

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.791.4

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-4(18)-9-17

Олег Новомлинець, Світлана Ющенко,
Сергій Олексієнко, Євген Половецький, Ігор Алексеєнко

НОВА ТЕХНОЛОГІЯ ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ АЛЮМІНІЮ З МІДЮ ЧЕРЕЗ ПРОШАРОК

Актуальність теми дослідження. Сучасний темп промислового розвитку потребує зниження металоємності конструкцій та одночасного підвищення їхніх технічних характеристик. Використання біметалевих з'єднань у вузлах конструкцій дозволяє поєднати переваги кожного з матеріалів та забезпечити високі експлуатаційні властивості. Одним із найбільш поширених біметалів є пара алюміній-мідь, що широко використовується в різних галузях промисловості. Тому актуальним завданням є пошук нових способів отримання нероз'єднаних з'єднань алюмінію з міддю.

Постановка проблеми. Отримання якісних нероз'єднаних з'єднань різнорідних матеріалів пов'язане з технологічними труднощами, викликаними відмінностями фізико-механічних властивостей матеріалів. Особливо ця проблема ускладнюється в разі необхідності одержання прецизійних з'єднань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Способи зварювання тиском, зокрема електроконтактне, здатні запобігти виникненню вказаних проблем, підвищити міцність з'єднання та досягти прецизійності за рахунок більш низьких температур та меншої тривалості їх дії порівняно зі зварюванням плавленням. У попередніх роботах нами було розроблено технологію прецизійного електроконтактного зварювання алюмінієвих сплавів через тонкий металевий проміжний прошарок.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Недослідженим питанням залишається електроконтактне зварювання алюмінію з міддю через тонкий металевий проміжний прошарок.

Постановка завдання. Дослідження здатності до зварювання тиском алюмінію та міді через проміжний прошарок з алюмінієвої фольги з метою отримання з'єднань з високою міцністю та низьким рівнем деформації.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводили на зразках із алюмінію АД0 та міді М1 з використанням проміжного прошарку із суцільної стрічки алюмінієвої фольги марки АД0. Шляхом експериментів встановлено оптимальний режим електроконтактного точкового зварювання. Якість зварного з'єднання залежить від кількості шарів фольги в проміжному прошарку.

Висновки відповідно до статті. Розроблено технологію зварювання тиском алюмінію та міді через проміжний прошарок з алюмінієвої фольги; встановлено, що використання проміжного прошарку дозволяє збільшити тепловкладення в зону з'єднання та зменшити рівень залишкової деформації; досліджено мікроструктуру зони з'єднання; визначено міцність зварних з'єднань.

Ключові слова: алюміній; мідь; зварювання тиском; проміжний прошарок; тепловкладення; міцність; прецизійність.
Рис.: 3. Табл.: 2. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Однією з найактуальніших проблем машинобудування є зниження металоємності конструкцій при одночасному підвищенні їх технічних характеристик та надійності в роботі.

Розвиток сучасного авіа-, автомобіле-, приладобудування, хімічної, енергетичної та інших галузей промисловості тісно пов'язаний із широким використанням таких металевих матеріалів, які володіють високою міцністю при низьких та високих температурах, великим відношенням міцності до питомої ваги, достатньою опірністю напруженням, що виникають при вібраціях тощо.

Аналіз властивостей існуючих конструкційних матеріалів та матеріалів, що створюються, показує, що жоден із них не відповідає вищевказаним вимогам одночасно. Одним із способів раціонального застосування конструкційних матеріалів є виготовлення їх комбінованими. Тому в багатьох конструкціях оптимальні експлуатаційні властивості можливо отримати, використовуючи біметалеві з'єднання та вузли. У цьому випадку найбільш повно використовуються властивості, які характерні для кожного з металів, що входять до складу комбінованих з'єднань.

Серед таких біметалевих з'єднань значного поширення в різних галузях набуває використання пари мідь-алюміній [1; 2]. Наприклад, в електротехнічній промисловості

застосовують нероз'ємні з'єднання алюмінію з міддю в електропроводах, силових трансформаторах. В енергетиці мідно-алюмінієві вузли використовуються в елементах холодильної та криогенної техніки.

