

## ВАКУУМНЕ ПАЯННЯ РІЗНОРІДНИХ З'ЄДНАНЬ КОВАР–МОЛІБДЕН

С.В. Максимова, П.В. Ковальчук, В.В. Воронов

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

На підставі проведених досліджень встановлено особливості розтікання припоїв системи Cu–Mn–Co по молібдену і Ковару. Мікрорентгеноспектральним аналізом визначено, що при розтіканні відбувається зональна кристалізація краплі припою на підкладці основного металу: по зовнішньому периметру краплі формуються явно виражені ділянки твердого розчину на основі міді (Cu–12,92Mn–4,69Co), а в центральній зоні краплі кристалізуються дендрити твердого розчину на основі марганцю, які характеризуються більш високою температурою плавлення. Експериментально доведено, що підвищення температури нагріву сприяє збільшенню площі розтікання припою за рахунок покращання розтікання твердого розчину на основі міді. Встановлено, що в паяному шві різнорідних з'єднань Ковар–молібден формується твердий розчин на основі міді, а на міжфазній границі молібден–припій кристалізується реакційний шар (шириною біля 1 мкм) на основі молібдену, який збагачений кобальтом (15,80 %), марганцем (14,12 %) та містить незначну кількість міді (1,63 %). Внаслідок механічних випробувань напускних пластинчастих паяних з'єднань Ковар–молібден в умовах статичних навантажень при кімнатній температурі руйнування відбувається частково по паяному шву і частково по основному металу–молібдену. Бібліогр. 14, табл. 2, рис. 6.

*Ключові слова:* Ковар, молібден, вакуумне високотемпературне паяння, різнорідні з'єднання, сплави системи мідь–марганець–кобальт, мікроструктура, міцність, розтікання

Для отримання певних властивостей конструкцій часто використовують окремі вузли з різнорідних матеріалів. При їх отриманні шляхом паяння виникає низка проблем, що обумовлена хімічним складом поєднуваних матеріалів, різними фізико-механічними властивостями.

При паянні різнорідних з'єднань молібден–нержавіюча сталь (Ковар) необхідно враховувати особливості кожного матеріалу. Молібден відноситься до тугоплавких жароміцних матеріалів завдяки високій температурі плавлення (2600 °C) і значній питомій міцності в умовах високої температури. Його паяння проводять у вакуумі або в захисних газах, оскільки при нагріві на повітрі він активно реагує з киснем, що сприяє його окисленню і знижує механічні властивості [1]. Температура паяння не повинна перевищувати температуру його рекристалізації. При переході через поріг рекристалізації молібден стає крихким [2], що важливо враховувати при виборі припою і його інтервалів плавлення. Окрім того, різниця коефіцієнтів термічного розширення обох металів призводить до виникнення залишкових напружень, деформації виробів і появи тріщин [3, 4, 5]. Тому при їх поєднанні в якості припою зазвичай використовують мідь і її сплави, які слугують демпфером між з'єднуваними деталями і сприяють релаксації виникаючих напружень. Можна застосовувати спеціальні проміжні пластичні прошарки, які ефективні при з'єднанні різнорідних металів, що мають значну різницю у їх фізико-механічних властивостях [4].

З'єднанню молібдену з Коваром (Fe–29Ni–17Co) присвячено значно менше робіт, в порівнянні з паянням молібдену з нержавіючою сталлю. Все ж протягом багатьох років такі роботи проводяться і вони стали особливо актуальними у зв'язку зі створенням нових установок та конструкційних елементів в приладобудуванні. На сьогоднішній час актуально з'єднання різнорідних матеріалів Ковар–молібден, що призначені для високотемпературного застосування [5, 6]. Ковар відноситься до прецизійних сплавів з заданим температурним коефіцієнтом лінійного розширення (ТКЛР), який близький до такого для борсилікатного скла [7], що сприяє його застосуванню в оптичних приладах, що експлуатуються в широкому інтервалі температур. При паянні даних металів виникають проблеми іншого характеру. З однієї сторони, їх ТКЛР близькі: так, для Ковару він становить  $\sim 4,6 \dots 5,29 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (в температурному інтервалі 20...400 °C і з підвищенням температури стрімко зростає) [8], а для молібдену він становить  $\sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (в температурному інтервалі 0...100 °C), що є позитивним моментом при створенні паяних з'єднань Ковар – молібден. А з іншої сторони, на основі діаграми плавкості системи Mo–Fe видно, що молібден і залізо мають значні області розчинності при високій температурі, але з її зниженням ці області швидко звужуються і при кімнатній температурі взаємна розчинність практично відсутня. Між розглянутими елементами формується низка інтерметалідних фаз, які можуть відіграва-

