

РОЗДІЛ II. ЗВАРЮВАННЯ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.791.4

DOI: 10.25140/2411-5363-2017-4(10)-54-66

Юрій Фальченко, Олег Новомлинець, Лідія Петрушинець, Ірина Нагорна

ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ

Актуальність теми дослідження. Використання поверхневих фізико-хімічних процесів є перспективним засобом активації для прецизійного з'єднання металевих матеріалів.

Постановка проблеми. Сучасна теорія твердофазного з'єднання стосовно використання поверхневих процесів не може повною мірою визначати безпосередні критерії технології зварювання з мінімальним рівнем пластичної деформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При зварюванні у твердій фазі різних металів і сплавів використання попереднього підігріву деталей, що зварюються, у розведеному стані, може прискорити процес відновлення оксидних плівок та сублімації одного з матеріалів з наступною конденсацією на поверхню іншого.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Застосування сублімованих прошиарків при зварюванні різномірних матеріалів дозволяє отримати міцність на 15...20 % більше міцності з'єднань, зварених безпосередньо напружено. Однак у роботах не досліджено можливість використання таких прошиарків для прецизійного зварювання тиском.

Постановка завдання. Дослідження впливу поверхневих фізико-хімічних процесів (самоочищення від оксидних плівок, сублімація та конденсація) на здатність до прецизійного зварювання тиском у вакуумі різномірних металів.

Викладення основного матеріалу. Досліджено здатність до прецизійного зварювання тиском міді з молібденом та хромом через мідний сублімований прошиарок та міді з титаном через сублімований прошиарок з титану.

Висновки. Встановлено, що деформація основних матеріалів при зварюванні не перевищує 1 %, а міцність зварених з'єднань міді з молібденом та хромом становить 85...90 % від міцності основного матеріалу (міді), міцність з'єднань міді з титаном – 73...77 % міцності міді.

Запропоновано новий спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через тонкі сублімовані активні прошиарки. Розроблено новий технологічний процес ДЗВ міді з тугоплавкими металами та титаном з використанням спеціалізованої оснастки, яка дозволяє здійснювати дифузійне зварювання через сублімовані прошиарки за один цикл в одній робочій камері.

Запропоновано модель формування нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском у твердій фазі з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів.

Ключові слова: дифузійне зварювання у вакуумі; поверхневі фізико-хімічні процеси; сублімовані прошиарки; прецизійні нероз'ємні з'єднання.

Табл.: 3. Рис.: 3. Бібл.: 28.

Постановка проблеми. Деформація має вирішальне значення при зварюванні тиском. Однак при виготовленні сучасних деталей машин, конструкцій та виробів для різних галузей часто виникає необхідність отримання зварних з'єднань з обмеженим рівнем деформації основних матеріалів. Основним технологічним прийомом для прецизійного зварювання тиском є застосування додаткових засобів активації поверхонь та вибір оптимальних параметрів режиму зварювання, що забезпечить допустимий рівень деформації основних матеріалів. При цьому важлива роль відводиться відновленню оксидних плівок на поверхні зразків в процесі зварювання. Проте нині сучасна теорія твердофазного з'єднання стосовно використання поверхневих процесів не може повною мірою визначати безпосередні критерії технології зварювання з мінімальним рівнем пластичної деформації. Тому актуальним є вивчення можливості отримання прецизійних з'єднань металевих матеріалів з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що атомній взаємодії перешкоджає оксидний шар, що перебуває на поверхні контактуючих металевих поверхонь. В умовах вакууму ($1,33 \cdot 10^{-6}$ - $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па) і нагрівання ($0,3$ - $0,7 T_{пл}$) пари води, газові молекули й жирові плівки зникають із металевої поверхні. Таким чином, від того, що буде відбуватися під час нагрівання у вакуумі із шаром оксидів, буде залежати зварюваність металів у твердій фазі як в однорідній, так і в різномірній комбінації [1].

При нагріванні у вакуумі багато металів мають блискучий вигляд. Однак це не свідчить про те, що поверхня повністю звільняється від оксидів, тому що, по-перше, при товщині менше 5 нм плівка оксидів стає безбарвною й прозорою, а по-друге, у процесі

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

поверхневої рекристалізації утворюються грані, які відбивають світло, що й створює враження повного очищення поверхні. Оксидні плівки при товщині більше 5 нм починають набувати колір через інтерференцію світла в них [2].

Тонкий оксидний шар на поверхні металу сам по собі має дуже складну будову, яка визначається складом металу і навколишнім середовищем. Так у ніобію є три оксиди (NbO , NbO_2 , Nb_2O_5), а окалина на залізі має шарувату будову й може складатися залежно від умов із трьох шарів (FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3), двох шарів (FeO , Fe_3O_4 або Fe_2O_3) або одного шару (FeO або Fe_3O_4) [3]. Оксиди тугоплавких металів мають відносно невисокий питомий об'єм у порівнянні з питомим об'ємом основного металу (особливо W і Mo). Це викликає відшаровування й розтріскування оксидів, що сприяє більш швидкому очищенню поверхонь при нагріванні у вакуумі. Структура оксидів і міцність зчеплення мають різний характер для металів. Найбільш міцно пов'язані з металом оксиди Ti , Zr , Hf , Nb , Ta [4; 5].

Розглянемо процеси, які відбуваються у поверхневому шарі металу під час нагрівання у вакуумі: *дисоціація оксиду; сублімація оксиду; розчинення оксидів; відновлення оксидів; механічний вплив.*

Найбільш імовірним процесом *термічної дисоціації* у процесі дифузійного зварювання у вакуумі є розкладання водяної пари й металу на нагрітій поверхні металу за реакціями: $2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$; $\text{CH}_4 = 2\text{H}_2 + \text{C}$. Утворені в результаті реакції, водень, вуглець і кисень, реагуючи з нагрітою поверхнею металу, сприяють протіканню процесів, які ми розглянемо нижче.

Дисоціація оксиду може мати місце, якщо парціальний тиск кисню середовища менше пружності дисоціації оксиду. Розрахунки для жароміцних сплавів на Ni основі показують, що у вакуумі $1,33 \cdot 10^{-3}$ - $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па дисоціація не можлива [6]. У роботах [7; 8] стверджується, що є ймовірність дисоціації оксидів тільки таких елементів, як Pt , Ir , Rh , Ru , Os , Cu , Re , Ni , Co , Ge , Sn , Mo , W , Fe . Дисоціація інших елементів не може мати місце при будь-якому практично досяжному вакуумі.