Останнім часом зварювання алюмінію з міддю стає одним із центральних технічних завдань у такій перспективній сфері, як електроавтомобілебудування, зокрема для виготовлення акумуляторів [2].

Вибір цих матеріалів для дослідження зумовлений не лише їх поширеністю у виробництві, а також потребою в отриманні нероз'ємних з'єднань пари мідь-алюміній з необхідними експлуатаційними якостями.

Постановка проблеми. Різномірні з'єднання, що працюють при високих температурах або у спеціальних середовищах, доцільно отримувати за допомогою зварювання. Це зумовлено тим, що механічні з'єднання (заклепочні, болтові тощо) здебільшого є ненадійними в експлуатації та складними за конструкцією. З'єднання, отримані зварюванням, сприяють зниженню металоємності, трудомісткості та підвищенню якості з'єднання. Водночас зварювання різномірних металів і сплавів пов'язане з технологічними труднощами.

Складність зварювання алюмінію з міддю пов'язана з тим, що вони розрізняються за фізичними та механічними властивостями, які обумовлюють як взаємодію металів між собою, так і їх взаємодію з фазами, що утворюються в процесі зварювання. Утворення крихких інтерметалідних фаз у процесі зварювання знижує показники міцності. Задача отримання якісного зварного з'єднання ще більше ускладнюється необхідністю забезпечення прецизійності. Тому актуальним завданням є дослідження та вдосконалення способів зварювання алюмінію з міддю з метою забезпечення високих показників механічної міцності та низького рівня залишкової деформації з'єднань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Способи зварювання плавленням алюмінію та міді пов'язані зі значними труднощами, викликаними внаслідок специфіки фізико-хімічних властивостей цих матеріалів. Додаткова проблема виникає внаслідок наявності на поверхні алюмінію тугоплавкої оксидної плівки Al_2O_3 .

Відомо, що якість зварних з'єднань з різномірних матеріалів суттєво залежить від умов формування інтерметалідів. Вони зберігають високий рівень лише на початковій стадії процесу зварювання, коли відбувається поперечний ріст інтерметалідної фази. Росту інтерметалідів сприяють високі температури нагрівання та тривалий час їх дії. Отримати якісне нероз'ємне з'єднання різномірних металів дозволяють ті способи зварювання, у яких термічний цикл не перевищує температурно-часових умов утворення інтерметалідів [3].

Вказаним вимогам найбільшою мірою відповідають способи зварювання тиском. Серед цих способів досить ефективним є дифузійне зварювання у вакуумі [4; 5], проте цей технологічний процес характеризується значною тривалістю, у результаті чого з'являється висока ймовірність виникнення інтерметалідів. Крім того, висока тривалість знижує продуктивність цього процесу. У багатьох випадках використовується холодне зварювання алюмінію з міддю, однак, по-перше, з'єднання при цьому характеризуються надмірною деформацією, а по-друге, з плином часу такі з'єднання ослаблюються [5; 6].

У порівнянні зі згаданими способами більш технологічним є електроконтактне зварювання, що зумовлюється такими перевагами: висока продуктивність, економічність, незначні залишкові деформації, простота та зручність робочого процесу, схильність до легкої механізації та автоматизації [6; 7]. Проте в багатьох випадках при електроконтактному зварюванні пари алюміній-мідь процес нагрівання міді струмом є досить тривалим внаслідок її високої електропровідності, що може призвести як до утворення інтерметалідів, так і до зниження прецизійності.

Тому необхідним завданням є пошук шляхів забезпечення миттєвого нагрівання металів з метою уникнення формування інтерметалідів та зменшення рівня деформації.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Як показано в попередніх роботах, при електроконтактному зварюванні ефекту прецизійності можна досягти шляхом зменшення об'єму розплавленого металу, зниження зусилля стиску та зростання температури у зоні контакту шляхом короткоімпульсного дозованого вкладення енергії [8; 9]. Водночас інтенсивного тепловиділення без надмірного перегрівання металу можна досягти використанням тонких проміжних прошарків зі зварювального матеріалу або матеріалу з близьким до основного металу хімічним складом [8; 10].