Максимова С.В. – <https://orsid.org/0000-0003-0158-5760>, Ковальчук П.В. – <https://orsid.org/0000-0002-2313-5982>, Воронов В.В. – <https://orsid.org/0000-0002-0410-1154>

© С.В. Максимова, П.В. Ковальчук, В.В. Воронов, 2021

ти негативну роль, приводячи до крихкості паяного з'єднання [9]. Утворення інтерметалідних фаз негативно впливає на механічні властивості різномірних з'єднань, що отримані різними методами, в тому числі і зварюванням [6, 10]. Детальні дослідження мікроструктури з'єднань, що отримані при електронно-променевому паянні-зварюванні Ковару з молібденом показали, що на міжфазній границі з'єднання формуються три зони, в яких виявлено твердий розчин на основі заліза і на основі молібдену, а також крихкі інтерметалідні фази:  $Fe_5Mo_3$ ,  $FeMo$ , які і є причиною крихкого руйнування і низької міцності [10].

При вакуумному паянні Ковару з молібденом (при температурі 1115 °C) з застосуванням в якості припою чистої міді товщиною 100 мкм міцність з'єднань становить 72...75 МПа [5].

У даній роботі представлено результати досліджень з розтікання експериментальних припоїв системи Cu–Mn–Co по Ковару і молібдену та особливості формування структури паяних різномірних з'єднань Ковар–молібден, що отримані за допомогою вакуумного високотемпературного паяння.

**Експериментальна частина.** Для проведення експериментів в якості основного металу використовували пластини молібдену марки МЧ (товщиною 3 мм) та прецизійного сплаву Ковар (товщиною 2 мм, табл. 1).

Експериментальні припої виплавляли на мідній підкладці в середовищі аргону з застосуванням дугового нагріву. Для дослідження впливу кобальту на температуру солідусу і ліквідусу виплавили ряд експериментальних сплавів системи Cu–Mn–(0,5-4,5)Co та визначили їх інтервали плавлення за допомогою високотемпературного диференційного термічного аналізу (ВДТА) (табл. 2) з застосуванням установки ВДТА-8МЗ в високочистому гелії при швидкості нагрівання 40 °C/хв ( $\pm 5$  °C).

Для проведення експериментів використовували полікристалічні сплави Cu–Mn–(0,5–4,5)Co в литому і прокатаному стані у вигляді стрічки товщиною ~100 мкм.

Експерименти з розтікання досліджуваних сплавів проводили на підкладках молібде-

ну розміром 15×15 мм. Припої в кількості 300 мг розміщали в центральній зоні підкладки основного металу, нагрівання проводили в вакуумній печі з радіаційним нагрівом при температурі, що перевищує температуру ліквідусу на 30 °C при розрідженні робочого простору  $1,33 \cdot 10^{-4}$  Па на протязі 180 с. Площі розтікання експериментальних припоїв вимірювали за допомогою сканування та програми КОМПАС-3D v17.1.

Паяння різномірних напускних з'єднань (з капілярним зазором) теж проводили при температурі, що перевищує  $T_{\text{ліквідусу}}$  на 30 °C, час витримки складав 180 с. Отримані зразки різали перпендикулярно поверхні пластини і за стандартною методикою готували мікрошліфи та вивчали хімічну неоднорідність з застосуванням растрового електронного скануючого мікроскопу Tescan Mira 3 LMU. Мікрорентгеноспектральні дослідження і визначення локального розподілу елементів в окремих фазах проводили з використанням енергодисперсійного спектрометра «Oxford Instruments X-max 80 mm<sup>2</sup>», що оснащений програмним пакетом INCA. Мікрошліфи досліджували без хімічного травлення.

**Результати експериментів та їх аналіз.** Отримані результати досліджень показали, що експериментальні сплави мають достатньо вузький інтервал плавлення, що не перевищує 22...35 °C, але підвищення концентрації кобальту призводить до його розширення за рахунок підвищення температури ліквідусу. З підвищенням концентрації кобальту від 0,5 до 4,5 мас. % температура солідусу сплаву зростає на 14 °C.