Умовою сублімації є перевищення тиску насиченого пару оксиду над парціальним тиском парів того ж оксиду в газовій фазі. За даними робіт [9; 10] при нагріванні у вакуумі до 0,7 $T_{\text{пл}}$ найбільш імовірна сублімація оксидів молібдену, ванадію й нікелю за реакцією: $\text{MeO}_{(\text{твердий стан})} = \text{MeO}_{(\text{газоподібний стан})}$. Якщо для ніобію така реакція можлива тільки при 1775 °C [11], то для молібдену й вольфраму вона вже відчутна при 600 °C і 800 °C. Оксид нікелю товщиною 3 нм при 1200 °C випаровується за 13 секунд [6].

У роботі [12] встановлено, що швидкість випаровування багатьох оксидів може бути на кілька порядків вище або нижче швидкості випаровування самих металів. Так, наприклад, сам молібден починає помітно випаровуватися тільки при температурах вище 1727°C, а оксид MoO_3 з такою ж швидкістю випаровується вже при 377°C. У той же час нікель випаровується при температурі 1000 °C, при якій його оксид NiO не випаровується.

Цікаво відзначити, що в космічному вакуумі з поверхні металів відбувається сублімація навіть дислокацій [4].

Розчинення оксидів проходить у дві стадії. Спочатку відбувається розрив хімічного зв'язку між атомами кисню й металу, а потім атоми кисню дифундують у глиб металу, тобто дифузія є вторинним процесом [13]. Розчинення оксидів шляхом дифузії кисню є характерним способом розкладання поверхневих оксидів для металів, що мають велику спорідненість до кисню (Ti , Zr , V , Nb). Так, при нагріванні титану у вакуумі, вже починаючи з 700 °C, оксидна плівка починає інтенсивно розчинятися в основному металі.

При взаємодії оксидів з деякими речовинами, які дають продукти реакції в газоподібному стані, може відбуватися *відновлення оксидів*. До таких речовин відносять вуглець і його хімічні сполуки типу вуглеводнів, водень, а також хлористий алюміній, фтористий амоній тощо. Розглянемо окремо кожний з можливих процесів відновлення.

Відновлення вуглецем. Процес відновлення плівки оксиду при нагріванні у вакуумі є основним для вуглецевмісних і низьколегованих сталей. При відновленні оксиду заліза (FeO) у газову фазу виділяються оксид вуглецю CO і діоксид вуглецю CO₂, а залізо відновлюється. Дуже важливим є висновок про те, що звільнені від кисню атоми компонентів, що входять до складу оксидів, є матеріалом для прискореного утворення загальних зерен у зоні контакту [10]. Реакція відновлення вуглецем з виділенням CO така: $m\text{Me}_{n/m}\text{O}_{2/m} + 2\text{C} = m\text{Me} + 2\text{CO}$. Реакція буде протікати вправо, якщо спорідненість вуглецю до кисню більша, ніж до металу. Діоксид вуглецю (CO₂) є результатом реакції взаємодії CO і оксиду: $2n\text{CO}_{(\text{газ})} + \text{MeO}_{2n(\text{тв})} = 2n\text{CO}_{(\text{газ})} + m\text{Me}_{(\text{тв})}$ [14].

Відновна здатність вуглецю при високих температурах пояснюється тим, що пружність дисоціації CO дуже мала й несуттєво змінюється з температурою. У табл. 1 показано, що відновлення різних оксидів вуглецем найчастіше протікає в певному температурному інтервалі [9]. Згідно з роботою [14] температура відновлення вуглецем FeO визначена як 1050–1000 °C і якщо вона знижується хоча б на 50 °C, то відновлення йде дуже повільно.

Таблиця 1

Температура початку й кінця відновлення різних оксидів вуглецем

Оксиди	Початок відновлення, °C	Кінець відновлення, °C
FeO	800	1100
MnO	1000	1200
SiO ₂	1100	1500
Al ₂ O ₃	1300	1600
Cr ₂ O ₃	-	1200
MoO ₃	-	1200
V ₂ O ₅	800	1200
ZrO ₂	1200	1500
TiO ₂	1000	1400
B ₂ O ₃	1000	1400

Як видно з табл. 1, в умовах зварювання у твердій фазі процеси відновлення оксидних плівок на Fe, Mn, Cr, Mo, V можуть носити визначальний характер.

Таким чином, знаючи особливості газовиділення у вакуумі металів, ми можемо орієнтовно оцінювати механізм очищення поверхні від оксидних плівок. Інтенсивне виділення оксиду вуглецю повинне свідчити про інтенсивне очищення поверхні за механізмом відновлення оксиду вуглецем. У табл. 2 на підставі ряду робіт наведені експериментальні відомості про газовиділення деяких металів при нагріванні у вакуумі.

Таблиця 2

Газовиділення металів при нагріванні у вакуумі

Метал	Гази, що виділяються	Основне газовиділення		Література
		газ	температура, °C	
Mo*, W, Ni, Cr, V		CO	1000	[10; 16]
Сталь Ст.3	CO, CO ₂	CO	1200	[17]
Нікель	CO, CO ₂ , H ₂ , N ₂	CO ₂	1100-1200	[14]
Нікель	CO, CO ₂	CO	800	[18]
Сталь X18H10T	CO, H ₂ , N ₂ , H ₂ O	H ₂	400	[19]
Ніобій	CO, H ₂ , N ₂	H ₂	900-1250	[11; 4]
Титан	H ₂ , H ₂ O, CO+H ₂	H ₂	700-800	[9]

* – Mo при T≥1000 виділяє CO, а при T>1200 – N₂, при T<1000 – H₂.

Аналізуючи табл. 2 можна зробити припущення про те, що для багатьох металів процес відновлення плівки оксидів вуглецем є найбільш імовірним. Однак ніобій, тантал, титан і аустенітні сталі (18 % Cr і 8 % Ni) явно не характеризуються процесом від-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

новлення оксидної плівки вуглецем. Виділення CO із ніобію, найімовірніше, є наслідком реакції типу $[C] + [O] \rightarrow [CO_2]$, тобто реакція може слугувати як для видалення вуглецю, так і кисню, розчиненого в металі. У роботі [15] було знайдено, що вміст кисню після відпалу сплавів ВН-1 і ВН-2 при 1800 °С протягом 10 годин знижувався з 0,05 до 0,005 %. Отже, реакція з виділенням CO іде в ніобії не за шляхом відновлення оксиду вуглецем. Відзначимо, що водень із ніобію видаляється при 900...1400 °С і у вакуумі вище $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па продукти реакції Nb-H втрачають стабільність [11; 16].

За даними роботи [16], при температурі 1000 °С у вакуумі оксид вуглецю виділяється в основному з таких металів: Fe, вуглецева сталь, Ni, ковар, Mo, W. Причому Ni виділяє менше CO порівняно з Fe і вуглецевою сталлю. Необхідно відзначити той факт, що Fe покриті Ni виділяє CO не як Fe, а як Ni. Остання обставина може мати велике практичне значення при виборі проміжних прошарків у випадку зварювання у твердій фазі різнорідних металів.

