

## РОЗДІЛ III. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

УДК 621.791.4

*Юрій Фальченко, Лідія Петрушинець, Анатолій Устїнов, Тетяна Мельниченко,  
Олег Новомлинець, Ірина Гусарова*

### ДИФУЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ У ВАКУУМІ ТОНКОЛИСТОВОГО НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ

*Юрий Фальченко, Лидия Петрушинец, Анатолий Устинов, Татьяна Мельниченко,  
Олег Новомлинец, Ирина Гусарова*

### ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА В ВАКУУМЕ ТОНКОЛИСТОВОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

*Yurii Falchenko, Lidiia Petrushynets, Anatolii Ustinov, Tetiana Melnichenko,  
Oleg Novomlynets, Irina Gusarova*

### DIFFUSION WELDING IN VACUUM THIN SHEET OF NICKEL ALLOY

Наявність оксидного шару на поверхні жароміцних сплавів на основі нікелю, а також їх мала пластичність обумовлюють труднощі для схоплювання контактних поверхонь на стадії утворення фізичного контакту при дифузійному зварюванні у вакуумі. Для полегшення умов видалення оксидної плівки з поверхонь, що зварюються, і локалізації пластичної деформації у стикі необхідне застосування тонких пластичних прошарків. У ролі таких прошарків розглянуто багатошарові фольги. В роботі досліджено вплив хімічного складу пористих фольг Cu, Co, Ni на структуру зварних з'єднань жароміцних сплавів, отриманих з їх допомогою.

**Ключові слова:** дифузійне зварювання у вакуумі, Ni-Cr, багатошарові фольги, мікроструктура, мікроіндентування.

*Рис.: 10. Табл.: 4. Бібл.: 8.*

Наличие оксидного слоя на поверхности жаропрочных сплавов на основе никеля, а также их малая пластичность обуславливают трудности для схватывания контактных поверхностей на стадии образования физического контакта при диффузионной сварке в вакууме. Для облегчения условий удаления оксидной пленки со свариваемых поверхностей и локализации пластической деформации в стыке необходимо применение тонких пластичных прослоек. В качестве таких прослоек рассмотрены многослойные фольги. В работе исследовано влияние химического состава пористых фольг Cu, Co, Ni на структуру сварных соединений жаропрочных сплавов, полученных с их помощью.

**Ключевые слова:** диффузионная сварка в вакууме, Ni-Cr, многослойные фольги, микроструктура, микроиндентирование.

*Рис.: 10. Табл.: 4. Библ.: 8.*

The presence oxide layer on the surface of heat-resistant alloys based on nickel and their low ductility cause difficulties for setting the contact surfaces at the stage of physical contact during the diffusion welding in vacuum. To facilitate the conditions for the removal of oxide film from the surfaces to be welded and the localization of plastic deformation in the joint requires the use of thin plastic layers. As such layers are considered multilayer foil. The influence of the chemical composition of the porous foils Cu, Co, Ni on the structure of welded joints of high-temperature alloys, obtained through them.

**Key words:** diffusion welding in vacuum, Ni-Cr, multilayer foil, microstructure, microindentation.

*Fig.: 4. Tabl.: 10. Bibl.: 8.*

**Постановка проблеми.** Нікелеві сплави завдяки своїм високотемпературним властивостями можуть експлуатуватися при температурах, близьких до температури плавлення. Вони широко застосовуються у процесі виготовлення газових турбін, у космічних кораблях, ракетних двигунах, атомних реакторах, підводних човнах, парових теплоцентралях і нафтохімічному обладнанні [1]. Складність отримання з'єднань з жароміцних сплавів на основі нікелю методом дифузійного зварювання у вакуумі, перш за все, полягає в наявності на їх поверхнях термічно стійкого шару оксиду і низькій пластичності цієї групи матеріалів [2].

**Аналіз досліджень і публікацій.** У роботі [3] вказується, що наявність оксиду на полірованих поверхнях сплаву Inconel 718SPF не дозволяє отримати якісне з'єднання (температура зварювання  $T_{зв} = 1000$  °С, тиск зварювання  $P_{зв} = 7$  МПа, час зварювання  $t_{зв} = 30$  хв), оскільки оксидна плівка відіграє роль бар'єра для дифузійних процесів у зоні з'єднання, перешкоджає формуванню загальних зерен.

Автори роботи [4] стверджують, що вирішальний вплив на високотемпературні властивості з'єднань нікелевих жароміцних сплавів здійснює температура зварювання. У роботі відзначається, що для зварювання сплаву ЖС6У необхідна температура вище 1000 °С, вона сприяє очищенню поверхонь, що зварюються, від оксидів хрому і нікелю. Високотемпературна міцність з'єднань, отриманих при температурі зварювання нижче 1200 °С, поступається міцності основного металу.

