

ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ КИСНЮ В АРГОНІ НА ВЛАСТИВОСТІ І КОЛІР ПОВЕРХНІ ЗВАРНИХ ШВІВ ПРИ TIG ЗВАРЮВАННІ ТИТАНУ

В.П. Прилуцький, І.К. Петриченко

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

Приведені результати досліджень процесу утворення газонасиченого шару на поверхні зварного шва при випадковому порушенні умов захисту аргоном (під насадкою) при TIG зварюванні титана VT1-0. Встановлено, що зміна вмісту кисню в аргоні захисної насадки в межах 0,024...1,18 об. % призводить до зміни кольору ділянки поверхні шва, який утворюється. Показано, що кожному кольору відповідає певна глибина газонасиченого шару, що досягає 0,25 мм. Встановлена кореляційна залежність: колір поверхні шва – товщина газонасиченого шару – вміст кисню в захисній насадці. Результати газового аналізу і механічних випробувань зварних швів показують, що кисень і азот повітря в аргоні захисної насадки практично не взаємодіють в процесі зварювання з розплавленим металом зварювальної ванни. Тому кількісні показники властивостей металу швів знаходяться на рівні властивостей металу швів, отриманих в стандартних умовах. Для підвищення експлуатаційної надійності зварних вузлів з кольоровою поверхнею ділянки шва запропоновано видаляти її залежно від кольору на глибину в межах від 0,10 до 0,25 мм. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: аргонодугове зварювання (TIG), сплав титана VT1-0, колір поверхні зварних швів, порушення захисту аргоном, властивості металу швів

Для виготовлення титанових конструкцій широке промислове застосування отримало зварювання вольфрамовим електродом в інертному газі (TIG). З підвищенням температури зростає активність взаємодії титану з газами атмосфери – киснем, азотом, вуглекислим газом, парами вологи, які є для титану шкідливими домішками. Помітне поглинання кисню титаном починається вже при температурі 300 °С, азоту – при 800 °С [1]. Розчинність кисню в α -фазі може досягати 34 % ат., а азоту – 0,75 % ат., при цьому швидкість взаємодії титану з киснем в 50 разів більше, ніж з азотом [2]. Високотемпературна взаємодія титану з повітряним середовищем супроводжується дифузійною кисню углиб матриці і утворенням твердого розчину кисню та азоту в титані, яке призводить до сильного спотворення кристалічної решітки і внаслідок цього до погіршення механічних характеристик металу. Оксидний шар, що утворився на поверхні у вигляді крупногочаптої α' -фази, має підвищену твердість і крихкість [3]. Слід зазначити, що домішки впровадження найбільшою мірою впливають не лише на зварюваність титанових сплавів, але і сприяють уповільненню руйнуванню зварних конструкцій у зв'язку з утворенням холодних тріщин в швах і зоні термічного впливу (ЗТВ) [4, 5]. Тому при зварюванні TIG особлива увага приділяється надійності захисту від контакту з повітрям не лише розплавленого металу зварювальної ванни, але і остигаючого зварного з'єднання [6]. Для виключення забруднення металу шва шкідливими домішками, окрім засто-

сування аргону високої чистоти, використовують зварювальні пальники і захисні пристосування, які забезпечують якісний захист усієї зони зварного з'єднання інертним газом. Важливе значення при цьому має правильний вибір співвідношення витрат аргону в зварювальний пальник і захисну насадку. Проте, незважаючи на якісний захист, під час зварювання можуть виникнути випадкові порушення захисту аргоном як в зоні горіння дуги під соплом пальника, так і в зоні остигаючого зварного з'єднання. У роботі [7] приведено метод, що дозволяє виявити порушення аргонового захисту в зоні горіння дуги під час зварювання і встановити міру впливу цього порушення на механічні властивості зварного шва. Але встановити порушення захисту аргоном поверхні остигаючого зварного шва такою методикою практично неможливо. Таке порушення можна виявити тільки при виходу зварного шва з-під захисної насадки. При дотриманні усіх технологічних вимог до процесу зварювання поверхня шва має сріблястий колір, а зміна умов захисту аргоном під насадкою призводить до зміни кольору поверхні шва в результаті утворення на ньому оксидно-нітридного шару титану. Нині такий ефект розглядається як показник властивостей і працездатності зварного з'єднання. Так, запропоновано стандарт, згідно з яким тільки за кольором поверхні швів оцінюється допуск до експлуатації зварних конструкцій з такими швами [8]. У літературі відсутня інформація про обґрунтування кількісної оцінки властивостей ділянки металу швів з кольоровою поверхнею. Тому до-

