

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

ЮЩЕНКО СВІТЛАНА МИХАЙЛІВНА



УДК 621.791.4

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ПРЕЦИЗІЙНОГО
З'ЄДНАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ**

Спеціальність 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Краматорськ – 2018

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Чернігівському національному технологічному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Чернігів.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Новомлинець Олег Олександрович,
Чернігівський національний технологічний
університет, перший проректор

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Фальченко Юрій В'ячеславович,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
НАН України, завідувач відділу фізико-металургійних
процесів зварювання легких металів та сплавів

кандидат технічних наук, доцент
Гавриш Павло Анатолійович,
Донбаська державна машинобудівна академія,
доцент кафедри підйомно-транспортних машин

Захист відбудеться 30 березня 2018 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.02 Донбаської державної машинобудівної академії за адресою: 84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Академічна (Шкадінова), 72, корп. 2, ауд. 2313.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії за адресою: 84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Академічна (Шкадінова), 72, корп. 1, або за web-адресою: <http://www.dgma.donetsk.ua/zahisti-u-radi-d12.105.02.html>.

Автореферат розісланий 28 лютого 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 12.105.02,
кандидат технічних наук, доцент



С.Л. Міранцов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасна промисловість потребує використання конструкційних матеріалів з високими показниками міцності та пластичності, значною тепло- та електропровідністю, низькою питомою вагою та високою корозійною стійкістю. З цієї точки зору найбільший інтерес представляють алюміній та сплави на його основі, які широко застосовуються у різноманітних конструкціях авіа-, ракето- та суднобудування, автотранспорту, атомної енергетики, хімічної, електротехнічної та електронної техніки. До таких конструкцій, зокрема, належать тонкостінні та корпусні конструкції складної форми.

Складна конфігурація таких конструкцій, невеликі товщини складових елементів, велика кількість з'єднань потребують пошуку та використання найбільш технологічних методів їх виготовлення та одержання якісних нероз'ємних з'єднань у характерних вузлах, оскільки окрім високої міцності з'єднань існує необхідність збереження проектної форми даних виробів. Необхідною вимогою при цьому є забезпечення прецизійності виробів, що характеризується рівнем залишкової деформації до 2 % від початкового розміру виробу.

Через притаманні алюмінію та його сплавам властивості отримання прецизійних з'єднань способами зварювання плавленням та паяння ускладнене необхідністю реалізації складних технологічних процесів.

Серед існуючих способів зварювання алюмінію та сплавів необхідної прецизійності дозволяють досягти способи зварювання тиском, зокрема дифузійне зварювання у вакуумі та, у ряді випадків, електроконтактне зварювання. При цьому отримання нероз'ємних з'єднань з алюмінію та його сплавів значно ускладнюється наявністю тугоплавкої оксидної плівки на поверхні металу, видалення якої перед з'єднанням без використання складних технологій не забезпечує утворення якісного фізичного контакту, що, як наслідок, суттєво погіршує умови для одержання прецизійних з'єднань.

При дифузійному зварюванні наявність вакууму дозволяє уникати надлишкового окислення зони з'єднання, однак термодформаційний цикл процесу зварювання не забезпечує низького рівня деформації через високу пластичність алюмінію та сплавів при високих температурах. Особливо поставлена задача ускладнюється через неможливість використання спеціальної оснастки для обмеження рівня деформації при зварюванні складних за конфігурацією виробів.

Вирішення завдання прецизійного з'єднання алюмінію та сплавів електроконтактним зварюванням ускладнюється внаслідок притаманних їм високих термопластичних властивостей, тепло- та електропровідності. Це, у свою чергу, не дозволяє локалізувати тепловиділення у вузькій зоні контакту, внаслідок чого вироби мають високий рівень залишкової деформації.

У зв'язку з цим необхідним та актуальним завданням є створення нових технологій з'єднання алюмінію та його сплавів способами зварювання тиском на основі розробки засобів інтенсифікації процесів, що обумовлюють утворення з'єднань.

Зв'язок дисертації з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась у рамках держбюджетної науково-дослідної роботи Чернігівського національного технологічного університету на тему «Наукові основи

отримання нероз'ємних з'єднань зварюванням тиском» (номер державної реєстрації № 0112U003008).

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є розробка технологій з'єднання алюмінію та його сплавів способами зварювання тиском з низьким рівнем залишкової деформації виробів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

1. Вивчити термодформаційну кінетику деталей з алюмінію та його сплавів.
2. Дослідити використання проміжних евтектичних прошарків при дифузійному зварюванні у вакуумі алюмінію та його сплавів
3. Розробити засоби інтенсифікації процесу дифузійного з'єднання при використанні питомих зусиль низького рівня.
4. Визначити засоби локалізації тепловиділення у контакті деталей при електроконтактному стиковому зварюванні опором.

Об'єкт дослідження – процес прецизійного зварювання тиском алюмінію та його сплавів.

Предмет дослідження – інтенсифікуючі фактори видалення оксидної плівки при дифузійному зварюванні у вакуумі; фактори, що впливають на тепловиділення при електроконтактному стиковому зварюванні опором.

Методи досліджень. Якість зварних з'єднань оцінювалася за результатами оптичної мікроскопії на оптичних мікроскопах МИМ-8 та Neophot-32 та растрової електронної мікроскопії на скануючому електронному мікроскопі JSM-840 фірми «JEOL». Мікротвердість зварних з'єднань вимірювалася за допомогою мікротвердоміра М400 фірми «LECO». Визначення характеристик шорсткої поверхні деталей перед зварюванням здійснювалося за методикою, розробленою Дьомкіним Н.Б., з використанням профілограм поверхонь, знятих до зварювання на профілографі-профілометрі моделі 201. Механічні випробування зварних з'єднань на розрив та на зріз проводилися на розривній машині УМ-5 з використанням спеціалізованого оснащення. Обробка результатів експериментів здійснювалася за методикою, розробленою Кассандровою О.Н. та Лебедевим В.В., з використанням математичного пакета Mathcad 15. При дослідженні складу проміжного евтектичного прошарку для дифузійного зварювання у вакуумі використовувалися теоретичні основи неорганічної хімії. При дослідженні деформування матеріалів та обробці даних досліджень використовувалися математичний апарат, теоретичний апарат повзучості та пластичності металів, фізико-механічні властивості металів та сплавів. Моделювання процесу нагріву та деформування алюмінієвих сплавів проводилося з використанням скінченно-елементного пакета ANSYS 11.0 (підстава для використання: договір про передачу ліцензованого програмного забезпечення між Чернігівським національним технологічним університетом та ЗАТ «Кадфем Си-Ай-Ес» від 2010 року). Математичні залежності деформації алюмінію від величини та часу дії навантаження одержані з використанням математичного пакету Mathcad 15.

Наукова новизна.

1. На основі дослідження термодформаційної кінетики вперше одержано рівняння повзучості для моделювання деформаційної поведінки виробів з алюмінію АД00 та сплаву АМг5 під дією температури та навантаження. Визначено температурну залежність коефіцієнта Пуассона алюмінію АД00 в інтервалі 293-873 К. Отримані дані дозволяють здійснювати прогнозування величини деформації

виробу з використанням скінченно-елементних програмних комплексів залежно від геометричних характеристик виробу, величини температури, зусиль при зварюванні та тривалості їх дії.

2. Вперше встановлено можливість інтенсифікації процесу дифузійного зварювання на основі електрохімічної активації шляхом використання прошарку системи $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$, що вноситься перед зварюванням між контактними поверхнями, та пропускання електричного струму густиною до $0,2 \text{ А/мм}^2$ в процесі зварювання. Утворення фізичного контакту, що виражається у змочуванні контактуючих поверхонь рідким металевим евтектичним прошарком системи алюміній-кремній, відбувається за рахунок видалення оксидної плівки при утворенні їдкою натрію NaOH та безпосереднього відновлення алюмінію з оксиду парами магнію з виділенням вільного кремнію. За рахунок пропускання струму час контактного плавлення та утворення з'єднання скорочується до 90 с. Модифікація евтектики натрієм, що подрібнює її структуру, та утворення зміцнюючої фази силіциду магнію Mg_2Si забезпечують високий рівень механічних властивостей зварного з'єднання.

3. Вперше встановлено ефективність застосування тонких проміжних прошарків з алюмінієвої фольги для отримання прецизійних нероз'ємних з'єднань при електроконтактному стиковому зварюванні опором алюмінію та його сплавів. Визначено, що утворення зварного з'єднання зі сплаву АД31 відбувається за рахунок внесення суцільної алюмінієвої фольги марки АД0 товщиною 11 мкм у контакт між деталями, що зварюються, у кількості 6-ти шарів, проходження через деталі електричного струму густиною 300 А/мм^2 протягом 0,5-0,7 с та прикладення питомого тиску 8 МПа. Розміщення тонкого проміжного прошарку з декількох шарів фольги дозволяє зосередити тепловиділення у зоні з'єднання внаслідок утворення між шарами фольги та деталями більшої кількості контактних опорів, на яких локалізується виділення теплової енергії значної величини при проходженні електричного струму.