З метою зниження негативного впливу оксидів, а також інтенсифікації пластичної деформації в зоні з'єднання рекомендується використання проміжних прошарків. Наприклад, у роботі [3] поверхні сплаву Inconel 718SPF покривалися електролітичним шаром нікелю, що дозволило підвищити міцність з'єднання на зріз у 1,7 разу (до 70,4 МПа). Авторами [5] на прикладі нікелевого сплаву Udimet 700 показано, що застосування прошарку Ni-Co ( $T_{зв} = 1191$  °С,  $P_{зв} = 8,3$  МПа,  $t_{зв} = 240$  хв) або електролітичного шару нікелю ( $T_{зв} = 1171$  °С,  $P_{зв} = 6,9$  МПа,  $t_{зв} = 240$  хв, з подальшим старінням) товщиною  $\delta = 5$  мкм, призводить до інтенсивної рекристалізації зони з'єднання з формуванням загальних зерен і гомогенізацією хімічного складу, при цьому міцність підвищуються до 90 % від основного матеріалу.

**Виділення не вирішених раніше частин глобальної проблеми.** Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що поєднання високих параметрів дифузійного зварювання з застосуванням проміжних прошарків дозволяє отримати якісні з'єднання з жароміцних нікелевих сплавів. Однак описані технології розраховані на з'єднання масивних зразків і непридатні для тонких фольг.

**Мета статті.** Головною метою роботи є дослідити можливість отримання зварних з'єднань фольг з порошкового нікелевого сплаву.

**Виклад основного матеріалу.** У цій роботі досліджувалася можливість отримання з'єднань зі сплаву Ni-Cr (Ni – 20Cr – 3–4Fe – 0,40–0,6Al – 0,25–0,35Ti – 0,5Y, % вес.), отриманого методом порошкової металургії. Дифузійне зварювання у вакуумі зразків фольги товщиною  $\delta = 25$  мкм проводили у вільному стані в умовах вакууму на установці У-394М, принципова схема якої докладно описана в [6].

Перед зварюванням зразки розміром 15x5x0,025 мм вирізали з фольги. Зварювання проводили внапуск з перекриттям, що дорівнює 5 мм. Для видалення оксидної плівки, обидві поверхні фольги зачищали на наждачному папері до металевого блиску, знежирували в ацетоні. Зварювання проводили в оснащенні з плоскопаралельними поверхнями (матриця і пуансон), виготовленому з легованої сталі. Параметри процесу зварювання були такі: температура зварювання  $T_{зв} = 800 \dots 1200$  °С, тиск зварювання  $P_{зв} = 20 \dots 40$  МПа, тривалість зварювання  $t_{зв} = 20$  хв, вакуум у робочій камері підтримували на рівні  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па. Для забезпечення пластичної деформації в стику і полегшення умов формування фізичного контакту як проміжні прошарки застосовували пористі фольги з Cu, Co, Ni, отримані за технологією електронно-променевого випаровування і конденсації у вакуумі, що детально описана в роботі [7]. Вміст пор у прошарках становив близько 13 %. Загальна товщина прошарків 25–30 мкм.

Після зварювання вирізали зразки для проведення механічних випробувань на розтяг. Форма і розміри зразків вихідного матеріалу, а також зварних з'єднань з фольги сплаву Ni-Cr були такі: загальна довжина  $L = 30$  мм, ширина  $H = 11$  мм, товщина фольги  $\delta = 25$  мкм, довжина робочої зони  $l = 12,5$  мм, ширина робочої зони  $h = 5$  мм, радіус при переході від захватів був  $R = 3$  мм (рис. 1). Міцність з'єднань досліджували на стандартній машині МТС810.

Аналіз структурних характеристик фольги і зварних з'єднань проводили за допомогою скануючого електронного мікроскопа CAMSCAN 4, оснащеного системою енергодисперсійного аналізу Oxford Inca Energy 200 для визначення хімічного складу на пло-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

ських зразках. Для цього за стандартною методикою з використанням шліфувально-полірувального устаткування фірми Struers були приготовлені шліфи поперечного перерізу фольги і зварних з'єднань.

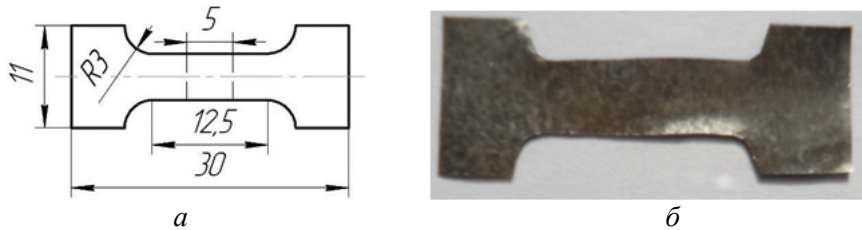
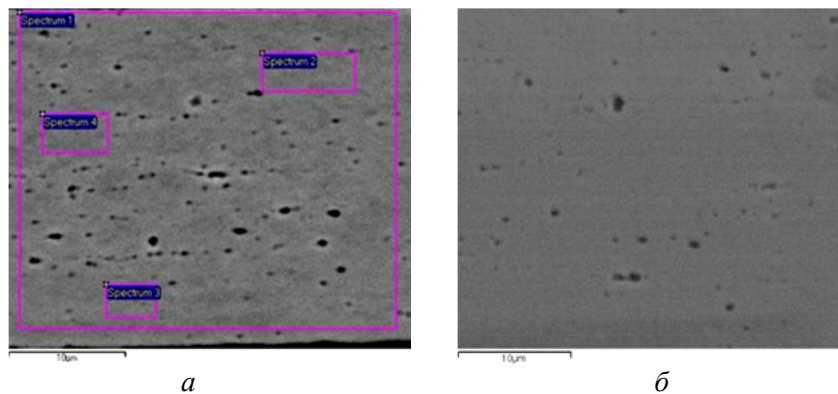