На основі цих досліджень нами було розроблено технологію прецизійного електроконтактного точкового зварювання алюмінію шляхом використання тонкого металевого проміжного прошарку [11], а у подальшому – технологію прецизійного стикового зварювання опором алюмінію через прошарок [12; 13].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У наявних публікаціях на тему зварювання тиском залишається недослідженим електроконтактне зварювання алюмінію з міддю з використанням тонких металевих проміжних прошарків.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка технології електроконтактного точкового зварювання алюмінію та міді з використанням проміжного прошарку у вигляді алюмінієвої фольги.

Виклад основного матеріалу. *Взаємодія алюмінію з міддю.* Специфіка поєднання фізичних властивостей міді та алюмінію така, що в більшості випадків не викликає додаткових ускладнень. Наприклад, різниця у 1,5 рази коефіцієнтів термічного розширення не призводить до небезпеки руйнування з'єднання, оскільки обидва матеріали є високопластичними. Однак значна різниця в температурах плавлення цих металів спричиняє той факт, що алюміній розплавляється раніше, ніж мідь. Відмінність теплопровідності та теплоємності призводить до зміни температурних полів та умов кристалізації металу [14].

Вирішальним ускладнюючим фактором при зварюванні алюмінію з міддю є схильність до утворення хімічних з'єднань. Аналіз діаграми стану системи алюміній-мідь показує, що в цій системі існує ряд стійких (як при кімнатній температурі, так і при нагріванні) інтерметалідів (Al_2Cu , $AlCu$, Al_2Cu_3 , $AlCu_2$, Al_4Cu_9 та ін.), що характеризуються високою твердістю та низькою пластичністю [14].

У порівнянні з поєднанням алюмінію з іншими металами (наприклад, залізом, нікелем) для взаємодії алюмінію з міддю характерні великі швидкості росту прошарків інтерметалідів і мала тривалість латентного періоду. Наявність латентного періоду дозволяє отримати високоякісні з'єднання безпосередньо алюмінію з міддю такими методами зварювання тиском, які використовують відносно невисокі температури при невеликій тривалості дії. Одним із таких способів є електроконтактне зварювання. Використання електроконтактного зварювання дозволяє забезпечити обмежені тепловкладення та температуру зварювання і таким чином запобігти перевищенню латентного періоду [3; 15].

Технологічний процес електроконтактного точкового зварювання (ЕКТЗ). Контактне точкове зварювання ґрунтується на генеруванні джоулевого тепла під час проходження електричного струму між електродами зварювальної машини в металі деталей та на контактних опорах електрод-деталь та деталь-деталь, а також пластичній деформації нагрітого металу [16].

Процес зварювання проводиться у три етапи. На першому етапі відбувається стискання деталей, що зварюються, який викликає пластичну деформацію мікронерівностей у ланцюзі електрод-деталь-деталь-електрод.

Другий етап полягає у ввімкненні імпульсу електричного струму, що призводить до нагрівання металу, його розплавлення в зоні з'єднання та утворення рідкого ядра. По мірі проходження струму ядро збільшується за висотою та в діаметрі до максимальних

розмірів. Відбувається утворення зв'язків у рідкій фазі металу. При цьому продовжується пластичне осадження контактної зони до кінцевого розміру. Стискання деталей забезпечує утворення ущільнюючого поясу навколо ядра, що запобігає виплеску металу.

На третьому етапі процесу відбувається вимкнення струму, охолодження та кристалізація металу, що закінчується утворенням литого ядра. При охолодженні об'єм металу зменшується та виникають залишкові напруження. Для забезпечення кращих умов кристалізації металу стискаюче зусилля знімається з деякою затримкою після вимкнення струму.

Експериментальне дослідження ЕКТЗ алюмінію з міддю. Відпрацювання технології зварювання алюмінію та міді здійснювалося на зразках алюмінію марки АД0 та міді марки М1 у вигляді пластин розміром $1 \times 20 \times 100$ мм. Як проміжний прошарок, для електроконтактного зварювання використовувався технічний алюміній марки АД0 у вигляді суцільної стрічки фольги завтовшки 11 мкм, яка складалася в декілька шарів.