Прилуцький В.П. – <https://orcid.org/0000-0002-3174-1966>

© В.П. Прилуцький, І.К. Петриченко, 2021

слідження впливу випадкового підвищення вмісту кисню в аргоні захисної насадки на властивості металу зварного шва при зміні кольору його поверхні є актуальною задачею. Рішення її дозволить створити базу даних: колір поверхні шва – властивості металу шва, мета якої – підвищити експлуатаційну надійність вузлів зварних конструкцій, на поверхні швів яких виявлені кольорові ділянки.

Методика і матеріали. Для кількісної оцінки впливу концентрації домішок впровадження (кисню і азоту), в аргоні захисної насадки на властивості металу зварних швів залежно від кольору їх поверхні було використано комплекс методів:

- спектральний аналіз;
- фотографування кольору поверхні швів;
- металографічний аналіз;
- вимір мікротвердості металу шва;
- визначення вмісту газів в металі шва;
- механічні випробування металу швів.

Спектральний аналіз. Наявність кисню в дуговому проміжку визначали по інтенсивності випромінювання атомних ліній кисню за методикою, яка викладена в роботі [7]. У аргон, що поступає в захисну насадку, вводили дозовану кількість повітря. Повітря подавали в аргон за схемою, представленою на рис. 1.

Оптимальне співвідношення між витратою аргону в пальник і насадку, що забезпечує необхідну якість, визначали експериментально, домагаючись сріблястого кольору шва. Режимми зварювання: зварювальний струм 160 А, швидкість зварювання 12 м/ч, довжина дугового проміжку 1,5 мм. Витрата аргону в пальник складала 12 л/хв, в захисну насадку – 27 л/хв. Вміст повітря в аргоні захисної насадки змінювали в межах 0,12...5,9 об. %, при цьому вміст кисню змінювався в межах 0,024...1,18 об. % (табл. 1). Зварювання виконували на пластинах сплаву титану марки ВТ1-0 завтовшки 3 мм. Для забезпечення якісного захисту остигаючого металу ЗТВ відстань площини поверхні захисної насадки до поверхні пластини знаходилась в межах 1,0...1,5 мм. При кожному значенні концентрації повітря зварювали не

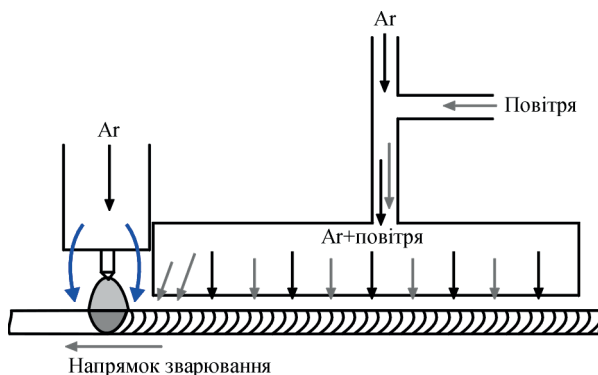


Рис. 1. Схема подачі повітря у захисну насадку

менше трьох зразків і визначали середнє значення інтенсивності випромінювання атомних ліній кисню.

Фотографування поверхні шва виконувалося за допомогою цифрової камери марки «CANON». Умови зйомки (експозиція, освітлення, відстань до поверхні шва) для усіх зварних зразків були однакові. Після зварювання з кожним варіантом концентрації кисню в аргоні захисної насадки фотографували поверхню зварних швів для отримання кореляційної залежності: колір поверхні шва – властивості металу шва.

