

Лідія Петрушинець, Юрій Фальченко, Анатолій Устінов,
Тетяна Мельниченко, Олег Новомлинець

ДИФУЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ У ВАКУУМІ ЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ НА Ni ОСНОВІ

Актуальність теми дослідження. Дифузійне зварювання нікелевих жароміцних сплавів є перспективним процесом.

Постановка проблеми. Складність отримання з'єднань із жароміцних сплавів на основі нікелю методом дифузійного зварювання полягає в наявності на їх поверхні шару оксиду, а також їх низькій пластичності.

Аналіз досліджень і публікацій. У процесі зварювання жароміцних нікелевих сплавів необхідно застосовувати досить жорсткі режими зварювання.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Застосовування для зварювання прошарків з чистих пластичних металів хоча і сприяє формуванню зварного з'єднання, але створює в зоні з'єднання ділянки з хімічною неоднорідністю, що негативно позначається на фізико-хімічних властивостях з'єднання.

Постановка завдання. Дослідження впливу структурних характеристик та хімічного складу багатошарової фольги на особливості формування з'єднань із жароміцного сплаву на Ni основі.

Виклад основного матеріалу. Проведено дослідження зі зварювання сплаву ЖС6К через багатошарові фольги систем Al – Ni і Co – Ti.

Висновки. Складність отримання з'єднань із жароміцних сплавів на основі нікелю методом дифузійного зварювання полягає в наявності на їх поверхні шару, який складається зі стійкого оксиду. Низька пластичність сплавів негативно впливає на формування фізичного контакту і, як наслідок цього, на процес схоплювання поверхонь.

Встановлено, що використання як проміжних прошарків фольги Co/Ti під час дифузійного зварювання у вакуумі нікелевого жароміцного сплаву призводить до формування у стик шарів сполук на основі системи Ti–Ni–Co, наявність яких обумовлює високу мікротвердість зони з'єднання, що призводить до утворення значних термічних напружень, унаслідок чого відбувається розтріскування зразків.

Показано, що використання фольги системи Al–Ni під час дифузійного зварювання нікелевого жароміцного сплаву забезпечує утворення з'єднань, сприяє активному протіканню дифузійних процесів з формуванням у стик однорідної за хімічним складом дифузійної зони з монотонним характером розподілу легуючих елементів.

Ключові слова: дифузійне зварювання у вакуумі; ЖС6К; багатошарові фольги; мікроструктура; мікроіндентування.

Рис.: 7. Бібл.: 10.

Постановка проблеми. Жароміцні сплави на основі нікелю широко використовуються в автомобільній, аерокосмічній і атомній промисловості. Виробництво деталей складної конфігурації з цієї групи сплавів методами прецензійного лиття є трудомістким і дорогим. Одним зі шляхів вирішення цієї проблеми є виготовлення окремих сегментів конструкції з їх наступним з'єднанням. Дифузійне зварювання в цьому відношенні є перспективним процесом, оскільки дозволяє поєднувати елементи складної конфігурації без розплавлення та непередбачуваних спотворень форми, а також дає можливість отримувати з'єднання з властивостями і мікроструктурою, близькими до вихідного матеріалу. Складність отримання з'єднань із жароміцних сплавів на основі нікелю методом дифузійного зварювання, насамперед, полягає в наявності на їх поверхні шару оксиду, який перешкоджає утворенню зварного з'єднання. Сплави цієї групи також мають низьку пластичність, що у свою чергу ускладнює схоплення контактних поверхонь на стадії утворення фізичного контакту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як правило, під час зварювання без проміжних прошарків з урахуванням перебування на поверхні жароміцних нікелевих сплавів термічно стійкої оксидної плівки, необхідно застосовувати більш жорсткі режими зварювання. Так, В. Н. Столяров у [1] показав, що в з'єднаннях сплаву ЭИ607А отриманих на режимі: температура зварювання 1200 °С, навантаження 20 МПа, тривалість зварювання 6 хв у зоні з'єднання поряд із зернами загальними для обох заготовок виявляються сліди лінії розділу, які являють собою мікронесуцільності або залишки оксидних плівок у площині з'єднання.

Автори роботи [2] відзначають, що під час зварювання дисперсійно-зміцненого нікелевого сплаву Ni – Cr – Al – W – Y₂O₃ процес доцільно вести в інтервалі температур T = 950 ... 1100 °С, при якому в матриці сплаву відбувається розчинення 20–25 % γ-

фази. Це призводить до збільшення відстані між дисперсними частками сплаву і їх роль у гальмуванні дислокацій знижується. Встановлено, що в з'єднаннях, отриманих на цьому режимі, завжди спостерігається міжфазна плоскоорієнтована границя. Застосування рекристалізаційного відпалу призводить до її усунення.