Відновлення оксидом вуглецю. Відновлення оксидом вуглецю відбувається за реакцією: $2nCO_{(газ)} + M_mO_{2(тв)} = 2nCO_{2(газ)} + mM_{(тв)}$. Відновлення відбувається з виділенням вуглекислого газу CO₂. Оксид вуглецю, що виділився з металу (табл. 2), додатково призводить до часткового відновлення оксидів. Залежно від матеріалу, температури нагрівання й глибини вакууму спостерігається присутність у газовій фазі переважно або CO або CO₂.

Проте оксид вуглецю поряд з відновленням може призводити до утворення карбідів й оксидів. При $T > 500-600$ °С можлива реакція [14]: $3Fe + 2CO \rightarrow Fe_3C + CO_2$; $Ni + CO_2 \rightarrow NiO + CO$; $TiO + CO \leftrightarrow Ti + CO_2$; $Ti + 2CO \leftrightarrow TiC + CO_2$ і т. ін. Присутній при вакуумі $1,33 \cdot 10^{-3}-1,33 \cdot 10^{-1}$ Па метан (CH₄) розкладається на нагрітій поверхні металу за реакцією $CH_4 \rightarrow C + 2H_2$, що може призвести до відновлення оксиду як за рахунок вуглецю, так і водню.

Відновлення воднем. Присутні в атмосфері газової фази пари води при взаємодії з нагрітим металом розкладаються із виділенням атомарного водню, який є сильним відновлювачем оксидів. Ідуть реакції дисоціації $2H_2O = 2H_2 + O_2$ і відновлення $2nH_{2(газ)} + M_mO_{2n(тв)} = 2nH_2O_{(газ)} + mM_{(тв)}$. Відновлення оксиду воднем іде безупинно, тому що після відновлення оксиду знову утворюються пари води, тобто цикл повторюється. Відновлення оксиду відбувається також воднем, що виділяється з металу, при цьому швидкість відновлення визначається адсорбцією H₂ на поверхні оксиду. Відзначимо, що в металі водяна пара не розчиняється [14]. Водень відновлює оксидну плівку міді вже при нагріванні понад 800 °С: $Cu_2O + H_2 = 2Cu + H_2O$. За даними роботи [14], водень може відновлювати оксиди таких металів, як хром, молібден, вольфрам, титан, нікель. Відзначається, що особливо легко відновлюються воднем оксиди нікелю.

Відновлення фтористим амонієм починається з моменту його дисоціації при 200 °С у вакуумі. Ідуть процеси утворення летучих фторидів металу: $2NH_4F = N_2 + 3H_2 + 2HF$ та відновлення оксидів воднем: $mMe_{n/m}O_{2/m} + xHF = cMe_{n/c}Fe_{x/c} + x/cH_2O$; $mMe_{n/m}O_{2/m} + 2H_2 = nMe + H_2O$.

Розроблено спосіб зварювання [20], який полягає в тому, що у стик поміщається матеріал, який у результаті хімічної реакції з основним металом утворює газоподібні продукти й поверхня очищається від оксидів. Після видалення оксидів можна здійснювати процес зварювання. У роботі розглядається приклад видалення оксидних плівок хрому й титану з деталей за допомогою фтористого амонію (NH₄F). Фтористий амоній відновлює плівки оксиду на Cr і Ti за 15 хвилин при 1100 °С.

Механічний вплив. У процесі пластичної деформації відбувається механічне пошкодження або руйнування оксидної плівки на металі. Тріщини в плівці й місця розриву полегшують вихід глибинних газів на поверхню, тобто інтенсивність очищення металу зростає. У роботі [18] прямими експериментами показано зростання газовиділення при

деформації сплавів ніобію або нікелю. Додаткове виділення газів на ніобієвому сплаві (H_2 , CO , N_2) пояснюється утворенням додаткових шляхів більш легкої дифузії газів. При деформації в металі виникають напруження, площини ковзання, нові границі й блоки, руйнується поверхнева оксидна плівка. Зі збільшенням ступеня деформації при одній температурі нагрівання газовиділення зростає [18]. Процеси рекристалізації можуть вплинути на оксидну плівку. По-перше, при рекристалізації прискорюються процеси пластичної деформації й дифузійна рухливість атомів, а по-друге, може відбуватися виламування плівки зростаючим кристалом [21; 22].

Фізичний стан є фактором, що впливає на зварюваність у твердому стані у вакуумі. Тому поряд зі знанням того, що ж відбувається з оксидами в контакті, необхідно знати й ті зміни в поверхневому шарі металу, які відбуваються у процесі випаровування самого металу або легуючих елементів, а також ураховувати небезпеку забруднення поверхні продуктами реакцій та залишковими газами.

Випаровування металів і сплавів. Найбільшу випаровуваність мають хром, марганець, нікель, кобальт, а найменшу – титан, мідь, цирконій, алюміній тощо [7; 12]. У вакуумі при температурі $1200\text{ }^\circ\text{C}$ швидкість випаровування (оцінка по зменшенню ваги) збільшується для ряду деяких металів у такій послідовності: W, Mo, Pd, Ni, Fe, Cu [23]. Також у роботі [23] представлені результати дослідження складу поверхні хромомарганцевої і хромонікельмолібденової сталі після різних витримок ($5 \div 120$ хв) в інтервалі температур від 700 до $1200\text{ }^\circ\text{C}$ при вакуумі порядку $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па. Спектроаналітичне обстеження поверхні показало, що загальна глибина поверхневого шару, що брав участь у сублімації, досягає $0,3 \div 0,4$ мм.

Відомо, що випаровування твердих тіл є ступінчастим процесом. Спочатку атоми металу переходять в адсорбований на поверхні шар, а потім випаровуються після деякого блукання по поверхні. Ріст чисельності поверхневих дефектів і перерозподіл легуючих елементів у процесі пластичної деформації сприяє збільшенню швидкості випаровування. Наявність поверхневих дефектів полегшує перехід атомів в адсорбований стан і зменшує роботу випаровування елементів [13].

Слід зазначити, що тривала витримка у вакуумі при високій температурі обумовлює появу своєрідного мікрорельєфу на поверхні металу. Нерівна терасоподібна поверхня з висотою сходів до 10^{-4} мм, ямки й канавки термічного травлення є наслідком вибіркового випаровування металу й протікання процесів поверхневої дифузії [13]. Термічне травлення має місце переважно з областей з найбільшими викривленнями кристалічних ґраток і підвищеної вільної енергії (границі зерна, місця виходу дислокацій).