Металографічний аналіз. Підвищення вмісту повітря в аргоні захисної насадки призводить до утворення на поверхні шва окисдно-нітридних щонайтонших плівок, що мають різне забарвлення. Товщину таких плівок можна оцінити по інтерференційному забарвленню [9]. Під кольоровою плівкою знаходиться метал з підвищеним вмістом кисню і азоту, в якому спотворено кристалічні ґрати і утворена крупногоччата α' -фаза. Дослідження змін мікроструктури в поверхневому шарі металу швів, зварених при фіксованих значеннях концентрації кисню в аргоні захисної насадки, виконували на мікроскопі «NEOFOT-2».

Мікротвердість поверхневого шару металу шва вимірювали пошарово приладом ПМТ-3 під навантаженням 50 г. На мікрошліфах з поверхні шва, звареного при кожній концентрації повітря в захисній насадці, видаляли шар певної товщини і виконували не менше 10 вимірів в декількох ділянках шліфа. Потім процес повторювали, видаляючи шар металу з вимірюваною твердістю і знову вимірювали твердість поверхні металу шва. Такий процес виконувався до тих пір, поки значення твердості металу шва на подальших шарах практично не змінювалися. Для порівняння такі ж виміри виконували для металу швів, зварених без введення повітря в захисну насадку. Отримані дані були використані для побудови залежності: твердість поверхневого шару металу шва – відстань від поверхні шва.

Вміст газів (кисню і азоту) визначали в металі швів при кожній концентрації повітря в аргоні захисної насадки і без введення в неї повітря. Для

Таблиця 1. Вміст повітря (кисню та азоту) в аргоні захисної насадки, об. %

Індекс зразка	Вміст повітря	Вміст кисню	Вміст азоту
1	0,12	0,024	0,09
2	0,19	0,038	0,14
3	0,37	0,074	0,28
4	0,48	0,096	0,37
5	0,60	0,120	0,46
6	1,10	0,220	0,85
7	1,60	0,320	1,24
8	2,24	0,440	1,74
9	5,90	1,180	4,60

оцінки змін змісту газів в металі швів будували графіки по середніх значеннях результатів вмісту кисню $[O]_{(Ar)}$ і азоту $[N]_{(Ar)}$ у швах, зварених в чистому аргоні і зварених при різних концентраціях кисню $[O]_{(Ar+air)}$ і азоту $[N]_{(Ar+air)}$ в аргоні захисної насадки.

Механічні випробування металу швів. Для визначення межі міцності і відносного подовження металу шва зі швів виготовляли зразки для механічних випробувань. Критерієм оцінки властивостей металу зварних швів, отриманих при введенні в аргон дозованих концентрацій повітря, порівнювали показники меж міцності, відносних подовжень в цих швах з відповідними показниками металу швів, отриманих при зварюванні в аргоні без домішок повітря. Результати механічних випробувань і змісту газів в металі швів, виконаних без домішки повітря в захисній насадці, приведені в роботі [7].

Для випробувань на статичний вигин (шириною 10 мм) вирізували зразки упоперек шва відповідно до Designation ASTM B265. Діаметр оправляння D вибраний з умови $D = 5b$, де b – товщина пластин ($b = 3$ мм). Перед випробуваннями зразка шліфуванням видаляли метал із зворотного валика шва. Після випробувань вимірювали кут вигину, а також аналізували поверхню зварних швів на наявність мікротріщин.

Результати досліджень. Наявність кисню в дуговому проміжку визначали при зміні концентрації

кисню в аргоні захисної насадки відповідно до табл. 1. Як показали дослідження, незважаючи на підвищення вмісту кисню в аргоні захисної насадки (від 0,024 до 1,180 об. %) випромінювання ліній кисню в дуговому проміжку не було виявлено. Можна припустити, що деяка частина суміші аргону і повітря, яка вводиться в аргон захисної насадки, захоплюється за рахунок інжекції периферійною частиною потоком аргону з палика і виноситься, не потрапляючи в стовп дуги. Інша частина поглинається остигаючою твердою поверхнею зварного шва, що утворюється, і ЗТВ. Можливо, також, що частина молекул кисню потрапляє в низькотемпературні ділянки дуги, недостатньо диссоціює і тому випромінювання ліній кисню в дузі не зареєстровано.

