

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ ПАЯНИХ З'ЄДНАНЬ МОЛІБДЕН–КОВАР

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

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В роботі висвітлено результати металографічних і мікрорентгеноспектральних досліджень напукських з'єднань молібден–Ковар, які отримані шляхом вакуумного високотемпературного паяння з застосуванням припою на базі системи Cu–Mn–Co. Досліджено вплив витримки при температурі паяння на структуроутворення паяних швів. Локальним мікрорентгеноспектральним аналізом визначено кількість структурних складових паяного шва: твердий розчин на основі міді, окремі одиничні зерна на основі заліза, реакційний шар у вигляді суцільної смуги на міжфазній границі молібден–припій. Встановлено, що збільшення витримки при температурі паяння сприяє збільшенню ширини реакційного шару з 1 до 3 мкм і призводить до формування ограненої морфології зі сторони металу паяного шва та до появи мікротріщин в ньому, але не впливає на концентрацію молібдену, яка при різній витримці (1...15 хв) знаходиться в межах 55,81...59,05 мас. %. В твердому розчині (матриці) концентрація марганцю зменшується зі збільшенням витримки, концентрація міді підвищується, але кількість заліза практично не змінюється і знаходиться в межах 4,52... 4,95 мас. %. В окремих зернах темної фази, що спостерігаються біля межі з Коваром, збільшення витримки сприяє підвищенню концентрації заліза, нікелю та зниженню вмісту марганцю і міді. Бібліогр. 14, табл. 3, рис. 9.

Ключові слова: Ковар, молібден, вакуумне високотемпературне паяння, припій, структура, паяний шов, витримка, реакційний шар, мікрорентгеноспектральний аналіз

Вступ. В умовах сучасної промисловості сплави з заданими фізичними характеристиками знайшли широке використання у вигляді окремих паяних вузлів, що є складовими різних конструкцій. Особливу увагу привертають різномірні паяні з'єднання, наприклад, пара молібден–Ковар. Молібден є важливим конструкційним матеріалом електровакуумної, ракетної, авіаційної техніки, ядерної енергетики. Вдале поєднання комплексу цінних фізико-механічних і корозійних властивостей робить цей метал одним з основних конструкційних матеріалів нової техніки [1–3]. З'єднувати молібден та Ковар доволі складно через різницю їх хімічного складу та фізико-механічних властивостей. Як відомо, існують різні способи з'єднання даної пари матеріалів: дифузійне, електронно-промене, лазерне зварювання [3–5], але найбільш широке застосування набула технологія з'єднання даних матеріалів шляхом вакуумного паяння.

При паянні молібдену виникають проблеми через високу спорідненість його з киснем, а також схильність до зростання зерна при високій температурі. Температура рекристалізації молібдену (850...1220 °С) залежить від багатьох чинників і в першу чергу від чистоти і ступеня деформації. При переході через поріг рекристалізації молібден стає крихким, що необхідно враховувати при виборі припою для його паяння. Крім того, молібден має невеликий температурний коефіцієнт лінійного розширення ($\alpha = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), що відрізняє його від ме-

талів і сплавів, з якими він зазвичай з'єднується при паянні (мідь, нікель, залізо та ін.) [6].

Істотні проблеми виникають при паянні різномірних матеріалів [7, 8]. Для їх паяння застосовують в якості припою мідь [2], мідь–титан [9], пластичні срібні припої [10].

Припій при температурі паяння повинен однаково добре змочувати обидва основні матеріали, інакше він замість заповнення паяльних зазорів буде розтікатися по поверхні одного з матеріалів, що краще змочується. Молібден і залізо (що є складовою Ковару) мають значні області розчинності при високій температурі, але при зниженні температури ці області швидко звужуються і при кімнатній температурі взаємна розчинність практично відсутня [11]. Між розглянутими елементами є ряд інтерметалідних фаз, які відіграють негативну роль, приводячи до крихкості як зварних, так і паяних з'єднань [5, 8]. Тому вивчення формування структури міжфазної границі молібден–припій–Ковар має важливе значення при створенні нероз'ємних різномірних з'єднань молібден–Ковар.

Метою даної роботи є дослідження впливу часу витримки на структуроутворення паяних швів і ширину реакційного шару при високотемпературному паянні різномірних з'єднань молібден–Ковар (з застосуванням припою системи мідь–марганець) в умовах вакууму.

Експериментальна частина. В якості основного металу використовували пластини не-

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

Воронов В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-0410-1154>

© С.В. Максимова, П.В. Ковальчук, В.В. Воронов, 2022

ржавіючої сталі 12X18H10 (Fe–(17-18)Cr–(8,0-10)Ni– $\leq 2,0$ Mn– $\leq 0,8$ Si– $\leq 0,12$ C), що характеризується високими антикорозійними властивостями, прецизійний сплав Ковар марки 29НК (Fe–29Ni–17Co) і припій на базі системи мідь-марганець (Cu–Mn–4,5Co) зі структурою твердого розчину. Останній отримували шляхом виплавки в лабораторній установці в захисному середовищі аргону і використовували в литому стані у вигляді шматочків (розміром не більше 2 мм). Перед паянням поверхні з'єднуваних матеріалів шліфували на алмазному диску з зернистістю 125 мкм.