Поглинання газів. Склад газової фази при вакуумі $1,33 \cdot 10^{-3}$ – $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па різко відрізняється від розрахункового, який відповідає прийнятому ступеню розрядження. У робочій вакуумній камері при зазначеному розрядженні міститься H_2O , H_2 , CH_4 (метан). При нагріванні метан взаємодіє із цими залишковими газами, наприклад, метан розкладається на гарячому ніобії за реакцією $CH_4 \rightarrow C + 2H_2$ і обумовлює насичення поверхні вуглецем [11]. У такий спосіб навіть вакуум $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па не є нейтральним середовищем при нагріванні, особливо таких хімічноактивних металів, як ніобій, молібден, титан тощо.

Можна вважати доведеним необхідність застосування максимально можливого розрядження, якщо температура нагрівання перевищує $0,4 T_{пл}$. Відзначимо, що дані спектроскопії свідчать про те, що на поверхнях свіжого зламу вуглець і кисень можуть бути присутніми навіть у надвисокому вакуумі $1,33 \cdot 10^{-7}$ Па [24].

При низьких тисках і високих температурах поглинання газів металами визначається трьома процесами: хемосорбцією газу на поверхні металу і його наступною дифузійною в глиб зразка, а також десорбцією газу з поверхні металу в газову фазу. Поглинання газів супроводжується окисленням поверхні металів, наприклад, на ніобії у вакуумі утворюються продукти окислення у вигляді окремих ізольованих ділянок на поверхні [11].

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

У роботі [25] стверджується, що зазор між деталями, які при зварюванні тиском перед нагріванням попередньо стискаються на повітрі, можна розглядати як суму герметичних мікрооб'ємів, що заповнені повітрям. У період нагрівання в цих мікрооб'ємах відбуваються процеси самоочищення від оксидних плівок і утворення вакууму, а процеси автовакуумного зварювання тиском, гарячої прокатки герметичних пакетів, пресового зварювання, дифузійного зварювання у вакуумі та контактного зварювання характеризуються спільністю фізико-хімічних процесів, які протікають у герметичному зазорі.

У світлі вищевикладеного становить інтерес результат досліджень попередньо окислених зразків зі сталі Ст3 і сталі 12Х18Н10Т [26]. Встановлено, що на затиснутих поверхнях спостерігається різке зниження швидкості очищення, а вільна поверхня металу очищається більш інтенсивно, коли вона контактує з газовою фазою (вакуумом). На сталі Ст3 плівка товщиною 50-60 нм при 900 °С видаляється за 5...10 хвилин одночасно як на затиснутих, так і на вільних поверхнях. На сталі 12Х18Н10Т товсту оксидну плівку на затиснутих поверхнях вилучити при нагріванні до 1000 °С не вдалося, а на вільній поверхні товщина плівки зменшилась. Тобто істотне значення має відновлення оксидів за рахунок їх взаємодії з елементами-відновлювачами, що є в газовій фазі. Відзначимо, що наявність цих елементів у вакуумі залежить від глибини вакууму, величини натікання у вакуумну камеру, інтенсивності газовиділення.

Імовірно, для кожного металу й сплаву є характерна величина вакууму й натікання, обумовлені фізико-хімічними властивостями матеріалів, що зварюються, і температурою нагрівання. У такий спосіб ми можемо зробити висновок, що при нагріванні металу у вакуумі він може як очищатися від оксидів, так і окислюватися одночасно.

На підставі зробленого аналізу літератури можна зазначити, що під час нагрівання металу у вакуумі на його поверхні відбувається комплекс поверхневих фізико-хімічних процесів, які взаємозалежні й можуть привести не тільки до очищення поверхні від оксидів, але й до істотної зміни механічних і фізико-хімічних властивостей тонкого поверхневого шару металу. У табл. 3 на підставі викладеного матеріалу наведені основні відомості, які можуть надати істотну допомогу при розробці технології зварювання у твердій фазі у вакуумі $1,33 \cdot 10^{-4}$ - $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па, з температурою зварювання вище $0,4T_{пл}$.

Аналізуючи відомості, наведені в табл. 3, можна зробити висновок, що у процесі зварювання як однорідних, так і різнорідних металів необхідно враховувати процеси, що протікають у поверхневому шарі металу при його нагріванні у вакуумі. У випадку зварювання різнорідних металів слід визначати параметри нагрівання не тільки з погляду появи крихких фаз у зоні контакту, але й з позицій оптимального очищення поверхні від оксидів. При виборі проміжних прошарків необхідно також враховувати не тільки діаграму стану металів, що зварюються, але й той вплив, який матеріал прошарку може виявити на інтенсивність очищення поверхні контакту основного металу від оксидів.

Таблиця 3

Можливі процеси очищення металів від оксидів при нагріванні у вакуумі

Метал	Основне газовиділення $T=(0,4-0,7)T_{пл}$	Можливі процеси очищення металу від оксидів у вакуумі при нагріванні
Fe, Ст3	CO	Дисоціація, відновлення вуглецем
Ni	CO	Дисоціація, сублімація, відновлення вуглецем і воднем
Cu	-	Дисоціація, відновлення воднем
Cr	-	Відновлення воднем і вуглецем
Mn	-	Відновлення вуглецем
V	CO	Сублімація, розчинення, відновлення вуглецем
Mo	CO	Дисоціація, сублімація, відновлення вуглецем і воднем
W	CO	Дисоціація, сублімація, відновлення вуглецем і воднем
Ti, Zr, Nb	H ₂	Розчинення, відновлення вуглецем
Pd	H ₂	Дисоціація, сублімація, відновлення воднем
X19H10T	N ₂	Відновлення вуглецем і воднем

Таким чином, стосовно зварювання у твердій фазі різних металів і сплавів можна запропонувати п'ять підходів до розробки технологій з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів для забезпечення утворення якісного нероз'ємного з'єднання:

- гальванічне покриття матеріалом, який не утворює термодинамічно стійких оксидів, нітридів й карбідів на поверхні та сприяє процесам очищення основного металу від оксидів;
- застосування проміжних прошарків, матеріал яких дозволяє інтенсифікувати очищення від оксидів основного металу;
- застосування штучних методів відновлення оксидних плівок;
- скорочення до мінімуму часу від обробки поверхні металу до моменту зварювання й зварювання у граничному для цієї системи вакуумі;
- використання попереднього підігріву деталей, що зварюються, у розведеному стані для прискорення процесу відновлення оксидних плівок та сублімації одного з матеріалів з наступною конденсацією на поверхню іншого.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. У роботах [27; 28] встановлено, що при дифузійному зварюванні у вакуумі (ДЗВ) міді з хромом та титаном міцність зварних з'єднань, отриманих із застосуванням сублімованих прошарків міді (пара мідь-хром) та титану (пара мідь-титан), на 15...20 % більше міцності з'єднань, зварених безпосередньо напругу. Однак у роботах не досліджено можливість використання поверхневих фізико-хімічних процесів для прецизійного зварювання тиском. Крім того, умови проведення експерименту, коли спочатку створювали проміжні шари міді, а потім проводили зварювання, не дозволили повною мірою оцінити ефективність використання сублімованих прошарків, у зв'язку з тим, що сублімовані прошарки при цьому встигають окислитись.