При аналізі колірної гамми поверхні зварних швів металу був зроблений наступний висновок. Зі збільшенням вмісту кисню в аргоні захисної насадки колір поверхні шва змінюється від золотистого (0,024 об. % кисню) до сіро-блакитного (1,180 об. % кисню). На рис. 2 представлені кольори поверхні швів, характерні для кожного значення концентрації повітря, яке вводилось в захисну насадку.

Аналіз мікроструктури поверхневих шарів зварних швів показав, що при вмісті кисню в аргоні захисної насадки 0,024 об. % на поверхні

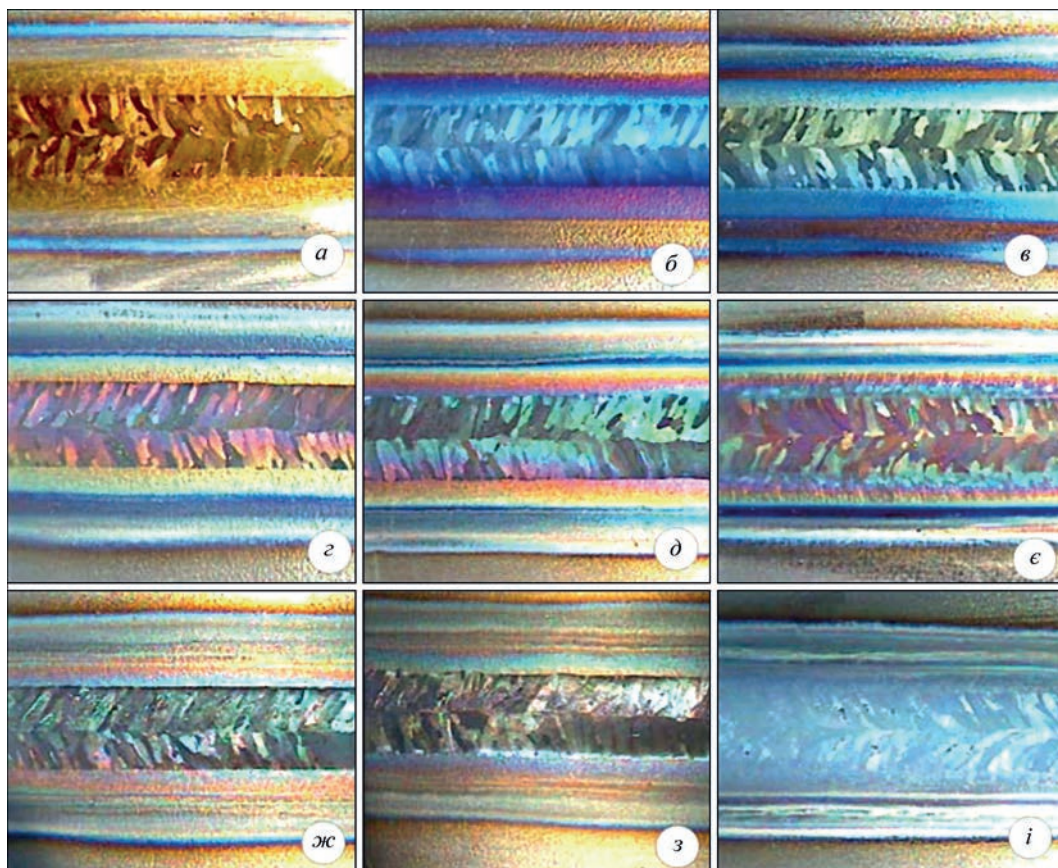


Рис. 2. Колір поверхні зварних швів, зварених при вмісті кисню в аргоні захисної насадки, (об. %): а – 0,024; б – 0,038; в – 0,074; г – 0,096; д – 0,120; е – 0,220; ж – 0,320; з – 0,440; і – 1,180