Рис. 1. Зразки для механічних випробувань на розтяг:  
а – схема, б – зовнішній вигляд зразків з фольги сплаву Ni-Cr

Механічні властивості зварних з'єднань оцінювали методом автоматичного інденування площині поперечного перерізу зварних з'єднань із записом діаграми навантаження і розвантаження індентора на установці «Мікрон-гамма» [8]. Для збільшення діапазону вимірювань дослідження проводилися під кутом 5 до 10 ° до зони з'єднання. В таблицях даних використані такі позначення:  $P$  – навантаження, гр;  $V$  – швидкість навантаження, гр / с;  $H$  – значення мікротвердості за Мейером;  $E$  – модуль Юнга, ГПа;  $K_{\text{пласт}}$  – коефіцієнт пластичності.

На рис. 2, а показана мікроструктура Ni-Cr фольги у стані після прокатки. Методом мікроінденування встановлено, що у зразках вихідного матеріалу середнє значення мікротвердості дорівнює 3,754 ГПа, а значення модуля Юнга становить 139,8 ГПа. Відхилення модуля пружності дорівнює 4,6 %, що вказує на однорідність матеріалу, що досліджується, а також рівномірність розподілу пор по всьому поперечному перерізу фольги (табл. 1).



Вміст в % ваг.						
	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Y
pectrum 1	0,61	0,37	20,02	3,32	75,19	0,5
Spectrum 2	0,42	0,32	20,45	3,95	74,87	–
Spectrum 3	0,54	0,38	20,98	3,04	75,05	–
Spectrum 4	0,42	0,26	20,6	3,15	75,56	–

б

Рис. 2. Мікроструктура і хімічний склад фольги з жароміцного Ni-Cr сплаву в початковому стані (а, в), а також після відпалу ( $T_{\text{відп}} = 1050$  °С,  $P_{\text{відп}} = 5$  МПа,  $t_{\text{відп}} = 5$  хв) в умовах вакууму (б)

Відпал зразків в умовах вакууму ( $T_{\text{відп}} = 1050$  °С,  $P_{\text{відп}} = 5$  МПа,  $t_{\text{відп}} = 5$  хв) призводить до зниження значень мікротвердості в 1,6 разу, в порівнянні з матеріалом у початковому стані (до 2,293 ГПа) і до збільшення модуля Юнга до 148,7 ГПа. Збільшення модуля пружності може бути показником зниження загальної пористості матеріалу (рис. 2, б). Проте збільшення діапазону його значень до 7,1 % може вказувати на менш рівномірний характер розподілу пор по всьому поперечному перерізу фольги, в порівнянні зі зразком у початковому стані (табл. 2).

Таблиця 1

Результати автоматичного індентування зразків фольги NiCr у стані поставки

№ п/п	P, гр	V, гр/с	H	E, ГПа
1	20	2	4,014	135,6
2	20	2	4,046	138,4
3	20	2	3,830	134,1
4	20	2	3,437	137,5
5	20	2	3,773	154,2
6	20	2	3,584	135,7
7	20	2	3,593	142,9
Середнє значення	20	2	3,754	139,8

Таблиця 2

Результати автоматичного індентування зразків фольги NiCr після відпалу

 $(T_{відп} = 1050 \text{ }^\circ\text{C}, P_{відп} = 5 \text{ МПа}, t_{відп} = 5 \text{ хв})$ 

№ п/п	P, гр	V, гр/с	H	E, ГПа
1	20	2	2,389	137,0
2	20	2	2,605	139,3
3	20	2	2,230	151,5
4	20	2	2,237	162,8
5	20	2	2,254	144,8
6	20	2	2,100	140,6
7	20	2	2,239	165,0
Середнє значення	20	2	2,293	148,7

Вивчали вплив температури зварювання на структуру і мікромеханічні властивості зварних з'єднань.

На рис. 3 показана мікроструктура зварних з'єднань зразків нікелевого сплаву, виконаних без проміжних шарів на режимі:  $T_{зв} = 800 \dots 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 40 \text{ МПа}$ ,  $t_{зв} = 20 \text{ хв}$ . Встановлено, що зі збільшенням температури зварювання дефектність зони з'єднання зменшується. Однак навіть при  $T_{зв} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$  у зоні з'єднання зберігається ланцюжок оксидів і пор, розташованих уздовж стику.