Хімічний склад та фізико-механічні властивості даних матеріалів наведено у табл. 1, 2 [15].

Зварювання проводили на машині для контактного точкового зварювання загального використання типу МТ-1216 (максимальна сила струму 12 кА). Циклограма процесу ЕКТЗ показана на рис. 1 [16].

Таблиця 1

Хімічний склад (мас. %, не більше) матеріалів, що зварюються

Метал	Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti
АД0	99,5	0,02	0,05	0,025	0,3	0,3	0,07	0,1
М1	99,9	0,005	0,001	0,002	0,002	0,002	0,004	0,05

Таблиця 2

Фізико-механічні властивості матеріалів, що зварюються (при $T = 20^{\circ}\text{C}$)

Метал	γ , г/см ³	$\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹	$\rho \times 10^{-8}$, Ом·м	λ , Вт/м·К	E , ГПа	σ_s , МПа	σ_T , МПа	HB , МПа	δ , %
АД0	2,71	24,0	2,92	226	71	80	40	30	15
М1	8,90	16,0	1,75	390	128	200	90	35	45

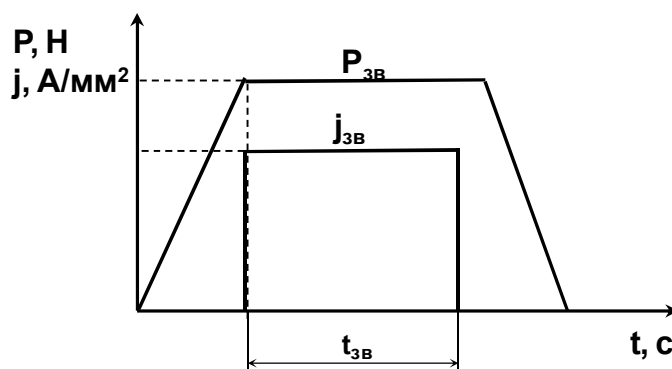


Рис. 1. Циклограма процесу ЕКТЗ:

$P_{зв}$ – стискаюче зусилля; $j_{зв}$ – густина зварювального струму; $t_{зв}$ – час зварювання

Електроконтактне точкове зварювання здійснювали на жорстких режимах: густина струму – 400-450 А/мм², час імпульсу зварювання – 0,1-0,5 с, стискаюче зусилля – 0,8-1 кН. Кількість шарів фольги у проміжному прошарку змінювали від 2 до 10.

Необхідно зауважити, що на вказаних режимах з'єднання алюмінію та міді напряму, без використання прошарку, отримати зварне з'єднання не вдалося.

Шляхом проведення експериментів було визначено оптимальний режим процесу зварювання, що полягає в прикладенні до деталей, що зварюються, тиску $P_{зв}$ величиною

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

28 МПа, пропусканні через деталі короткочасного імпульсу струму густиною $j_{зв}$ 425 А/мм², часі зварювання $t_{зв}$ 0,1 с. Оптимальна кількість шарів фольги у проміжному прошарку – 6.

Металографічні дослідження зварних з'єднань проводились на шліфах за допомогою світлового мікроскопа Neophot-32 та електронного скануючого мікроскопа SEM15 фірми «Philips» (Нідерланди). Електронний мікроскоп оснащений енергодисперсійним рентгенівським аналізатором хімічних елементів LINK фірми «OXFORD» (Англія). Режим роботи електронного мікроскопа: прискорююча напруга – 20 кВ, струм пучка – 40 нА.

Якість зварних з'єднань оцінювали за результатами механічних випробувань на зріз на розривній машині марки РТ-250.

Мікроструктура зварного з'єднання, отриманого на оптимальному режимі через 6 шарів проміжних тонких прошарків, представлена на рис. 2. На фото яскраво виражене зміщення литого ядра в бік деталі з алюмінію, що пояснюється меншими значеннями його тепло- та електропровідності порівняно з міддю. Дослідження мікроструктури показали, що глибина проплавлення металу при використанні 6 шарів фольги становить не більше ніж 10 % товщини металу.