У роботі [3] розглядали можливість застосування двостадійного процесу зварювання сплаву NiCr (Ni – 20Cr – 2ThO₂, % ваг). На першій стадії для забезпечення щільного контакту між площинами, що зварюються, до зразків прикладається тиск порядку 207 МПа при відносно низькій температурі 705 °С і тривалості процесу 60 хв. На другій стадії при зниженому тиску P = 15 МПа і підвищеній температурі T = 1190 °С протягом 30 хв відбувається зварювання. Відзначають, що застосування цього процесу дозволяє отримати якісні з'єднання.

Одним із методів активації зварювальних поверхонь є застосування проміжних прошарків, використання яких дозволяє локалізувати пластичну деформацію безпосередньо у стику, що в свою чергу сприяє утворенню на контактних поверхнях зсувних деформацій, наслідком чого є руйнування оксидних плівок.

У процесі дифузійного зварювання нікелевого сплаву Rene'41 автори [4] рекомендують застосовувати проміжні прошарки сплаву Ni-2%Be. Було встановлено, що підвищення температури зварювання з 1079 °С до 1176 °С призводить до формування ділянок схоплювання між поверхнями, що сполучаються. Це пов'язано з більш інтенсивним протіканням дифузійних процесів, розчиненням залишків оксидів і зменшенням градієнта механічної та хімічної неоднорідності на границі основного металу з прошарком.

У роботі [5] досліджували з'єднання зразків зі сплаву Nimonic 90, отримані при тиску до 230 МПа. Як проміжні прошарки використовували фольги нікелю. Після прикладення тиску зразки піддавалися витримці тривалістю до 480 хв, температура зварювання становила 1100 °С. Максимальна міцність на зріз 370 МПа спостерігалася при використанні прошарку з нікелевої фольги товщиною 25 мкм, тиску стиснення P = 150...230 МПа.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Необхідно відзначити, що застосування для зварювання прошарків з чистих пластичних металів, таких як мідь, нікель, алюміній, срібло, золото та інші хоча і сприяє формуванню зварного з'єднання, але створює в зоні з'єднання ділянки з хімічною неоднорідністю, що в свою чергу негативно позначається на фізико-хімічних властивостях з'єднання.

Для зменшення хімічної неоднорідності у стику існує необхідність у застосуванні більш тонких фольг, проте здатних пластично деформуватися у процесі зварювання. До таких фольг можна віднести фольги, отримані методами напилення, зокрема методом електронно-променевого випаровування і конденсації у вакуумі. Ці фольги у процесі зварювання можуть трансформуватися у структуру близьку за хімічним складом до матеріалу, що зварюється [6]. У ролі таких прошарків можуть бути використані багатошарові фольги, які створюються під певні пари металів, що потребують зварювання, з урахуванням їх хімічного складу. Як показали дослідження, проведені авторами статті раніше, застосування багатошарової фольги може істотно прискорити протікання дифузійних процесів у стику і зменшити хімічну неоднорідність з'єднань [7; 8].

Мета статті. Метою цієї роботи є дослідження впливу структурних характеристик та хімічного складу багатошарової фольги на особливості формування з'єднань з жароміцного сплаву на Ni основі.

Виклад основного матеріалу. Зварювання зразків проводили способом дифузійного зварювання у вакуумі в установці У-394М. Рівномірність нагрівання зразків забезпечували за рахунок використання електронно-променевого нагрівача кільцевої форми. Температуру зварювання контролювали за допомогою хромель-алюмелевої термопари.

Параметри процесу зварювання задавали в таких діапазонах: температура $T_{зв} = 900 \dots 1200$ °С, тиск $P_{зв} = 10 \dots 20$ МПа, тривалість $t_{зв} = 5 \dots 20$ хв, вакуум у робочій камері підтримували на рівні $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па.

Об'єктом досліджень був жароміцний сплав на нікелевій основі ЖС6К (Ni – 11Cr – 5,5Al – 5W – 4,5Co – 4Mo – 2,75Ti, до 2Fe, % ваг). Сплав є важкозварювальним дисперснозміцненим суперсплавом, що містить значну кількість титану й алюмінію, схильний до утворення тріщин у шві та зоні термічного впливу [9].

Як проміжні прошарки під час дифузійного зварювання використовували багатошарові фольги (БФ) Al – 86,68Ni і Co – 77,16Ti, % ваг. загальною товщиною 30 і 50 мкм відповідно. Подвійні системи для БФ вибирали виходячи зі складу матеріалів, що зварюються, таким чином, щоб компоненти проміжного прошарку виступали легуючими елементами основного матеріалу.

