

## РОЗДІЛ IV. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

УДК 621.791.354:541.428

**Г.П. Болотов**, д-р техн. наук

**І.С. Бондаренко**, магістр

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

### ПРЕЦИЗИЙНЕ ДИФУЗИЙНЕ ПАЯННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

**Г.П. Болотов**, д-р техн. наук

**И.С. Бондаренко**, магистр

Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

### ПРЕЦИЗИОННАЯ ДИФФУЗИОННАЯ ПАЙКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**H.P. Bolotov**, Doctor of Technical Sciences

**I.S. Bondarenko**, master

Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

### PRECISION DIFFUSION SOLDER OF ALUMINUM ALLOYS

*Досліджено вплив основних технологічних параметрів дифузійного паяння на міцність та деформаційні характеристики з'єднань сплавів алюмінію АМц. Як припій використовували рідку легкоплавку евтектику алюміній–мідь. Показано, що застосування у процесі паяння статичного та динамічного навантаження створює сприятливі умови для формування рівноважної дрібнозернистої структури паяного шва. Визначені оптимальні режими паяння, що забезпечують відносну деформацію зразків не вище 5 % при високих показниках міцності з'єднання.*

**Ключові слова:** алюмінієві сплави, дифузійне паяння, прецизійне з'єднання.

*Исследовано влияние основных технологических параметров диффузионной пайки на прочность и деформационные характеристики соединений сплавов алюминия АМц. В качестве припоя использовали жидкую легкоплавкую эвтектику алюминий–медь. Показано, что применение в процессе пайки статического и динамического нагружения создает благоприятные условия для формирования равновесной мелкозернистой структуры паяного шва. Определены оптимальные режимы пайки, обеспечивающие относительную деформацию образцов не более 5 % при высоких показателях прочности соединения.*

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, диффузионная пайка, прецизионное соединение.

*The influence of the main technological parameters of diffusion soldering on the strength and deformation characteristics of the joints of aluminum alloys AMts. As the liquid solder used fusible eutectic aluminum-copper. It is shown that the use of a soldering process static and dynamic loading creates favorable conditions for the formation of equilibrium grain structure solder joint. The optimal regimes ratios that provide a relative deformation of the samples did not exceed 5 % and high performance bond strength.*

**Key words:** aluminum alloys, diffusion soldering, precision joint.

**Постановка проблеми.** Алюміній – це легкий, дуже пластичний метал. Унікальне поєднання його властивостей, серед яких – довговічність, непроникність, висока тепло- і електропровідність, стійкість до корозії і можливість стовідсоткової переробки – робить його незамінним компонентом для великої кількості промислової продукції – від побутової техніки до реактивного літака. Обсяги застосування алюмінію і його сплавів у виробництві безперервно збільшуються, до того ж темпи його росту значно вищі, ніж у чавуна та сталі. Багато задач по створенню сучасних машин і конструкцій вирішують тільки за допомогою алюмінієвих сплавів [1].

Широке застосування алюмінію та його сплавів майже у всіх галузях промисловості і техніки вимагає подальшого вдосконалення та розвитку існуючих технологічних процесів утворення нероз'ємних з'єднань окремих елементів, деталей, вузлів в єдину конструкцію за допомогою зварювання, паяння, склеювання та розроблення нових способів з'єднання.

**Аналіз попередніх досліджень.** Для з'єднання алюмінієвих сплавів широко застосовується дифузійне зварювання. Однак воно здійснюється із застосуванням достатньо значних зусиль стискання деталей (5...10 МПа) при температурі 723...823 К, що призводить до суттєвої деформації зварного вузла і необхідності наступного механічного оброблення. Більш ефективним для отримання прецизійних з'єднань пластичних металів слід вважати процес паяння.

Серед усіх способів з'єднань паяння металів з кожним роком набуває все більше поширення [2]. Його справедливо розглядають як один з найбільш прогресивних технологічних методів з'єднання деталей. Паяння дозволяє раціонально використовувати конструкційні матеріали, знижувати масу конструкцій, зменшувати затрати праці, покращувати зовнішній вигляд виробів, збільшувати їх міцність, особливо при знакозмінних і вібраційних навантаженнях, і забезпечувати високу якість і надійність у процесі експлуатації.