При проведенні експериментів максимальний перегрів над температурою солідусу сплавів становив 65 °C (рис. 1).

Потрійні сплави системи Cu–Mn–(0,5–4,5)Co характеризуються литою структурою, що утворена двома твердими розчинами: на основі міді і марганцю. Останній спостерігається у вигляді темних дендритів твердого розчину з явно вираженою ліквациєю за складовими елементами, що притаманна сплавам даної системи [11]. Кобальт є складовим елементом обох твердих розчинів. Структура Ковару однофазна і утворена  $\gamma$ -твер-

Таблиця 1. Хімічний склад дослідних матеріалів, мас. %

Склад	Fe	C	Si	Ni	Co	Mo
Мо	до 0,01	до 0,005	до 0,01	до 0,005	-	min 99,96
29НК	51,14...54,5	-	-	28,5...29,5	17,0...18,0	-

Таблиця 2. Експериментальні сплави та температура розтікання (паяння)

Номер сплаву	Склад, мас. %	Температура розтікання, °C	Температурний інтервал плавлення, °C	Перегрів вище температури солідусу, °C
1	Cu–Mn–0,5Co	939	22	52
2	Cu–Mn–1Co	946	21	51
3	Cu–Mn–2Co	955	26	56
4	Cu–Mn–4,5Co	966	35	65

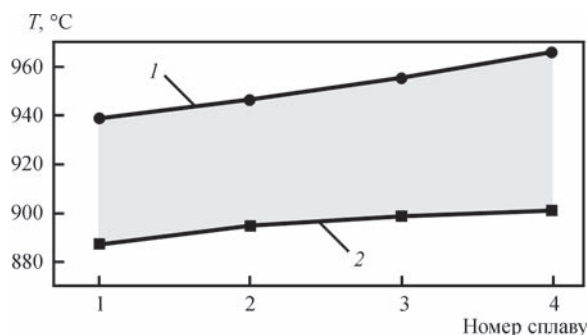


Рис. 1. Температура паяння (1) і температура солідусу (2) експериментальних сплавів

дим розчином, який стійкий при температурі, що вища за  $-70^{\circ}\text{C}$ . При несприятливому співвідношенні нікелю і кобальту і наявних домішок при  $T = -70^{\circ}\text{C}$  можливе часткове перетворення  $\gamma \rightarrow \alpha$  (мартенситного характеру), яке може призводити до збільшення ТКЛР, що необхідно враховувати при створенні конструкцій і вузлів з різнорідних матеріалів: Ковару і молибдену.

Відомо, що однією з важливих фізико-хімічних характеристик отримання якісного з'єднання є здатність припою змочувати основний метал і розтікатися по ньому [12]. Від повноти протікання даного складного металургійного процесу залежить якість паяних виробів. На підставі проведених досліджень встановлено, що при розтіканні литого припою (рис. 2, а) системи Cu–Mn–Co по

молибдену, формується крапля з неоднорідною структурою, яку умовно можна розділити на зони (рис. 2, б, в).

В центральній зоні (№ 1) кристалізується твердий розчин на основі марганцю у вигляді дисперсних дендритів, які формують вершину краплі припою. Вони розташовані на тлі мідної матриці, але їх температура ліквідусу вища за температуру ліквідусу твердого розчину на основі міді [13]. Результатами мікрорентгеноспектрального аналізу виявлено значну хімічну неоднорідність проміжної зони (№ 2), що являє собою твердий розчин на основі міді перемінної концентрації. Морфологія даної зони значно відрізняється від попередньої і складається з доволі крупних дендритів твердого розчину з явно вираженою ліквіацією за складовими елементами (рис. 2, з), що обумовлено швидкістю охолодження та температурним інтервалом кристалізації [11]. Концентрація марганцю знаходиться в межах 16,2...32,15 %.