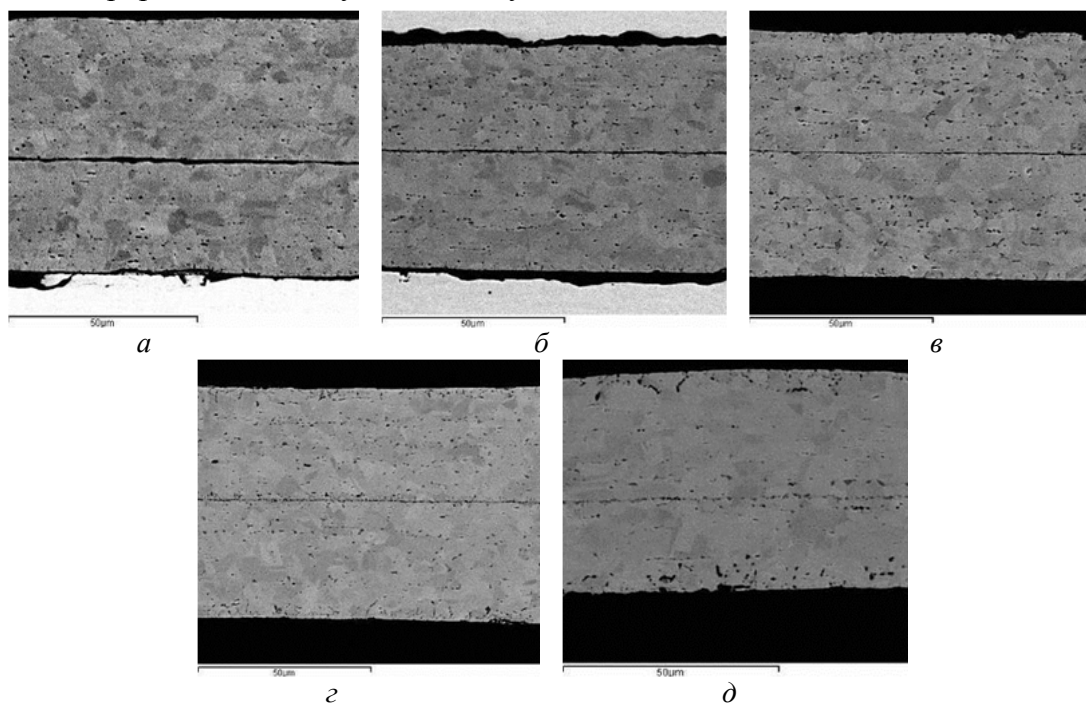
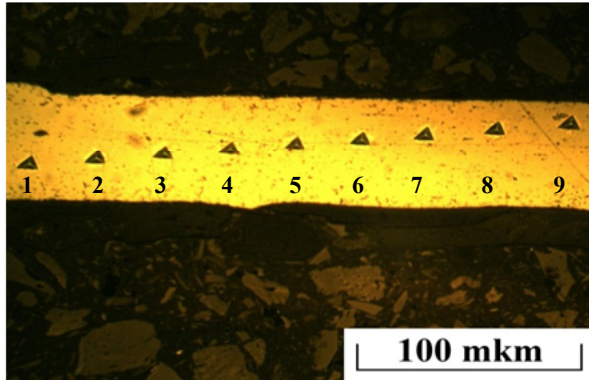


Рис. 3. Мікроструктура зони з'єднання зразків Ni-Cr + Ni-Cr, отриманих при  $P_{зв} = 40 \text{ МПа}$ ,  $t_{зв} = 20 \text{ хв}$ ,  $T_{зв}$ : а – 800 °C; б – 900 °C; в – 1000 °C; г – 1100 °C; д – 1200 °C

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

При зварюванні сплаву Ni-Cr без прошарків, мікротвердість зони з'єднання відповідає значенням, які характерні для відпаленого матеріалу  $E = 110,7 \dots 125,8$  ГПа. Виходячи з результатів металографічних досліджень, а також поступового збільшення модуля Юнга до  $E = 154,3$  ГПа можна зробити висновок, що вплив високих значень температури зварювання і тиску призводить, з одного боку, до коагуляції пор у фользі, а з іншого боку – до утворення значної пористості в зоні з'єднання. Середнє значення мікротвердості становить 2,659 ГПа, а модуля пружності – 129,7 ГПа (рис. 4).



№ з/п	P, гр	V, гр/с	H	E, ГПа
1	20	2	2,547	110,
2	20	2	3,029	1 7,1
3	20	2	2,750	112,6
4	20	2	2,689	121,4
5	20	2	2,804	125,8
6	20	2	2,403	131,1
7	20	2	2,519	140,4
8	20	2	2 707	143,5
9	20	2	2,487	154,3
Середнє значення	20	2	, 59	129,7