Нині паяння застосовується при виготовленні таких виробів з алюмінієвих сплавів, як стільникові панелі, радіатори різних систем охолодження, контейнери для космічних апаратів, оболонки тепловиділяючих елементів реакторів, теплообмінники та реактори силових установок, обертаючі диски турбін паливно-насосних агрегатів для реактивних двигунів, вакуумні прилади, радіоелектронна апаратура, хвилеводи, трубопроводи та ін.

Подальше впровадження в промисловість паяння алюмінію та його сплавів зумовлюється передусім необхідністю вдосконалення технології цього процесу. Дослідженням процесів паяння алюмінію і його сплавів займаються практично в усіх провідних, економічно та технологічно розвинених країнах. Покращення працездатності, зменшення деформації матеріалу і забезпечення міцності потребує всебічного вивчення особливостей його з'єднання. Розроблення та підбір різноманітних припоїв, флюсів для забезпечення прецизійності та міцності з'єднання алюмінію та його сплавів мають актуальне значення [3].

**Мета роботи** – дослідження та розроблення технології отримання прецизійних з'єднань алюмінію та алюмінієвих сплавів із деформацією не вище 5 % та максимальною можливою міцністю.

**Викладення основного матеріалу.** В роботі досліджується процес дифузійного паяння алюмінієвих сплавів, який здійснюється через металевий рідкий прошарок при відносно незначних зусиллях притискання з'єднуваних поверхонь.

Для наявності рідкої фази в зоні з'єднання у процесі паяння як прошарок застосовували мідь, яка утворює з алюмінієм хімічну сполуку за типом легкоплавкої евтектики. Подвійна евтектика Al – Cu крихка і потребує додаткових заходів усунення крихкості та активації дифузії рідкої фази в основний метал у процесі паяння для підвищення міцності з'єднання. Температура утворення евтектики 821 К [4], тому для отримання рідкої фази процес паяння здійснювали при температурі 833 К.

Паяння зразків здійснювали у вакуумі  $10^{-2} \dots 10^{-3}$  Па. Міцність паяних зразків визначали механічними випробуваннями до руйнування на зрізання із застосуванням розривної машини УМ-5.

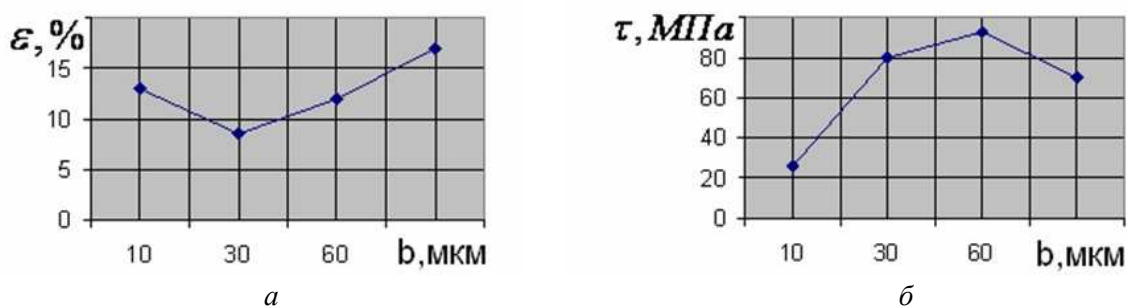


Рис. 1. Залежність відносної деформації (а) та міцності (б) паяного з'єднання від товщини проміжного мідного прошарку

На першому етапі досліджували вплив товщини мідного прошарку між з'єднуваними зразками на характеристики паяного з'єднання. Дифузійне паяння здійснювали на режимі: температура 833 К, зусилля стискання 2 МПа, час ізотермічної витримки 60 хв. Товщина проміжного прошарку міді становила 10, 30, 60 та 100 мкм. Шар товщиною 10 мкм отримували вакуумним напиленням, інші шари – за допомогою мідної фольги відповідної товщини. Результати досліджень свідчать (рис. 1) про помітну залежність як міцності, так і