По периметру краплі (зона № 3) спостерігається ореол у вигляді плоского фронту кристалізації, що утворений твердим розчином на основі міді з мінімальною концентрацією марганцю (12,92Mn), який характеризується самою низькою температурою плавлення та кристалізується в останню чергу. Низька концентрація марганцю в даній зоні обумовлена високою пружністю пару і часом

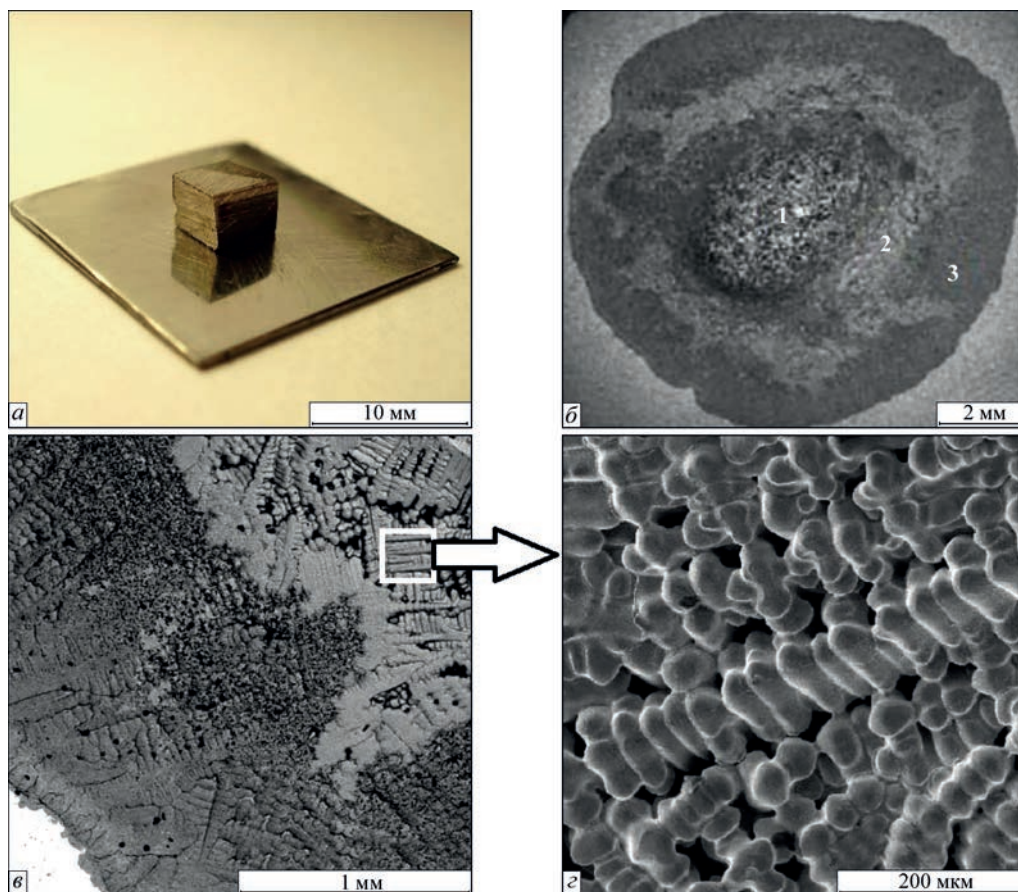


Рис. 2. Припій Cu–Mn–4,5Co перед розтіканням на молибденовій підкладці (а), після розтікання (б, в) та структура проміжної зони – дендрити твердого розчину на основі міді (г)



