



УКРАЇНА

(19) UA (11) 87053 (13) C2

(51) МПК (2009)

C23C 14/00

B23K 20/00

B23K 20/02

B23K 20/16

B23K 20/22

B23K 35/00

B23K 35/28

B23K 35/30

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(54) СПОСІБ ДИФУЗІЙНОГО З'ЄДНАННЯ МЕТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ ЧЕРЕЗ ПРОШАРОК

1

2

(21) а200711387

(22) 15.10.2007

(24) 10.06.2009

(46) 10.06.2009, Бюл.№ 11, 2009 р.

(72) ПАТОН БОРИС ЄВГЕНОВИЧ, УСТІНОВ АНАТОЛІЙ ІВАНОВИЧ, ІЩЕНКО АНАТОЛІЙ ЯКОВИЧ, ФАЛЬЧЕНКО ЮРІЙ В'ЯЧЕСЛАВОВИЧ, МОВЧАН БОРИС ОЛЕКСІЙОВИЧ, ХАРЧЕНКО ГЕНАДІЙ КОСТЯНТИНОВИЧ

(73) ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ІМ. Є.О.ПАТОНА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

(56) SU, 1 632 705, A1, 07.03.1991

UA, 23 980, C2, 15.04.2002

RU, 2 253 554, C2, 20.06.2003

EP, 1 637 270, A1, 22.03.2006

US, 3 121 785, A, 18.02.1964

US, 3 145 466, A, 25.08.1964

JP, 59-223275, A, 15.12.1984

Terrill J.R. R-260 Alloy Bonding Process for Joining Aluminum/Weld. J., 1962, v. 41, №9, p. 799-804

Гришин В.Л., Лашко С.В. О взаимодействии припоев с титаном в процессе диффузионной пайки//Автоматическая сварка, 1966, №6 (159), с. 41-44

Рыкалин Н.Н., Углов А.А. Некоторые особенности тепловых источников при сварке лазером//Сварочное производство, 1969, №11 (420), с. 33-37

(57) 1. Спосіб дифузійного з'єднання металевих деталей через прошарок, що включає попереднє очищення, механічне шліфування і полірування з'єднуваних поверхонь деталей, створення між

з'єднуваними поверхнями прошарку з шаруватого матеріалу, який складається з металевих шарів чистих різнорідних елементів або сплавів на їх основі, з'єднання деталей у збірку, стиснення, нагрівання і витримку у вакуумі при заданій температурі протягом певного часу, який **відрізняється** тим, що шари шаруватого матеріалу, що чергують, створюють з елементів та/або сплавів на їхній основі, які в результаті дифузійного перемішування елементів, що входять до складу шарів, утворюють евтектичний сплав, температура плавлення якого нижча температури плавлення матеріалу з'єднуваних деталей не менш ніж на 10 °С, при цьому окремі шари шаруватого матеріалу створюють товщиною 10-100 нм, а процес нагрівання області з'єднання металевих деталей ведуть до температури, яка нижча не менш, ніж на 10 °С від температури плавлення евтектичного сплаву.

2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що прошарок із шаруватого матеріалу створюють у вигляді покриття послідовним осадженням або електронно-променевим випаром і конденсацією у вакуумі шарів, що чергують, на з'єднувані поверхні однієї або обох з'єднуваних металевих деталей.

3. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що прошарок із шаруватого матеріалу створюють у вигляді фольги, яку одержують шляхом послідовного осаджування або електронно-променевого випаровування і конденсацією у вакуумі шарів, що чергують, на підкладку, після чого зняту з підкладки фольгу розміщують між з'єднуваними поверхнями з'єднуваних металевих деталей.

Винахід відноситься до формування нероз'ємних з'єднань металевих деталей у твердому стані

без плавлення їх матеріалу. Більш конкретно він

(19) UA (11) 87053 (13) C2

відноситься до дифузійного зварювання у вакуумі деталей через прошарок.

Необхідною умовою, що забезпечує утворення зварного з'єднання при дифузійному зварюванні у вакуумі, є створення між з'єднуваними поверхнями фізичного контакту, при якому будь-які фактори, що перешкоджають процесу дифузії, будуть зведені до мінімуму [Э.С. Каракозов. Сварка металлов под давлением. М., Машиностроение, 1986г., 275 с]. Для забезпечення цього з'єднання поверхні піддають ретельному поліруванню і хімічному очищенню від забруднення. Разом з тим у ряді випадків, наприклад, при з'єднанні алюмінієвих сплавів на їхній поверхні залишається оксидна плівка, повне видалення якої подібним способом є проблематичним. Тому при дифузійному зварюванні такі плівки прагнуть зруйнувати і диспергувати [Сергеев А.В., Чудин В.М., Сыропаева Е.С. «Диффузионная сварка алюминиевых сплавов в состоянии сверхпластичности», Автоматическая сварка №7, 1991, с. 40-43]. Із цією метою з'єднувані поверхні обробляють спеціальними хімічно активними речовинами, що забезпечують модифікування поверхневого шару, а потім здійснюють їх нагрівання у вакуумі в розведеному положенні. Для руйнування окисної плівки поверхню деталей піддають також лазерній або електроерозійній обробці. Недоліком цього підходу є те, що при хімічній обробці поверхні на ній формуються стійкі з'єднання на основі не тільки основного металу, але й легуючих елементів, що утруднює видалення останніх з поверхні при наступній термічній обробці або в процесі дифузійного зварювання.