Паяння різномірних напускних з'єднань (з капілярним зазором) проводили у вакуумній печі з радіаційним нагрівом при температурі, що перевищує температуру ліквідусу ($T_{\text{л}} = 966$ °C) припою на 30 °C, час витримки складав 1, 3 та 15 хв. Отримані зразки різали перпендикулярно поверхні пластини і за стандартною методикою готували мікрошліфи та вивчали хімічну неоднорідність із застосуванням скануючого електронного растрового мікроскопу TescanMira 3 LMU. Мікрорентгеноспектральні дослідження і визначення локального розподілу елементів в окремих фазах проводили з використанням енергодисперсійного спектрометра «Oxford Instruments X-max 80 mm²», який оснащений програмним пакетом INCA. Мі-

крошліфи досліджували без хімічного травлення [12]. Твердість визначали з застосуванням мікротвердоміру ПМТ-3 при навантаженні $P = 50$ г ($\tau = 0,15$ хв).

Результати експериментів та їх аналіз. При паянні напускних різномірних з'єднань молібден–Ковар формуються щільні паяні прямі (рис. 1, а) та зворотні галтельні ділянки (рис. 1, б).

Припій добре розтікається по основному металу і затікає в капілярний зазор [13]. Результати металографічних досліджень і мікрорентгеноспектрального аналізу паяних з'єднань молібден–Ковар ($\tau = 1$ хв) показали, що шви характеризуються однорідною структурою (рис. 2, а, б).

Структура паяного шва представлена твердим розчином на основі системи мідь-марганець–нікель–кобальт, що містить незначну кількість заліза (4,52 %) і є матрицею. Окрім того, на фоні даної матриці спостерігаються окремі темні зерна на основі заліза, які слабо візуалізуються (табл. 1, спектр 1, рис. 2, в).

Можна припустити, що при паянні протікають дифузійні процеси (або диспергація Ковару) і окремі зерна основного металу (табл. 1, спектр 1, рис. 2, в) у вигляді темних зерен виділяються на фоні матриці-твердого розчину. По мірі віддалення їх від Ковару концентрація заліза і нікелю

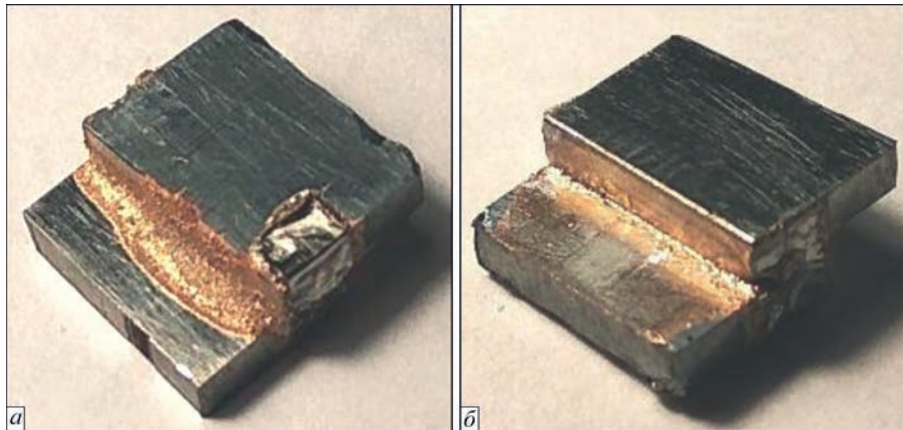


Рис. 1. Зовнішній вигляд паяного різномірного з'єднання молібден–Ковар при витримці 15 хв: пряма (а) та зворотна галтелі (б)

