductility by 65%. The proposed procedure can be used to create a database in the development of systems for predicting operational reliability of welded structures of titanium alloys by quantitative indices of changes in the characteristics of the weld metal during welding. 9 Ref., 4 Tabl., 8 Fig.

Keywords: argon arc welding (TIG), VT1-0 titanium alloy, violation of argon protection, gas impurities, prediction of weld properties

Надійшла до редакції 25.02.2021

РОЗРОБЛЕНО В ІЕЗ

Роботизоване плазмове зварювання мідних шин трансформаторів товщиною 6 мм