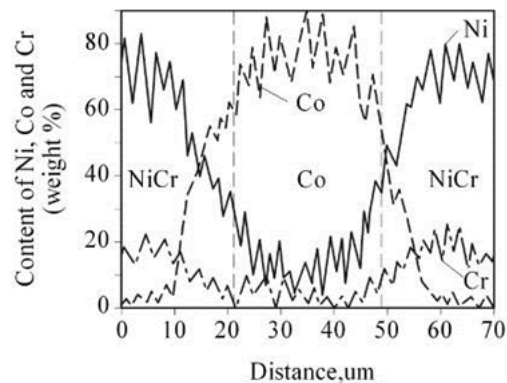
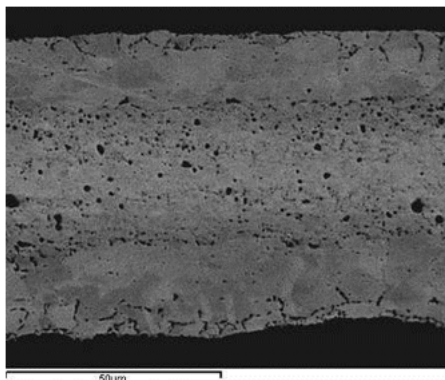
а

б

Рис. 4. Результати автоматичного інdentування зони з'єднання зразків фольги Ni-Cr ( $T_{зв} = 1200$  °С,  $P_{зв} = 40$  МПа,  $t_{зв} = 20$  хв): а – відбитки, отримані під час інdentування; б – таблиця розрахунків

У подальших дослідженнях для активації дифузійних процесів застосовували проміжні прошарки з Cu, Co, Ni. Параметри дифузійної зварювання були наступні:  $T_{зв} = 1200$  °С,  $P_{зв} = 40$  МПа,  $t_{зв} = 20$  хв.

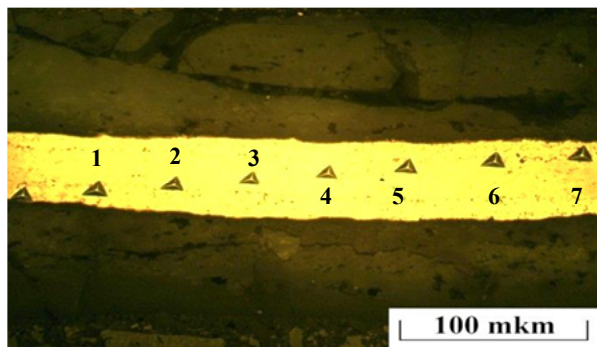
Встановлено, що застосування прошарків з Co призводить до утворення хімічної неоднорідності в зоні з'єднання і до розвитку значної пористості у стику, що може бути обумовлено ефектом Кіркендала (рис. 5). Глибина дифузії в зоні з'єднання нікелевого сплаву становить до 10 мкм. У проміжному шарі спостерігається невеликий вміст як нікелю, так і хрому (до 20 %). Застосування проміжного прошарку з пористого кобальту дозволяє підвищити мікротвердість зварного з'єднання до значень, близьких до вихідного матеріалу. Однак значна хімічна неоднорідність зони з'єднання призводить до утворення в центральній частині області з високим модулем Юнга  $E = 152 \dots 179$  ГПа (рис. 6).



а

б

Рис. 5. Мікроструктура (а) і розподіл елементів (б) у з'єднанні, виконаному з застосуванням пористого прошарку з Co ( $T_{зв} = 1200$  °С,  $P_{зв} = 40$  МПа,  $t_{зв} = 20$  хв)



a

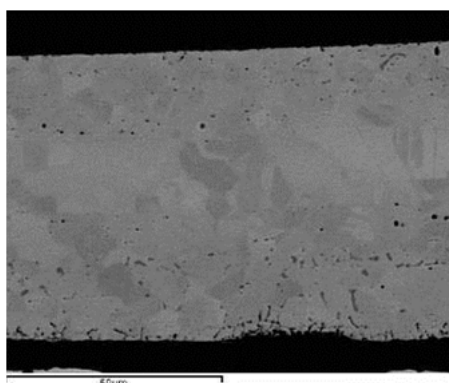
№ з/п	P, гр	V, гр/с	H	E, ГПа
1	20	2	3,366	138,3
2	20	2	2,959	136,0
3	20	2	3,086	152,1
4	20	2	3,282	155,7
5	20	2	3,6	179,6
6	20	2	3,149	163,3
7	20	2	2,689	151,3
Середнє значення	20	2	3,168	153,8

б

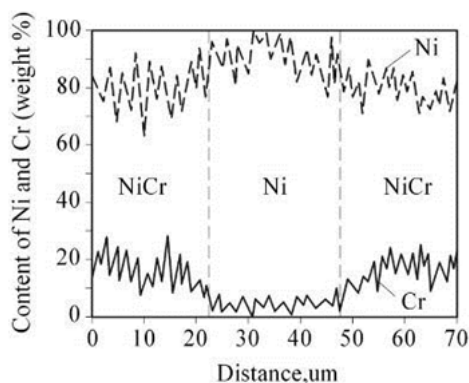
Рис. 6. Результати автоматичного індентування зони з'єднання зразків фольги Ni-Cr, отриманих через проміжний прошарок з пористого кобальту ( $T_{зв} = 1200\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 40\text{ МПа}$ ,  $t_{зв} = 20\text{ хв}$ ):

a – відбитки, отримані під час індентування; б – таблиця розрахунків

Застосування у процесі зварювання прошарку з Ni призводить до утворення у стикі зони шириною 20–25 мкм з низьким вмістом хрому (рис. 7). Мікроструктура цієї зони аналогічна сплаву Ni-Cr, але має меншу дефектність. На межі розділу прошарок/нікелевий сплав, дефекти у вигляді включень оксидів або пори відсутні. Залишкові пори спостерігаються у сплаві в областях, прилеглих до стикі. Мікротвердість з'єднань перебуває на такому рівні, як у відпаленого зразка (рис. 8). Збільшення значень модуля пружності спостерігається в зоні з'єднання, що свідчить про заліковування пор.