Тому **метою** нашої роботи було дослідження впливу поверхневих фізико-хімічних процесів (самоочищення від оксидних плівок, сублімація та конденсація) на здатність до прецизійного зварювання тиском у вакуумі різнорідних металів.

Викладення основного матеріалу. У роботах [27; 28] зазначено, що у разі нагрівання у вакуумі негерметичних об'ємів, час, необхідний для утворення сублімованих прошарків, становить 1-3 хвилини незалежно від природи іншого металу, що значно менше, ніж час, необхідний для утворення таких прошарків при нагріві герметичних об'ємів.

Отже, нами був запропоновано новий спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через тонкі сублімовані прошарки, що здійснюється за схемою, зображеною на рис. 1. Зварні деталі 2 встановлюються та фіксуються за допомогою спеціальної оснастки 4 таким чином, щоб зазор між поверхнями становив 0,5...1 мм. Після герметизації та створення розрідження у робочій камері 1, зібраний вузол нагрівачем 3 нагрівається до температури сублімації одного із матеріалів, що зварюється і після витримки протягом 1-5 хвилин, яка необхідна для прогріву заготовок і проходження процесу сублімації та конденсації з утворенням тонкого проміжного прошарку, прикладається зусилля зварювання і проводиться дифузійне зварювання. Після зварювання з'єднання охолоджують та виймають із камери. У випадку, коли температура зварювання менше температури сублімації матеріалу, то зусилля зварювання прикладають після зменшення температури до необхідної межі. Представлена схема дозволяє здійснювати дифузійне зварювання через тонкі проміжні прошарки за один цикл в одній робочій камері.

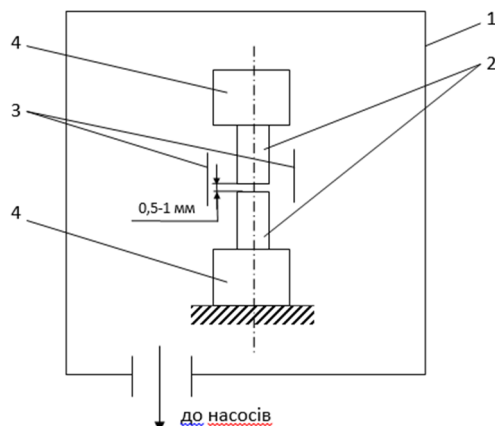


Рис. 1. Схема ДЗВ різнорідних металів через сублимовані прошарки:

1 – вакуумна камера; 2 – деталі, що зварюються; 3 – нагрівач;

4 – верхній та нижній штоки

Для реалізації представленої схеми зварювання була розроблена спеціалізована оснастка, що дозволяє проводити попереднє нагрівання заготовок, що зварюються, у розведеному стані з наступним прикладанням зусилля зварювання та розроблена нова технологія ДЗВ міді з тугоплавкими металами та титаном, яка передбачає:

- збирання заготовок, що зварюються, у вакуумній камері з використанням спеціальної оснастки;
- нагрів заготовок у розведеному стані для створення сублимаційних прошарків;
- процес дифузійного зварювання на режимах: *мідь-тугоплавкі метали (молібден, хром):* $T_{зв} = 950...970$ °С, час витримки при температурі зварювання до прикладання зусилля – 1...2 хвилини; $t_{зв} = 10$ хвилин; тиск зварювання 1-2 МПа; *мідь-титан:* $T_{зв} = 850$ °С, час витримки при температурі зварювання до прикладання зусилля – 1...2 хвилини; $t_{зв} = 10$ хвилин; тиск зварювання 2-3 МПа.

Тиск зварювання був попередньо визначений з метою мінімізації пластичної деформації. Необхідно зауважити, що з врахуванням розміру сублимованих частинок (товщини конденсованого прошарку) порядку 2 мкм, поверхні перед зварюванням полірували до 7-го класу шорсткості (параметри шорсткості визначали за допомогою профілографа-профілометра).

Характерний вид зварних з'єднань, отриманих на вказаних режимах, представлено на рис. 2. Встановлено, що деформація основних матеріалів при зварюванні на вказаних режимах не перевищує 1 %, що відповідає вимогам прецизійності. Механічні випробування на зріз показали, що міцність зварних з'єднань міді з молібденом та хромом при цьому досягає 95...100 МПа, що складає 85...90 % від міцності основного матеріалу (міді). Міцність з'єднань міді з титаном становить 80–85 МПа, або 73...77 % міцності міді (110 МПа).

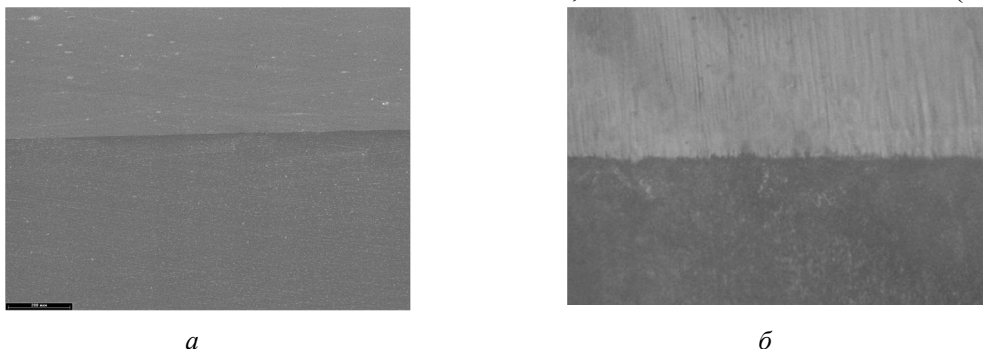


Рис. 2. Мікроструктура зони з'єднання мідь-молібден (а) (растрова електронна мікроскопія); мідь-титан (б) (оптична мікроскопія) (x100).

Таким чином, літературний аналіз можливих поверхневих фізико-хімічних процесів при зварюванні тиском різних однорідних та різнорідних матеріалів, а також отримані експериментальні дані щодо використання таких процесів як засіб активації поверхонь, дозволяють запропонувати модель формування нероз'ємних з'єднань при зварюванні у твердій фазі за розробленою технологією за рахунок проходження таких стадій: 1 – самоочищення поверхні від оксидних плівок на стадії попереднього нагрівання заготовок у вакуумі у розведеному стані (внаслідок дисоціації, відновлення та розчинення оксидів); 2 – сублимація одного з матеріалів з наступною конденсацією на поверхні іншого; 3 – утворення на стадії осади хімічних зв'язків та формування зони об'ємної взаємодії (рис. 3).