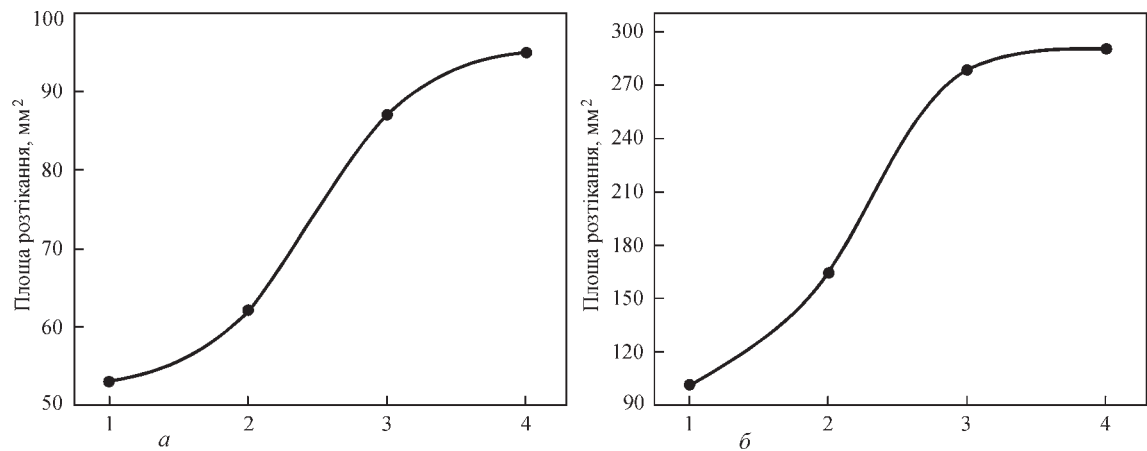


Рис. 3. Площа розтікання припоїв № 1, 2, 3, 4 системи Cu–Mn–Co по молибдену (а) і по Ковару (б)

перебування припою в рідкому стані в умовах вакууму. Слід зазначити, що зональне формування структури при розтіканні по молибдену характерно для всіх досліджуваних припоїв (див. табл. 1).

Експериментально доведено, що при підвищенні температури нагріву площа розтікання припоїв збільшується (рис. 3, а) за рахунок покращання розтікання твердого розчину на основі міді, який кристалізується по периметру краплі припою у вигляді ореолу. Тенденція до збільшен-

ня площі спостерігається при розтіканні експериментальних припоїв як по молибдену (рис. 3, а), так і по Ковару (рис. 3, б). Отримані дані свідчать про хороші капілярні властивості припоїв системи Cu–Mn–Co.

Для вивчення якості паяних швів і проведення металографічних досліджень паяли різнірідні зразки-свідки одночасно зі зразками, що підлягали механічним випробуванням. Зовнішній огляд зразків показав, що при паянні різнірідного з'єднання молибден-Ковар (припоєм Cu–Mn–4,5Co) спостерігається формування повної прямої і зворотної галтельної ділянки (рис. 4, а, б).

Локальним мікрорентгеноспектральним аналізом встановлено, що метал паяного шва складається з матриці – твердого розчину на основі міді Cu–Mn–Ni, який містить 2,87% кобальту та 3,73 % заліза. На міжфазній границі молибден–припій формується реакційний шар (шириною біля 1 мкм) на основі молибдену (рис. 5), який збагачений кобальтом (15,80 %), марганцем (14,12 %) та містить незначну кількість міді (1,63 %).

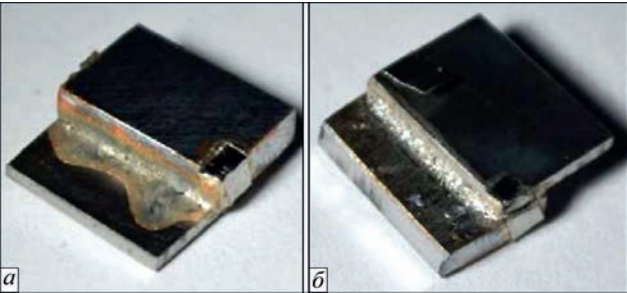


Рис. 4. Зовнішній вигляд паяного різнірідного з'єднання Ковар–Мо: пряма (а) та зворотна галтелі (б)