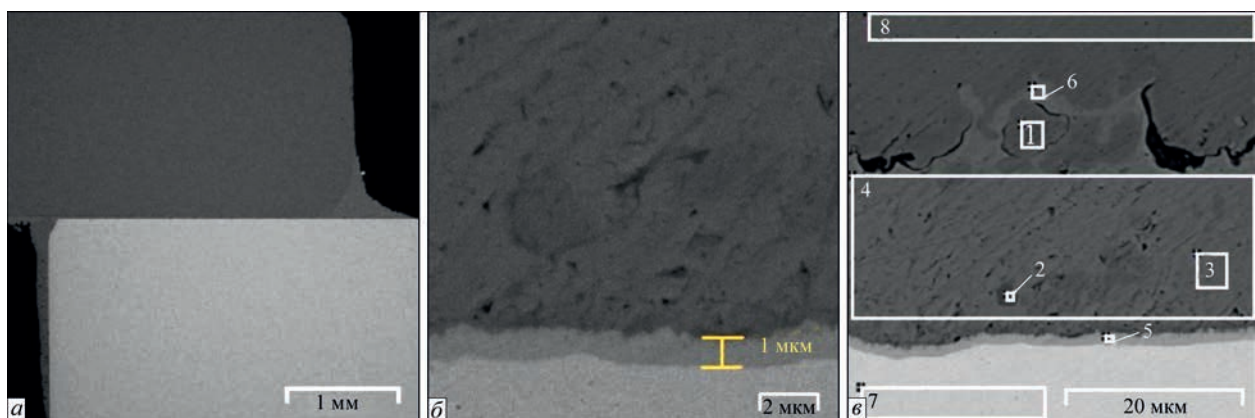


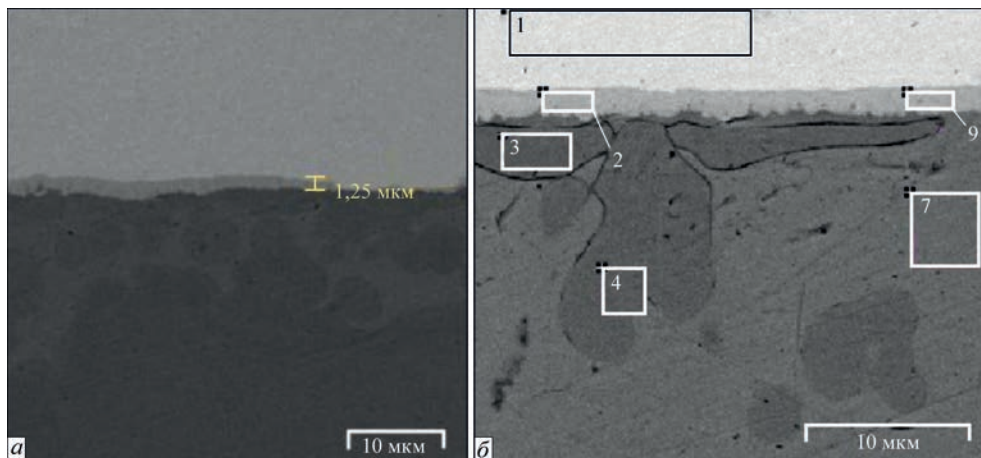
Рис. 2. Зовнішній вигляд (а), реакційний шар (б) і ділянки (в), в яких визначали хімічну неоднорідність паяного з'єднання Мо–Ковар ($\tau = 1$ хв)

Таблиця 1. Хімічна неоднорідність паяного з'єднання Мо–Ковар ($\tau = 1$ хв)

Номер спектра	Хімічні елементи, мас %					
	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Mo
1	22,12	39,49	17,62	13,50	6,42	0,85
2	29,99	28,25	21,43	5,06	10,07	5,21
3	26,53	4,52	4,41	5,37	59,17	–
4	26,33	5,71	5,02	5,15	57,79	–
5	10,25	18,26	11,80	0,69	2,57	56,42
6	24,06	8,87	5,62	9,15	52,30	–
7	–	–	–	–	0,48	99,52
8	0,69	52,79	17,75	28,77	–	–

в даних зернах зменшується, а марганцю, кобальту, міді – зростає (табл. 1, спектр 2, рис. 2, в), що свідчить про їх насичення складовими хімічними елементами припою (або частковим розчиненням в рідкому припої при паянні). Слід зазначити, що концентрація заліза в твердому розчині паяного шва, що прилягає до молібдену, не змінюється і залишається на рівні 4,52 %. При дослідженні хімічного складу твердого розчину на ділянках, що розташовані ближче до Ковару, визначено підвищену концентрацію заліза – 5,71 %.

Зі сторони молібдену, що межує з металом шва, формується реакційний шар на основі молібдену: 56,42Mo–18,26Fe–11,80Co–10,25Mn шириною 1 мкм, який містить незначну кількість міді і нікелю (рис. 2, а–в, табл. 1, спектр 5). Підвищення часу витримки при вакуумному паянні з однієї до трьох хвилин призводить до незначного збільшення його ширини до 1,25...2,0 мкм (рис. 3, табл. 2 спектр 2), але концентрація молібдену залишається на тому ж рівні (табл. 2, спектр 2, рис. 3, б).