Ефективним способом, що забезпечує як фізичний контакт, так і протікання дифузійних процесів між з'єднуваними поверхнями, є примусове деформування матеріалів у зоні з'єднання [Тернавский А.П. «Диффузионная сварка с принудительным формированием (аналитический обзор)», Сварочное производство, 1988, №9(647), с. 1-4]. При цьому покладаються на те, що при пластичній деформації відбувається механічне руйнування окисних плівок на з'єднуваних поверхнях деталей, збільшується поверхня контакту та відбувається пластичне деформування приконтатної зони матеріалу. Все це активізує дифузійні процеси в зоні з'єднання.

Значне підвищення міцності з'єднань досягається при введенні між з'єднуваними поверхнями тонких прошарків. Ці прошарки можуть бути виготовлені на основі легкоплавких елементів, а у випадку алюмінієвих сплавів, наприклад, із цинку або галію. Причому ці прошарки можуть осаджуватися у вигляді покриттів на поверхнях, що з'єднуються [Лашко Н.Ф., Лашко С.Ф., «Контактно-реактивная пайка», Сварочное производство, 1969, №11, с. 34-37]. Матеріали для прошарків можуть бути виготовлені як із чистих елементів, так і зі сплавів, які при взаємодії зі зварюваним матеріалом утворюють легкоплавку евтектику. Так, наприклад, при дифузійному зварюванні алюмінієвих сплавів ефективно застосовуються прокладки з міді, срібла й галію.

Ефективність застосування прошарків на основі легкоплавких елементів або евтектичних сплавів пов'язана з формуванням у зоні з'єднання

рідкої фази, що полегшує руйнування окисної плівки, підвищує інтенсивність дифузійного потоку атомів в основний метал як зі з'єднуваних частин, так і з боку прошарку. Шляхом підбору елементів, які входять до складу прошарку, його товщини, температури нагрівання з'єднання і часу витримки при цій температурі можна варіювати вміст елементів, що вводяться в зону шва. Способом впливу на дифузійні процеси в стику в присутності рідкої фази є поєднання процесу нагрівання із зовнішнім навантаженням [Terrill J.R., «The R-260 alloy bonding process for joining Aluminium», Weld. J., 1962, v. 41, N9, p. 799-804]. При цьому частина рідкої фази може бути видалена із зони з'єднання, що забезпечить досягнення оптимального обсягу рідкої фази в зоні контакту і, як наслідок цього, надходження необхідної кількості елементів із проміжного шару в основний матеріал. Рідка фаза, яка утворюється в результаті так званого контактного плавлення, завдяки своїй високій поверхневій активності добре змочує контактуючі метали й швидко розтікається по їх поверхні, що дозволяє здійснювати процес з'єднання металевих деталей без флюсів.

Але, попри всі переваги розглянутих вище процесів дифузійного зварювання, які супроводжуються утворенням рідкої фази, остання стає причиною нагрівання зони з'єднання до температури, яка є вищою, ніж температура плавлення евтектичного сплаву, що формується на основі матеріалу прошарку і з'єднуваного матеріалу. При цьому слід зазначити, що умови проведення зварювального процесу потребують повного розчинення прошарку (фольги), що, в свою чергу, потребує доволі тривалої витримки зварюваного з'єднання при відносно високих температурах. За таких умов властивості матеріалу деталей зазнають суттєвої деградації.

При виборі елементів, на основі яких формується прошарок, орієнтуються на те, щоб при контакті з основним металом формувалися або безперервний ряд твердих розчинів, температура плавлення яких нижча температури плавлення з'єднуваного матеріалу, або легкоплавка евтектика [Лашко Н.Ф., Лашко С.Ф., «Контактно-реактивная пайка», Сварочное производство, 1969, №11, с. 34-37]. Так, для з'єднання алюмінієвих сплавів широко використовуються проміжні шари з міді, срібла, цинку, а для з'єднання сталевих деталей - порошок суміш заліза з вуглецем.

Цей підхід успішно застосовується і у випадку з'єднання різнорідних матеріалів, наприклад, напівпровідників з металами. Відомі способи з'єднання алюмінієвої і мідної бронзи через прошарок зі срібла, нанесеного гальванічним способом на з'єднувані поверхні деталей. Недоліком такого способу з'єднання є те, що при формуванні рідкої фази зона з'єднання нагрівається до температури, вищої температури утворення відповідної евтектики. Крім того, оскільки швидкість формування рідкого прошарку залежить від багатьох факторів, процес формування з'єднання у цьому випадку буде досить нестабільним.

У патенті US №3121785 [МПК:<sup>8</sup>B23K20/233, 35/00, 20/22, опубл. 1964.02.18] описаний процес з'єднання деталей з алюмінієвих сплавів за допо-

могою введення в проміжок між ними фольги з міді або мідних сплавів з вмістом міді більше 50%, таких, як бронзи і латуні, що не містять елементів, здатних істотно змінювати температуру плавлення евтектики. При цьому відзначається, що задовільний рівень міцності з'єднання досягається при нагріванні зони з'єднання до температури порядку 600°C у вакуумі. Недоліком такого способу є значний перегрів зони з'єднання до температури, вищої температури плавлення евтектики, що може негативно позначитися на характеристиках міцності з'єднуваного матеріалу.