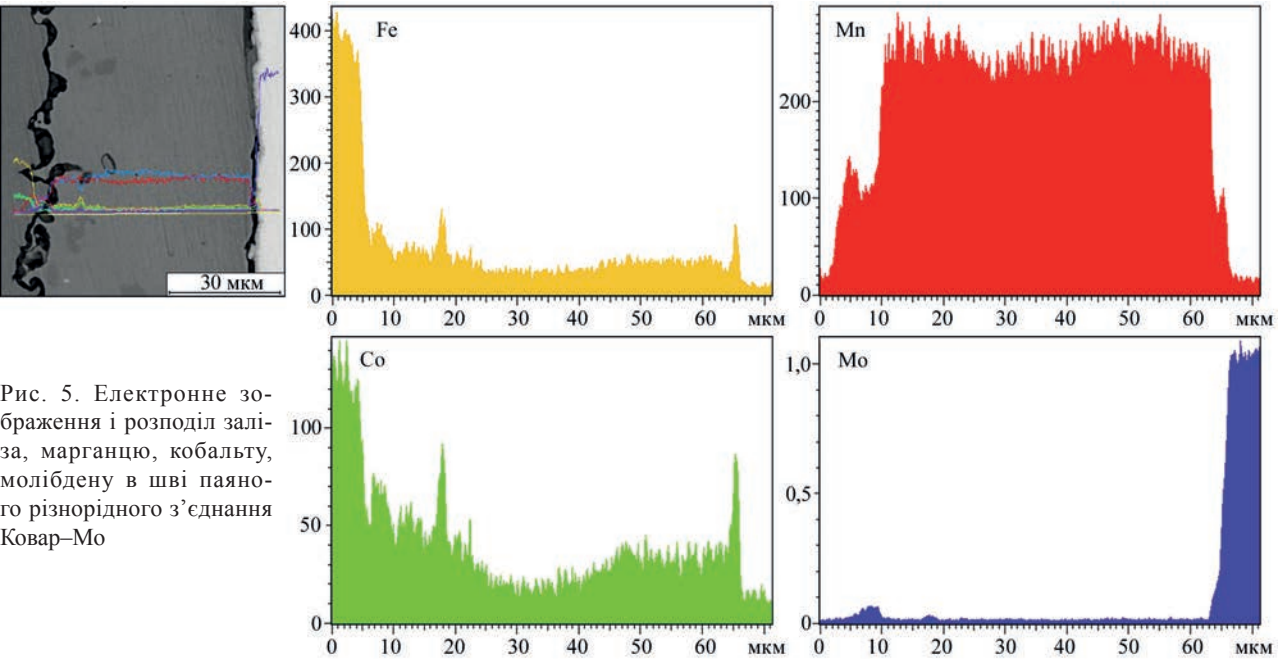


Рис. 5. Електронне зображення і розподіл заліза, марганцю, кобальту, молибдену в шві паяного різнірідного з'єднання Ковар–Мо

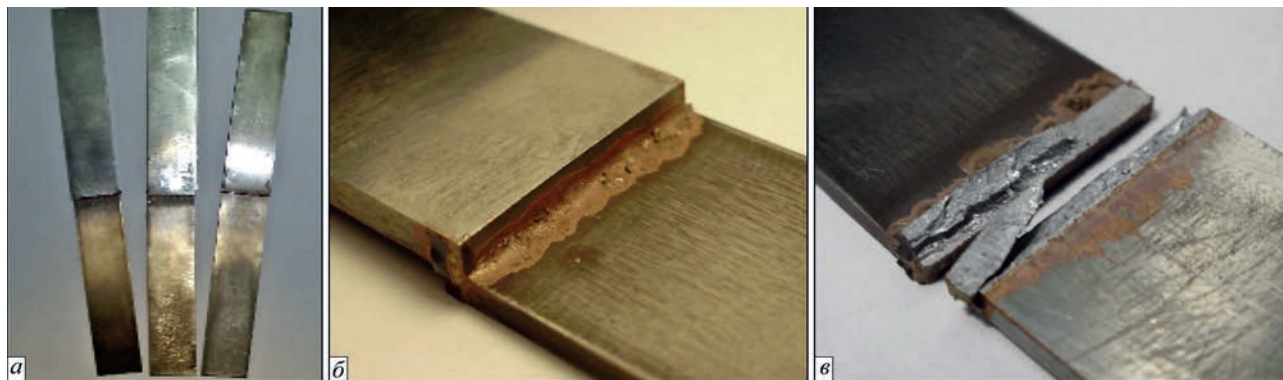


Рис. 6. Зовнішній вигляд паяних зразків Ковар–молібден до (а, б) та після випробувань (в)

Окрім того, на фоні твердого розчину спостерігається незначна кількість дискретних зерен на основі заліза (27,05...28,29 %), які збагачені марганцем (27,94...26,93 %), що підтверджено дослідженнями при скануванні електронним променем паяного зразка (рис. 5).

Необхідно зазначити, що такі особливості формування структури обумовлені нерівноважними умовами кристалізації металу паяного шва, наявністю концентраційного градієнту на міжфазній границі основний метал – припій та дифузійними процесами, що протікають під час паяння. Завдяки дифузійним процесам метал паяного шва насичується елементами основного металу і, як наслідок, відрізняється від вихідного припою за хімічним складом, що відображається на механічних властивостях паяних з'єднань.