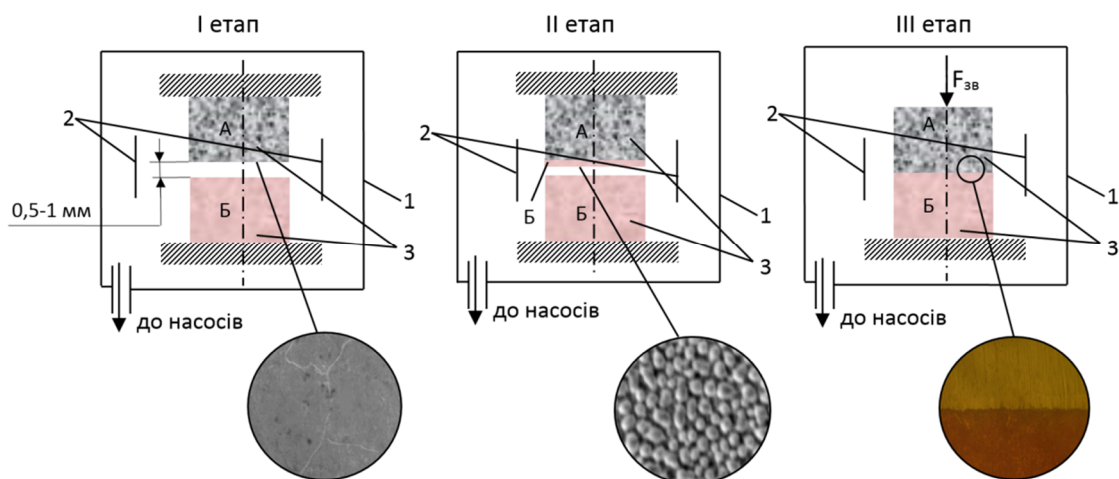


Рис. 3. Стадії формування нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском у твердій фазі з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів: 1 – вакуумна камера; 2 – нагрівач; 3 – деталі, що зварюються

Висновки.

1. Запропоновано новий спосіб дифузійного зварювання у вакуумі через тонкі сублимовані активні прошарки.
2. Розроблено новий технологічний процес ДЗВ міді з тугоплавкими металами та титаном з використанням спеціалізованої оснастки, яка дозволяє здійснювати дифузійне зварювання через сублимовані прошарки за один цикл в одній робочій камері.
3. Запропоновано модель формування нероз'ємних з'єднань при зварюванні тиском у твердій фазі з використанням поверхневих фізико-хімічних процесів.

Список використаних джерел

1. Кочергин К. А. Сварка давлением / К. А. Кочергин. – Л. : Машиностроение, 1972. – 216 с.
2. Окисление металлов / под ред. Ж. Бенара ; пер. с французского. – М. : Металлургия, 1967. – Т. 1. – 499 с.
3. Стычинский В. Б. Предупреждение образования окалины и методы очистки деталей / В. Б. Стычинский, С. Д. Бешелев. – М. : Машиностроение, 1964. – 132 с.
4. Савицкий Е. М. Металловедение сплавов тугоплавких металлов / Е. М. Савицкий, Г. С. Бурханов. – М. : Наука, 1971. – 356 с.
5. Гуляев Б. Б. Литье из тугоплавких металлов / Б. Б. Гуляев, О. Н. Магницкий, А. А. Демидов. – М.-Л. : Машиностроение, 1964. – 192 с.
6. Квасницкий В. Ф. О возгонке поверхностных пленок при соединении жаропрочных сплавов в твердом состоянии в вакууме / В. Ф. Квасницкий // Труды НКИ им. С. О. Макарова. – 1971. – Вып. 45. Технология судостроения и сварочного производства в судостроении.
7. Шмыков А. А. Закономерности взаимодействия контролируемых атмосфер с металлами / А. А. Шмыков // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1967. – № 5. – С. 54–65.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

8. Шмыков А. А. Термодинамика и кинетика процессов взаимодействия контролируемых атмосфер с поверхностью стали / А. А. Шмыков, В. Г. Хорошайлов, Е. Л. Гюлиханданов. – М. : Металлургия, 1991. – 160 с.
9. *Взаимодействие* марганца, хрома и титана с воздухом в условиях автовакуумного нагрева при пайке / В. И. Рымарь, С. Н. Лоцманов, В. М. Радзиевский, В. Ю. Чернов // Сварочное производство. – 1973. – № 11. – С. 6–8.
10. Слепуха В. Т. Образование поверхностей, свободных от оксидных пленок при диффузной сварке в вакууме / В. Т. Слепуха // Сварочное производство. – 1965. – № 5. – С. 30–40.
11. Соколова Г. В. Взаимодействие ниобия с газами при высоких температурах и низких давлениях (обзор литературы) / Г. В. Соколова, С. Ф. Юрьев // Металловедение. – 1970. – № 14.
12. Куликов И. С. Термическая диссоциация соединений / И. С. Куликов. – М. : Металлургия, 1966. – 250 с.
13. *Испарение* и металлические свойства металлических материалов в вакууме (обзор литературы) / Н. Н. Грибов, Ю. И. Звездин, А. И. Мелькер, С. С. Шураков, В. А. Яковлев // Металловедение. – 1964. – № 8.
14. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники : пер. с англ. / С. Дэшман. – М. : Мир, 1964. – 715 с.
15. *Масс-спектрометрический* анализ газов при прокате в вакууме / Н. А. Аникеев, Я. Б. Гуревич и др. // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1969. – № 7. – С. 61–67.
16. Коллинз Д. Термическое обезгаживание электровакуумных материалов / Д. Коллинз, К. Тернбалл // Техника электронных ламп : материалы V Национальной конференции по технике электронных ламп. – М. : Изд-во иностр. лит., 1963. – С. 178–183.
17. Гельман А. С. О взаимодействии сталей с газами в условиях автовакуумного нагрева при сварке / А. С. Гельман, М. С. Барышев // Сварочное производство. – 1971. – № 5. – С. 9–11.
18. *О кинетике* выделения газов при прокатке в вакуум / Н. А. Аникеев, Я. Б. Гуревич и др. // Физика и химия обработки материалов. – 1970. – № 12. – С. 52–61.
19. Скибина Г. В. Исследование газоотделения нержавеющей сталей в динамическом высоком вакууме : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. В. Скибина ; МВТУ им. Н. Е. Баумана. – М., 1970.
20. Норман С. Усовершенствования в области сварки металлов. Английский Патент, кл. 83(ч). В23к, № 919031 (РЖМЕТ, № 11, 1963, 11Е327П).
21. Семенов А. П. Схватывание металлов / А. П. Семенов. – М. : Машгиз, 1958. – 280 с.
22. Вадило П. С. Кристаллизация металлов / П. С. Вадило. – М. : Металлургия, 1964. – 183 с.
23. Борисов А. Я. Исследование испаряемости нержавеющей сталей и никелевых жаропрочных сплавов в вакууме при высоких температурах / А. Я. Борисов, Г. В. Ильина, Ю. В. Соломко // Металловедение. – 1965. – № 9. – С. 124–131.
24. *Methods for diffusion welding the superalloy Udimet 700* / Duvall D. S., Owszarski W. A., Paulonis D. F., King W. H. // *Welding Journal*. – 1972. – Issue 51, № 2. – Pp. 41–49.
25. *Самоочистка* от оксидов стыкуемых поверхностей при сварке в твердой фазе с нагревом / С. И. Кучук-Яценко, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко и др. // Автоматическая сварка. – 1998. – № 2. – С. 16–23.
26. Гельман А. С. Основы сварки давлением / А. С. Гельман. – М. : Машиностроение, 1970. – 312 с.
27. *Дослідження* впливу сублимаційних процесів в стику на якість зварних хром-мідних з'єднань / Г. К. Харченко, О. О. Новомлинець, Д. М. Демиденко, Ю. В. Фальченко // Вісник ЧДТУ. – 2005. – № 22. – С. 91–93.
28. *Falchenko Y.* Diffusion welding of titanium with copper using surface physical and chemical processes / Falchenko Y., Novomlynets O. // *Collection of Scientific Papers: Information, Technologies, Management and Society*. – Riga, Latvia, 2015. – № 4 (12). – Pp. 184–191.