У патенті US №2987816 [МПК:<sup>8</sup>B23K20/16; 35/28; 35/30, опубл. 1961.06.13] описана методика одержання пластичних з'єднань шляхом нанесення на з'єднувані поверхні порошку кремнію з наступним нагріванням зони з'єднання до температури, яка дещо перевищує температуру плавлення евтектики Al-Si. Через низьку швидкість дифузійних процесів у порошкових матеріалах утворення таких евтектик є нестабільним. Крім того, параметри цього процесу будуть залежати від ступеню окислювання порошкового матеріалу.

У роботі [Лашко С.В., Сухачева Г.Н., «Контактно-реактивна пайка алюмінія і його сплавів» (Сб., «Пайка в машиностроєнні», ЛатІНТИ, Рига, 1968г.)] відзначається, що при з'єднанні алюмінієвих сплавів доцільним є створення в області шва евтектик на основі систем Al-Cu-Si, Cu-Si-Mg і Ag-Si-Mg, які забезпечують більш високу пластичність з'єднанням і дозволяють провести процес з'єднання при порівняно низьких температурах (550-570°C) за більш короткий проміжок часу у порівнянні з процесами, при проведенні яких застосовуються додаткові прошарки на основі чистих елементів - міді й срібла. Однак, і в цьому випадку для формування рідкої фази необхідне нагрівання до відносно високих температур, що є небажаним для металів, що з'єднуються.

Як відзначається в патенті US №3145466 [МПК:<sup>8</sup> B23K20/02; 35/00; 35/30, опубл. 1964.08.25] при створенні міцного з'єднання нікелевих сплавів в якості прошарку можуть бути використані такі елементи, як ніобій, ванадій і титан, які утворюють легкоплавкі евтектики з нікелем, а також паладій, що утворює легкоплавкі тверді розчини з нікелем. Недоліком такого підходу, як вже відзначалось вище, є розігрів зони з'єднання до температури, що перевищує температуру плавлення евтектичних сполук, які утворюються в системі нікелю з ніобієм, ванадієм і титаном, або температури плавлення відповідного твердого розчину нікелю з паладієм. Крім того, через відносно невисоку швидкість дифузійного перемішування елементів, що входять до складу проміжного шару і матеріалу, що з'єднується, і залежності швидкості протікання цього процесу від ступеню шорсткості з'єднуваних поверхонь та наявності забруднень, цей процес є важко керованим і вимагає більшого часу витримки зони з'єднання в розігрітому стані.

Контактне плавлення заліза і сталей можливе з вуглецем, кремнієм, берилієм, титаном і цирконієм [Лашко Н.Ф., Лашко С.Ф., «Контактно-реактивна пайка», Сварочное производство, 1969, №11, с. 34-37]. Як вже відзначалось вище, наслідком формування рідкої фази при контактно-

му зварюванні є розігрів зони з'єднання до температур, дещо перевищуючих температуру плавлення евтектичного сплаву системи залізо - вуглець, кремній, берилій, титан і цирконій. Крім того, слід зазначити, що процес формування рідкої фази буде нестабільним і істотно залежатиме від ступеню окислювання порошкового матеріалу.

У патенті US №3145466 [МПК:<sup>8</sup>B23K20/02; 35/00; 35/30, опубл. 1964.08.25] описана технологія одержання з'єднання деталей з нержавіючих мартенситних і аустенітних сталей у вакуумі через фольгу з берилію. Для цього способу характерні ті ж недоліки - нагрівання зони з'єднання до температури, що перевищує температуру плавлення евтектики Fe-Be і нестабільність протікання процесу формування рідкої фази.

У роботі [Anonim, "Electroplating gold Copper for bronze alloy forms strong bond for 400 series stainless", (West Metallwork, v. 20, 1962, N8)] описана методика одержання з'єднання сталевих деталей за допомогою прошарку, що складається з міді і золота, нанесених на з'єднувані поверхні гальванічним способом. У процесі нагрівання контактного плавлення здійснювалося між шарами золота і міді при нагріванні з'єднання до температури 1065°C. Для подібного методу з'єднання основним недоліком є відносно низька швидкість протікання процесу формування рідкої фази і її залежність від ряду факторів, таких, як шорсткість і ступінь окислювання поверхні міді.

У роботі [Legen V.L. "Schweiss u Lot-Zusatz Werkstoffe und ihre Anwendung" (Tech. Rundschau, 1962, v. 54, N19; 1961, v. 53, N5)] описана схема одержання з'єднання деталей з нержавіючої сталі при введенні між з'єднуваними поверхнями прошарку Ni-P. До недоліків такого методу варто віднести, насамперед, нагрівання зони з'єднання до температур, перевищуючих температуру плавлення евтектики Ni-P.

У роботі [Лашко Н.Ф., Лашко С.Ф., «Контактно-реактивна пайка» (Сварочное производство, 1969, №11, с. 34-37)] повідомляється про можливість одержання з'єднань із нержавіючої сталі шляхом нанесення на з'єднувані поверхні гальванічним способом шарів з Cu, Ni і Mn у співвідношенні, що забезпечує утворенням легкоплавких твердих розчинів на основі системи Cu-Ni- Mn. Так само як і в попередньому випадку, зона з'єднання нагрівається до температури, що перевищує температуру плавлення твердого розчину на основі системи Cu-Ni-Mn.