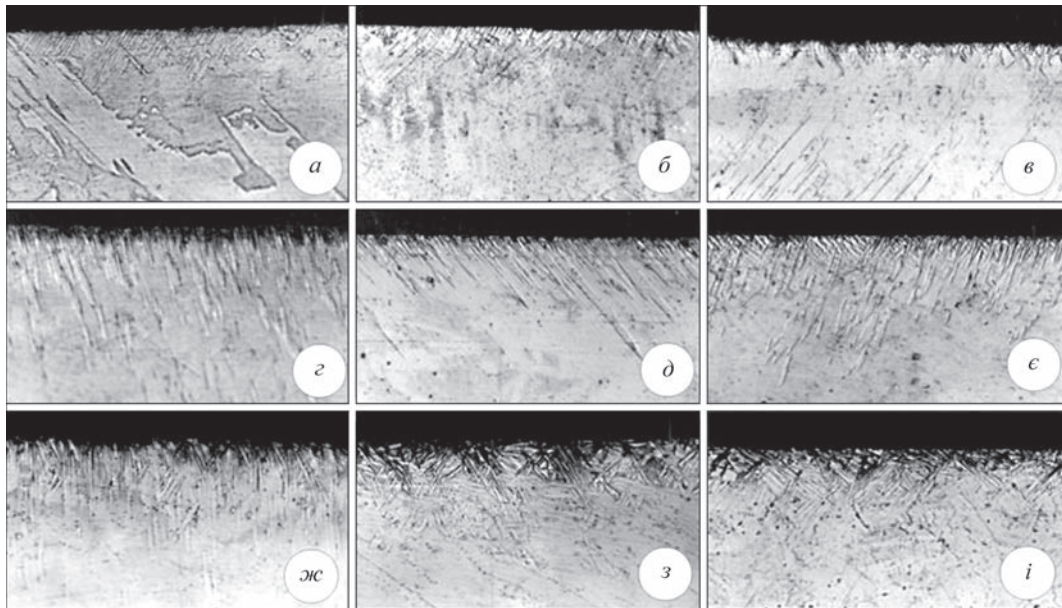


Рис. 3. Мікроструктури ($\times 250$) поверхнього шару зварних швів, зварених при вмісті кисню в аргоні захисної насадки (об. %): *a* – 0,024; *б* – 0,038; *в* – 0,074; *г* – 0,096; *д* – 0,120; *е* – 0,220; *ж* – 0,320; *з* – 0,440; *і* – 1,180

металу шва утворюється шар з тонкими голчастими виділеннями глибиною не більше 0,012 мм (рис. 3, *a*). Такі виділення чергуються із структурою, типовою для металу шва, звареного в чистому аргоні. При вмісті кисню в аргоні 0,038 об. % (рис. 3, *б*) утворюється суцільний шар з голчастою структурою глибиною не більше 0,02 мм. Причому голки мають як однакову, так і різну спрямованість відносно поверхні. Такі структурні змі-

ни пов'язані з поглинанням кисню і азоту в цих ділянках металу. При подальшому підвищенні вмісту кисню в аргоні до 0,074 об. % (рис. 3, *в*) зростає і товщина шару металу з голчастою структурою до 0,05 мм. При вмісті кисню в аргоні 0,096 об. % (рис. 3, *г*) структура шару з голчастою морфологією стає неоднорідною по розташуванню і величині голок. Окремі голки проростають на глибину до 0,16 мм. Середня глибина шару – до 0,07 мм. Подальший аналіз мікроструктур показує, що збільшення вмісту кисню до 1,180 об. % призводить до підвищення глибини шару з голчастою структурою до 0,18...0,25 мм (рис. 3, *і*).

В результаті металографічних досліджень встановлено, що при введенні повітря в аргон захисної насадки поверхній шар металу зварного шва зазнає структурні зміни, пов'язані з поглинанням кисню і азоту. Ці зміни відбуваються до глибини приблизно 0,25 мм. В глибших ділянках зварного шва подібних структурних змін не виявлено.

Результат пошарового виміру мікротвердості металу швів для кожного значення концентрації кисню в аргоні захисної насадки представлено на рис. 4. Порівнюючи дані, приведені на рис. 3 і 4, можна зробити висновок, що зі збільшенням