Практичне значення. Розроблено нову технологію дифузійного зварювання алюмінію та його сплавів у вакуумі з використанням рідкого евтектичного проміжного прошарку на основі кремнію, яка дозволяє отримати зварні з'єднання з міцністю при випробуванні на зріз до 90 % від міцності основного матеріалу при деформації виробу до 2-3 %.

Розроблено нову технологію електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через тонкий проміжний прошарок з алюмінієвої фольги. Запропонована технологія дозволяє одержати зварні з'єднання з міцністю на розрив до 95% від міцності основного матеріалу з рівнем деформації виробу до 1-2 %.

Розроблена технологія дифузійного зварювання у вакуумі через прошарок впроваджена у виробництво прецизійних корпусних вузлів спеціального призначення на ПАТ «Чернігівський завод радіоприладів» (м. Чернігів). Дану технологію також апробовано під час дослідно-виробничої перевірки на ДП «Харківське державне авіаційне виробниче підприємство» (м. Харків), за результатами якої підтверджено можливість застосування розробленого технологічного процесу в авіабудівній галузі.

Окремі наукові розробки та практичні рекомендації за результатами дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес Чернігівського національного технологічного університету.

Особистий внесок здобувача. За участю автора були проведені дослідження і розробка засобів інтенсифікації процесу одержання нероз'ємних з'єднань при дифузійному зварюванні у вакуумі, дослідження деформаційної поведінки алюмінію під дією температури та навантаження, вивчення процесів масоперенесення при електроконтактному зварюванні алюмінію. Автором самостійно було одержано аналітичні залежності повзучості алюмінію АД00 та АМг5 під дією температури та навантаження, встановлено температурну залежність коефіцієнта Пуассона для АД00, виконано дослідження електропровідності проміжного прошарку для дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію АД00 та сплаву АМг5, одержано результати досліджень впливу кількості шарів проміжного прошарку на тепловиділення у контакті між деталями при електроконтактному стиковому зварюванні опором алюмінію АД31. Проведення експериментів, обробка, аналіз та узагальнення результатів досліджень виконувалися особисто та за участю співавторів.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 3-й Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2013 р.), на 7-й Науково-практичній конференції молодих учених і спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» (Київ, 2013 р.), на Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі» (Чернігів, 2013 р.), на Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених та студентів «Наукові дослідження молоді – інновації в науці та практиці» (Маріуполь, 2013 р.), на 2-й Міжнародній конференції «Ukraine – EU. Modern Technology, Business and Law. Modern Priorities of Economics. Engineering and Technologies» (Словаччина, м. Кошице, 2016 р.), на 6-й Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2016 р.), на Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі» (Чернігів, 2016 р.), на 36-й Міжнародній конференції «IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)» (Київ, 2016 р.), на 7-й Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 2017 р.), на 9-й Міжнародній конференції молодих учених «Welding and related technologies» (Київ, 2017 р.).

Публікації. За результатами проведених досліджень опубліковано 17 наукових робіт: 5 статей у фахових наукових виданнях, з яких 4 у виданнях, що входять до наукометричних баз даних; 10 у збірниках наукових праць та матеріалів конференцій (матеріали однієї конференції входять до наукометричної бази даних Scopus); отримано 2 патенти України.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і шести додатків. Загальний обсяг дисертації 169 сторінок, з них дисертації без додатків – 155 сторінок, що містить 60 рисунків, 15 таблиць, список використаних джерел включає 158 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі, які необхідно вирішити у процесі досліджень. Визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про апробацію та опубліковані результати досліджень, відображено особистий внесок автора.

Вирішенню поставленого наукового завдання присвячено наступні розділи.

У *першому розділі* проведено аналіз існуючих способів одержання нероз'ємного з'єднання алюмінію та його сплавів. Розглянуто особливості зварювання та паяння алюмінію та його сплавів, у результаті чого зроблено висновок, що необхідною умовою для формування прецизійного нероз'ємного з'єднання алюмінієвих деталей є видалення оксидної плівки та утворення фізичного контакту за короткий проміжок часу безпосередньо у процесі з'єднання. Видалення оксидної плівки з поверхонь перед з'єднанням без використання складних технологій не забезпечує утворення якісного фізичного контакту, таким чином, суттєво погіршуючи умови для одержання прецизійних з'єднань.

Способи зварювання плавленням дозволяють вирішувати лише обмежене коло проблем, що виникають при з'єднанні алюмінію та його сплавів, та не здатні забезпечити достатню міцність та прецизійність і вимагають значного часу на післязварювальну обробку деталей. Для отримання прецизійних виробів з алюмінію використовуються різноманітні способи паяння, однак паяні з'єднання характеризуються невисокою міцністю, необхідністю рівномірного розподілення зазорів між деталями та ретельної підготовки деталей, що робить паяння складним технологічним процесом. Літературний аналіз показав, що найбільш ефективними технологіями для одночасного забезпечення міцності та прецизійності виробів з алюмінію та його сплавів є дифузійне зварювання у вакуумі (ДЗВ) та, у ряді випадків, електроконтактне зварювання (ЕКЗ), що відбуваються при температурах, нижчих за температуру плавлення металу. Над проблемами дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію та сплавів на його основі працювали Казаков Н.Ф., Шоршоров М.Х., Каракозов Е.С., Бачін В.А., Мусін Р.А., Люшинський А.В. та ін. Вивченням способів електроконтактного зварювання алюмінію та його сплавів займалися Гельман А.С., Гуляєв А.П., Орлов Б.Д., Кочергін К.А., Кучук-Яценко С.І., Лебедев В.К. та ін. Однак інформації стосовно дослідження термодформаційної поведінки алюмінію під дією температури і навантаження та аналізу інтенсифікуючих засобів, що обумовлюють утворення з'єднань, у даних роботах недостатньо для оцінки можливості забезпечення потрібного рівня прецизійності зварних виробів.

У розглянутих наукових працях вказується, що в основі утворення нероз'ємного з'єднання алюмінію при ДЗВ лежить активація поверхонь, що з'єднуються, шляхом прискорення процесу утворення фізичного контакту, а при ЕКЗ – локалізація теплової енергії у приконтактній зоні з'єднання. Реалізація вказаних умов в обох випадках досягається шляхом використання додаткових засобів інтенсифікації процесів, що обумовлюють утворення з'єднань. На підставі огляду літературних джерел обґрунтовано доцільність досліджень, визначено мету роботи та сформульовано основні задачі досліджень.

У *другому розділі* наводиться інформація про матеріали та обладнання, що використовувалися для проведення досліджень. Матеріали для досліджень:

технічний алюміній марки АД00 та деформовані алюмінієві сплави марок АД31 та АМг5. Використовувалися зразки розмірами $8 \times 8 \times 10$ мм та стержні діаметрами 6-12 мм. Для приготування рідкого прошарку для дифузійного зварювання у вакуумі застосовувалися насичений розчин силікату натрію Na_2SiO_3 , 2М розчин соляної кислоти HCl та порошок магнію з розміром частинок 25 мкм. При електроконтактному зварюванні як проміжний прошарок використовувалася алюмінієва фольга марки АД0 товщиною 11 мкм.

Зварювання зразків здійснювалося на модернізованій дифузійній установці УВН-2М-1 з радіаційним джерелом нагріву та машині для електроконтактного стикового зварювання МС-802У. Мікроструктура зварних з'єднань оцінювалася на оптичних мікроскопах МИМ-8 та Neophot-32 та скануючому електронному мікроскопі JSM-840. Мікротвердість зварних з'єднань вимірювалася за допомогою мікротвердоміра М400.

У третьому розділі наведено результати дослідження термодформаційної кінетики алюмінію та його сплавів. Встановлено, що використання класичних режимів зварювання алюмінію та його сплавів без використання спеціальної оснастки може призводити до величини деформації на рівні 48-62 %.

Прецизійне з'єднання алюмінію та сплавів на його основі зварюванням тиском потребує незначних питомих зусиль задля забезпечення мінімальної залишкової деформації виробів. Це обумовлено тим, що внаслідок високої пластичності алюмінію при підвищенні температури спостерігається різке зниження його пружних властивостей та міцності від тривалості дії навантаження, що викликані структурними та фазовими перетвореннями матеріалу у часі, починаючи з певного діапазону температур. Крім того, при високих температурах матеріал проявляє нові властивості, зокрема повзучість, що полягає у зміні деформації у часі під дією постійного навантаження. Тому існує необхідність вивчення механічних властивостей та термодформаційної поведінки алюмінію та його сплавів під дією температури і навантаження.