Для дослідження механічних властивостей в статичних умовах навантаження при кімнатній температурі використовували напускні пластинчасті паяні зразки [14] Ковар – молібден, що отримані з застосуванням припою №(4) Cu–Mn–4,5Co. Їх зовнішній вигляд у вихідному стані (після паяння) свідчить про якісне формування галтельних ділянок та відсутність пор в швах (рис. 6, а, б).

Під час випробувань руйнування зразків відбувається частково по паяному шву і частково по основному металу – молібдену (рис. 6, в). За результатами механічних випробувань визначено, що міцність на зріз паяних зразків Ковар – молібден знаходиться в межах 168,18...178,87 МПа.

## Висновки

Отримані результати досліджень показали, що при розтіканні припоїв системи Cu–Mn–4,5Co по молібдену відбувається зональна кристалізація краплі припою. По периметру краплі формуються явно виражені ділянки з плоским фронтом кристалізації твердого розчину на основі міді (Cu–12,92Mn–4,69Co). В проміжній зоні спостерігаються дендрити твердого розчину на основі міді, що містять перемінну концентрацію марганцю (16,2...32,15 %), що обумовлено дендритною ліквідацією при кристалізації.

В центральній зоні краплі (верхній) на тлі твердого розчину на основі міді кристалізуються дендрити твердого розчину на основі марганцю, температура плавлення яких вища за температуру плавлення твердого розчину на основі міді.

Встановлено, що підвищення температури нагріву призводить до збільшення площі розтікання припою, що обумовлено температурою плавлення твердого розчину на основі міді, яка практично не змінюється.

Міцність на зріз при кімнатній температурі паяних напускних різномірних зразків Ковар – молібден знаходиться в межах 168,18...178,87 МПа. Руйнування зразків відбувається частково по паяному шву і частково по основному металу – молібдену.

## Список літератури

1. Титц Т., Уилсон Дж. (1969) *Тугоплавкие металлы и сплавы*. Пер. с англ. Новикова П.К., Новиков И.И. (ред.). Москва, Металлургия.
2. Гуревич С.М., Нероденко М.М., Харченко Г.К. и др. (1982) *Металлургия и технология сварки тугоплавких металлов и сплавов на их основе*. Киев, Наукова думка.
3. Єрмолаєв Г.В., Квасницький В.В., Квасницький В.Ф. та ін. (2015) *Паяння матеріалів*. Підручник. Хорунов В.Ф., Квасницький В.Ф. (ред.). Миколаїв, НУК.
4. Liu, G.W., Valenza, F., Muolo, M.L. et al. (2010) SiC/SiC and SiC/Kovar joining by Ni–Si and Mo interlayers. *J Mater Sci*, 45, 4299–4307. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4337-3>
5. Kumar, S., Upadhyay, A., Dinesh Kumar, P., Agarwal, A. (2015). *Vacuum Brazing of Molybdenum–Kovar and Evaluation of its Joint Strength*. MSF 830–831, 282–285. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.830-831.282>
6. Chen, G., Yin, Q., Guo, C. et al. (2019) Beam deflection effects on the microstructure and defect creation on electron beam welding of molybdenum to Kovar. *Journal of Materials Processing Technology*, 267, 280–288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.017>
7. (1983) *Прецизионные сплавы: Справочник*. Молотиллов Б.В. (ред.). 2-е изд. Москва, Металлургия.
8. Бутурля С.А., Бугаєнко Б.В., Петренко Л.М., Голуб Д.М. (2019) Особливості активного паяння кераміки з металами. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, 1, 45, 38–42.
9. (1997) *Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник*. Под ред. Лякишева Н.П. (ред.) в 3 т. Т. 2. Москва, Машиностроение.
10. Chen, G., Yin, Q., Dong, Z. et al. (2020) Microstructure evolution analysis for the reaction interface between molybdenum and Kovar acquired by electron beam welding-brazing. *Materials Characterization*, 171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110781>