Порізку зразків для зварювання проводили на електроерозійному верстаті. Поверхні зразків, які підлягали зварюванню, шліфували на алмазному крузі та знежирювали в етиловому спирті.

Аналіз мікроструктури зварних з'єднань проводили за допомогою електронного мікроскопа CAMSCAN 4, оснащеного системою енергодисперсійного аналізу Oxford Inca Energy 200 для визначення хімічного складу на плоских зразках. Для цього за стандартною методикою з використанням шліфувально-полірувального обладнання фірми Struers були приготовлені шліфи поперечного перерізу зварних з'єднань.

Оцінку мікромеханічних властивостей зварних з'єднань проводили з використанням установки «Мікрон-гама» методом автоматичного індентування алмазною пірамідою Берковича ($\alpha = 65^\circ$) при навантаженні 0,4 Н і швидкості навантаження 0,04 Н/с, з автоматичним навантаженням та розвантаженням протягом 20 с і записом діаграми в координатах Р (навантаження) – h (глибина впровадження індентора) [10]. Показники діаграми P_{\max} , h_{\max} та інші фіксувалися автоматично за даними двох тисяч точок на діаграмі індентування і проводилося автоматичне обчислення таких характеристик матеріалу, як твердість, модуль Юнга, коефіцієнт пластичності. З метою збільшення діапазону вимірювань дослідження проводили під кутом $20 - 45^\circ$ до зони з'єднання. В таблицях даних введені такі позначення: Н – значення мікротвердості за Мейером, ГПа; Е – модуль Юнга, ГПа; $K_{\text{пласт}}$ – коефіцієнт пластичності.

Оцінювання впливу параметрів дифузійного зварювання у вакуумі на формування з'єднань зі сплаву ЖС6К без проміжних прошарків проводили в температурному інтервалі 900–1200 °С, при тиску 20 МПа та тривалості зварювання 20 хв. Встановлено, що навіть при $T_{зв} = 1200$ °С у зоні з'єднання спостерігається значна кількість дефектів у вигляді суцільного ланцюга пор і оксидних включень (рис. 1). Утворення загальних зерен у стику не виявлено.

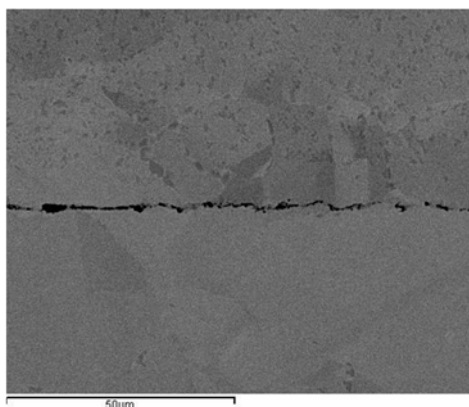
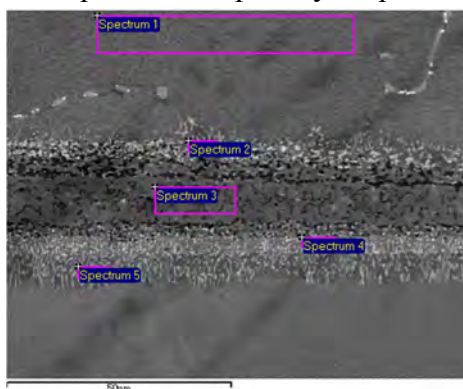


Рис. 1. Мікроструктура зварного з'єднання сплаву ЖС6К, отриманого на режимі: $T_{зв} = 1200$ °С, $P_{зв} = 20$ МПа, $t_{зв} = 20$ хв

Високу дефектність зони з'єднання можна пояснити низькою пластичністю жароміцного нікелевого сплаву, яка не дозволяє на заданому режимі забезпечити достатню деформацію приповерхневих шарів металу, і як наслідок неможливість утворити повний фізичний контакт.