При з'єднанні деталей на основі титану найбільш широко використовуються прошарки з нікелю і міді. Відомо також, що титанові деталі з'єднуювали за допомогою двошарових прошарків міді й нікелю [Гришин В.Л., Лашко С.В., «О некоторых вопросах взаимодействия титана с припоями в процессе пайки», Автоматическая сварка 1966 №6, с. 18-21].

В роботі [Понимаш И.Д., Орлов А.В., Рыбкин Б.В. "Вакуумная пайка реакторных материалов" (М., Энергоатомиздат, серия Физика и Техника ядерных реакторов. Вып. №46, 1995г., 192 с.)] повідомляється про одержання з'єднання деталей із цирконієвого сплаву за допомогою евтектичних прошарків систем Zr-Mn, Zr-Ag, Zr-Sn, Zr-Fe. Так як

і в попередніх випадках, нагрівання зони з'єднання здійснювали до температури, вищої температури плавлення евтектики, що обмежує можливості методу.

У патенті US №4700881 [МПК:<sup>8</sup> B23K35/00; 35/30; 35/00, опубл. 1987.10.20] описаний спосіб дифузійного з'єднання жароміцних сплавів на нікелевій основі через прошарок, що складається з декількох шарів фольги того ж хімічного складу, що й матеріал з'єднуваних деталей, поверхня яких збагачена бором. Нагрівання зони з'єднання до температури, при якій відбувається плавлення збагачених бором ділянок фольги і наступна його витримка при цій температурі приводить до формування з'єднання, вільного від пор. Недоліком такого методу є тривалий час витримки при заданій температурі, яка є необхідною для забезпечення дифузійного перерозподілу бору із зони з'єднання в основний метал. Як наслідок цього процесу зона з'єднання збагачується бором, що може призвести до зниження міцності з'єднання.

У патенті EP №1637270 [МПК:<sup>8</sup> B23K11/00; 20/00; 20/02, опубл. 2006.03.22] описаний процес дифузійного з'єднання деталей за допомогою прошарку з аморфного сплаву. Оскільки для формування аморфних сплавів, як правило, використовуються аморфізуючі елементи, такі як фосфор, вуглець, сірка, кремній та ін., їх попадання в з'єднуваний метал в процесі дифузійного зварювання буде викликати зниження механічних властивостей (особливо пластичності) зварного з'єднання. Недоліком цього методу є також обмежене коло аморфних сплавів, які можна використовувати для цих цілей.

Підсумовуючи викладений вище матеріал, можна констатувати, що кожен із наведених способів дифузійного з'єднання металів із застосуванням того чи іншого виду прошарку супроводжується утворенням рідкої, тобто розплавленої, евтектики (або легкоплавких твердих розчинів). Утворення такої субстанції з одного боку сприяє інтенсифікації дифузійних процесів, але з іншого - негативно позначається на характеристиках міцності.

За прототип запропонованого винаходу прийнятий спосіб дифузійного з'єднання металевих деталей через прошарок, що включає попереднє очищення, механічне шліфування і полірування зварюваних поверхонь деталей, створення між з'єднуваними поверхнями прошарку із шаруватого матеріалу, який складається з металевих шарів чистих різномірних елементів або сплавів на їх основі, з'єднання деталей у збірку, стиснення, нагрівання і витримку у вакуумі при заданій температурі протягом певного часу патент UA №23980, [МПК:<sup>8</sup> C23C14/00, опубл. в Бюл. №4, 2002.04.15].

Відповідно до опису цього винаходу, прошарок створюють із шаруватого матеріалу, утвореного великою кількістю мікрошарів, що чергуються, одна частина яких складається з найбільш легкоплавкого елемента, що входить до складу матеріалу з'єднуваних деталей, а інша частина включає всі інші елементи, що входять до складу з'єднуваних деталей, а співвідношення товщини зазначених мікрошарів вибирають так, щоб склад прошарку в цілому відповідав складу з'єднуваних деталей.

При цьому нагрівання з'єднання здійснюють до температури, близької до температури плавлення шарів з найбільш легкоплавкого компонента, а витримку - при температурі, тиску й часі, які забезпечують утворення між з'єднуваними деталями твердої однорідної зони з'єднання, хімічний склад якої відповідає хімічному складу з'єднуваних деталей. З опису винаходу випливає, що в результаті цього процесу прошарку з мікрошаруватого матеріалу забезпечують формування зони з'єднання, що по хімічному складу відповідає складу матеріалу деталей, що з'єднуються. Разом з тим, даний спосіб не може забезпечити з'єднання деталей зі сплавів на основі легкоплавкого елемента, легovanого більш тугоплавким елементом, або композита, що складається з легкоплавкого компонента (матриця) і компонента, що сприяє зміцненню, на основі тугоплавких елементів або хімічних сполук, щоб не призвести до плавлення матеріалу деталей у зоні з'єднання. Крім того, запропонований спосіб не забезпечує видалення або руйнування окисної плівки на поверхні з'єднуваних деталей, через що ефективність дифузійної взаємодії між матеріалом з'єднуваних деталей і прошарку суттєво знижується.