Рис. 3. Мікроструктура (а) і електронне зображення (б) паяного з'єднання Мо–Ковар ($\tau = 3$ хв)

Таблиця 2. Хімічна неоднорідність паяного з'єднання Мо–Ковар

Номер спектра	Хімічні елементи, мас. %					
	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Mo
1	–	–	–	–	–	100,00
2	8,64	19,78	11,08	1,29	2,78	56,43
3	26,51	30,35	20,89	5,62	1,06	5,56
4	26,54	28,36	18,20	7,17	19,73	–
7	24,01	4,43	3,16	5,19	63,21	–
8	23,68	10,09	6,48	6,14	52,24	1,39
9	7,76	19,97	10,98	1,17	1,07	59,05

Відповідно до бінарної діаграми стану Fe–Mo (рис. 4) залізо і молібден обмежено розчинні і утворюють декілька інтерметалідних фаз: при високій температурі – стабільні інтерметалідні фази FeMo (σ -фаза) і $\text{Mo}_{38}\text{Fe}_{62}$ (R-фаза); в твердому стані за перитектичними реакціями утворюються ще дві інтерметалідні фази: Fe_2Mo і Fe_7Mo_6 . Особливістю високотемпературних фаз FeMo (σ -фази) і $\text{Mo}_{38}\text{Fe}_{62}$ (R-фази) є те, що в результаті зниження температури вони трансформуються в μ -фазу, область гомогенності якої становить 44...58 ат. % і тверді розчини на основі Mo і αFe (відповідно) [11].

За перитектоїдною реакцією утворюється сполука MoFe_2 (фаза Лавеса) з областю гомогенності $66,3 \pm 0,2$ ат. % заліза (при температурі 950 ± 50 °C). Такий фазовий склад характерний для бінарних сплавів даної системи, що приведені до рівноважного стану шляхом здійснення термічної обробки [11].

Слід зазначити, що кристалізація металу паяного шва протікає в нерівноважних умовах за

наявності дифузійних процесів і градієнту концентрацій на міжфазній границі основний ме-

тал-припій, що впливає на хімічний склад металу паяного шва і його морфологію [14]. На основі отриманих результатів локального мікрорентгено-спектрального аналізу можна припустити, що такі умови кристалізації металу паяного шва сприяють формуванню складної інтерметалідної фази на основі молибдену $Mo_{36}(Fe,Co,Mn,Cu,Ni)_{44}$, яка спостерігається у вигляді суцільної смуги – реакційного шару вздовж паяного шва і містить окрім заліза і молибдену інші складові елементи припою і основного металу. Між високотемпературними модифікаціями γ -залізом і α -кобальтом утворюється безперервний ряд твердих розчинів, аналогічно високотемпературній області бінарної системи залізо–марганець [11]. Щодо концентрації міді і нікелю, то вона незначна в даній фазі і не може суттєво впливати на її властивості.

Подальше збільшення часу витримки до 15 хв призводить до збільшення ширини реакційного шару в межах 2...3 мкм (рис. 5).

Концентрація молибдену практично не змінюється і залишається на тому ж рівні, що і в попередніх зразках (табл. 3, спектри № 2 і № 9). В окремих ділянках реакційного шару (зі сторони припою) його морфологія зазнає змін і трансформується в огранену поверхню (рис. 5, б, в).

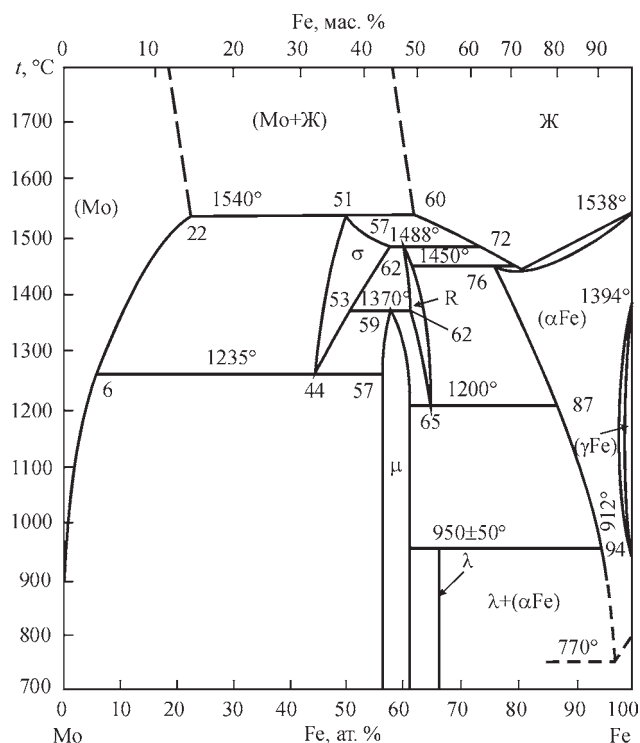


Рис. 4. Бінарна діаграма стану металічної системи Fe–Mo [11]