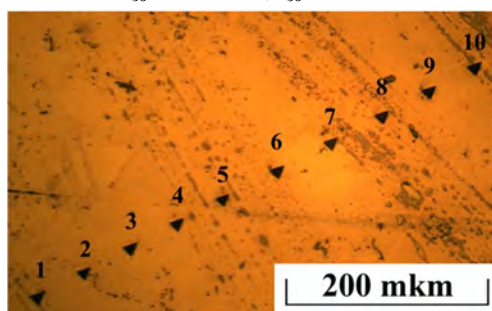
Подальші дослідження виконували з використанням БФ Со/Ті. Зварювання проводили при таких параметрах дифузійного зварювання: $T_{зв} = 1050$ °С, $P_{зв} = 20$ МПа, $t_{зв} = 20$ хв. В області з'єднання формується дифузійна зона (~ 30 мкм), що складається з шарів із різним хімічним і фазовим складом (рис. 2). Розподіл хімічних елементів в зоні з'єднання свідчить про їх високу дифузійну рухливість. У стику внаслідок хімічної взаємодії елементів формуються шари інтерметалідів на основі системи Ті–Ni–Со, наявність яких забезпечує високу мікротвердість зони з'єднання (рис. 3).

З метою вирівнювання вмісту легуючих елементів та мікромеханічних властивостей зони з'єднання було збільшено тривалість процесу зварювання вдвічі.



	Вміст елементів, % ваг.						
	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Mo	W
Spectrum 1	4,3	2,57	12,4	10,14	62,22	4,45	3,91
Spectrum 2	2,87	11,04	12,75	8,67	55,68	5,04	3,95
Spectrum 3	1,41	21,83	3,53	15,58	57,62	–	0,04
Spectrum 4	1,86	14,36	9,62	10,17	53,58	5,63	4,77
Spectrum 5	4,36	6,89	12,04	8,9	56,45	5,3	6,05

Рис. 2. Мікроструктура зварного з'єднання жароміцного нікелевого сплаву ЖС6К, отриманого з використанням наношаруватої фольги Со/Ті на режимі: $T_{зв} = 1050$ °С, $P_{зв} = 20$ МПа, $t_{зв} = 20$ хв



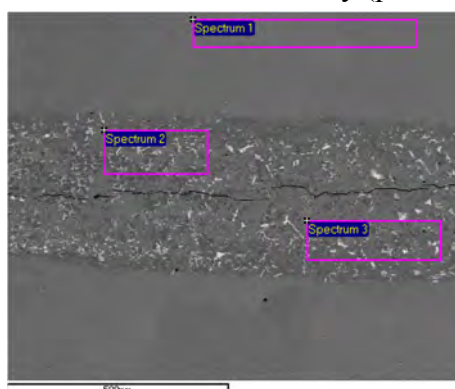
а

№ з/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Середнє значення
H, ГПа	4,868	5,279	5,075	5,322	5,809	5,105	5,041	4,863	4,960	4,975	5,130
E, ГПа	177,8	213,8	214,9	224,8	213,8	221,8	193,5	206,5	229,1	227,3	212,3
K _{пласт}	0,881	0,891	0,895	0,895	0,878	0,898	0,885	0,895	0,903	0,902	0,892

б

Рис. 3. Результати автоматичного інденування з'єднання ЖС6К+ Со/Ті+ ЖС6К, отриманого на режимі: $T_{зв} = 1050$ °С, $P_{зв} = 20$ МПа, $t_{зв} = 20$ хв: а – відбитки, отримані при інденуванні; б – таблиця розрахунків

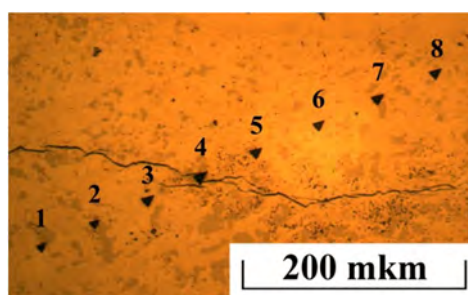
Встановлено, що збільшення часу витримки при температурі зварювання сприяє формуванню більш однорідної за хімічним складом дифузійної зони, яка за своїм вмістом хімічних елементів близька до основного металу (рис. 4).



	Вміст елементів, % ваг.						
	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Mo	W
Spectrum 1	4,05	3,09	12,25	10,23	62,13	4,12	4,13
Spectrum 2	4,07	12,79	9,36	11,04	54,53	4,01	4,19
Spectrum 3	3,96	12,17	9,14	10,78	56,98	3,74	3,22

Рис. 4. Мікроструктура зварного з'єднання жароміцного нікелевого сплаву ЖС6К, отриманого з використанням наночаруватої фольги Co/Ti на режимі: $T_{зв} = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{зв} = 20 \text{ МПа}$, $t_{зв} = 40 \text{ хв}$

Аналіз зміни мікромеханічних властивостей зони з'єднання (рис. 5) показав, що область стику має мікротвердість нижчу за мікротвердість вихідного нікелевого сплаву. Також варто зазначити, що збільшення часу зварювання значною мірою впливає на властивості сплаву ЖС6К, викликає суттєве зростання мікротвердості (~30 %) та зниження коефіцієнта пластичності. Причиною цього може бути інтенсивний ріст зерна у процесі зварювання. Суттєва розбіжність у мікротвердості окремих ділянок зварного з'єднання призводить до утворення значних термічних напружень і як наслідок до розтріскування зразків на стадії охолодження.