В основу запропонованого винаходу поставлена задача розширення функціональних можливостей способу дифузійного з'єднання металевих деталей через прошарок шляхом підбору складових елементів прошарку за умови, що елементи здатні формувати евтектичний сплав, до складу якого входить інтерметалева сполука, а температура плавлення нижча за температуру плавлення матеріалу, що з'єднується, оптимізації умов проведення технологічного процесу, зокрема, підбору оптимальної температури нагрівання зони з'єднання при постійно діючих стискаючих зусиллях, необхідних для пластичної деформації матеріалу прошарку в проміжку між поверхнями, що з'єднуються, завдяки чому відбувається інтенсифікація локального розігріву матеріалу прошарку, перехід його в надпластичний стан внаслідок утворення в прошарку гетерофазної структури, яка складається з матриці на основі твердого розчину одного з компонентів та дисперсних інтерметалідних включень, що сприяє інтенсивній пластичній деформації матеріалу прошарку та контактних поверхонь деталей і, як наслідок цього, активізації протікання дифузійних процесів між з'єднуваними поверхнями, дифузії елементів прошарку в основний матеріал та вивільненню площини контакту прошарок-деталь від окисних плівок і перетворенню її в зону об'ємної взаємодії, зміцнену дрібнодисперсними інтерметалідами.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі дифузійного з'єднання металевих деталей через прошарок, що включає попереднє очищення, механічне шліфування і полірування з'єднуваних поверхонь деталей, створення між з'єднуваними поверхнями прошарку із шаруватого матеріалу, який складається з металевих шарів чистих різномірних елементів або сплавів на їх основі, з'єднання деталей у збірку, стиснення, нагрівання і витримку її вакуумі при заданій температурі протягом певного часу, згідно до запропонованого винаходу, шари шаруватого матеріалу,

що чергуються, створюють з елементів та/або сплавів на їхній основі, які в результаті дифузійного перемішування елементів, що входять до складу шарів, утворюють евтектичний сплав, температура плавлення якого нижча не менш ніж на 10°C за температуру плавлення матеріалу з'єднаних деталей, при цьому окремі шари створюють товщиною 10-100нм, а процес нагрівання області з'єднання цих деталей ведуть до температури, що не менш ніж на 10°C нижча за температуру плавлення евтектичного сплаву. При цьому прошарок із шаруватого матеріалу може бути створений у вигляді покриття послідовним осадженням або електронно-променевим випаром і конденсацією у вакуумі шарів, що чергуються, на з'єднувані поверхні однієї або обох з'єднаних деталей. Цей прошарок може бути також створений у вигляді фольги, яку одержують шляхом послідовного осаджування або електронно-променевого випаровування і конденсацією у вакуумі шарів, що чергуються, на підкладку, після чого зняту з підкладки фольгу розміщують між стикувальними поверхнями з'єднаних деталей.

Вказаний вище технічний результат, який досягається в процесі реалізації запропонованого винаходу, обумовлений ознаками, які відрізняють його від ознак подібних технологій, описаних згідно відомого рівня техніки, зокрема, зазначених у винаході, прийнятому за прототип.

Дане технічне рішення забезпечує одержання з'єднань із високим поєднанням механічних характеристик завдяки запобіганню процесів деградації механічних властивостей з'єднаного матеріалу через його нагрівання до підвищених температур і тривалої витримки при цій температурі (як це має місце у відомому винаході).

Досягнення таких характеристик є можливим перш за все завдяки тому, що у запропонованому способі якісний склад та товщина окремих шарів прошарку підбираються таким чином, щоб утворювані ними евтектичний сплав мав температуру плавлення, нижчу температури плавлення основного металу. За таких умов з'єднання деталей відбувається при температурах нагрівання, які нижчі температури плавлення елементів, що входять до складу прошарку, температури плавлення матеріалів, з яких виготовлені з'єднувані деталі, і температури плавлення евтектики на основі елементів, що входять до складу прошарку В результаті нагрівання до температури, яка нижча за евтектичну температуру, рідка фаза, як така, взагалі відсутня (для порівняння - відомі процеси дифузійного зварювання завжди супроводжувались переходом матеріалу прошарку в рідку субстанцію або твердий розчин) Разом з тим, дифузійне перемішування елементів приводить до формування евтектичної структури, яка по суті є гетерофазною. Формування гетерофазної мікроструктури в матеріалі прошарку і активізація дифузійних процесів в сукупності з іншими факторами буде сприяти переходу матеріалу прошарку у надпластичний стан. Під дією прикладеного тиску матеріал прошарку в такому стані буде піддаватися інтенсивній пластичній деформації, що призведе до активації поверхневих шарів деталей, що зварюються, і створить умови для встановлення фізичного контакту між

зварюваними поверхнями. Процес деформації супроводжуватиметься руйнуванням окисних плівок, що містяться на з'єднуваних поверхнях деталей, завдяки захопленню їх інтерметалевими включеннями, які присутні у "витікаючому" прошарку.

Перелік компонент, з яких формуються шари нанощаруватих присадок для дифузійного зварювання, є досить широким. Вибір того чи іншого хімічного складу матеріалу прошарку залежить від виду та фізико-хімічних властивостей матеріалу, який підлягає зварюванню. Основною умовою вибору матеріалу прошарку є його спроможність при дифузійному перемішуванні шарів, що його формують, утворювати евтектичний сплав, температура плавлення якого буде нижчою температури плавлення основного металу. З цієї метою прошарки створюють з шарів, одну частину яких формують на основі елементу, взятого з ряду Al, Ag, Au, Cr, Ce, Co, Cu, Dy, Fe, Hf, La, Mg, Mo, Ni, Nb, Nd, Os, Ti, Re, Zr, Y, V та/або сплавів на їхній основі, а іншу - із одного з елементів, взятого з ряду Al, Ag, Au, B, Ba, Be, Bi, C, Ca, Ce, Co, Cu, Dy, Er, Ir, Fe, Ga, Gd, Ge, Hf, Ho, La, Mg, Mn, Ni, Nb, Nd, Os, Pb, Pd, Pr, Si, Ti, Re, Zr, Zn, Y, Yb, V та/або сплавів на їхній основі, які при дифузійному перемішуванні з елементами, що входять до складу шарів на основі елементів переліченими у першому ряді та/або їх сплавами, утворюють евтектичний сплав.