Відомо, що при дослідженні міцності матеріалу в умовах підвищених температур проводять довготривалі випробування та одержують криві повзучості – графічні залежності залишкової деформації від часу при постійних напруженні та температурі. Визначення характеру та величини деформації виробу можливе за умови наявності даних щодо зміни залежно від температури нагріву модуля пружності, коефіцієнта Пуассона, границі текучості та швидкості повзучості матеріалу при заданій температурі залежно від величини навантаження. У той час як відомості про перші три характеристики можна вважати у тій чи іншій мірі відомими, то стосовно повзучості алюмінію, як найважливішої характеристики деформації, у літературі наведено доволі обмежений ряд даних.

З метою вивчення деформаційної поведінки алюмінію було проведено експерименти для виявлення впливу величини та часу дії зусилля стиску на величину деформації алюмінієвих деталей. На рис. 1, 2 представлено одержані криві повзучості $\varepsilon = f(t)$ при дослідженні зразків з алюмінію АД00 та сплаву АМг5 розмірами $8 \times 8 \times 10$ мм на одновісний стиск при температурі 853 К. Використання такої температури обґрунтоване тим, що прецизійне з'єднання алюмінію та його сплавів можливе за рахунок використання проміжних прошарків системи Al-Si, евтектична температура плавлення яких складає значення 850 К.

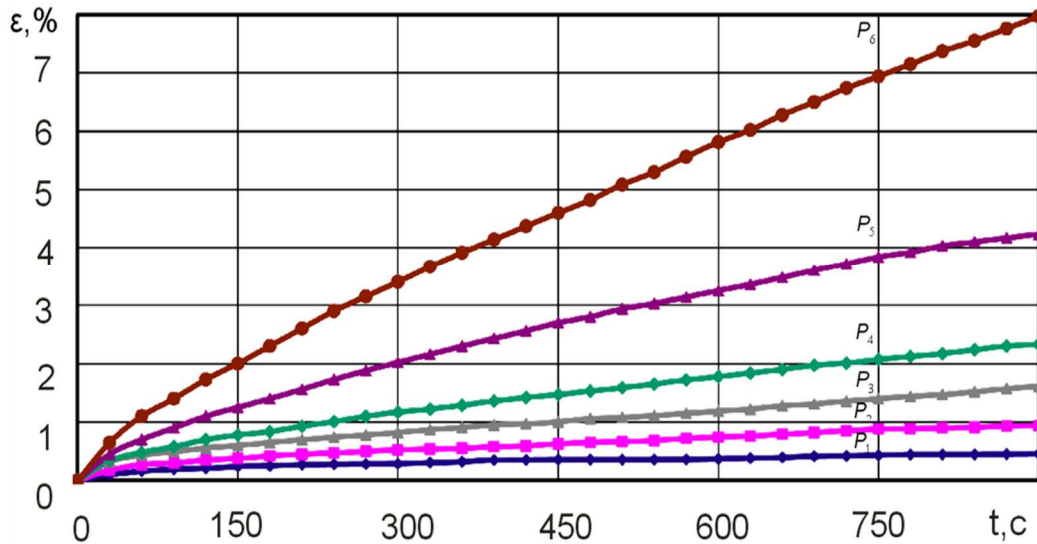


Рис. 1. Криві повзучості для зразка з АД00 при різному тиску, $T=853$ К:
 $P_1 = 0,5$ МПа; $P_2 = 0,75$ МПа; $P_3 = 1$ МПа;
 $P_4 = 1,25$ МПа; $P_5 = 1,5$ МПа; $P_6 = 1,75$ МПа

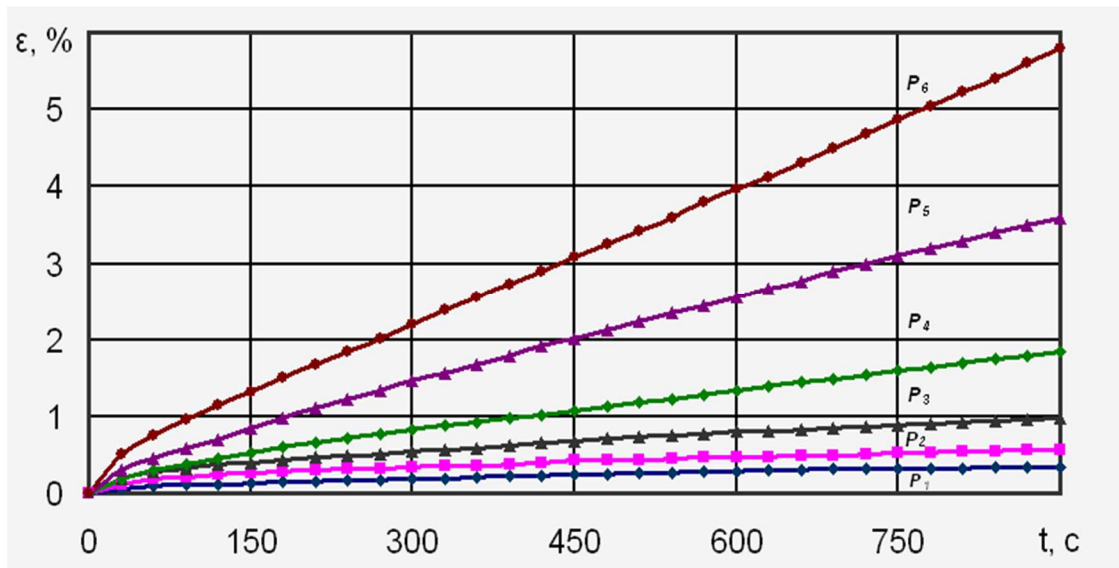


Рис.2. Криві повзучості для зразка з АМг5 при різному тиску, $T=853$ К:
 $P_1 = 0,5$ МПа; $P_2 = 0,75$ МПа; $P_3 = 1$ МПа;
 $P_4 = 1,25$ МПа; $P_5 = 1,5$ МПа; $P_6 = 1,75$ МПа

У результаті обробки одержаних даних було отримано аналітичний вигляд залежностей швидкості повзучості від питомого тиску (законів повзучості) при $T = 853$ К у різному аналітичному вигляді для алюмінію АД00 (табл. 1) та сплаву АМг5 (табл. 2) при діапазонах питомого тиску 0-0,5 МПа та 0,5-1,75 МПа.

Використовуючи дані закони, з'являється можливість спрогнозувати величину деформації виробів з алюмінію АД00 та сплаву АМг5 при термодформаційному навантаженні процесу зварювання. В умовах відсутності експериментальних даних одержані залежності для визначення деформації дозволяють у подальшому використовувати їх для комп'ютерного моделювання деформації виробів у процесі їх виготовлення залежно від геометричних характеристик виробу, величини температури, зусиль при зварюванні та тривалості їх дії.

Закони повзучості у різному математичному вигляді для АД00

Функція повзучості	Питомий тиск, МПа	
	0-0,5	0,5-1,75
Лінійна	$V(P) = 4,4 \cdot 10^{-6} \cdot P - 3,3 \cdot 10^{-8}$	$V(P) = 4,65 \cdot 10^{-5} \cdot P - 2,98 \cdot 10^{-5}$
Експоненціальна	-	$V(P) = 6,23 \cdot 10^{-7} e^{2,68P}$
Гіперболічна	-	$V(P) = \frac{-3,33 \cdot 10^{-5}}{P} + 5,78 \cdot 10^{-5}$
Логарифмічна	-	$V(P) = 4,3 \cdot 10^{-5} \ln(P) + 2,1 \cdot 10^{-5}$
Степенева	-	$V(P) = 1,17 \cdot P^{2,68}$
Показникова	-	$V(P) = 6,23 \cdot 10^{-7} \cdot 14,7^P$
Поліноміальна	$V(P) = 1,6 \cdot 10^{-7} \cdot P^2 + 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot P$	$V(P) = 4,84 \cdot 10^{-5} \cdot P^2 - 6,23 \cdot 10^{-5} \cdot P + 2,26 \cdot 10^{-5}$

Таблиця 2

Закони повзучості у різному математичному вигляді для АМг5

Функція повзучості	Питомий тиск, МПа	
	0-0,5	0,5-1,75
Лінійна	$V(P) = 2,4 \cdot 10^{-7} \cdot P$	$V(P) = 4,37 \cdot 10^{-5} \cdot P - 3,16 \cdot 10^{-5}$
Експоненціальна	-	$V(P) = 2,27 \cdot 10^{-8} e^{4,76P}$
Гіперболічна	-	$V(P) = \frac{-3,04 \cdot 10^{-5}}{P} + 5 \cdot 10^{-5}$
Логарифмічна	-	$V(P) = 4 \cdot 10^{-5} \ln(P) + 1,63 \cdot 10^{-5}$
Степенева	-	$V(P) = 4,09 \cdot 10^{-6} P^{4,9}$
Показникова	-	$V(P) = 2,27 \cdot 10^{-8} \cdot 117,47^P$
Поліноміальна	$V(P) = 2,4 \cdot 10^{-7} \cdot P^2 + 1,6 \cdot 10^{-7} \cdot P$	$V(P) = 5,41 \cdot 10^{-5} \cdot P^2 - 7,8 \cdot 10^{-5} \cdot P + 2,7 \cdot 10^{-6}$

Для отримання об'ємної картини деформування та визначення складових деформації за трьома напрямками необхідно знати коефіцієнт поперечної деформації, або коефіцієнт Пуассона.