деформації зразків від товщини застосованого мідного прошарку. У зразках із товщиною фольги 100 мкм утворюється забагато рідкої фази, яка частково витискується із зони з'єднання, що призводить до підвищення деформації. В той же час у зразках із мідним прошарком товщиною 10 мкм рідкої фази недостатньо для утворення міцного з'єднання. Найбільш ефективним є застосування проміжного мідного прошарку товщиною 30...60 мкм, коли найбільшій міцності 80...93 МПа відповідає помірна деформація зразка в межах 8...11 %. Зменшення зусилля стискання до 1,2 МПа при товщині прошарку 60 мкм привело до зниження деформації на рівні 5 % при міцності з'єднання до 74 МПа.

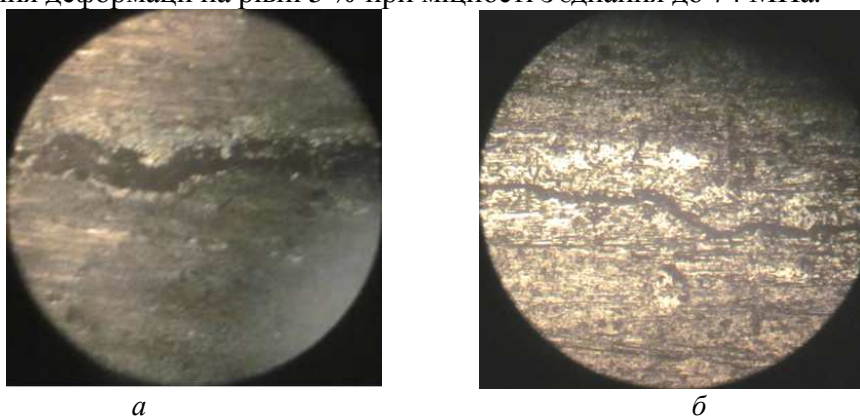


Рис. 2. Мікрошліфи паяних з'єднань при товщині прошарку 30 мкм (а) та 100 мкм (б)

На мікрошліфах зразків із товщиною прошарку 60...100 мкм у зоні паяння спостерігаються дисперговані частинки основного металу (рис. 2), які не дифундують із розплаву і призводять до зниження міцності з'єднання. Для подрібнення диспергованих частинок у зоні спаю, а також інтерметалідів, що утворюються при кристалізації розплаву, застосовували прикладання до зразків у процесі паяння динамічного (вібраційного) навантаження. Досліджували три варіанти прикладених зусиль – статичне, динамічне та комбіноване (статичне та динамічне одночасно). Паяння здійснювали на режимі: температура 833 К, зусилля стискання 1,2 МПа, час паяння 60 хвилин. Динамічне навантаження забезпечували за допомогою електромагніта із частотою вібрації 100 Гц. Комбіноване навантаження в досліджах отримували при співвідношенні статичного та динамічного навантажень у межах від 1:1 до 1:3.

Результати випробувань паяних зразків свідчать, що динамічне навантаження сприяє підвищенню міцності з'єднань завдяки вирівнюванню хімічного складу шва та подрібненню інтерметалідів. Найбільш ефективним виявилось застосування комбінованого навантаження при співвідношенні статичного та динамічного зусиль як 1:2, при якому досягається максимальна міцність з'єднання із зниженням відносної деформації зразків до величини, меншої ніж 5 % (рис. 3).