№ з/п	1	2	3	4	5	6	7	8	Середнє значення
H, ГПа	7,418	7,672	6,483	4,489	6,414	6,574	6,540	8,619	6,776
E, ГПа	198,5	194,1	219,6	182,2	194,8	201,0	241,2	246,6	209,8
$K_{\text{пласт}}$	0,840	0,831	0,871	0,894	0,858	0,856	0,881	0,845	0,860

б

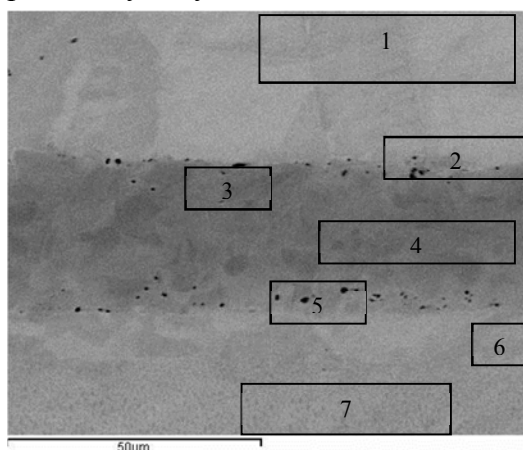
Рис. 5. Результати автоматичного індентування з'єднання ЖС6К+Co/Ti+ ЖС6К, отриманого на режимі: $T_{зв} = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{зв} = 20 \text{ МПа}$, $t_{зв} = 40 \text{ хв}$:

а – відбитки, отримані при індентуванні; б – таблиця розрахунків

Дифузійне зварювання зразків через БФ Al/Ni проводили при таких технологічних параметрах: $T_{зв} = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{зв} = 20 \text{ МПа}$, $t_{зв} = 20 \text{ хв}$. Встановлено, що використання як проміжного прошарку багаточарової фольги Al/Ni забезпечує формування зварного з'єднання з мінімальною кількістю дефектів, у зонах з'єднання прошарок – сплав ЖС6К

спостерігаються окремі пори (рис. 6). Отримані результати дозволяють припустити, що пористість на границях прошарку формується за рахунок зустрічної дифузії елементів з нікелевого сплаву в прошарок Al/Ni й у протилежному напрямку (ефект Кіркіндала).

Використання прошарку системи Al-Ni забезпечує формування з'єднання і сприяє активному протіканню у стику дифузійних процесів. Взаємна дифузія компонентів сплаву і фольги призводить до формування у стику дифузійної зони шириною ~30 мкм. БФ Al/Ni забезпечує формування однорідної за хімічним складом дифузійної зони з монотонним характером розподілу легуючих елементів.

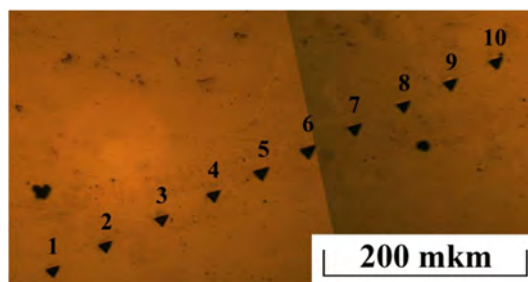


	Вміст елементів, % ваг.						
	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Mo	W
Spectrum 1	3,42	2,34	11,26	10,36	64,02	4,13	4,48
Spectrum 2	3,46	1,57	9,8	9,07	68,31	3,83	3,95
Spectrum 3	9,45	1,24	3,1	2,61	83,16	–	0,43
Spectrum 4	10,54	0,58	2,74	2,01	84,13	–	–
Spectrum 5	8,89	1,6	3,54	3,27	79,68	1,52	1,51
Spectrum 6	3,94	2,77	11,83	10,44	63,22	4,29	3,51
Spectrum 7	3,62	1,83	10,9	9,47	66,32	3,64	4,21

Рис. 6. Мікроструктура зварного з'єднання ЖС6К+Al/Ni+ЖС6К, отриманого на режимі:
 $T_{зв} = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{зв} = 20 \text{ МПа}$, $t_{зв} = 20 \text{ хв}$

Аналіз зміни мікротвердості (рис. 7) показує, що зона з'єднання має мікротвердість нижчу за мікротвердість матеріалу сплаву ЖС6К у вихідному стані. Формування зони з дещо вищими значеннями коефіцієнта пластичності дозволяє запобігти розтріскуванню зразків на стадії охолодження.