Відомо, що коефіцієнт Пуассона можна знайти на основі закону Грюнайзена, що встановлює однакову температурну залежність теплоємності та коефіцієнта теплового розширення і добре виконується для більшості чистих металів та ряду простих з'єднань. Шляхом математичних перетворень закону Грюнайзена було одержано формулу для визначення коефіцієнта Пуассона ν при відомих значеннях модуля пружності E та модуля об'ємного стиску K (для алюмінію $K = 7,5 \cdot 10^{10}$ Па, практично не залежить від температури):

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E}{3K} \right). \quad (1)$$

Розрахунок коефіцієнта Пуассона за формулою (1) проведено на прикладі алюмінію марки АД00. Одержані значення коефіцієнтів наведено у табл.3.

Значення коефіцієнта Пуассона алюмінію АД00 у залежності від температури

Температура, К	293	373	473	573	673	773	873
E, ГПа	71	70	66	61	56	50	44
ν	0,342	0,344	0,353	0,364	0,376	0,389	0,402

Визначена температурна залежність коефіцієнта Пуассона алюмінію АД00 дозволяє у більш повній мірі описати властивості матеріалу та здійснювати моделювання процесу деформування реальних виробів з урахуванням зміни температури.

Четвертий розділ присвячений розробці технології дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію та його сплавів.

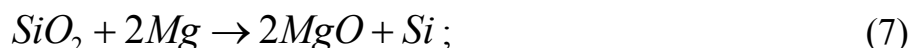
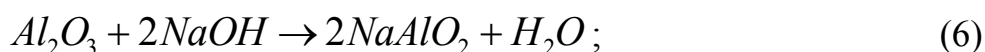
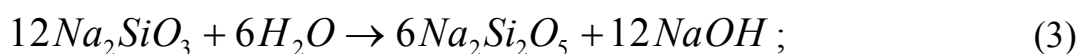
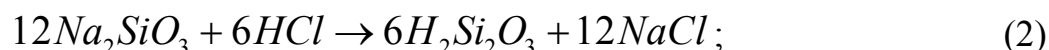
Досліджено використання проміжних прошарків системи Al-Si для дифузійного з'єднання у вакуумі алюмінію та його сплавів. Зниження рівня деформації та підвищення міцності з'єднання досягається активацією поверхонь, що з'єднуються, шляхом інтенсифікації утворення фізичного контакту за рахунок введення між поверхнями проміжних прошарків. Ефективність застосування прошарків на основі легкоплавких елементів або евтектичних сплавів при дифузійному зварюванні у вакуумі пов'язана з формуванням у зоні з'єднання рідкої фази, що полегшує руйнування оксидної плівки, підвищує інтенсивність дифузійного потоку атомів в основний метал як зі сторони з'єднуваних частин, так і з боку прошарку.

Відомо, що використання проміжних прошарків на основі алюмінію дозволяє забезпечити високу міцність та корозійну стійкість з'єднань з температурою плавлення в інтервалі 723÷903 К. Найбільш широко в їх якості використовуються сплави алюмінію з вмістом кремнію 4÷13 % – силуміни, переважно евтектичні, завдяки їх рідкотекучості. Евтектика алюміній-кремній, що утворюється у цих сплавах, має температуру плавлення 850 К та характеризується наявністю грубих кристалів кремнію. Для подрібнення структури та видалення надлишкових кристалів кремнію силуміни модифікують натрієм, завдяки чому кристали кремнію обволікаються плівкою силіциду натрію, що сприяє утворенню більш тонкої структури евтектики та покращенню механічних характеристик сплаву. При додаванні до силуміну магнію у кількості до 2 % спостерігається зміцнення його структури та покращуються умови для відновлення алюмінію з оксидної плівки.

На основі аналізу літературних джерел було припущено, що при дифузійному зварюванні алюмінію у зоні з'єднання потрібно забезпечити утворення евтектики алюміній-кремній та введення натрію та магнію.

Враховуючи викладені вище міркування, як прошарок для дифузійного зварювання алюмінію було використано суміш складу $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$, при якому в зоні з'єднання забезпечується утворення евтектики Al-Si, хлориду натрію NaCl, зміцнюючих фаз Na_2Si та Mg_2Si та створюються додаткові умови для видалення оксидної плівки з поверхні металу. Основою суміші обрано силікат натрію, або "рідке скло", як джерело кремнію та натрію. Для забезпечення комплексу хімічних реакцій по видаленню оксидної плівки до суміші додавалася соляна кислота. Для зміцнення структури з'єднання та забезпечення умов для відновлення алюмінію з оксиду додавався порошок магнію.

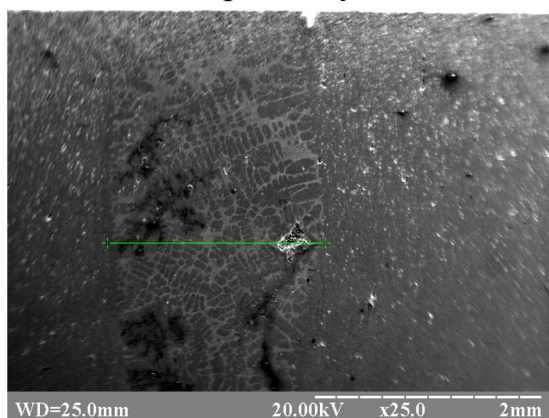
Використовуючи теоретичний апарат неорганічної хімії було визначено, що при використанні запропонованої суміші при дифузійному зварюванні алюмінію та його сплавів у зоні з'єднання відбуваються наступні хімічні реакції:



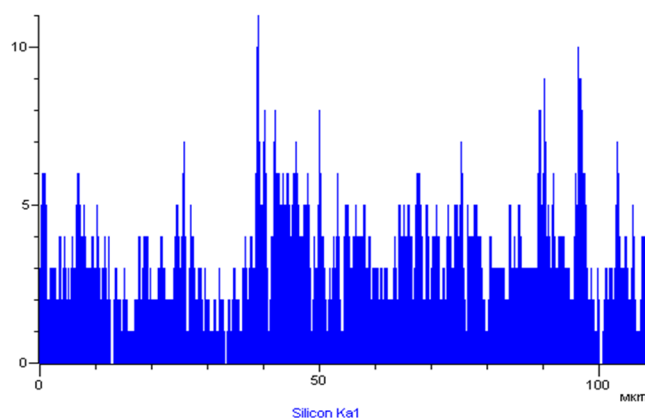
Отже, у процесі зварювання в зоні з'єднання утворюється чистий кремній, який утворює евтектику з алюмінієм, зміцнююча фаза силіциду магнію Mg_2Si та натрій у вигляді силіциду Na_2Si . При реакції силікату натрію з соляною кислотою утворюється хлорид натрію $NaCl$, що сприяє змочуванню оксидної плівки, та гель силікатної кислоти $H_2Si_2O_3$, що дозволяє досягти потрібної консистенції суміші. Таким чином, запропонований рідкий прошарок дозволяє забезпечити легке і технологічне нанесення його на поверхні деталей, що з'єднуються. Утворення у процесі зварювання летючого силану SiH_4 створює додаткові умови для видалення оксидної плівки Al_2O_3 .

Співвідношення компонентів визначалося кількістю кремнію, що виділяється в результаті проходження реакцій (2)-(9) і бере участь в утворенні евтектичного сплаву Al-Si (88,3 % алюмінію та 11,7 % кремнію, мас. %), по відношенню до якого магній вводиться у кількості близько 2 %. Враховуючи молярні маси речовин, було розраховано відсотковий вміст компонентів у суміші (мас. %): 75,3 % силікату натрію, 22,5 % соляної кислоти та 2,2 % порошку магнію.

Результати зварювання показали утворення евтектики Al-Si з характерною структурою силуміну (рис. 3, а) та концентрацією кремнію в евтектиці, що представлена на рис. 3, б. За даними мікрорентгеноспектрального аналізу концентрація елементів безпосередньо у шві складає 87,65Al - 10,87Si - 1,28Mg - 0,2Na (мас. %).