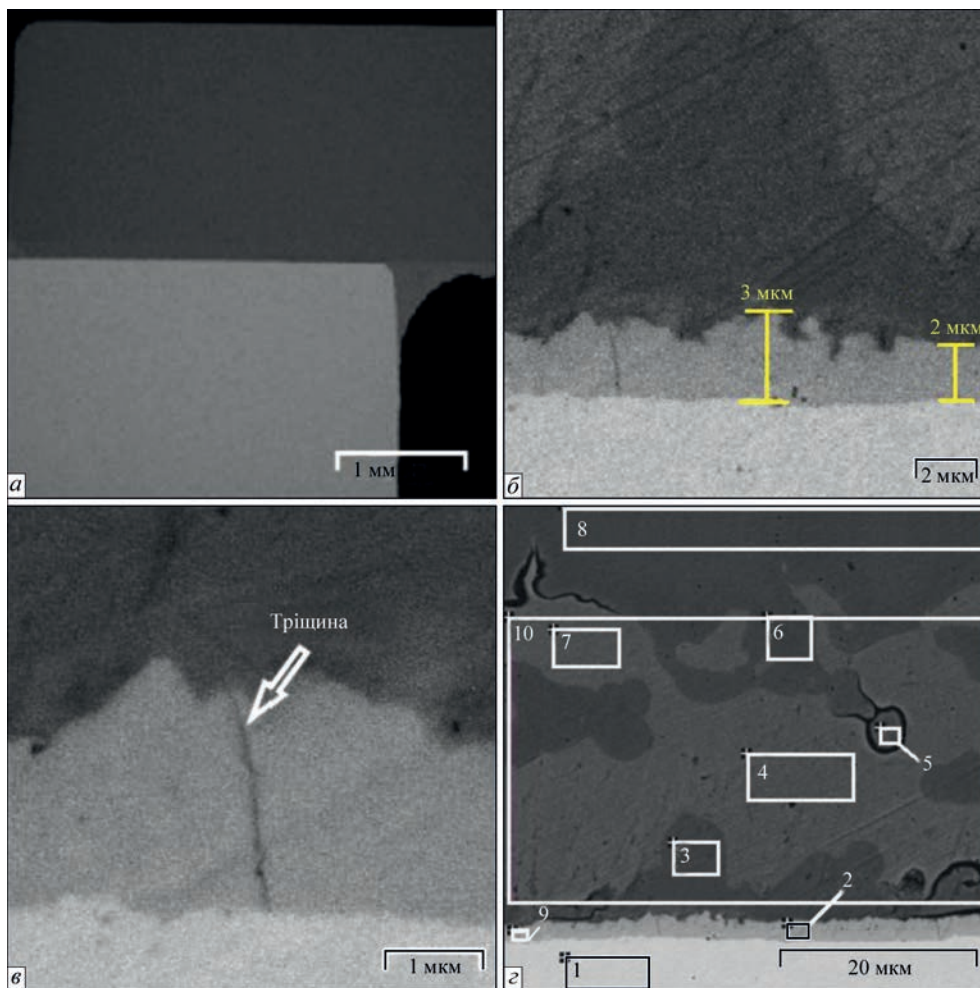


Рис. 5. Зовнішній вигляд (а), реакційний шар (б, в) і електронне зображення (г) мікроструктури паяного з'єднання Мо–Ковар ($\tau = 15$ хв)

Окрім того, збільшення часу витримки призводить не тільки до збільшення його ширини, а і до появи мікротріщин, які розповсюджуються тільки в деяких ділянках даного реакційного шару в напрямку, який перпендикулярний до його поверхні (рис. 5, б, в), що свідчить про його крихкість.

Концентрація складових елементів окремих фаз паяного шва теж змінюється (табл. 3). В твердому розчині концентрація марганцю складає 18,71...19,11 мас. %, що значно менше в порівнянні з попередніми зразками. Очевидно, що при збільшенні витримки при температурі паяння висока

пружність пару марганцю обумовлює його часткове випаровування, що призводить до зниження концентрації в металі паяного шва (припої).

В темній фазі концентрація заліза незначно підвищується і знаходиться в межах 31,69...47,56 %, а концентрація кобальту становить 16,34...17,42 % (табл. 3). Мікрорентгено-спектральним аналізом доведено, що збільшення витримки з однієї до 15 хв при температурі паяння зразків Мо–Ковар сприяє підвищенню концентрації заліза, нікелю та зниженню вмісту марганцю і міді в зернах темної фази, що розташовані біля Ковару (рис. 6).

Окрім того, слід зазначити, що підвищення концентрації заліза проявляється в більшій мірі в зернах даної фази, які розташовані ближче до Ковару. В зернах, що розташовані в центральній зоні шва, теж спостерігається підвищення концентрації заліза, але воно виражено в меншій мірі.

Аналіз отриманих результатів мікрорентгено-спектральних досліджень свідчить, що збільшення часу витримки при паянні різнофазних з'єднань молибден–Ковар сприяє підвищенню концентрації міді в твердому розчині – матриці металу паяного шва, але кількість заліза практично не змінюється і знаходиться в межах 4,52...4,95 % (рис. 7, а). Концентрація кобальту і нікелю практично не змінюється, а марганцю значно зменшується.