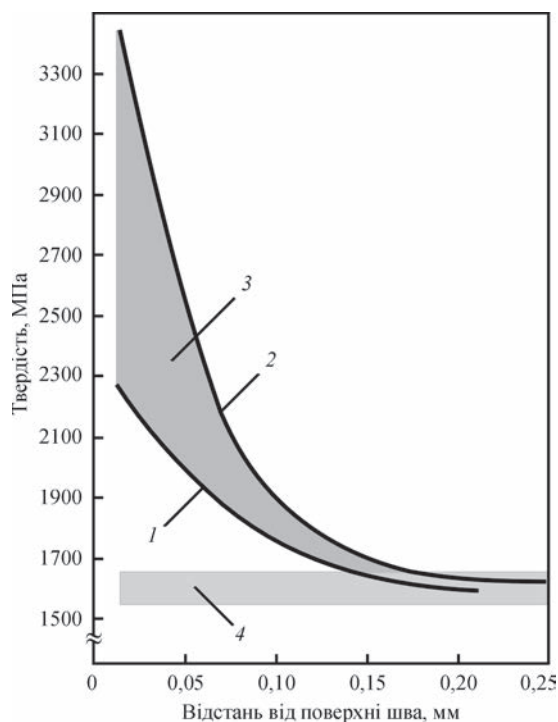


Рис. 4. Мікротвердість поверхніх шарів металу зварних швів, зварених при вмісті кисню в аргоні захисної насадки (об. %): 1 – 0,024; 2 – 1,18; 3 – зона мікротвердості при вмісті кисню в інтервалі 0,038...0,440; 4 – зона мікротвердості поверхнього шару зварного шва, звареного без введення повітря в аргон захисної насадки

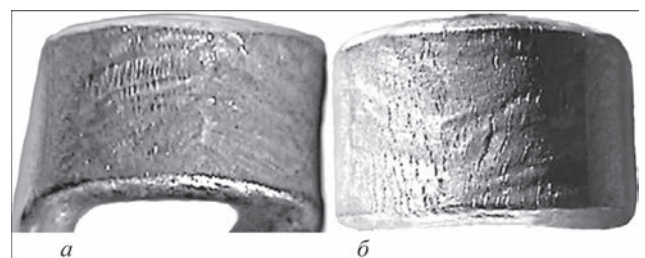


Рис. 5. Мікротріщини на поверхні зразків, зварених при вмісті кисню в аргоні захисної насадки (об. %): *a* – 0,024; *б* – 1,18

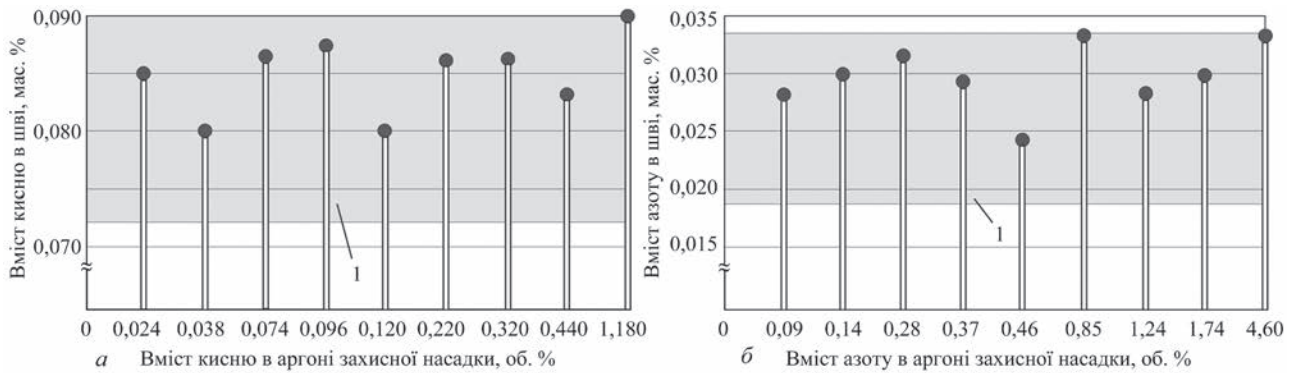


Рис. 6. Вміст кисню (а) і азоту (б) в зварних швах залежно від вмісту цих газів в аргоні захисної насадки: 1 – інтервал вмісту кисню і азоту в зварних швах, виконаних без введення повітря в аргон захисної насадки

кількості повітря в аргоні захисної насадки до 5,9 об. % (1,18 об. % кисню) глибина поверхневого шару металу шва з підвищеним вмістом домішок зростає приблизно до 0,20...0,25 мм.