11. Фавстов Ю.К., Шульга Ю.Н., Рахштадт А.Г. (1980) *Металловедение высокодемпфирующих сплавов*. Москва, Металлургия.
12. Красовський В.П., Габ І.І., Стецюк Т.В., Красовська Н.О. (2017) Змочування кварцового скла легкоплавкими припійними розплавами. *Адгезія расплавов и пайка матеріалов*, 50, 18–27.
13. Дриц М.Е. (1979) *Двойные и многокомпонентные системы на основе меди*. Справочник. Москва, Наука.
14. Максимова С.В., Ковальчук П.В., Воронов В.В. (2019) Вплив кобальту на структуру і технологічні властивості сплавів системи Cu–Mn. *Металофіз. новітні технології*, 41, 10, 1365–135. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1365>
15. Chen, G., Yin, Q., Guo, C. et al. (2019) Beam deflection effects on the microstructure and defect creation on electron beam welding of molybdenum to Kovar. *J. Materials Proc. Technology*, 267, 280–288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.017>
16. (1983) *Precision alloys*: Refer. book. Ed. by B.V. Molotilov. 2nd Ed. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
17. Buturlya, E.A., Bugaenko, B.V., Petrenko, L.M., Golub, D.M. (2019) Features of active brazing of ceramics with metals. *Visnyk DDMA*, 1(45), 38–42 [in Ukrainian].
18. (1997) *State diagrams of binary metal systems*: Refer. book. Ed. by N.P. Lyakishev. In: 3 Vol., Vol. 2. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
19. Chen, G., Yin, Q., Dong, Z. et al. (2020) Microstructure evolution analysis for the reaction interface between molybdenum and Kovar acquired by electron beam welding-brazing. *Materials Characterization*, 171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110781>
20. Favstov, Yu.K., Shulga, Yu.N., Rakhshadt, A.G. (1980) *Metals science of high-damping alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
21. Krasovskiy, V.P., Gab, I.I., Stetsyuk, T.V., Krasovska, N.O. (2017) Wetting of quartz glass by low-melting brazing melts. *Adgeziya Rasplavov i Pajka Materialov*, 50, 18–27 [in Russian].
22. Drits, M.E. (1979) *Binary and multicomponent copper-based systems*: Refer. book. Moscow, Nauka [in Russian].
23. Maksymova, S.V., Kovalchuk, P.V., Voronov, V.V. (2019) Influence of cobalt on structure and technological properties of Cu-Mn system alloys. *Metalofiz. Novitni Tekhnologii*, 41(10), 1365–135. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1365>

## References

## VACUUM BRAZING OF KOVAR–MOLYBDENUM DISSIMILAR JOINTS

S.V. Maksymova, P.V. Kovalchuk, V.V. Voronov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

The features of spreading of brazing filler metal of Cu-Mn-Co system over molybdenum and Kovar were established based on the performed studies. Micro X-ray spectral analysis determined that zonal crystallization of a brazing filler metal droplet on the base metal substrate occurs during spreading: pronounced areas of copper-based solid solution (Cu-12.92Mn-4.69Co) form along the outer perimeter of the droplet, and dendrites of manganese-based solid solution, characterized by a higher melting point, are crystallized in the drop central part. It has been experimentally proven that an increase in the heating temperature contributes to an increase in the spreading area of the brazing filler metal by improving the spreading of copper-based solid solution. It was found that a copper-based solid solution forms in the brazed seam of Kovar-molybdenum dissimilar joints, and a molybdenum-based reaction layer (about 1 μm wide), crystallizes at the molybdenum-brazing filler metal interface. This layer is enriched in cobalt (15.80%) and manganese (14.12%) and contains a small amount of copper (1.63%). As a result of mechanical tests of Kovar-molybdenum overlap joints under static loads at room temperature, destruction occurs partly along the brazed seam and partly along the base metal - molybdenum. 14 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

**Keywords:** Kovar, molybdenum, vacuum brazing, dissimilar joints, copper-manganese-cobalt alloys, microstructure, strength, spreading

Надійшла до редакції  
26.05.2021

### Нова книга



**Электронно-лучевая сварка. Технологии. Оборудование. Материалы:** Сб. статей под ред. чл.-кор. НАН Украины В.М. Нестеренкова. — Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 2021. — 390 с.

Сборник включает 38 статей сотрудников отдела «Физические процессы, техника и оборудование для электронно-лучевой и лазерной сварки» Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, опубликованных за период 2011–2020 гг. В нем обобщен опыт научно-исследовательской и инженерной деятельности отдела в области электронно-лучевой сварки. Может быть интересен и полезен ученым, инженерам и технологам, занимающимся проблемами соединения металлов с помощью высококонцентрированных источников нагрева, а также аспирантам и студентам, изучающим теоретические основы электронно-лучевой сварки и родственных процессов.