З проведених досліджень випливає, що зі збільшенням часу витримки з 1 до 15 хв збільшується ширина реакційного шару (фази на основі молибдену), але концентрація молибдену залишається на тому ж рівні, що і при витримці 1, 3 і 15 хв (рис. 7, б). Спостерігається незначне зменшення концентрації марганцю з одночасним підвищенням концентрації заліза. Такі особливості формування структури обумовлені будовою бінарних діаграм стану металевих систем [11] та високою пружністю пару марганцю.

Отримані дані добре корелюють з результатами досліджень розподілу елементів в паяному

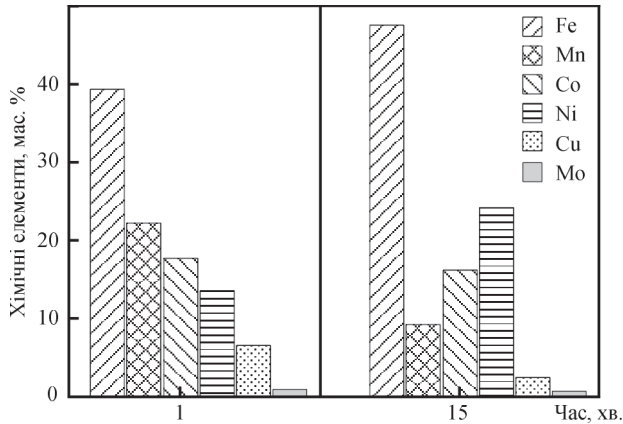


Рис. 6. Залежність вмісту хімічних елементів у фазі на основі заліза від часу витримки при паянні різнофазних з'єднань Мо–Ковар

Таблиця 3. Хімічна неоднорідність паяного з'єднання Мо–Ковар (τ = 15 хв)

Номер спектра	Хімічні елементи, мас %					
	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Mo
1	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	99,81
2	7,00	22,47	12,58	1,79	0,00	56,16
3	21,03	31,97	17,42	8,31	17,18	4,10
4	19,11	4,95	3,71	6,21	66,01	0,00
5	20,36	31,69	16,14	10,58	18,39	2,85
6	9,15	47,56	16,34	24,07	2,41	0,47
7	18,71	6,15	4,14	6,45	64,36	0,19
8	4,44	48,94	16,63	24,78	5,20	0,00
9	6,57	21,92	12,63	1,76	1,31	55,81
10	17,24	12,60	6,60	6,90	55,98	0,69

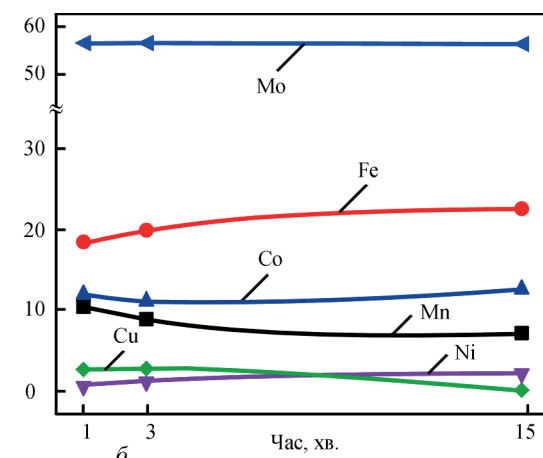
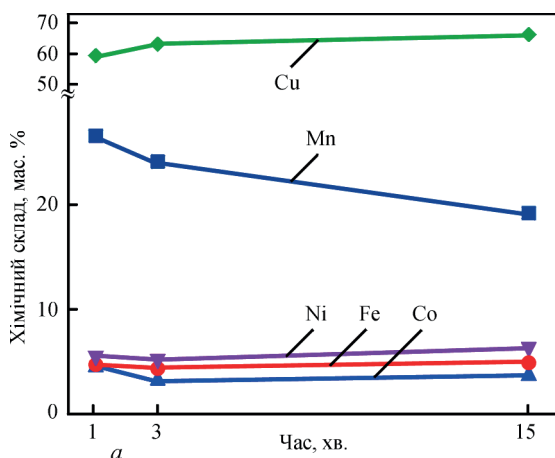


Рис. 7. Вплив часу витримки на концентрацію хімічних елементів в фазах: твердому розчині (а); в реакційному шарі – фазі на основі молибдену (б) при паянні різнофазних з'єднань Мо–Ковар