а



б

Рис. 3. Зона з'єднання (а) та розподілення кремнію в евтектиці (б)

Враховуючи топологічні особливості контактування шорстких поверхонь за умови, що їх підготовка здійснюється шабрінням, встановлено, що утворення евтектики лише в об'ємі шорстких поверхонь забезпечується після нанесення запропонованої суміші на них і наступного складання з питомим тиском 0,1 МПа.

Також у роботі було розроблено засоби інтенсифікації дифузійного з'єднання алюмінію та його сплавів через прошарок. Як відомо, прискорення процесу контактного плавлення деталей можна досягти, пропускаючи електричний струм через деталі, таким чином викликаючи, окрім дифузійних потоків, потоки електропереносу. З огляду на електрохімічну теорію, видалення оксиду алюмінію відбувається за рахунок електродного процесу на границі алюмінію з оксидною плівкою, при якому іони алюмінію, відриваючись від поверхні металу, поступово руйнують зв'язок частинок оксидної плівки з металом. Таким чином, електрохімічний процес викликає розрихлення оксидної плівки, відрив її від металу та перехід у шлак.

Силікат натрію як безпосередньо сольовий розчин натрію у розплавленому стані є електролітично дисоційованою системою. Тому виникла необхідність дослідити запропоновану суміш на основі силікату натрію на електропровідність. Дослід виконувався на базі установки для ДЗВ. Схема проведення досліду представлена на рис. 4. Експериментальним шляхом встановлено збільшення електропровідності суміші при підвищенні температури. Одержана у результаті досліджень залежність струму, що проходить через суміш, від температури представлена на рис. 5.

Відомо, що величина електропереносу при густинах струму до $0,2 \text{ А/мм}^2$ є співрозмірною з дифузією при контактному плавленні. У зв'язку з цим було припущено, що прискорення видалення оксидної плівки при дифузійному з'єднанні у вакуумі і, відповідно, зменшення часу дії стискаючих зусиль при високих температурах можливе за рахунок прикладення постійного електричного струму до деталей, що з'єднуються.

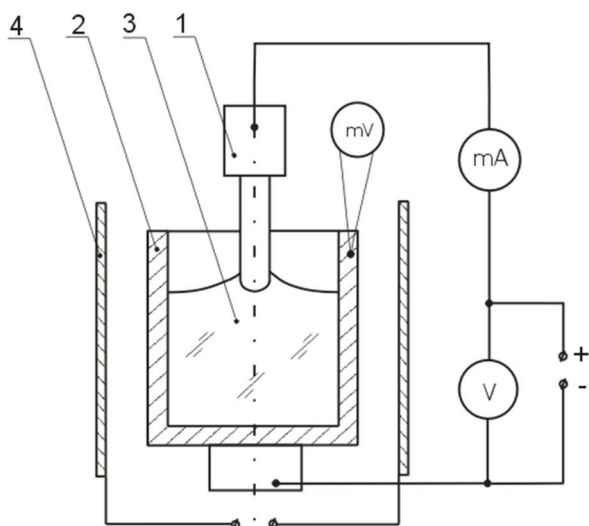


Рис. 4. Схема для дослідження електропровідності суміші:
1 – електрод; 2 – стакан;
3 – суміш $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$;
4 – нагрівач

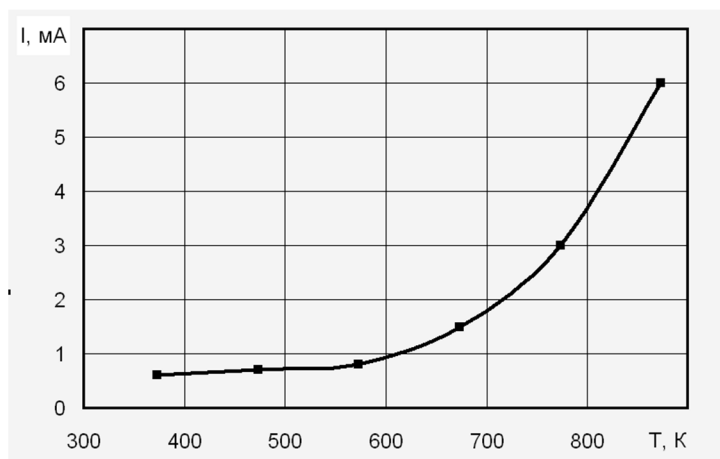


Рис. 5. Залежність електропровідності суміші $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$ від температури

У результаті проведених досліджень запропоновано технологію прецизійного дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію та його сплавів із пропусканням електричного струму та представлено результати досліджень зварних з'єднань. Дослідження процесу зварювання через запропонований прошарок системи $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$ проводились у вакуумній камері модернізованої установки УВН-2М-1 при глибині розрідження $10^{-2}\text{-}10^{-3}$ Па, температурі 853 К, питомому тиску 0,1 МПа, пропусканні електричного струму густиною до $0,2\text{ А/мм}^2$ та часі зварювання 90 с. Навантаження на зразки створювалося за допомогою механічного приводу типу гвинт-гайка через пружину, що дозволило зафіксувати момент утворення рідкого прошарку за показаннями індикатора годинникового типу.

На рис. 6 представлені знімки мікроструктури зони зварних з'єднань з алюмінію АД00 та сплаву АМг5, одержаних за запропонованим режимом зварювання. Методом скануючої мікроскопії встановлено, що евтектична суміш, яка утворюється при виділенні вільного кремнію в результаті проходження описаних вище хімічних реакцій, заповнює зазор в стику та забезпечує якісне формування зони з'єднання. При цьому спостерігаються ділянки зрощування кристалів основного металу. За даними мікрорентгеноспектрального аналізу концентрація елементів безпосередньо у шві (спектр 1 на рис. 6, а) складає 92,83Al - 5,62Si - 1,4Mg - 0,15Na (мас. %).

На прикладі сплаву АМг5 результати показали, що у залежності від термодформаційного циклу можна одержати з'єднання різних типів. В одному випадку зварний шов утворюється в результаті зрощування вершин кристалів та перехідних зон при майже повному видавлюванні рідкої фази зі стику (рис. 6, б); в другому випадку шов як такий відсутній, а в місцях відсутності прошарку спостерігаються спільні зерна, які виникли в результаті схоплення випуклих ділянок мікрорельєфу, де утворились ювенільно чисті поверхні після повного видавлювання прошарку зі стику (рис. 6, в).

У результаті використання розробленої технології одержано якісні прецизійні зварні з'єднання з алюмінію АД00 та сплаву АМг5 з високими показниками міцності. У табл. 4 наведені узагальнені результати механічних випробувань на зріз (τ – міцність основного металу, τ' – міцність зварного з'єднання) та рівень відносної залишкової деформації ε .

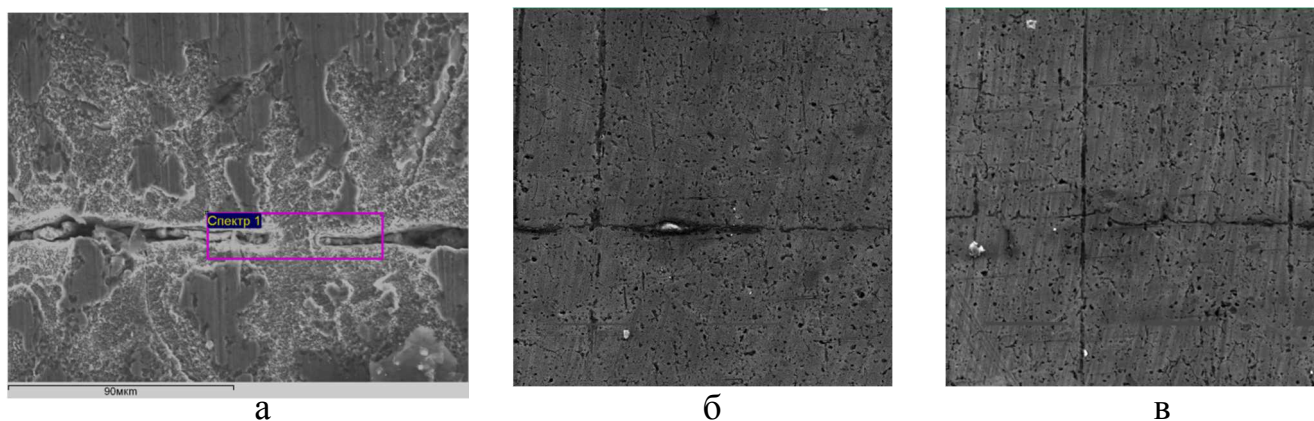


Рис. 6. Мікроструктура зварних з'єднань: а – АД00, б, в – АМг5
(растрова електронна мікроскопія)

**Результати механічних випробувань та рівень деформації
зварних зразків, отриманих ДЗВ**

Марка сплаву	τ , МПа	τ' , МПа	$(\tau'/\tau) \cdot 100\%$	ε , %
АД00	62	53-56	85-90	2-3
АМг5	240	215-217	89-90	2-2,5

П'ятий розділ присвячено розробці технології електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів. Наведено результати досліджень особливостей формування з'єднань алюмінію та його сплавів при електроконтактному зварюванні через тонкі проміжні алюмінієві прошарки та факторів, що впливають на тепловиділення у зоні контакту деталей.