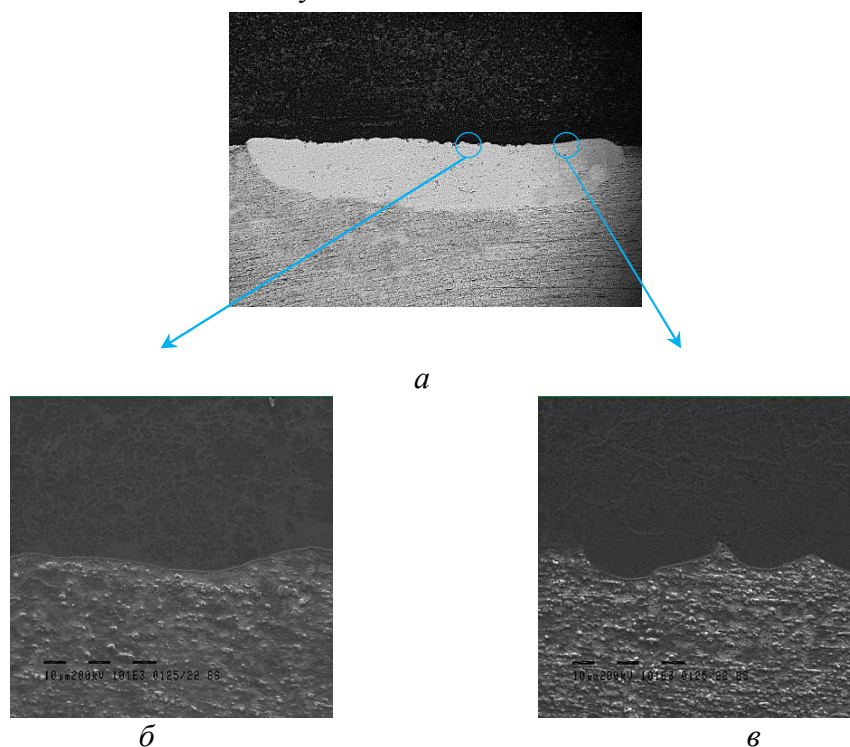


Рис. 2. Мікроструктура зварного з'єднання АД0+М1, отриманого ЕКТЗ ($j = 425$ А/мм²; $P_{зв} = 28$ МПа; $t_{зв} = 0,1$ с), через 6 шарів фольги АД0, оптична мікроскопія, $\times 50$, (а), електронна мікроскопія (б, в)

Варто зазначити, що використання у прошарку більше ніж 6 шарів фольги спричиняє наскрізне проплавлення, що викликане надмірним тепловкладенням у зону з'єднання. Застосування меншої кількості проміжних шарів також виявилось недоцільним, оскільки тепловкладення є недостатнім, а діаметр ядра не відповідає вимогам до номінальних розмірів ($2\delta + 3$ мм, δ – товщина металу).

За допомогою мікрорентгеноспектрального аналізу зварних з'єднань було виявлено, що в зоні з'єднання відсутні сліди інтерметалідних з'єднань, що свідчить про те, що алюміній та мідь не вступають у хімічну взаємодію. Слідів оксидів металів також не виявлено.

На рис. 3 представлена топографія поверхні зламу зварного з'єднання після випробувань на зріз. Встановлено, що діаметр ядра становить від 4,5 до 5 мм.



Рис. 3. Топографія поверхні зламу після випробувань на зріз ($\times 8$)

Міцність зварного з'єднання становить 80-82 % від міцності основного матеріалу (алюмінію АД0). При цьому встановлено, що величина залишкової деформації не перевищує 2 % від початкової товщини деталі. Подальші дослідження в цьому напрямі продовжуються.

Висновки відповідно до статті.

1. Розроблено нову технологію зварювання тиском алюмінію АД0 з міддю М1 через тонкий металевий проміжний прошарок, яка полягає в розміщенні між деталями, що зварюються, прошарку з алюмінієвої фольги марки АД0 товщиною 11 мкм.