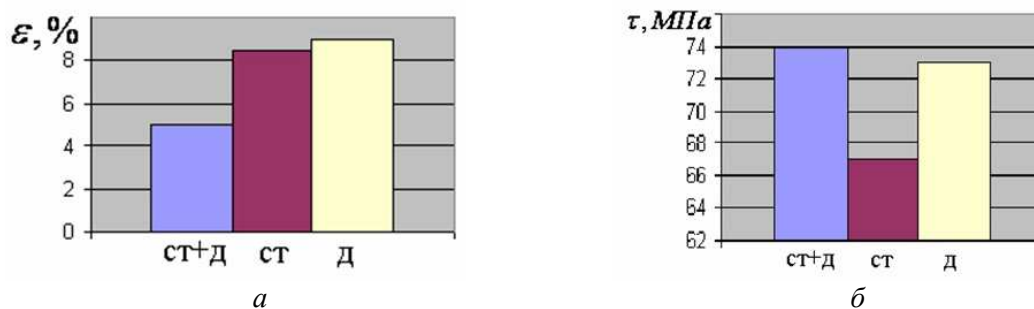


Рис. 3. Залежність деформації (а) та міцності (б) паяного з'єднання від виду прикладеного зусилля (статичного та динамічного)

В основу дифузійного паяння покладено явище дифузії рідкої фази, яка виконує функції припою, в основний метал. Процес дифузії є повільнодіючим, завдяки чому для здійс-

нення дифузійного паяння необхідний певний час ізотермічної витримки, який для різних металів може становити від 10 хвилин до 10 годин [5; 6]. У зв'язку з цим необхідно дослідити вплив часу ізотермічної витримки на міцність та прецизійність паяних з'єднань сплаву АМц. Паяні з'єднання отримували при температурі 833 К, прикладанні комбінованого зусилля загальною величиною 1,2 МПа при співвідношенні статичного та динамічного навантажень як 1:2. Час ізотермічної витримки змінювали в межах від 30 до 90 хвилин.

Результати випробувань зразків показують, що залежність їх міцності та деформації від часу паяння має екстремальний характер (рис. 4). Найкращі показники вказаних параметрів відповідають часу ізотермічної витримки 50...60 хвилин. При меншому часі витримки в паяній зоні спостерігаються скупчення диспергованих блоків алюмінію достатньо значних розмірів, що збільшують крихкість з'єднання. Зі збільшенням часу витримки до 60 хвилин ці блоки подрібнюються в рідкій фазі і рівномірно розподіляються по зоні з'єднання. При подальшому збільшенні часу паяння погіршуються властивості основного металу, викликані збільшенням зерна під дією високих температур, що призводить до зниження міцності з'єднання.

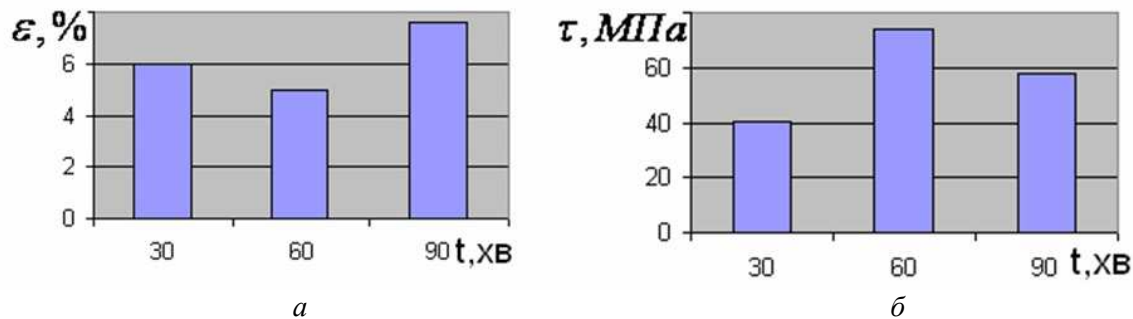


Рис. 4. Залежність деформації (а) та міцності (б) паяного з'єднання від тривалості ізотермічної витримки

На наступному етапі досліджували вплив частоти вібраційного навантаження на показники міцності та деформації паяних з'єднань. Режим паяння застосовували аналогічний попереднім дослідженням. Частоту вібрації динамічного навантаження забезпечували зміною частоти електричного струму в обмотці електромагніту в межах 1...10...100 Гц. Аналіз мікроструктур паяних з'єднань показує, що зі збільшенням частоти вібрації структура шва подрібнюється. При низьких частотах вібрації 1...10 Гц у зоні з'єднання присутні дисперговані частинки основного металу, а також зерна інтерметалідної фази значних розмірів, що негативно впливає на міцність паяння (рис. 5). Зі збільшенням частоти вібрації до 100 Гц структура паяного шва стає дрібнозернистою і рівноважною, що дозволило отримати паяні з'єднання із міцністю на зрізання до 75 МПа при відносній деформації зразків менше 5 %.