Відомо, що прецизійне електроконтактне зварювання характеризується залишковою пластичною деформацією до 2 % від товщини (або діаметра) деталі. Необхідною умовою, що забезпечує утворення прецизійного з'єднання при електроконтактному зварюванні, є зосередження тепловиділення у зоні з'єднання та збільшення опору у контакті деталь-деталь. Саме контактний опір між деталями є ключовим фактором у нагріві деталей при електроконтактному зварюванні. Контактний опір поверхні деталей залежить від стану поверхні та зварювального тиску і у 2-3 рази перевищує опір самих деталей.

Завдання одержання прецизійного з'єднання алюмінію та його сплавів електроконтактним зварюванням суттєво ускладнюється внаслідок притаманних їм високих термопластичних властивостей, тепло- та електропровідності. Це, у свою чергу, перешкоджає локалізації тепловиділення у вузькій зоні контакту, внаслідок чого виробу мають високий рівень залишкової деформації.

Аналіз літератури показав, що одним із засобів локалізації тепловиділення у контакті деталей і, відповідно, зменшення деформації виробів, при електроконтактному зварюванні алюмінію та його сплавів є використання тонких проміжних прошарків з алюмінієвої фольги. Розміщення такого прошарку з декількох шарів дозволяє зосередити тепловиділення у зоні з'єднання внаслідок утворення між прошарком та деталями більшої кількості контактних опорів, на яких локалізується виділення теплової енергії значної величини при проходженні електричного струму. Це, у свою чергу, дозволяє збільшити сумарний контактний опір, температуру в контакті деталь-деталь, зменшити час нагріву та рівень залишкових деформацій за рахунок зниження об'єму розплавленого металу та утворення зв'язків між матеріалом проміжного шару і основним металом.

На основі вище викладених міркувань було припущено, що ефективним засобом для локалізації тепловиділення у вузькій приконтактній зоні при електроконтактному стиковому зварюванні може бути розміщення між деталями, що зварюються, декількох шарів алюмінієвої фольги, оскільки саме опір поверхні металу перевищує його власний опір. Використання проміжних прошарків з алюмінію, по-перше, дозволяє зосередити тепловиділення у вузькій приконтактній зоні деталей, по-друге, не призводить до значної зміни хімічного складу та властивостей перехідної зони.

Для підтвердження ефективності запропонованого засобу інтенсифікації тепловиділення були проведені експериментальні дослідження зі стикового ЕКЗ опором алюмінію марки АД31 на циліндричних зразках діаметрами 6-12 мм. Як проміжний прошарок використовувалися шари алюмінієвої фольги марки АД0

товщиною 11 мкм. Було проведено дослідження з кількістю шарів фольги від 1-го до 8-ми. Слід відмітити, що з'єднання алюмінієвих зразків напряду, без використання проміжного прошарку, не відбулося.

Процес зварювання проводився на універсальній машині для електроконтактного стикового зварювання МС-802У. Експериментальним шляхом було визначено оптимальний режим процесу зварювання, при якому через деталі проходить короточасний імпульс струму густиною 300 А/мм^2 , прикладається тиск величиною 8 МПа, час зварювання становить 0,5-0,7 с.

На рис. 7 зображено знімки мікроструктури зварних з'єднань, одержаних на оптимальному режимі. Як видно з представлених результатів, суцільна зона взаємного розплавлення утворюється при використанні 6-ти шарів прошарку. У випадку застосування 2-х та 4-х шарів зона взаємного розплавлення містить дефекти, що, очевидно, свідчить про недостатню кількість виділеної теплової енергії у стику.

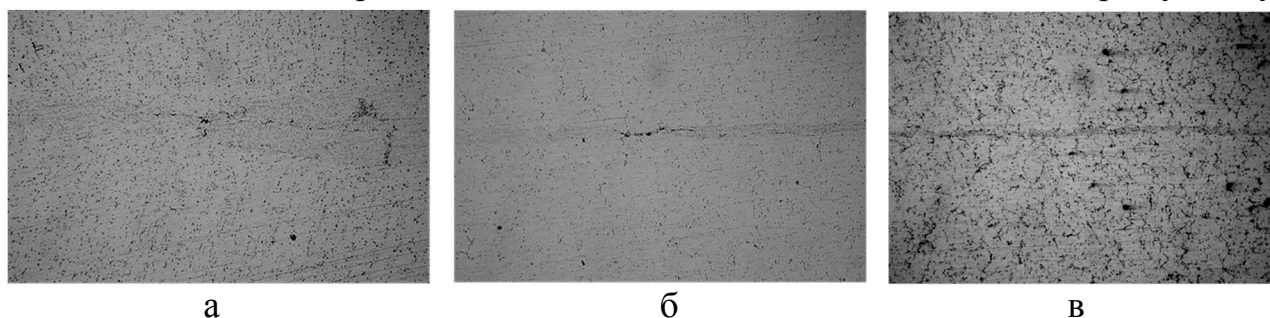


Рис. 7. Мікроструктура зварних з'єднань, одержаних ЕКЗ опором (АД31): а – через 2 шари фольги, б – через 4 шари фольги, в – через 6 шарів фольги (оптична мікроскопія, $\times 250$)

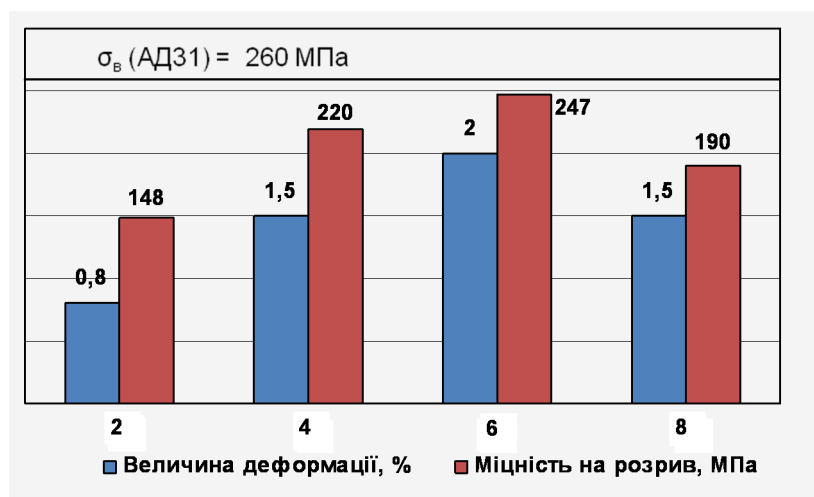


Рис. 8. Гістограма залежності деформації та міцність на розрив зварного зразка з АД31 від кількості шарів проміжного прошарку ($j = 300 \text{ А/мм}^2$; $p = 8 \text{ МПа}$; $t = 0,5-0,7 \text{ с}$)

Результати показали, що величина деформації для всіх трьох випадків використання фольги знаходиться у допустимих межах прецизійності. Однак міцні зварні з'єднання одержано при використанні проміжного прошарку із 4-х та 6-ти шарів алюмінієвої фольги, а у випадку 6-ти шарів міцність з'єднання досягає 95 % від міцності основного металу σ_B .

На основі отриманих даних можна зробити висновок, що вибір оптимальної кількості шарів у кожному конкретному випадку залежить насамперед від густини струму та, відповідно, від кількості теплової енергії, яка генерується на контактних опорах прошарків. Необхідно відмітити, що окрім механічних випробувань, це

підтверджується також і результатами досліджень проміжних прошарків з алюмінієвої фольги на явище масоперенесення, проведених сумісно з інститутом металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, які показали, що при точковому електроконтактному зварюванні сплаву АМц коефіцієнт масоперенесення при зварюванні через 4 шари на 2-3 порядки вище, ніж при використанні 2-х та 6-ти шарів.

Після зварювання було проведено вимірювання мікротвердості зварного з'єднання зі сплаву АД31, отриманого на оптимальних режимах через 6 шарів алюмінієвої фольги (рис. 9). Вимірювання проводилися методом Віккерса при навантаженні 0,1 Н на площу поверхні пірамідального відбитка.