2. Встановлено, що ця технологія дозволяє запобігти утворенню інтерметалідних з'єднань алюмінію та міді за рахунок миттєвого нагрівання зони з'єднання.

3. Показано, що запропонована технологія електроконтактного точкового зварювання алюмінію АД0 з міддю М1 через прошарок з алюмінієвої фольги АД0 дозволяє отримати міцність зварних з'єднань на рівні 82 % міцності основного матеріалу при відносній деформації порядку 2 %.

4. Отримані результати можуть бути використані при розробці технологій виготовлення біметалевих зварних з'єднань з інших різномірних матеріалів.

Список використаних джерел

1. Биметаллы / Л. Н. Дмитров и др. Пермь: ПКИ, 1991. 415 с.
2. Kaspar, J., Zimmermann M., Ostwaldt, A., Goebel, G., Standfub, J., Brenner, B. Challenges in Joining Aluminium with Copper for Applications in Electro Mobility. *Materials Science Forum*. 2014. Vol. 783-786. P. 1747-1752.
3. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: в 3 т. Т. 1 / под общ. ред. Н. П. Лякишева. Москва: Машиностроение, 1996. 992 с.
4. Ковшиков Е. К., Маслов Г. А. Новое в технологии диффузионного соединения материалов: Учеб. пособие. Москва: Машиностроение, 1990. 64 с.
5. Банов М. Д., Масаков В. В., Плюснина Н. П. Специальные способы сварки и резки: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования. Москва: Академия, 2009. 207 с.
6. Квасницкий В. В. Специальные способы сварки: Учебное пособие. Николаев: УДМУ, 2003. 437 с.
7. Катаев Р. Ф., Милютин В. С., Близник М. Г. Теория и технология контактной сварки: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 144 с.
8. Новомлинець О., Олексієнко С., Ющенко С., Половецький Є. Прецизійне зварювання тиском алюмінієвих сплавів. *Технічні науки та технології*: науковий журнал. 2017. № 4 (10). С. 67–76.
9. Новомлинець О., Олексієнко С., Ющенко С., Байдала О., Половецький Є. Зварювання тиском алюмінієвих сплавів через модифіковані поверхневі шари. *Технічні науки та технології*: науковий журнал. 2018. № 3(13). С. 123–131.
10. Пат. 117001 UA, МПК51 В23К 20/16. Спосіб електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через прошарок / Харченко Г. К., Олексієнко С. В., Ющенко С. М.,

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Половецький С. В., Прибытько І. О., Нагорна І. В.; заявник і власник Чернігівський національний технологічний університет. № у 2016 13635; заявл. 30.12.2016; опубл. 12.06.2017, Бюл. № 11.

11. Новомлинець О. О. Наукові та технологічні основи отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань зварюванням тиском: дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології» / Донбас. держ. машинобуд. акад. Краматорськ, 2018. 354 с.

12. Ющенко С. М. Розробка технології прецизійного з'єднання алюмінієвих сплавів: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології» / Донбас. держ. машинобуд. акад. Краматорськ, 2018. 169 с.

13. Novomlynets O. O., Oleksiienko S. V., Yushchenko S. M., Bolotov M. G., Nahorna I. V. Application of Resistance Welding Machines for Production of Precision Aluminium Joints. *The 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON): Conference proceedings*. Lviv, 2019. P. 502–506.

14. Рябов В. Р., Рабкин Д. М., Курочко Р. С., Стрижевская Л. Г. Сварка разнородных металлов и сплавов. Москва: Машиностроение, 1984. 239 с.

15. Овчинников В. В., Гуреева М. А. Современные материалы для сварных конструкций: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования. 2-е изд. Москва: Академия, 2016. 304 с.

16. Биковський О. Г., Лутов Д. М., Пінковський І. В. Технологія та обладнання електричного контактного зварювання: навч. посіб. Київ: Техніка, 2001. 240 с.