Наведені результати свідчать про перспективність використання багатошарових фольг як проміжні прошарки під час дифузійного зварювання жароміцних сплавів на нікелевій основі. Застосування таких проміжних прошарків дозволяє суттєво пом'якшити умови зварювання.



а

Рис. 7. Результати автоматичного індентування зварного з'єднання ЖС6К+Al/Ni+ЖС6К, отриманого на режимі: $T_{зв} = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{зв} = 20 \text{ МПа}$, $t_{зв} = 20 \text{ хв}$:
 а – відбитки, отримані при індентуванні; б – таблиця розрахунків

№ з/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Середнє значення
Н, ГПа	4,872	4,853	5,022	4,610	3,788	3,490	4,238	4,820	4,546	4,604	4,484
Е, ГПа	193,0	194,5	201,4	179,1	188,5	167,3	182,3	188,5	195,4	195,4	185,8
$K_{\text{пласт}}$	0,887	0,888	0,890	0,885	0,910	0,907	0,895	0,887	0,898	0,879	0,892

б

Рис. 7. Закінчення (див. також с.68)

Висновки.

1. Складність отримання з'єднань із жароміцних сплавів на основі нікелю методом дифузійного зварювання полягає в наявності на їх поверхні шару, який складається із стійкого оксиду. Низька пластичність сплавів негативно впливає на формування фізичного контакту і, як наслідок цього, на процес схоплювання поверхонь.

2. Встановлено, що використання як проміжних прошарків БФ Со/Ті у процесі дифузійного зварювання у вакуумі нікелевого жароміцного сплаву призводить до формування в стику шарів сполук на основі системи Ті–Ni–Со, наявність яких обумовлює високу мікротвердість зони з'єднання, що призводить до утворення значних термічних напружень, унаслідок чого відбувається розтріскування зразків.

3. Показано, що використання БФ системи Al–Ni під час дифузійного зварювання нікелевого жароміцного сплаву забезпечує утворення з'єднань, сприяє активному протіканню дифузійних процесів з формуванням у стику однорідної за хімічним складом дифузійної зони з монотонним характером розподілу легуючих елементів.

Список використаних джерел

1. Столяров В. Н. Жаропрочные соединения никелевых сплавов, выполненных диффузионной сваркой и прессовой сваркой-пайкой / В. Н. Столяров // Сварочное производство. – 1971. – № 1. – С. 26–29.
2. Диффузионная сварка с принудительным деформированием дисперсно-упрочненного сплава на основе никеля / Э. С. Каракозов, А. П. Терновский, Т. С. Самсонова и др. // Сварочное производство. – 1984. – № 6. – С. 15–17.
3. Квасницкий В. Ф. Интенсификация процесса диффузионной сварки жаропрочных сплавов / В. Ф. Квасницкий, Л. И. Маркашова // Автоматическая сварка. – 2004. – № 8. – С. 16–19.
4. Мусин Р. А. Диффузионная сварка жаропрочных сплавов / Р. А. Мусин, В. Н. Анциферов, В. Ф. Квасницкий. – М. : Металлургия, 1979. – 208 с.
5. Davies B. J. Diffusion bonding and pressure brazing of Nimonic 90 nickel-chromium-cobalt alloy / B. J. Davies, S. Stephenson // British Welding Journal. – 1962. – Vol. 2, № 3. – Pp. 139–148.
6. Устинов А. И. Многослойные фольги Ti/Al: методы получения, свойства и применение при сварке / А. И. Устинов, Ю. В. Фальченко, Т. В. Мельниченко и др. // Современная электрометаллургия. – 2012. – № 1. – С. 30–37.
7. Diffusion welding of TiAl alloys through nano-layered foil of Ti/Al system / A. I. Ustinov, Yu. V. Falchenko, A. Ya. Ishchenko et al. // Intermetallic. – 2008. – № 16. – Pp. 1043–1045.
8. Дослідження дифузійних процесів у зварних з'єднаннях алюмініду титану (TiAl) / Г. К. Харченко, В. Ф. Мазанко, А. І. Устїнов та ін. // Вісник ЧДТУ. Серія технічні науки. – 2009. – № 37. – С. 117–119.
9. Сорокин Л. И. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6 / Л. И. Сорокин, В. И. Лукин, Ю. С. Багдасаров // Сварочное производство. – 1997. – № 6. – С. 12–17.
10. Уравнение индентирования / С. А. Фирстов, В. Ф. Горбань, Э. П. Печковский, Н. А. Мамека // Доклади Національної академії наук України. – 2007. – № 12. – С. 100–106.