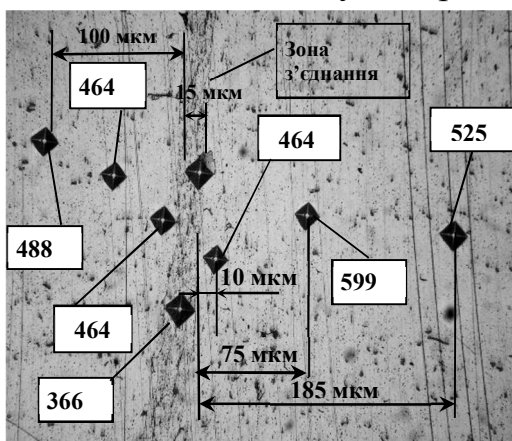


Рис. 9. Мікротвердість зварного з'єднання зі сплаву АД31, МПа $\times 500$

Як видно з представленого рисунку, мікротвердість зони контакту на 25-30 % менше, ніж мікротвердість основного матеріалу. Це свідчить про те, що метал зварного шва більш пластичний, ніж оточуючий його метал. Таким чином, при невеликій його ширині в роботу по утворенню шийки при розтягу зразка втягується більш міцний основний метал. Отже, статична міцність з'єднання забезпечується.

Таким чином, відповідно до отриманих у дисертації результатів, розроблено нові технології прецизійного з'єднання алюмінію та його сплавів способами зварювання тиском, які дозволяють отримати зварні з'єднання з міцністю на рівні 90-95 % від міцності основного металу та рівнем деформації виробів до 2-3 %.

Розроблена технологія дифузійного зварювання у вакуумі через проміжний евтектичний прошарок апробована при виготовленні прецизійних корпусних вузлів спеціального призначення з алюмінієвого сплаву АМцМ на ПАТ "Чернігівський завод радіоприладів", м. Чернігів (рис. 10).



Рис. 10. Зовнішній вигляд зварного корпусного вузла спеціального призначення

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення наукового завдання, що виявляються у розробці технологій прецизійного нероз'ємного з'єднання тиском алюмінію та його сплавів з високими показниками міцності.

1. Досліджено термодформаційну кінетику, одержано рівняння повзучості для алюмінію АД00 та сплаву АМг5 та визначено температурну залежність коефіцієнта Пуассона алюмінію АД00 в інтервалі температур 293-873 К. Отримані дані дозволяють здійснювати прогнозування величини деформації виробу з використанням скінченно-елементних програмних комплексів залежно від геометричних характеристик виробу, величини температури, зусиль при зварюванні та тривалості їх дії.

2. Внесення у контакт між деталями суміші складу $75,3\text{Na}_2\text{SiO}_3 - 22,5\text{HCl} - 2,2\text{Mg}$ (мас. %) при дифузійному зварюванні у вакуумі алюмінію АД00 та сплаву АМг5 дозволяє отримувати з'єднання за рахунок утворення евтектичного сплаву системи Al-Si. Модифікація евтектики натрієм, що подрібнює структуру евтектики, та утворення зміцнюючої фази Mg_2Si забезпечують високий рівень механічних властивостей зварного з'єднання.

3. Ефективним засобом інтенсифікації процесу дифузійного зварювання у вакуумі є пропускання через деталі, що зварюються, постійного електричного струму густиною $0,2 \text{ А/мм}^2$, що дозволяє скоротити час утворення з'єднання до 90 с.

4. Розроблено технологію дифузійного зварювання у вакуумі алюмінію та його сплавів через прошарок, яка полягає у складанні деталей та їх фіксації в нагрівачі вакуумної камери, створенні розрідження $10^{-2} - 10^{-3} \text{ Па}$, нагріванні до температури 853 К, прикладенні питомого тиску $0,1 \text{ МПа}$, пропусканні електричного струму густиною $0,2 \text{ А/мм}^2$, часі зварювання 90 с та охолодженні виробу.

5. Міцність зварних з'єднань на зріз з алюмінію марок АД00 та АМг5, отриманих дифузійним зварюванням у вакуумі, складає 53-56 МПа та 215-217 МПа відповідно, що складає до 90% від міцності основного матеріалу при деформації виробу до 2-3% від початкової висоти деталей.

6. Встановлено ефективність використання тонких проміжних багатошарових прошарків з алюмінієвої фольги для отримання прецизійних з'єднань при електроконтактному стиковому зварюванні опором алюмінію та його сплавів. Розміщення тонкого проміжного багатошарового прошарку дозволяє зосередити тепловиділення у зоні з'єднання внаслідок утворення між шарами фольги та деталями більшої кількості контактних опорів, на яких локалізується виділення теплової енергії значної величини при проходженні електричного струму.

7. Розроблено технологію електроконтактного стикового зварювання опором алюмінієвого сплаву АД31. Визначено оптимальний режим зварювання: густина струму 300 А/мм^2 , час зварювання 0,5-0,7 с, тиск зварювання 8 МПа, кількість проміжних шарів алюмінієвої фольги марки АД0 товщиною 11 мкм – 6 шарів. Показано, що міцність на розрив зварних з'єднань зі сплаву АД31 становить 95 % від міцності основного металу з величиною деформації не більше 2 % від початкового діаметру деталі.

8. На основі комплексу проведених досліджень розроблено технологію прецизійного зварювання тиском алюмінію та його сплавів стосовно виготовлення прецизійних корпусних вузлів спеціального призначення.

Основний зміст роботи відображено в публікаціях:

Статті у наукових фахових виданнях та виданнях, внесених до наукометричних баз даних:

- [1] С. В. Олексієнко, О. М. Савченко, та С. М. Ющенко «Флюсове видалення оксидних плівок при паянні алюмінію та сплавів на його основі (літературний

- огляд)», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, № 1 (63), С. 119-124, 2013. [фахове видання] (0,5 друк.арк.)
- [2] С. В. Олексієнко, Р. А. Куликовський, В. О. Мартиненко, та **С. М. Ющенко** «Спосіб реактивно-флюсового паяння алюмінію», *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, № 2, С. 84-87, 2013. [фахове видання] (0,25 друк.арк.)
- [3] О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, **С. М. Ющенко**, та В. О. Мартиненко «Дослідження деформаційної кінетики алюмінію при високих температурах», *Технічні науки та технології*, № 2 (2), С. 67-72, 2015. [міжнародна наукометрична база даних eLIBRARY.RU, фахове видання] (0,3 друк.арк.)
- [4] В. Мазанко, О. Новомлинець, С. Олексієнко, та **С. Ющенко**, «Дослідження процесів масоперенесення у процесі прецизійного електроконтактного зварювання алюмінію», *Технічні науки та технології*, № 2 (8), С. 75–81, 2017. [міжнародні наукометричні бази даних Index Copernicus, ResearchBib, Base, WorldCat, CrossRef, фахове видання] (0,3 друк.арк.)
- [5] О. Новомлинець, С. Олексієнко, **С. Ющенко**, та Є. Половецький «Прецизійне зварювання тиском алюмінієвих сплавів», *Технічні науки та технології*, № 4 (10), С. 67-76, 2017. [міжнародні наукометричні бази даних Index Copernicus, ResearchBib, Base, WorldCat, CrossRef, фахове видання] (0,6 друк. арк.)

Опубліковані праці апробаційного характеру:

- [6] С. В. Олексієнко, **С. М. Ющенко** «Електрохімічна активація при паянні алюмінію та його сплавів силумінами» на *III Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧДТУ, 2013, С. 117. (0,1 друк.арк.)
- [7] С. В. Олексієнко, О. А. Новомлинець, И. А. Прибытько, и **С. М. Ющенко**, «Способ прецизионного соединения алюминия и его сплавов» на *VII Науково-технічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Зварювання та споріднені технології»*, Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2013, С. 50. (0,15 друк.арк.)
- [8] С. В. Олексієнко, **С. М. Ющенко** «Спосіб паяння алюмінію та сплавів на його основі» на *Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі»*, Чернігів: ЧДТУ, 2013, С. 111-113. (0,15 друк.арк.)
- [9] С. В. Олексієнко, **С. М. Ющенко** «Технологія з'єднання алюмінію та його сплавів через прошарок при дії постійного електричного струму» на *Науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Наукові дослідження молоді – інновації в науці та практиці»*, Маріуполь: ПГТУ, 2013, С. 107-109. (0,15 друк.арк.)
- [10] S. V. Oleksienko, O. O. Novomlynets, and **S. M. Yushchenko** «Diffusion bonding technique concerning production of microchannel heat exchangers» in *IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, 2016, P. 57–60. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7493009>. (0,2 друк.арк.)
- [11] О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, **С. М. Ющенко**, та Т. В. Ганєєва, «Досвід і перспективи виробництва мікроканальних теплообмінників», на *VI Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення*

якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016)», Чернігів: ЧНТУ, 2016, С. 261–262. (0,1 друк.арк.)