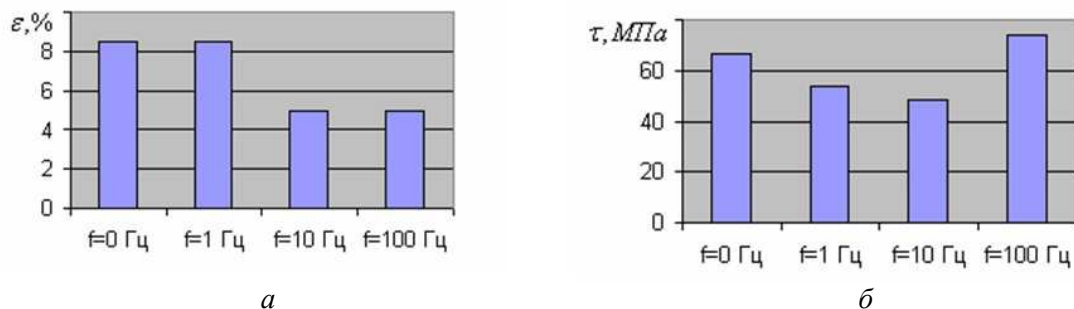


Рис. 5. Залежність деформації (а) та міцності (б) паяного з'єднання від частоти прикладеного вібраційного навантаження

**Висновки.** 1. Встановлено, що при дифузійному паянні прецизійність та міцність з'єднань алюмінію залежить від товщини проміжного металевого прошарку, який утво-

рює з основним матеріалом рідкий евтектичний шар, що виконує роль припою. Найкращі показники відносно міцності та прецизійності з'єднань отримані при товщині мідного прошарку 60 мкм. Товщина прошарку менше 30 мкм не забезпечує достатнього об'єму рідкої фази, що призводить до зниження міцності з'єднання. Збільшення товщини прошарку до 100 мкм супроводжується занадто перевищеним об'ємом рідкої фази і, відповідно, значною деформацією з'єднання.

2. Показано, що одночасне застосування в процесі дифузійного паяння статичного та динамічного навантаження позитивно впливає на якісні показники з'єднань, забезпечуючи активацію дифузії рідкої фази в основний матеріал, подрібнення інтерметалідної фази та підвищення міцності з'єднання. Найбільш високі показники з'єднань отримані при співвідношенні динамічного та статичного навантаження 2:1 та частоті вібрації 100 Гц.

3. Встановлено, що міцність та прецизійність паяних з'єднань сплаву АМц залежить від часу ізотермічної витримки у процесі паяння. Визначено, що при спільній дії статичного та динамічного навантаження максимальна міцність 73...75 МПа, що становить близько 50 % міцності основного матеріалу, при деформації зразків не вище 5 % досягається за час ізотермічної витримки 50...60 хв.

#### Список використаних джерел

1. *Алюминиевые сплавы. Промышленные деформируемые, спеченные и литейные алюминиевые сплавы. Справочное руководство.* – М. : Металлургия, 1972. – 552 с.
2. *Лашко С. В.* Пайка металлов / С. В. Лашко, Н. Ф. Лашко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1988. – 376 с.
3. *Петрунин И. Е.* Металловедение пайки / И. Е. Петрунин, И. Ю. Маркова, А. С. Екатова. – М. : Металлургия, 1976. – 264 с.
4. *Никитинский А. М.* Пайка алюминия и его сплавов / А. М. Никитинский. – М. : Машиностроение, 1983. – 192 с.
5. *Петрунин И. Е.* Пайка металлов / И. Е. Петрунин, С. Н. Лоцманов, Г. А. Николаев. – М. : Металлургия, 1973. – 279 с.
6. *Хряпин В. Е.* Справочник паяльщика / В. Е. Хряпин, А. В. Лакедемонский. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1974. – 328 с.