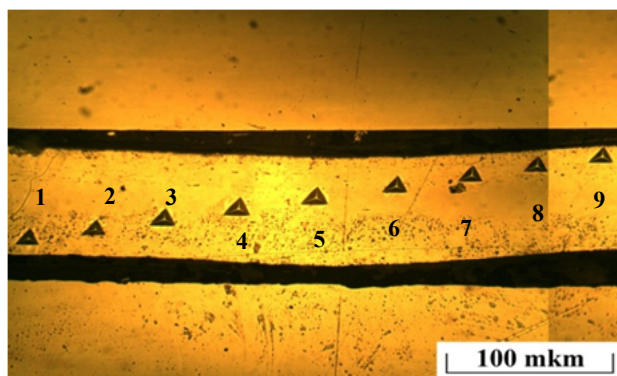


a



б

Рис. 7. Мікроструктура (a) і розподіл елементів (б) у з'єднанні, отриманого з застосуванням пористого прошарку з Ni ( $T_{зв} = 1200\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 40\text{ МПа}$ ,  $t_{зв} = 20\text{ хв}$ )



a

№ з п	P, гр	V, гр/с	H	E, ГПа
1	20	2	2,226	111,8
2	20	2	2,282	136,2
3	20	2	2,423	161,2
4	20	2	2,285	153,1
5	20	2	2,015	151,8
6	2	2	2,057	170,6
7	20	2	2,145	160,4
8	20	2	2,709	159
9	20	2	2,241	144,2
Середнє значення	20	2	2,265	149,8

б

Рис. 8. Результати автоматичного індентування зони з'єднання зразків фольги Ni-Cr, отриманих через проміжний прошарок з пористого нікелю ( $T_{зв} = 1200\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 40\text{ МПа}$ ,  $t_{зв} = 20\text{ хв}$ ):

a – відбитки, отримані під час індентування; б – таблиця розрахунків

Зварювання з застосуванням прошарку з міді забезпечує рівномірний характер розподілу елементів у стикі і мінімальну кількість дефектів (рис. 9). Лінія контакту як

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

елемент структури у процесі зварювання зникає. Розподіл елементів свідчить про рівномірний розподіл Cr, Ni, Cu у зварному з'єднанні. Мікротвердість з'єднання знаходиться на рівні зразка після відпалу (рис. 10).

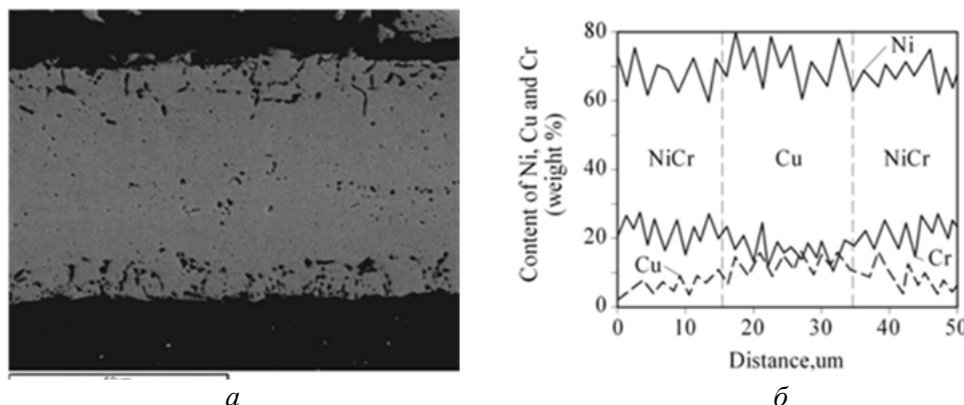
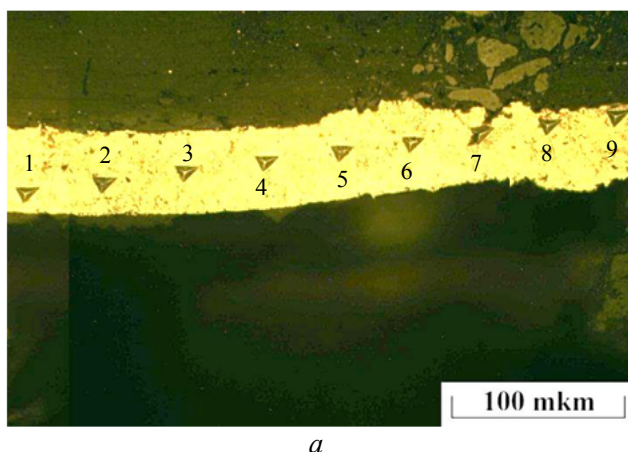