References

1. Kochergin, K. A. (1972). *Svarka davleniem [Pressure welding]*. Lviv: Mashinostroenie (in Russian).
2. Benar, Zh. (ed.) (1967). *Okislenie metallov [Metals oxidation]*. Vol. 1. Translated from French. Moscow: Metallurgija (in Russian).

3. Stychinskii, V. B. & Beshelev, S. D. (1964). *Preduprezhdenie obrazovaniia okaliny i metody ochildki detalei [Prevention of scale formation and methods of parts cleaning]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
4. Savickii, E. M. & Burhanov, G. S. (1971). *Metallovedenie splavov tugoplavkikh metallov [Metal science of refractory metals alloys]*. Moscow: Nauka (in Russian).
5. Guliaev, B. B., Magnitskii, O. N., Demidov, A. A. (1964). *Lite iz tugoplavkikh metallov [Casting of refractory metals]*. Moscow-Lviv: Mashinostroenie (in Russian).
6. Kvasnitskii, V.F. (1971). O vozgonke poverkhnostnykh plenok pri soedinenii zharoprochnykh splavov v tverdom sostoianii v vakuume [About the sublimation of surface films during the joining of high-temperature alloys in the solid state in a vacuum]. *Tehnologiya sudostroeniia i svarochnogo proizvodstva v sudostroenii – Shipbuilding technology and welding production in shipbuilding*, issue 45 (in Russian).
7. Shmykov, A. A. (1967). Zakonomernosti vzaimodeistviia kontroliruemyykh atmosfer s metallami [The regularities of the interaction of controlled atmospheres with metals]. *Metallovedenie i termicheskii obrabotka metallov – Metal science and heat treatment of metals*, no. 5, pp. 54–65 (in Russian).
8. Shmykov, A.A., Khoroshailov, V.G., Giulikhandanov, E.L. (1991). *Termodinamika i kinetika processov vzaimodeistviia kontroliruemyykh atmosfer s poverhnostiui stali [Thermodynamics and kinetics of processes of interaction of controlled atmospheres with the surface of the steel]*. Moscow: Metallurgiya (in Russian).
9. Rymar, V.I., Lotsmanov, S.N., Radzievskii, V.M., Chernov, V.Ju. (1973). Vzaimodeistvie margantsa, khroma i titana s vozduhom v usloviakh avtovakuumnogo nagreva pri paika [The interaction of manganese, chromium and titanium with air under conditions of autovacuum heating during the brazing process]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, no. 11, pp. 6–8 (in Russian).
10. Slepaha, V. T. (1965). Obrazovanie poverkhnostei, svobodnykh ot oksidnykh plenok pri diffuznoi svarke v vakuume [The formation of surfaces free of oxide films during vacuum diffusion welding]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, no. 5, pp. 30–40 (in Russian).
11. Sokolova, G.V. & Iurev, S.F. (1970). Vzaimodeistvie niobia s gazami pri vysokikh temperaturakh i nizkikh davleniiakh (obzor literatury) [Interaction of niobium with gases at high temperatures and low pressures (literature review)]. *Metallovedenie – Metal science*, no. 14. Lviv: Sudostroenie (in Russian).
12. Kulikov, I.S. (1966). *Termicheskaiia dissotsiatsiia soedinenii [Thermal dissociation of compounds]*. Moscow: Metallurgiya (in Russian).
13. Gribov, N.N., Zvezdin, Iu.I., Melker, A.I., Shurakov, S.S., Jakovlev, V.A. (1964). Isparenie i metalicheskie svoystva metallicheskiikh materialov v vakuume (obzor literatury) sb. [Evaporation and metal properties of metal materials in vacuum (literature review)]. *Metallovedenie – Metal science*, no. 8. Lviv: Sudostroenie (in Russian).
14. Dushman, S. (1964). *Nauchnye osnovy vakuumnoi tekhniki [Scientific basis of vacuum technology]* (translated from English). Moscow: Mir (in Russian).
15. Anikeev, N. A., Gurevich, Ia. B. et al. (1969). Mass-spektrmetricheskii analiz gazov pri prokate v vakuume [Mass-spectrometric analysis of the gases during the rolling at vacuum]. *Izvestiia Vuzov. Chernaia metallurgiya – News of Universities. Ferrous metallurgy*, no. 7, pp. 61–67 (in Russian).
16. Kollinz, D., Ternball, K. (1963). Termicheskoe obezgazhivanie elektrovakuumnykh materialov [Thermal degassing of electrovacuum materials]. Proceedings from *Tehnika elektronnykh lamp: sbornik materialov V Natsionalnoi konferentsii po tekhnike elektronnykh lamp – The technique of electron tubes: Conference proceedings of the 5 th National conference of electron tubes technique*. Moscow: Izd-vo inostr. lit., pp. 178–183 (in Russian).
17. Gelman, A.C. & Baryshev, M.S. (1971). O vzaimodeistvii stali s gazami v usloviakh avtovakuumnogo nagreva pri svarke [About the interaction of steels with gases in the conditions of autovacuum heating during the welding]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, no. 5, pp. 9–11 (in Russian).
18. Anikeev, N. A., Gurevich, Ia. B. et al. (1970) O kinetike vydeleniia gazov pri prokatke v vakuume [About the kinetics of gases at rolling in vacuum]. *Fizika i khimiia obrabotki materialov – Physics and chemistry of materials processing*, no. 12, pp. 52–61 (in Russian).
19. Skibina, G.V. (1970). Issledovanie gazootdeleniia nerzhaveiushchikh stali v dinamicheskom vysokom vakuume [The investigation of gas liberation of stainless steels in dynamic high vacuum]. *Extended abstract*. Moscow: MVTU (in Russian).