Випробування зразків на вигин, вирізаних упоперек шва без видалення поверхневого шару, показали, що кут загину усіх зразків складає 180°. Це характеризує метал зварних швів як досить пластичний. Проте, на поверхневому шарі металу усіх зразків спостерігаються мікротріщини (рис. 5).

Появу мікротріщин на поверхні, яка навантажується силою розтягування, можна пояснити низькою пластичністю поверхневого шару металу, пов'язаною з підвищеним вмістом в ньому газових домішок. Для оцінки вірогідного захоплення повітря аргонем пальника з аргону захисної насадки і поглинання його металом зварювальної ванни, був виконаний газовий аналіз металу зварних швів і визначений вміст кисню і азоту. На рис. 6 приведені залежності зміни вмісту кисню і азоту в зварних швах від концентрацій цих газів в аргоні захисної насадки. Порівнюючи отримані результати газового аналізу можна бачити, що зі збільшенням концентрації повітря в аргоні захисної насадки, вміст кисню і азоту в металі зварних швів знаходиться практично в тих же межах, що і в швах, виконаних в чистому аргоні. Ці дані дозволяють зробити висновок, що введення повітря в аргон захисної насадки в досліджуваних межах не підвищує вміст газів в зварних швах. Тому можна припустити, що в процесі зварювання розплавлений метал зварювальної ванни практично не взаємодіє з киснем і азотом повітря, яке вводилося в аргон захисної насадки.

Для визначення впливу концентрацій кисню в аргоні захисної насадки на міцність і відносне подовження металу зварних швів виготовляли плоскі зразки для випробувань, розташовуючи їх уздовж осі шва і видаляючи з поверхні 0,25 мм. Результати механічних випробувань зварних швів показали, що незважаючи на підвищення концентрації повітря в аргоні захисної насадки в досліджуваному інтервалі, межа міцності і відносне подовження металу зварних швів ($\sigma_B = 456,9...451,4$ МПа, $\delta = 35,7...35,4$ %) залиша-

Таблиця 2. Кореляційна залежність колір поверхні шва – товщина газонасиченого шару – вміст кисню в захисній насадці

Індекс шва	Колір поверхні зварного шва	Вміст кисню в аргоні захисної насадки, об. %	Максимальна товщина шару з підвищеною твердістю, мм
1		0,024	0,10
2		0,038	0,10
3		0,074	0,10
4		0,006	0,10
5		0,120	0,12
6		0,220	0,20
7		0,320	0,25
8		0,440	0,25
9		0,180	0,25

ються в тих же межах, що і в швах, виконаних в чистому аргоні ($\sigma_b = 453,0$ МПа, $\delta = 36,0$ %).

Обговорення результатів. Дослідженнями встановлено, що колір поверхні зварного шва після зварювання залежить від вмісту кисню і азоту в аргоні захисної насадки. Результати досліджень мікроструктури і пошарового виміру мікротвердості поверхневого шару зварного шва показують хороший збіг даних по інтенсивності глибини газонасиченого шару залежно від кольору поверхні шва. Таким чином, експериментально встановлена кореляція між зміною кольору поверхні шва і глибиною газонасиченого шару (табл. 2).

Максимальна глибина цього шару складає не більше 0,25 мм. Дослідження зразків на вигин показують, що навіть при мінімальному вмісті кисню в аргоні захисної насадки (0,024 %) і золотистому кольорі поверхні шва (див. рис. 2, а), на ній утворюються мікротріщини, які при експлуатації зварного вузла під навантаженням можуть привести до його руйнування через крихкості поверхневого шару.

Аналіз результатів газового аналізу і механічних випробувань зварних швів показує, що кисень і азот повітря в аргоні захисної насадки практично не взаємодіють в процесі зварювання з розплавленим металом зварювальної ванни. Тому для підвищення експлуатаційної надійності вузлів зварних конструкцій з кольоровою поверхнею ділянки шва можна рекомендувати видалення газонасиченого шару залежно від кольору шва на глибину відповідно до даних табл. 2. У разі потреби після видалення шару можлива компенсація видаленого металу наплавленням відповідно до технологічної інструкції.

Список літератури

1. Гуревич С.М., Замков В.Н., Блащук В. Е. и др. (1986). *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. 2-е изд. Киев, Наукова думка.