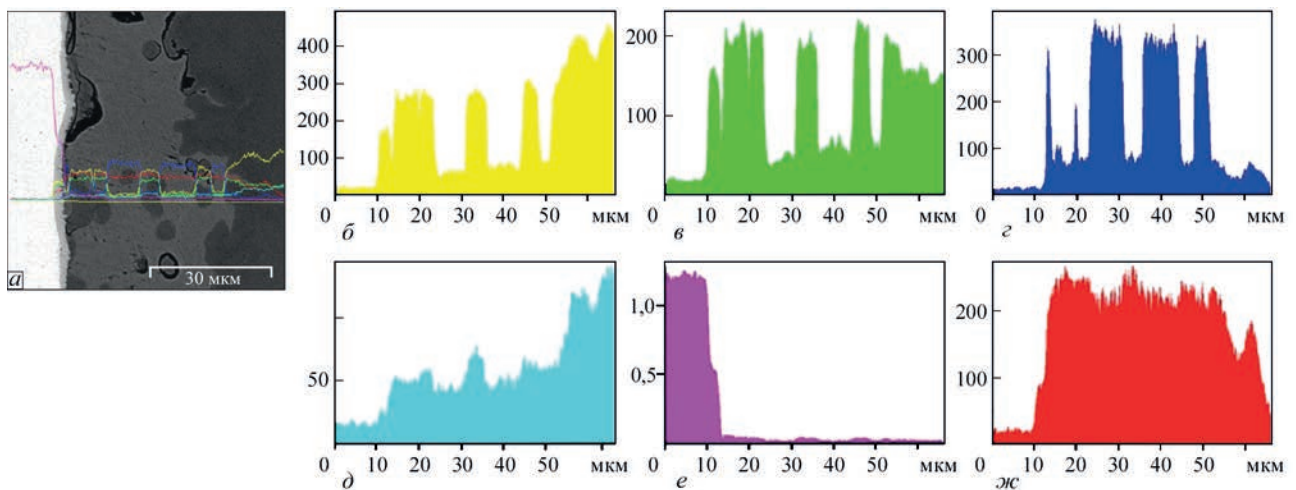


Рис. 8. Електронне зображення (а) і якісний розподіл елементів: заліза (б), кобальту (в), міді (з), нікелю (д), молібдену (е) та марганцю (ж) в паяному шві різномірного з'єднання при застосуванні припою системи Cu–Mn–4,5Co

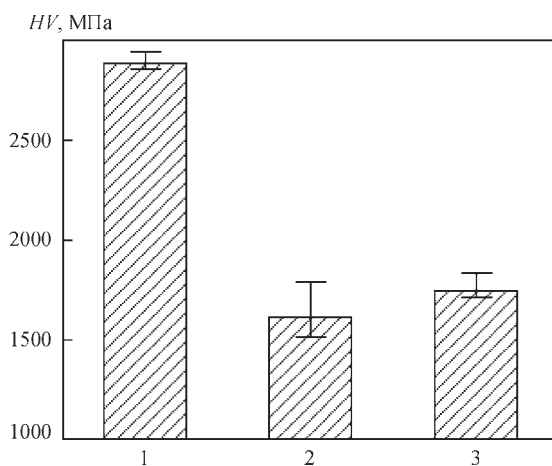


Рис. 9. Мікротвердість різномірного з'єднання молібден–Ковар: 1 – молібден; 2 – шов; 3 – Ковар

з'єднанні Мо–Ковар ($\tau = 15$ хв), що визначені шляхом сканування електронним променем поперечного перерізу паяного шва. Підтверджується присутність в центральній ділянці шва фази на основі системи Fe–Co–Mn та фази на основі молібдену, котра кристалізується у вигляді суцільної смуги вздовж міжфазної границі припій–молібден (рис. 8).

Результати досліджень паяних з'єднань ($\tau = 3$ хв) показали, що мікротвердість паяного шва характеризується суттєво нижчими значеннями в порівнянні з такими для молібдену, але мало відрізняється від значень для Ковару (рис. 9).

На основі отриманих даних можна зробити висновок, що мікротвердість (HV) паяного шва (1513...1791 МПа) і Ковару (1678...1831 МПа) знаходиться в близьких межах, що може позитивно впливати на механічні властивості і на релаксацію напружень, котрі виникають при паянні різномірних з'єднань.

Висновки

Мікрорентгеноспектральними дослідженнями встановлено, що основною фазою (матрицею) паяного шва з'єднань молібден–Ковар є твердий

розчин на основі міді, в якому розчиняється до 4,95 % заліза. Вздовж міжфазної границі припій–молібден формується у вигляді суцільного (реакційного) шару фази на основі молібдену. Окрім того, спостерігаються окремі одиничні зерна на основі заліза, що кристалізуються на фоні матриці–твердого розчину. Збільшення витримки з 1 до 15 хв сприяє підвищенню концентрації заліза, нікелю (в зернах темної фази, що розташовані біля Ковару) та зниженню вмісту марганцю і міді.

В твердому розчині (матриці) металу паяного шва концентрація марганцю зменшується зі збільшенням витримки, міді підвищується, але кількість заліза практично не змінюється і знаходиться в межах 4,52...4,95 %.