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

20. Norman, S. (1963). *Usovershenstvovaniia v oblasti svarki metallov [The improvements in the field of metals welding]*. Patent № 919031.
21. Semenov, A.P. (1958). *Skhvatyvanie metallov [Metals seizure]*. Moscow: Mashgiz (in Russian).
22. Vadilo, P.S. (1964). *Kristallizatsiia metallov [Metals crystallization]*. Moscow: Metallurgiiia (in Russian).
23. Borisov, A.Ia., Ilina, G.V., Solomko, Iu.V. (1965). Issledovanie ispariaemosti nerzhavieushchikh stalei i nikelovykh zharoprochnykh splavov v vakuume pri vysokikh temperaturakh [The investigation of the evaporability of stainless steels and Nickel heat-resistant alloys in vacuum at high temperatures]. *Metallovedenie – Metal science*, no. 9, pp. 124–131 (in Russian).
24. Duvall, D. S., Owszarski, W. A., Paulonis, D. F., King, W. H. (1972). Methods for diffusion welding the superalloy Udimet 700. *Welding Journal*, issue 51, no. 2, pp. 41–49.
25. Kuchuk-Jacenko, S.I., Harchenko, G.K., Falchenko, Ju.V. et al. (1998). Samoochistka ot oksidov stykuemykh poverhnostej pri svarke v tverdoj faze s nagrevom [Self-cleaning of oxides from the joining surfaces during the solid phase welding with heating]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic welding*, no. 2, pp. 16–23 (in Russian).
26. Gelman, A. S. (1970). *Osnovy svarki davleniem [The basics of pressure welding]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
27. Kharchenko, H.K., Novomlynets, O.O., Demydenko, D.M., Falchenko, Iu.V. (2005). Doslidzhennia vplyvu sublimatsiinykh protsesiv v styku na yakist zvarnykh khrom-midnykh ziednan [The investigation of the influence of sublimation processes in the joint on the quality of chromium-copper welded joints]. *Visnyk ChDTU – Herald of ChDTU*, no. 22, pp. 91–93 (in Ukrainian).
28. Falchenko, Y. & Novomlynets, O. (2015). Diffusion welding of titanium with copper using surface physical and chemical processes. *Collection of Scientific Papers: Information, Technologies, Management and Society*. Riga, Latvia, no. 4 (12), pp. 184–191.

UDC 621.791.4

Iurii Falchenko, Oleg Novomlynets, Lidiia Petrushynets, Iryna Nahorna

BASIC USAGE OF SURFACE PHYSICAL-CHEMICAL PROCESSES FOR PRECISION PRESSURE WELDING

Urgency of the research. *The usage of surface physical-chemical processes is the perspective activation method for precision joining of metal materials.*

Target setting. *The modern theory of solid-phase joining concerning to the usage of surface processes cannot fully determine the direct criteria of welding technology with a minimum level of plastic deformation.*

Actual scientific researches and issues analysis. *During the solid-phase welding of various metals and alloys, the usage of preheating of the welded parts in separated state may speed up the recovery process of oxide films and sublimation of one of the materials with subsequent condensation onto the surface of another.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *The usage of sublimated layers during the welding of dissimilar materials allows obtaining strength by 15–20 % higher than the strength of joints that welded directly. However, the works have not investigated the possibility of using such layers for precision pressure welding.*

The research objective. *The investigation of the influence of surface physical-chemical processes (self-cleaning of the oxide films, sublimation and condensation) on the ability to precision pressure welding of dissimilar metals in vacuum.*

The statement of basic materials. *The ability of precision pressure welding of copper with molybdenum and chrome through the sublimated copper layer was investigated. The precision weldability of copper and titanium through the sublimated titanium layer was also researched.*

Conclusions. *It was established that the deformation of the basic materials during the welding does not exceed 1 %, and the strength of welded joints of copper with molybdenum and chromium amounts to 85-90 % of the strength of the basic material (copper). The strength of the copper - titanium welded joints amounts to 73-77 % of the strength of copper.*

A new method of vacuum diffusion welding through the thin sublimated active layers was proposed. A new technological process of vacuum diffusion welding of copper with refractory metals and titanium was developed. Such technological process demands of specialized equipment that allows carrying out of diffusion welding through the sublimated layers in one cycle in the same working chamber.

The model of formation of permanent joints during solid-phase pressure welding using surface physical-chemical processes was proposed.

Key words: *vacuum diffusion welding; surface physical-chemical processes; sublimated layers; precision welded joints.*

Tabl.: 3. Fig.: 3. Bibl.: 28.

УДК 621.791.4

*Юрій Фальченко, Олег Новомлинець, Лідія Петрушинець, Ірина Нагорная***ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ**

В работе исследована возможность получения прецизионных неразъемных соединений разных однородных и разнородных металлических материалов с использованием поверхностных физико-химических процессов. На основании анализа литературных данных относительно возможных поверхностных физико-химических процессов при сварке в твердой фазе предложено новый технологический процесс сварки давлением, который предусматривает предварительный нагрев заготовок в разбавленном состоянии для создания сублимированных прослоек. Определены оптимальные режимы для прецизионной диффузионной сварки в вакууме меди с тугоплавкими материалами и титаном.

Ключевые слова: диффузионная сварка в вакууме; поверхностные физико-химические процессы; сублимированные прослойки; прецизионные неразъемные соединения.

Табл.: 3. Рис.: 3. Библ.: 28.

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

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

Falchenko Iurii – 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

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

Новомлинец Олег Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет, первый проректор, (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Novomlinets Oleg – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, First Vice-Rector, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: oon1@ukr.net

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

Scopus Author ID: 6507741249

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>

Нагорна Ірина В'ячеславівна – асистент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Нагорная Ирина Вячеславовна – асистент кафедри сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Nahorna Iryna – Assistant Lecturer of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: zavalnaya89@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5075-8712>

Scopus Author ID: 56939026500 (Zavalna, I. V.), 57192820279 (Nahorna, Iryna V)