References

1. Stoliarov, V.N. (1971). Zharoprochnye soedineniia nikelovykh spлавov, vypolnennykh difuzionnoi svarkoi i pressovoi svarkoi-paikoi [Heat-resisting junctions of nickel alloys made by diffusion welding and press welding-brazing]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Production*, no. 1, pp. 26–29 (in Russian).
2. Karakozov, E.S., Ternovskii, A.P., Samsonova, T.S., Davidian, E.V., Khaiurov, S.S., Polkin, I.S. (1984). Diffuzionnaia svarka s prinuditelnym deformirovaniem dispersno-uprochnennogo

splava na osnove nikelia [Diffusion welding with constrained deformation of dispersion-strengthened alloy on nickel base]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Production*, no. 6, pp. 15–17 (in Russian).

3. Kvasnitckii, V.F., Markashova, L.I. (2004). Intensifikatsiia protsesa diffuzionnoi svarki zharoprochnykh splavov [Intensification of the process of diffusion welding of heat-resisting alloys]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic Welding*, no. 8, pp. 16–19 (in Russian).

4. Musin, R.A., Antciferov, V.N., Kvasnitckii, V.F. (1979). *Diffuzionnaia svarka zharoprochnykh splavov [Diffusion welding of heat-resisting alloys]*. Moscow: Metallurgiiia (in Russian).

5. Davies, B.J., Stephenson, S. (1962). Diffusion bonding and pressure brazing of Nimonic 90 nicbel-cbromium-cobalt alloy. *British Welding Journal*, vol. 2, no 3, pp. 139–48.

6. Ustinov, A.I., Falchenko, Iu.V., Melnichenko, T.V., Kharchenko, G.K., Petrushinetc, L.V., Shishkin, E.A. (2012). Mnogosloinye folgi Ti/Al: metody polucheniiia, svoistva i primenenie pri svarke [Multilayered foils]. *Sovremennaia elektrometallurgiiia – Modern electrometallurgy*, no. 1, pp. 30–37 (in Russian).

7. Ustinov, A.I., Falchenko, Yu.V., Ishchenko, A.Ya., Kharchenko, G.K., Melnichenko, T.V., Muraveynik, A.N., (2008). Diffusion welding of TiAl alloys through nano-layered foil of Ti/Al system. *Intermetallic*, no 16, pp. 1043 – 1045.

8. Kharchenko, H.K., Mazanko, V.F., Ustinov, A.I., Falchenko, L.V., Petrushynets, Yu.V. (2009). Doslidzhennia dyfuziinykh protsesiv u zvarnykh ziednanniakh aliuminidu tytanu (TiAl) [Investigation of diffusive processes in welded junctions of titanium aluminum (TiAl)]. *Visnyk ChDTU. Seriiia tekhnichni nauky – Visnyk ChDTU. Technical Sciences Series*, no. 37, pp. 117–119 (in Ukrainian).

9. Sorokin, L.I., Lukin, V.I., Bagdasarov, Iu.S. (1997). Svarivaemost zharoprochnykh nikelovykh splavov tipa ZhS6 [Weldability of heat-resisting nickel alloys of type ZhS6]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Production*, no. 6, pp. 12–17 (in Russian).

10. Firstov, S.A., Gorban, V.F., Pechkovskii, E.P., Mameka, N.A. (2007). Uravnenie indentirovaniia [Equation indentation]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukraini – Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 12, pp. 100–10 (in Russian).

UDC 621.791.4

*Lidiia Petrushynets, Iurii Falchenko, Anatolii Ustinov,
Tetiana Melnychenko, Oleg Novomlynets*

DIFFUSION WELDING IN A VACUUM OF A HEAT-RESISTING ALLOY ON A NI-BASE

Urgency of the research. Diffusion welding of Ni-based heat-resistant alloys is a process of great perspective.

Target setting. Obtaining the joint of Ni-based heat-resistant alloys by diffusion welding is complicated by existence of oxide layer on the surface and alloys low plasticity.

Actual scientific researches and issues analysis. When welding the heat-resistant Ni-based alloys, it is necessary to apply fairly intensive welding modes.

Uninvestigated parts of general matters defining. Application of interlayers of pure plastic metals contributes to the formation of welded joint, although creates areas of chemical inhomogeneity which adversely affects the physical and chemical properties of the joint.