Рис. 9. Мікроструктура (а) и розподіл елементів (б) в з'єднанні, отриманого з застосуванням пористої прошарку з Cu ( $T_{зв} = 1200\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 40\text{ МПа}$ ,  $t_{зв} = 20\text{ хв}$ )



№ з/п	P, гр	V, гр/с	H	E, ГПа
1	20	2	2,324	119,2
2	20	2	2,236	116,4
3	20	2	2,117	132,9
4	20	2	2,151	137,3
5	20	2	2,451	141,8
6	20	2	2,31	36,2
7	20	2	2,926	138,9
8	20	2	2,121	123,9
Середнє значення	20	2	2,330	130,8

а

б

Рис. 10. Результати автоматичного індентування зони з'єднання зразків фольги Ni-Cr, отриманих через проміжний прошарок з пористої міді ( $T_{зв} = 1200\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 40\text{ МПа}$ ,  $t_{зв} = 20\text{ хв}$ ):

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

Оцінювання механічних властивостей зразків з фольги сплаву Ni-Cr проводили в початковому стані і після відпалу. Температура і час відпалу моделювали процес зварювання і становили: температура  $T_{відп} = 1000\text{ }^\circ\text{C}$ , час витримки протягом  $t_{відп} = 20\text{ хв}$  відповідно. Встановлено, що міцність вихідного металу зі сплаву Ni-Cr дорівнює  $\sigma_B = 405\text{ МПа}$  (табл. 3). Застосування відпалу призводить до зниження міцності матеріалу до  $\sigma_B = 258\text{ МПа}$ . Таким чином, міцність зразків після відпалу становить 63,7% від рівня міцності вихідного матеріалу.

Таблиця 3

Механічні властивості зразків з фольги сплаву Ni-Cr у початковому стані і після відпалу

Номер зразка	Тип зразка	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{B\text{ср}}$ , МПа
1	Основний метал	440	405
2		400	
3		375	
1	Основний метал + відпал	260	258
2		215	
3		300	

Дослідження механічних властивостей зварних з'єднань (табл. 4) показали, що середня міцність зразків, отриманих із застосуванням пористої прошарку з нікелю, ста-

новить  $\sigma_B = 108$  МПа. Виходячи з результатів металографічних досліджень, можна припустити, що отримані результати пов'язані з утворенням у стику зони, яка складається з чистого нелегованого нікелю, що, ймовірно, і призводить до зниження міцності зварного з'єднання. Середня міцність зразків, виготовлених із застосуванням пористого прошарку з кобальту, дорівнює  $\sigma_B = 233$  МПа. Зразки, отримані із застосуванням проміжної прошарку з кобальту, характеризуються наявністю дефектів у зоні з'єднання як у вигляді пор, так і значною хімічною неоднорідністю в розподілі основних легуючих елементів. Застосування пористого прошарку з міді під час зварювання сплаву Ni-Cr дозволила отримати з'єднання із середнім значенням міцності  $\sigma_B = 317$  МПа.

Таблиця 4

*Механічні властивості зварних з'єднань*

Номер зразка	Прошарок, мкм	Місце руйнування зразків		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{B\text{ ср}}$ МПа
		Основний метал	Зона з'єднання		
1	Ni	+	-	120	108
2		+	-	160	
3		-	+	45	
1	Co	+	-	200	317
2		+	-	310	
3		+	-	360	
4		+	-	400	
1	Cu	+	-	175	233
2		+	-	260	
3		-	+	-	
4		+	-	265	

Примітка: \* – робота виконана в межах проекту LIGHT-TPS № 607182.

**Висновки і пропозиції.** Досліджено умови формування з'єднань тонких фольг з нікелевого сплаву методом дифузійного зварювання у вакуумі при застосуванні проміжних прошарків з Cu, Co, Ni. Показано, що фольги, отримані за технологією електронно-променевого випаровування і конденсації у вакуумі, сприяють інтенсифікації дифузійних процесів у стику, а також забезпечують формування зварних з'єднань.