Технічну сутність винаходу пояснюють приведені креслення й малюнки, де

Фіг.1 представляє схему процесу утворення нероз'ємного з'єднання деталей за допомогою прошарку евтектичного складу в процесі нагрівання зони з'єднання в умовах стискуючих зусиль;

Фіг.2 представляє схему установки для проведення процесу дифузійного зварювання;

Фіг.3 зображує мікроструктуру поперечного перерізу прошарку з нанощароватою мікроструктурою, отриманого на прикладі пошарового осадження міді й алюмінію. Товщина шарів алюмінію (світлі шари) й міді (темні шари) становить 100 і 40нм відповідно;

Фіг.4 зображує мікроструктуру зони з'єднання матеріалу Al-27%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при дифузійному зварюванні за допомогою нанощарового прошарку у вигляді фольги Al/Cu;

Представлений на Фіг.1 процес умовно можна розділити на три стадії: перша стадія - підготовка поверхонь деталей 1 і створення проміжного шару 2 між з'єднуваними частинами, друга - активація контактних поверхонь, що забезпечує формування фізичного контакту, і третя - об'ємна взаємодія між елементами прошарку та поверхнею деталей 3, що забезпечує формування нероз'ємного з'єднання 4.

Вибір матеріалу окремих шарів прошарку був орієнтований на те, щоб температура плавлення його евтектики була меншою температури плавлення основного металу не менш, ніж на 10°C. Саме така різниця температур (у поєднанні з іншими, обумовленими цим технічним рішенням, факторами) є найбільш оптимальною для забезпечення ефективного зварювального процесу. Так, у випадку, коли зварювальний процес буде проводитись із застосуванням прошарку із матеріалу,

температура плавлення евтектичного сплаву якого буде нижчою температури плавлення основного металу менше, ніж на  $10^{\circ}\text{C}$ , - у випадку локального перегріву основний метал може оплавитися, що призведе до деградації його властивостей.

Такий же підхід було прийнято до товщини окремих шарів, яка шляхом численних експериментів була встановлена в межах 10-100нм. Проведені дослідження показують, що швидкість протікання реакції синтезу інтерметалевих включень істотно зростає при зменшенні товщини елементів, які формують нанощарувату структуру прошарку. Тому передбачена запропонованим технічним рішенням товщина шарів матеріалу прошарку буде підсилувати ступінь його локального розігріву. Як свідчать дослідження, саме товщина шарів, яка знаходиться у межах нанорозмірного масштабу - від 10 до 100нм, забезпечує найбільш істотне збільшення швидкості протікання екзотермічної реакції синтезу інтерметалідної компоненти евтектичного сплаву. Відхилення товщини шарів від цього інтервалу в бік збільшення або зменшення негативно позначиться на швидкості протікання цієї реакції в зоні з'єднання.

Згідно винаходу, процес нагрівання деталей ведуть до температури, що не менш ніж на  $10^{\circ}\text{C}$  нижча за температуру плавлення евтектичного сплаву. Така температура нагрівання матеріалу прошарку забезпечує повноту протікання процесу дифузійного перемішування елементів, що формують шарувату структуру прошарку, в результаті чого утворюється гетерофазна структура, яка під дією стискаючих зусиль піддається інтенсивній пластичній деформації, сприяє пластичній деформації контактуючих поверхонь деталей і інтенсифікує протікання дифузійних процесів між прошарком і з'єднуваними поверхнями. Останнє забезпечується тим, що в ході інтенсивної пластичної деформації прошарку, затиснутого між поверхнями, що з'єднуються, площа контакту прошарок-деталь вивільняється від окисних плівок і зникає, перетворюючись в зону об'ємної взаємодії, зміцнену дисперсними інтерметалідами. Нагрівання деталей до температури, що буде менш, ніж на  $10^{\circ}\text{C}$  нижчою температури плавлення евтектичного сплаву, може привести до локального оплавлення прошарку, що негативно позначиться на якості з'єднання.

Таким чином, запропонована температура нагрівання зони зварного з'єднання та використання прошарків із обумовлених винаходом шаруватого матеріалу створюють умови для протікання процесів, що забезпечують формування з'єднання при температурах, які значно нижчі, ніж температури, при яких здійснюються зварювання таких же матеріалів згідно відомих технологій. При цьому зона з'єднання розігривається в умовах щадного режиму, а міцність зварного шва наближається до міцності основного металу за рахунок зміцнення дисперсними включеннями інтерметаліду.

Запропонована технологія здатна забезпечити з'єднання деталей зі сплавів на основі легкоплавкого елемента, легованого більш тугоплавким елементом, або композита, що складається з легкоплавкого компонента і компонента, що його змі-

нює, на основі тугоплавких елементів або хімічних сполук.