The research objective. Investigation of effect from the structural parameters and chemical composition of multilayer foil on the formation of the joints from heat-resistant Ni-based alloy.

The statement of basic materials. Welding of ZhS6K alloy through interlayers of multilayered Al – Ni and Co – Ti foils was studied.

Conclusions. The difficulty to obtain the joints of nickel-based heat-resistant alloys by diffusion welding lies in the presence of a stable oxide layer on the alloy surface. Low plasticity of alloys negatively affects the formation of physical contact and therefore on surfaces co-adhesion.

It was established that use of interlayers of Co-Ti foil during vacuum diffusion welding of nickel-based heat-resistant alloy leads to the formation of Ti-Ni-Co-based layers which provides high microhardness of the joint zone that leads to the formation of significant thermal stresses, resulting in samples cracking.

It is shown that use of Al-Ni foil in the diffusion welding of nickel-based heat-resistant alloy ensures the formation of the joint, promotes the active diffusion processes with the formation of a uniform diffusion zone with a monotonous distribution of alloying elements in the joint.

Key words: Vacuum diffusion welding; ZhS6K; multilayered foil; microstructure; microindentation.

Fig.: 7. Bibl.: 10.

*Людия Петрушинец, Юрий Фальченко, Анатолий Устинов,
Татьяна Мельниченко, Олег Новомлинец*

ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА В ВАКУУМЕ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НА Ni ОСНОВЕ

Сложность получения соединений из жаропрочных сплавов на основе никеля методом диффузионной сварки в вакууме состоит прежде всего в наличии на их поверхности слоя оксида, который препятствует образованию сварного соединения. Сплавы этой группы также имеют малую пластичность, что в свою очередь препятствует схватыванию контактных поверхностей на стадии образования физического контакта. Для облегчения условий удаления оксидной пленки со свариваемых поверхностей и локализации пластической деформации в стыке необходимо применение тонких прослоек. В качестве таких прослоек в работе рассмотрены многослойные фольги систем Al-Ni и Co-Ti, полученные методом электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме. В работе исследовано влияние химического состава многослойных фольг на структуру сварных соединений жаропрочных сплавов, полученных с их помощью.

Ключевые слова: диффузионная сварка в вакууме; ЖСБК; многослойные фольги; микроструктура; микроиндентирование.

Рис.: 7. Библ.: 10.

Петрушинець Лідія Вячеславівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут електросварювання ім. Є. О. Патона НАН України (вул. Малевича, 11, м. Київ, 03680, Україна).

Петрушинец Лидия Вячеславовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ул. Малевича, 11, г. Киев, 03680, Украина).

Petrushynets Lidiia – PhD in Technical Sciences, senior staff scientist, Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine (11 Malevich Str., 03680 Kyiv, Ukraine).

E-mail: moremia2@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7946-3056>

Фальченко Юрій В'ячеславович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут електросварювання ім. Є. О. Патона НАН України (вул. Малевича, 11, м. Київ, 03680, Україна).

Фальченко Юрий Вячеславович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ул. Малевича, 11, г. Киев, 03680, Украина).

Falchenko Iurii – Doctor of Technical Sciences, senior staff scientist, Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine (11 Malevich Str., 03680 Kyiv, Ukraine).

E-mail: falchenko@paton.kiev.ua

Scopus Author ID: 7801687476

Устинов Анатолий Иванович – доктор фізико-математичних наук, Інститут електросварювання ім. Є. О. Патона НАН України (вул. Малевича, 11, м. Київ, 03680, Україна).

Устинов Анатолий Иванович – доктор физико-математических наук, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ул. Малевича, 11, г. Киев, 03680, Украина).

Ustinov Anatolii – Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine (11 Malevich Str., 03680 Kyiv, Ukraine).

E-mail: ustinov3@yandex.ru

Scopus Author ID: 7102930399

Мельниченко Тетяна Всеволодівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут електросварювання ім. Є. О. Патона НАН України (вул. Малевича, 11, м. Київ, 03680, Україна).

Мельниченко Татьяна Всеволодовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ул. Малевича, 11, г. Киев, 03680, Украина).

Melnychenko Tetiana – PhD in Technical Sciences, senior staff scientist, Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine (11 Malevich Str., 03680 Kyiv, Ukraine).

E-mail: melnychenko1@mail.ru

Scopus: Author ID: 12802654100

Новомлинець Олег Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, перший проректор, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Новомлинец Олег Александрович – кандидат технических наук, доцент, первый проректор, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Novomlinets Oleg – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, First pro-rector, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: oon1@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0774-434X>

Scopus Author ID: 6507741249