References

1. Dmitrov, L. N., Kuznetsov, Ye. V., Kobelev, A. G. et al. (1991). *Bimetally [Bimetals]*. Perm: PKI [in Russian].

2. Kaspar, J., Zimmermann M., Ostwaldt, A., Goebel, G., Standfub, J., & Brenner, B. (2014). *Challenges in Joining Aluminium with Copper for Applications in Electro Mobility*. Materials Science Forum, 783-786, 1747-1752.

3. Liakishev, N. P. (Ed.) (1996). *Diagramy sostoianniia dvoynykh metallicheskiikh sistem: spravochnik [Phase diagrams of metal systems: reference book]* (Vol. 1). Moscow: Mashinostroeniie [in Russian].

4. Kovshikov, E. K. (1990). *Novoie v tekhnologii diffuzionnogo soiedinieniia materialov [New in the technology of diffusion joining of materials]*. Moscow: Mashinostroeniie [in Russian].

5. Banov, M. D., Masakov, V. V. & Plusnina, N. P. (2009). *Spetsialnye sposoby svarki i rezki [Special methods of welding and cutting]*. Moscow: Academia [in Russian].

6. Kvasnitsky, V. V. (2003). *Spetsialnye sposoby svarki [Special welding processes]*. Nikolaiev: UDMTU [in Russian].

7. Kataiev, R. F., Miliutin, V. S., Bliznik & M. G. (2015). *Teoriia i tehnoiogiia kontaktnoj svarka [Theory and technology of resistance welding]*. Ekaterinburg: Ural University Publishing house [in Russian].

8. Novomlynets, O., Oleksiinko, S., Yushchenko, S. & Polovetskiy E. (2017). Pretsyziyne elektrokontaktne zvariuvannia aliuminiievykh splaviv [Precision pressure welding of aluminium alloys]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technology*, 4 (10), 67-76 [in Ukrainian].

9. Novomlynets, O., Oleksiinko, S., Yushchenko, S., Baydala O. & Polovetskiy E. (2018). Zvariuvannia tyskom aliuminiievykh splaviv cherez modyfikovani poverhnevi shary [Precision welding of aluminium alloys through modified surface layers]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technology*, 3 (13), 123-131 [in Ukrainian].

10. Kharchenko, G. K., Novomlynets, O. O., Oleksiienko, S. V., Yushchenko, S. M., Polovetskiy, E. V., Prybytko, I. V. & Nahorna, I. V. (2017). Sposib elektrokontaktnoho stykovoho zvariuvannia oporom aliuminiu ta joho splaviv cherez prosharok [The method of electric resistance butt welding of aluminium and its alloys through interlayer]. *Patent № 117001 UA* [in Ukrainian].

11. Novomlynets, O. O. (2018). *Naukovi ta tehnoiohichni osnovy otrymannia pretsyziinykh nerozjemnykh zjednan zvariuvanniam tyskom [Scientific and Technological Fundamentals of Producing Precise, Non-detachable Joints by Pressure Welding]*. (Doctor's thesis). Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk [in Ukrainian].

12. Yushchenko, S. M. (2018). *Rozrobka tehnoiohii pretsyziynoho zjednannia aliuminiievykh splaviv [The development of precision joining technique of aluminium alloys]* (PhD Thesis). Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk [in Ukrainian].

13. Riabov, V. R., Rabkin, D. M., Kurochko, R. S. & Strizhevskaya, L. G. (1984). *Svarka raznorodnyh metallov i splavov [Welding of heterogeneous metals and alloys]*. Moscow: Mashinostroeniie, 1984.

14. Ovchinnikov, V. V., Gurieieva, M. A. *Sovremennyye materialy dlia svarnykh konstruksij [Modern materials for welded structures]*. Moscow: Akademiia [in Russian].

15. Novomlynets, O. O., Oleksiienko, S.V., Yushchenko, S. M., Bolotov, M. G., Nahorna, I. V. *Application of Resistance Welding Machines for Production of Precision Aluminium Joints*, the 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON): Conference proceedings (Lviv, July 2-5, 2019). Lviv, Ivan Franko National University of Lviv.