Спосіб, що заявляється, здійснюється на установці, представленій на Фіг.2

У вакуумній камері 5 поміж нижнім 6 та верхнім 7 штоками в центруючій обоймі 8 розміщують збірку 9 для зварювання. Збірка 9 складається з двох деталей, поміж яких вкладається прошарок із нанощаруватого конденсату. Зверху від збірки розташований пуансон 10 для прикладення тиску зварювання. Нагрівання деталей здійснюється за допомогою пластинчатих молібденових нагрівачів 11, котрі мають серповидну форму. Утримуються нагрівачі за допомогою мідних водоохолоджуваних кронштейнів 12, зафіксованих на дверцятах вакуумної камери 13.

Спосіб здійснюється наступним чином:

Перша стадія процесу, крім формування прошарку між з'єднуваними поверхнями шляхом введення між ними фольги із шаруватою структурою або нанесення шаруватих покриттів, включає підготовку поверхонь. В процесі підготовки поверхонь з'єднуваних заготовок перед зварюванням (або перед нанесенням на них проміжного шару) їх піддають обробці, що включає механічну обробку поверхонь для зниження їх шорсткості, і наступне їхнє промивання, що забезпечує очищення поверхні від забруднень.

На другій стадії процесу зварювання з'єднання нагрівається із заданою швидкістю до температури, меншої температури плавлення евтектичного сплаву. При досягненні цієї температури в прошарку починаються процеси реакційної дифузії елементів, з яких складаються окремі шари, що призводить до утворення включень інтерметалевого з'єднання, яке входить до складу евтектичного сплаву. Цей процес супроводжується тепловиділенням, що приводить до локального розігріву матеріалу в прошарку і переходу його в надпластичний стан.

На заключній (третьої) стадії процесу зону з'єднання витримують при заданій температурі в умовах стискаючих напруг, що забезпечує повноту протікання дифузійних процесів між з'єднуваними поверхнями і повного або часткового розчинення в основному матеріалі матеріалу прошарку, який лишився в зоні з'єднання.

Вищеописаний винахід може бути краще зрозуміло з нижченаведених прикладів.

#### Приклад 1

Здійснювався ряд експериментів по з'єднанню деталей з композиційного матеріалу на основі сплаву алюмінію АМг5, зміцненого 27%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , температура плавлення якого  $640^{\circ}\text{C}$ . Прошарок виконувався у вигляді нанощаруватої фольги і був отриманий методом пошарового електронно-променевого осадження із шарів, що чергуються - міді й алюмінію (Фіг.3). Товщина шарів елементів у прошарку для міді й алюмінію варювалась. Поверхні, що зварювались, до розміщення в камері піддавалися механічному очищенню і промиванню в ацетоні. Аналогічній обробці піддавалась і фольга. Потім прошарок розміщували між контактуючими поверхнями заготовок. Збірку із двох заготовок, розділених прошарком, розміщували у вакуумній камері між штоками і прикладали тиск до 100МПа.

Після вакуумування камери до тиску  $10^{-3}$  Па нагрівали з'єднання до температур, величини яких були нижчі не менш, ніж на  $10^{\circ}\text{C}$  від евтектичної температури матеріалу прошарку ( $548^{\circ}\text{C}$ ) та проводили витримку при цих температурах протягом 20хв. Нагрівання здійснювали за допомогою пічного пристрою зі швидкістю  $30^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ . Температуру в пічному пристрої вимірювали за допомогою хромель-алюмелевої термопари, спай якої був прикріплений до обойми, у якій розміщувалась збірка. Зразки зі зварними з'єднаннями піддавали випробуванню на розрив ( $\sigma_B$ ). Результати експериментів приведені в таблицях 1 та 2.

В таблиці 1 представлені результати дослідження впливу температури нагрівання з'єднання

на механічні властивості зразків. При цьому для формування з'єднання використовували прошарки товщиною 20мкм, а середня товщина шарів шаруватої структури прошарку залишалася незмінною і складала близько 50нм. З таблиці видно, що найбільш оптимальними є температури нагрівання збірки до  $450\text{...}500^{\circ}\text{C}$ , при яких досягнуто найбільш високі значення міцності дифузійного з'єднання. Порівнюючи температуру плавлення евтектичного сплаву прошарку з температурою нагрівання збірки можна зробити висновок, що найбільш висока міцність з'єднання досягається при нагріванні до температур, які нижчі за температуру плавлення евтектичного сплаву на  $10\text{...}98^{\circ}\text{C}$ .

Таблиця 1

№ п/п	Товщина прошарку, мкм	Температура нагрівання, $^{\circ}\text{C}$	Міцність зварного з'єднання на розтягнення ( $\sigma_B$ ), МПа
1.	20	600	15
2.	20	550	78
3.	20	538	297
4.	20	500	325
5.	20	450	300
6.	20	400	240
7.	20	350	50

Для з'ясування впливу характеристик шаруватої структури прошарку на міцність з'єднання були проведені дослідження, в яких температура нагрівання збірки і товщина прошарку залишалися незмінними, а середня товщина шарів елементів шаруватої структури змінювалася. В таблиці

2 наведені результати механічних випробувань отриманих зразків. Видно, що висока міцність з'єднання досягається при умові, що середня товщина окремих шарів прошарку знаходиться в діапазоні  $10\text{...}100\text{нм}$ .