**Список використаних джерел**

1. *Суперсплави II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок* / под ред. Симса Ч. Т., Столоффа Н. С., Хагеля У. К. ; пер. с англ. В 2 кн. Кн. 1 / под ред. Шалина Р. Е. – М. : Металлургия, 1995. – 384 с.
2. *Atkinson H. V. A Review of the Role of Short-Circuit Diffusion in the Oxidation of Nickel, Chromium, and Nickel-Chromium Alloys* / H. V. Atkinson // *Oxidation of Metals*. – 1985. – Vol. 24, № 3/4. – Pp. 177–197.
3. *Yeh M. S. Diffusion Bonding of a Superplastic Inconel 718SPF Superalloy by Electroless Nickel Plating* / M. S. Yeh, C. B. Chang, T. H. Chuang // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2000. – Vol. 9. – Pp. 51–55.
4. *Мусин Р. А. Диффузионная сварка жаропрочных сплавов* / Р. А. Мусин, В. Н. Анциферов, В. Ф. Квасницкий. – М. : Металлургия, 1979. – 208 с.
5. *Methods for Diffusion Welding the Superalloy Udimet 700* / D. S. Duvall, W. A. Owczarski, D. F. Paulonis, W. H. King // *Welding Research Supplement*. – 1972. – Vol. 2. – Pp. 41–49.
6. *Диффузионная сварка в вакууме сплава на основе  $\gamma$ -TiAl с использованием нанослойных прослоек* / Г. К. Харченко, А. И. Устинов, Ю. В. Фальченко [та ін.] // *Автоматическая сварка*. – 2011. – № 3. – С. 7–11.
7. *Устинов А. И. Закономерности формирования пористой структуры нержавеющей стали при ее осаждении из паровой фазы в присутствии паров хлористого натрия* / А. И. Устинов, К. В. Ляпина, Т. В. Мельниченко // *Спец. Электрометаллургия*. – 2005. – № 4. – С. 23–28.
8. *Уравнение индентирования* / С. А. Фирстов, В. Ф. Горбань, Э. П. Печковский [та ін.] // *Доповіді Національної академії наук України*. – 2007. – № 12. – С. 100–106.



## References

1. Sims, Ch.T., Stoloff, N.S. & Xagsel, U.K. (eds.) (1995). Supersplavy II: Zharoprochnnye materialy dlia aerokosmicheskikh i promyshlennykh energoustanovok [Superalloys: materials for aerospace and industrial energyequipment]. Book 1. Moscow: Metallurgija (in Russian).
2. Atkinson, H.V. (1985). A Review of the Role of Short-Circuit Diffusion in the Oxidation of Nickel, Chromium, and Nickel–Chromium Alloys. *Oxidation of Metals*, vol. 24, № 3/4, pp. 177–197.
3. Yeh, M.S., Chang, C.B., Chuang, T.H. (2000). Diffusion Bonding of a Superplastic Inconel 718SPF Superalloy by Electroless Nickel Plating. *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 9, pp. 51–55.
4. Musin, R.A., Anciferov, V.N., & Kvasnickij, V.F. (1979). Diffuzionnaia svarka zharoprochnnykh splavov [Diffusion welding of heatproof alloys]. Moscow: Metallurgija (in Russian).
5. Methods for Diffusion Welding the Superalloy Udimet 700 (1972). *Welding Research Supplement*, vol. 2, pp. 41–49.
6. Harchenko, G.K., Ustinov, A.I. & Falchenko, Iu.V. (2011). Diffuzionnaia svarka v vakuume splava na osnove  $\gamma$ -TiAl s ispolzovaniem nanosloinykh prosloek [Diffusion welding in alloys' vacuum based on  $\gamma$ -TiAl with the usage of nanolayer layers] *Avtomaticheskaja svarka – Automatic Welding*, no. 3, pp. 7–11 (in Russian).
7. Ustinov, A.I., Liapina, K.V. & Melnichenko, T.V. (2005). Zakonomernosti formirovaniia poristoi struktury nerzhaveshhej stali pri ee osazhdenii iz parovoi fazy v prisutstvii parov khloristogo natriia [Regularity of formation of porous structure of stainless steel over its sedimentation with vapours of muriate of soda]. *Spec. Elektrometallurgija*, no. 4, pp. 23–28 (in Russian).
8. Firstov, S.A., Gorban, V.F. & Pechkovskii, E.P. (2007). Uravnenie indentirovaniia [Equation of indentation]. *Dopovidi Nacionalnoi akademii nauk Ukrainy*, no. 12, pp. 100–106 (in Russian).

**Фальченко Юрій Вячеславович** – доктор технічних наук, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (вул. Малевича, 11, м. Київ, 03680, Україна).

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

**Falchenko Yurii** – Doctor of Technical Sciences, Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine (11 Malevich Str., 03680 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** falchenko@paton.kiev.ua

**Scopus Author ID:** 7801687476

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

**Петрушинець 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>

**Устїнов Анатолій Іванович** – доктор фізико-математичних наук, Інститут електрозварювання 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 електрозварювання 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).

**Melnichenko Tatiana** – 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

**Новомлинцев Олег Александрович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

**Новомлинець Олег Александрович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри сварочного виробництва і автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (ул. Шевченко, 95, г. Чернігів, 14027, Україна).

**Novomlinets Oleg** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, 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

**Гусарова Ірина Олександрівна** – кандидат технічних наук, конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля (вул. Криворізька, 3, м. Дніпро, 49008, Україна).

**Гусарова Ирина Александровна** – кандидат технічних наук, конструкторське бюро «Южное» ім. М. К. Янгеля (ул. Криворожская, 3, г. Днепр, 49008, Україна).

**Gusarova Irina** – PhD in Technical Sciences, M. K. Yangel Yuzhnoye State Design Office (3 Krivorozhskaya Str., 49008 Dnipro, Ukraine).

**E-mail:** anya\_mail\_@inbox.ru

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-3431-2347>