16. Bykovskiy, O. G., Lutov, D. M. & Pinkovskiy, I. V. (2001). *Tehnolohiia ta obladnannia elektrychnoho kontaktного zvariuvannia [Technology and equipment of electric resistance welding]*. Kyiv: Tekhnika [in Ukrainian].

UDC 621.791.4

*Oleh Novomlynets, Svitlana Yushchenko,
Serhii Oleksiienko, Evgen Polovetskiy, Ihor Alekseienko*

NEW TECHNOLOGY OF PRESSURE WELDING OF ALUMINIUM WITH COPPER THROUGH INTERLAYER

Urgency of the research. *The modern rate of industrial development requires materials consumption lowering and simultaneous increase of technical features. Usage of bimetal joints in structure' units allows combining advantages of each material and providing high operational properties. One of the most widespread bimetals is the pair aluminum-copper. Therefore, the search of new methods of getting permanent joints of aluminum and copper is the actual task.*

Target setting. *The getting of qualitative permanent joints of heterogeneous materials is concerned with technological difficulties, which are produced by difference of physical-mechanical properties of materials. This problem complicates especially when the precision must be obtained.*

Actual scientific researches and issues analysis. *Pressure welding methods, particularly resistance welding, allow avoiding mentioned problems, increasing the strength and achieving precision due to lower temperatures and lower duration of their action compared with fusion welding. In the previous works, we had developed the technology of precision of resistance welding of aluminum alloys through thin metal intermediate layer.*

Uninvestigated parts of general matters defining. *Electric resistance welding of aluminum with copper through thin metal interlayer is still uninvestigated.*

The research objective. *The research of pressure welding of aluminum and copper through interlayer, made of aluminum foil, with the aim of obtaining the joints with high strength and low level of deformation.*

The statement of basic materials. *The research have been carried out on the specimens of aluminum 1050A and copper Cu-ETP with usage of solid band of aluminium foil 1010 as interlayer. By carrying out of experiments the optimal welding conditions of resistance spot welding has been determined.*

Conclusions. *The technology of pressure welding of aluminum and copper through aluminum foil interlayer has been developed; it has been determined that using of interlayer allows to increase of heat input into the welding area and decrease the level of residual deformations; the microstructure of welded zone has been investigated; the strength of welded joints has been determined.*

Keywords: *aluminum; copper; pressure welding; intermediate layer; heat input; strength; precision.*

Fig.: 3. Table: 2. References: 16.

Новомлинець Олег Олександрович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Novomlynets Oleh – Doctor in Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: oonl@ukr.net

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

ResearcherID: F-8166-2014

Scopus Author ID: 56938958300; 6507741249

Ющенко Світлана Михайлівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Yushchenko Svitlana – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: rasssveta@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0863-9020>

ResearcherID: F-7741-2014

Scopus Author ID: 57190373626

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Олексієнко Сергій Владиславович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Oleksiienko Serhii – 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 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: sv.oleks@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5475-4439>

ResearcherID: F-8197-2014

Scopus Author ID: 57190370561

Половецький Євген Вікторович – кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу фізико-хімічних методів дослідження матеріалів, ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України (вул. К. Малевича, 11, м. Київ, 03680, Україна).

Polovetskiy Evgen – PhD in Technical Sciences, senior researcher of the department of physical-chemical investigation methods of materials, The E. O. Paton electric welding institute of the National Academy of Science of Ukraine (11 Malevicha Str., 03680 Kyiv, Ukraine).

E-mail: poloveckiy@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8113-0434>

Researcher ID: U-9135-2017

Scopus Author ID: 57207357916

Алексєнко Ігор Іванович – молодший науковий співробітник відділу фізико-хімічних методів дослідження матеріалів, ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України (вул. К. Малевича, 11, м. Київ, 03680, Україна).

Alekseienko Ihor – junior researcher of the Department of physical-chemical investigation methods of materials, The E. O. Paton electric welding institute of the National Academy of Science of Ukraine (11 Malevicha Str., 03680 Kyiv, Ukraine).

E-mail: alex141274@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2595-1684>