2. Richardson, L.S., Grant, H.I. (1954) Reaction of oxygen and nitrogen with titanium from 700° to 1050°. *J. Metals*, **1**, 69–70.
3. Бай А.С., Лайнер Д.И., Слесарева Е.Н., Цыпин М.И. (1978). *Окисление титана и его сплавов*. Москва, Metallurgiya.
4. Mitra, T.K., Venkataraman, G. (1996). Effect of shielding on the properties titanium welds. *WRI Journal*, **17**, **4**, 117–121.
5. Mc Cue Don, Irving, B. (1999). Gas tungsten arc welding: It's built handle titanium. *Welding J.*, **11**, 31–36.
6. Dennis D. Harwig. (1999). Achieving high – quality titanium arc welds. *Practical welding today (EWI Update)*, **1/2**, 48–50.
7. Прилуцький В.П., Єрошенко Л.Є. (2021). Вплив умов захисту зварювальної ванни аргонном на властивості швів при ТІГ зварюванні титану. *Автоматичне зварювання*, **6**, 39–43. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.06.06>
8. ГОСТ Р ИСО 15614-5-2009. *Технические требования и аттестация процедур сварки металлических материалов. Проверка процедуры сварки. Часть 5. Дуговая сварка титана, циркония и их сплавов* (Перездание).
9. Грабин В.Ф. (1975). *Основы металловедения и термической обработки сварных соединений из титановых сплавов*. Киев, Наукова думка.

References

1. 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].
2. Richardson, L.S., Grant, H.I. (1954) Reaction of oxygen and nitrogen with titanium from 700° to 1050°. *J. Metals*, **1**, 69–70.
3. Baj, A.S., Lajner, D.I., Slesareva, E.N., Tsy-pin, M.I. (1978) *Oxidation of titanium and its alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Mitra, T.K., Venkataraman, G. (1996). Effect of shielding on the properties titanium welds. *WRI J.*, **17**(4), 117–121.
5. Mc Cue Don, Irving, B. (1999) Gas tungsten arc welding: It's built handle titanium. *Welding J.*, **11**, 31–36.
6. Dennis D. Harwig. (1999) Achieving high-quality titanium arc welds. *Practical Welding Today (EWI Update)*, **1/2**, 48–50.
7. Prylutsky, V.P., Yeroshenko, L.E. (2021) Influence of conditions of welding pool protection by argon on properties of TIG of titanium. *The Paton Welding J.*, **6**, 39–43
8. GOST R ISO 15614-5-2009: *Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Welding procedure test. Pt 5: Arc welding of titanium, zirconium and their alloys* (Reedition) [in Russian].
9. Grabin, V.F. (1975) *Fundamentals of physical metallurgy and heat treatment of welded joints from titanium alloys*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

INFLUENCE OF OXYGEN CONCENTRATION IN ARGON ON THE PROPERTIES AND COLOUR OF WELD SURFACE IN TIG WELDING OF TITANIUM

V.P. Prilutskiy, I.K. Petrichenko

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

E-mail: office@paton.kiev

The paper presents the results of investigations of the process of formation of a gas-saturated layer on the weld surface at accidental violation of the conditions of argon protection (under the nozzle) in TIG welding of VT1-0 titanium. It was found that the change of oxygen content in argon of the protective nozzle in the range from 0.024 to 1.18 vol. % leads to a change of the colour of a region of forming weld surface. It is shown that each colour corresponds to a certain depth of the gas-saturated layer that can be up to 0.25 mm. A correlation dependence of weld surface colour – gas-saturated layer thickness – oxygen content in the protective nozzle was established. Results of gas analysis and mechanical testing of the welds show that oxygen and nitrogen from the air practically do not interact with the molten metal of the weld pool in the argon of the protective nozzle during welding. Therefore, the quantitative characteristics of the metal of welds are on the level of those of the metal of welds produced under standard conditions. To increase the operational reliability of welded assemblies with a coloured surface of a weld region, it is proposed to remove it, depending on its colour to the depth in the range from 0.10 up to 0.25 mm. 9 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: argon-arc welding (TIG), VT1-0 titanium alloy, weld surface colour, violation of argon protection, weld metal properties.

Надійшла до редакції
05.05.2021