- [12] **С. М. Ющенко** «Мікроканальні теплообмінники: особливості конструкції та виготовлення» на *Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі»*, Чернігів: ЧНТУ, 2016, С. 12-14. (0,15 друк.арк.)
- [13] О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, та **С. М. Ющенко**, «Способи зварювання тиском алюмінієвих сплавів з обмеженням рівня деформації», in *II International Scientific-practical Conference «Ukraine – EU. Modern technology, business and law»*, Slovak Republic, Bratislava, 2016, P. 371–373. (0,15 друк.арк.)
- [14] В. Ф. Мазанко, О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, та **С. М. Ющенко**, «Особливості дифузійної взаємодії при електроконтактному зварюванні алюмінію» на *VII Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, Чернігів: ЧНТУ, 2017, С. 70. (0,1 друк.арк.)
- [15] О. О. Novomlynets, S. V. Oleksiienko, V. F. Mazanko, and **S. M. Yushchenko** «The investigation of mass-transfer processes during electric resistance welding of aluminium» in *XI International conference of young scientists «Welding and related technologies»*, Kyiv, 2017, P. 298. [Online]. – Available: http://wrtys.com.ua/2017/wp-content/uploads/Paton_Proceedings_2017_Small_New.pdf. (0,05 друк.арк.)

Патенти:

- [16] С. В. Олексієнко, **С. М. Ющенко**, та О. О. Новомлинець, «Спосіб прецизійного дифузійного з'єднання алюмінію та його сплавів», *Патент № 94095 Україна*, Опубл. 27.10.2014 р., Бюл. № 20.
- [17] Г. К. Харченко, О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, **С. М. Ющенко**, Є. В. Половецький, І. О. Прибитько, та І. В. Нагорна, «Спосіб електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через прошарок», *Патент № 117001 Україна*, Опубл. 12.06.2017 р., Бюл. № 11.

АНОТАЦІЯ

Ющенко С.М. Розробка технології прецизійного з'єднання алюмінієвих сплавів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології». – Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2018 р.

Дисертація присвячена розробці технологій одержання прецизійних нероз'ємних з'єднань алюмінію та його сплавів. Необхідною умовою прецизійності з'єднання є забезпечення рівня залишкової деформації кінцевого виробу до 2 % від початкового розміру. Способи зварювання плавленням та паяння дозволяють вирішувати лише обмежене коло проблем, що виникають при з'єднанні алюмінію та його сплавів, та не здатні комплексно забезпечити достатню міцність та прецизійність виробів. Серед існуючих способів зварювання алюмінію та сплавів прецизійності дозволяють досягти способи зварювання тиском, зокрема дифузійне зварювання у вакуумі (ДЗВ) та, у ряді випадків, електроконтактне зварювання (ЕКЗ). При цьому отримання нероз'ємних з'єднань з алюмінію та його сплавів значно ускладнюється наявністю тугоплавкої оксидної плівки на поверхні металу, видалення якої перед з'єднанням без використання складних технологій не забезпечує утворення якісного фізичного

контакту, що суттєво погіршує умови для одержання прецизійних з'єднань. В основі утворення нероз'ємного з'єднання алюмінію при ДЗВ лежить активація поверхонь, що з'єднуються, шляхом прискорення процесу утворення фізичного контакту, а при ЕКЗ – локалізація теплової енергії у приконтатній зоні з'єднання. Розроблено технологію дифузійного зварювання алюмінію та його сплавів у вакуумі з використанням рідкого евтектичного проміжного прошарку на основі кремнію. Розроблено технологію електроконтактного стикового зварювання опором алюмінію та його сплавів через тонкий проміжний прошарок з алюмінієвої фольги.

Ключові слова: алюміній, прецизійне з'єднання, дифузійне зварювання у вакуумі, електроконтактне стикове зварювання опором, оксидна плівка, фізичний контакт, проміжний прошарок, пружні характеристики, пластичність, повзучість, рівень деформації, міцність з'єднання.

АННОТАЦІЯ

Ющенко С.М. Разработка технологии прецизионного соединения алюминиевых сплавов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06 «Сварка и родственные процессы и технологии». – Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск, 2018 г.

Диссертация посвящена разработке технологий получения прецизионных неразъемных соединений алюминия и его сплавов. Необходимым условием прецизионности является обеспечение уровня остаточной деформации готового изделия до 2 % от начального размера. Среди существующих способов сварки алюминия и его сплавов различают способы сварки плавлением, сварки давлением, а также различные способы пайки.

Способы сварки плавлением позволяют решать только ограниченный круг проблем, возникающих при соединении алюминия и его сплавов, и не могут обеспечить достаточную прочность и прецизионность, а также требуют значительного времени на послесварочную обработку деталей. Пайка алюминия и его сплавов характеризуется низкими температурами процесса и возможностью соединения в труднодоступных местах, однако требует использования припоев и флюсов, обязательного удаления их остатков, равномерного распределения зазоров, а паяные соединения имеют невысокую прочность.

Наиболее эффективными способами для достижения прецизионности являются способы сварки давлением, среди которых выгодно отличаются диффузионная сварка в вакууме (ДСВ), и, в ряде случаев, электроконтактная сварка (ЭКС). При этом получение неразъемных соединений значительно усложняется наличием тугоплавкой оксидной пленки на поверхности алюминия и его сплавов, удаление которой перед соединением без использования сложных технологий не обеспечивает образование качественного физического контакта, что в комплексе с высокой пластичностью алюминия и его сплавов при высоких температурах существенно ухудшает условия для получения прецизионных соединений. В основе образования неразъемного соединения алюминия при ДСВ лежит активация свариваемых поверхностей путем ускорения процесса образования физического контакта, а при ЭКС – локализация тепловой энергии в приконтатной зоне соединения.

На основе исследований термомодеформационной кинетики получены уравнения ползучести для моделирования деформационного поведения изделий из алюминия

АД00 и АМг5 под действием температуры и нагрузки, которые позволяют осуществлять прогнозирование деформации изделий с использованием конечно-элементных программных комплексов в зависимости от геометрических характеристик изделия, величины температуры, усилий при сварке и длительности их действия.

Разработана технология диффузионной сварки в вакууме алюминия и его сплавов с использованием жидкой эвтектической прослойки состава $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-HCl-Mg}$ и пропусканьем через детали постоянного электрического тока плотностью $0,2 \text{ А/мм}^2$, которая обеспечивает электрохимическую активацию контактирующих поверхностей. Разработана технология электроконтактной стыковой сварки сопротивлением алюминия и его сплавов через тонкую промежуточную прослойку из алюминиевой фольги АД0 толщиной 11 мкм из 6-ти слоев, которая обеспечивает концентрацию тепловыделения в зоне стыка за счет образования большего количества контактных сопротивлений, на которых при прохождении тока локализуется тепловая энергия большой величины. Предложенные технологии позволяют получить сварные соединения с уровнем деформации до 2-3 % и прочностью до 90-95 % прочности основного металла.

Ключевые слова: алюминий, прецизионное соединение, диффузионная сварка в вакууме, электроконтактная стыковая сварка сопротивлением, оксидная пленка, физический контакт, промежуточная прослойка, упругие характеристики, пластичность, ползучесть, уровень деформации, прочность соединения.

ABSTRACT

Yushchenko S.M. The development of precision joining technique of aluminium alloys. – Manuscript.

The thesis for a scientific degree of the Candidate of Science (Engineering) by speciality 05.03.06 “Welding and related processes and technologies”. – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, 2018.

The thesis is devoted to the development of techniques of precision permanent joining of aluminium and alloys. The necessity of final product precision is the ensuring of residual deformation less than 2 % from its initial dimensions. Fusion welding and brazing allow to solve just limited issues emerged during bonding of aluminium and alloys and do not be able to ensure sufficient strength and precision. Among existing welding methods of aluminium and alloys, pressure welding methods enable getting the precision, in particular, diffusion welding in vacuum and, in a number of occasions, resistance welding. At the same time getting of permanent joints is complicated by the presence of high-melting oxide film on the metal surface. Its removal before welding without using of complex techniques does not enable qualitative physical contact formation, thus conditions for getting precision joint deteriorate substantially. The formation of permanent joint during diffusion welding in vacuum occurs on the basis of welded surfaces activation by means of acceleration of physical contact formation. The permanent joint during resistance welding forms by force of thermal energy localization in the contact zone. New technology of diffusion welding in vacuum of aluminium and alloys with using of liquid eutectic interlayer has been developed. New technology of resistance butt welding of aluminium and alloys through thin aluminium foam interlayer has been developed.

Keywords: aluminium, precision joint, diffusion welding in vacuum, electric resistance butt welding, oxide film, physical contact, intermediate layer, elastic behavior, plasticity, creeping, deformation value, joint strength.

Підписано до друку 27.02.2018. Формат 60x84/16.
Папір офсетний. Друк різнографія. Ум. друк. арк. 0,9.
Тираж 100 пр. Замовлення № 414/18.

Редакційно-видавничий відділ
Чернігівського національного технологічного університету
14035, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції серія ДК № 4802 від 01.12.2014 р.