Таблиця 2

№ п/п	Середня товщина шарів, нм	Температура нагрівання, $^{\circ}\text{C}$	Міцність зварного з'єднання на розтягнення ( $\sigma_B$ ), МПа
1.	5	500	50
2.	8	500	178
3.	10	500	320
4.	50	500	328
5.	100	500	300
6.	120	500	170

На Фіг.4 представлена мікроструктура поперечного перерізу зварного з'єднання, отриманого в результаті експерименту, зазначеного у вищенаведеній таблиці 1 та 2 під №4. Видно, що утворення зварного з'єднання відбувається у твердій фазі, на що вказує відсутність мікроструктурних ознак оплавлення матеріалу і відсутність скупчень із часток  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (зміцнюючого компонента композитного матеріалу), які неминуче виникають при оплавленні композита. Частина матеріалу проміжного шару, що залишилася після видавлювання, внаслідок розвитку дифузійних процесів і дії прикладеної деформації розчиняється. Частково це можна бачити по підвищенню концентрації міді в з'єднуваному матеріалі і по появі виділень  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , які, скоріш за все, є продуктом реакції синтезу в матеріалі прошарку.

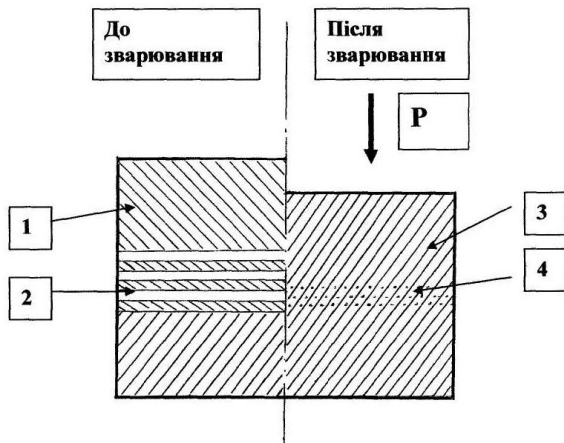
При випробуванні зразку зі дифузійним з'єднанням під №4 на розрив ( $\sigma_B$ ) виявилось, що його

міцність досягає 96% від міцності основного матеріалу.

#### Приклад 2

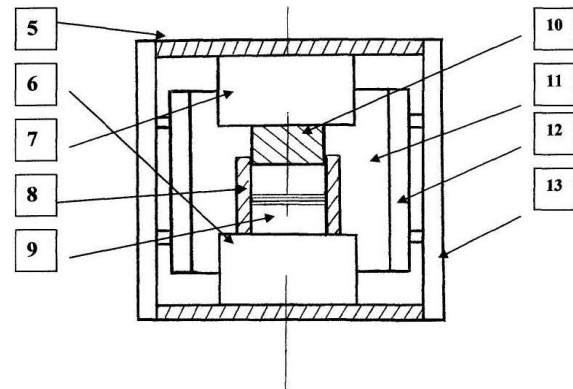
Дифузійне з'єднання у вакуумі титанового сплаву ВТ-1 (температура плавлення  $1660^{\circ}\text{C}$ ) через наночаровий прошарок системи Ti-Cu. Прошарки були виконані, як і у прикладі №1 у вигляді наночаруватої фольги загальною товщиною 12мкм, виготовленою методом парового електронно-променевого осадження. Товщина шарів окремих елементів у прошарку складала для титану - 50нм і для міді - 70нм. За хімічним складом прошарки відповідали евтектичному складу для цієї системи з температурою плавлення ( $T_{\text{евт}}=870^{\circ}\text{C}$ ). Контактні поверхні деталей перед зварюванням зачищали від забруднення та оксидних плівок, шліфували та полірували для зменшення шорсткості контактних поверхонь та промивали в ацетоні Збірку розміщували в

центруючій обоймі (Фіг.2, поз.8), яку виставляли у вакуумній камері (Фіг.2, поз.5) установки. Після прикладення тиску зварювання в вакуумній камері досягали необхідну ступінь розрядження -  $10^{-3}$  Па. Після цього проводили нагрівання збірки зі швидкістю 30град/хв до температури 700°C. З'єднання проводили протягом 20 хвилин. При цьому

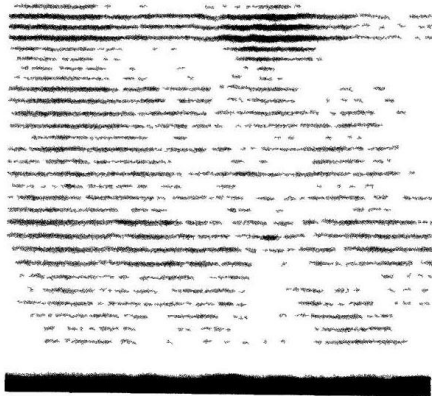


Фіг. 1.

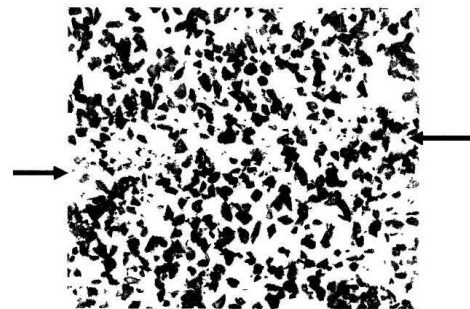
температура нагрівання була меншою за температуру евтектики системи Ti-Cu на 170°C. Обрані режими з'єднання забезпечують отримання зварного з'єднання, мікроструктура якого представлено на Фіг.5. Картина мікроструктури свідчить про відсутність дефектів вздовж межі з'єднання.



Фіг. 2.



Фіг. 3.



Фіг. 4.