Локальним мікрорентгеноспектральним аналізом доведено, що збільшення часу витримки з 1 до 15 хв при паянні з'єднань молібден–Ковар сприяє збільшенню ширини реакційного шару з 1 до 3 мкм, що формується на міжфазній границі молібден–метал шва, але не впливає на його хімічний склад. Концентрація молібдену при різній витримці (1, 3, 15 хв) знаходиться в межах 55,81...59,05 %. Збільшення ширини реакційного шару на основі молібдену (до 3 мкм) призводить до формування ограненої морфології зі сторони металу паяного шва і до появи мікротріщин в ньому.

Список літератури

1. Зеликман, А.Н. (1970) *Молібден*. Москва, Металлургия.
2. Kumar, S., Upadhyay, A., Dinesh Kumar, P., Agarwal, A. (2015) Vacuum Brazing of Molybdenum–Kovar and Evaluation of its Joint Strength. *Materials Science Forum*, 830-831, 282–285. doi:10.4028/www.scientific.net/msf.830-831.282
3. 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. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.017
4. Казаков Н. Ф. (1986) *Диффузионная сварка материалов*. Москва, Машиностроение.
5. Guoqing, C., Qianxing, Y., Zhibo, D. et al. (2021) Microstructure evolution analysis for the reaction interface between molybdenum and Kovar acquired by electron beam

- welding-brazing. *Materials Characterization*, 171, 110781. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110781>
- Петрунин И. Е. (2003) *Справочник по пайке*. 3-е изд. Москва, Машиностроение.
 - (2006) *Машиностроение. Энциклопедия, Технология сварки, пайки и резки*. Т. 111-4 Патон Б.Е. (ред.). Москва, Машиностроение.
 - Срмолаєв Г.В., Квасницький В.В., Квасницький В.Ф. та ін. (2015) *Паяння матеріалів*. Підручник. Миколаїв, НУК.
 - Костин А.М., Лабарткава Ал.В., Мартыненко В.А. (2014) Исследование процессов взаимодействия титано-содержащих припоев с оксидной керамикой и коваром. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 36, 6, 815–827.
 - Singh, M., Asthana, R., Sobczak, N. (2020) Active Brazing of SiC-Base Ceramics to High-Temperature Alloys. *J. of Mater. Eng. and Perform.* 29, 4898–4912 <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04934-3>
 - Лякишев Н.П. (1997) *Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: в 3 т. Т. 2*. Москва, Машиностроение.
 - Maksymova, S.V., Voronov, V.V., Kovalchuk, P.V., Larionov, A.V. (2017) Producing dissimilar joints of molybdenum–stainless steel using vacuum brazing. *The Paton Welding J.*, 2, 13–18. <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.02.03>
 - Maksymova, S.V., Kovalchuk, P.V., Voronov, V.V. (2021) Vacuum brazing of Kovar–molybdenum dissimilar joints. *Ibid.*, 7, 13–18. <https://doi.org/10.37434/tpwj2017.02.03/>
 - Maksymova S. V., Voronov V. V., Kovalchuk P. V., Larionov A. V. (2017) Influence of Temperature of the Brazing on Structure of Brazed Heterogeneous Molybdenum–Stainless Steel Joints. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol. J.*, 39, 9, 1227–1237 DOI:10.15407/mfint.39.09.1227
 - beam welding of molybdenum to Kovar. *J. of Materials Proc. Technology*, 267, 280–288. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.017>
 - Kazakov, N.F. (1986) *Diffusion welding of materials*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 - Guoqing, C., Qianxing, Y., Zhibo, D. et al. (2021) Microstructure evolution analysis for the reaction interface between molybdenum and Kovar acquired by electron beam welding-brazing. *Materials Characterization*, 171, 110781. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110781>
 - Petrinin, I.E. (2003) *Handbook on brazing. 3rd Ed.* Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 - (2006) *Mechanical engineering. Encyclopedia: Technology of welding, brazing and cutting*. Vol. 111-4. Ed. by B.E. Paton. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 - Yermolayev, G.V., Kvasnitskiy, V.V., Kvasnitskiy V.F. et al. (2015) *Soldering of materials: Manual*. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].
 - Kostin, A.M., Labartkava, Al.V., Martynenko, V.A. (2014) Study of processes of interaction of titanium-containing brazing filler metals with oxide ceramics and covar. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol. J.*, 36(6), 815–827 [in Russian].
 - Singh, M., Asthana, R., Sobczak, N. (2020) Active brazing of SiC-base ceramics to high-temperature alloys. *J. of Mater. Eng. and Perform.* 29, 4898–4912 <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04934-3>
 - Lyakishev, N.P. (1997) *State diagrams of binary metallic systems: Handbook*. In: 3 Vol. Vol. 2, Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 - Maksymova, S.V., Voronov, V.V., Kovalchuk, P.V., Larionov, A.V. (2017) Producing dissimilar joints of molybdenum–stainless steel using vacuum brazing. *The Paton Welding J.*, 2, 13–18. <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.02.03>
 - Maksymova, S.V., Kovalchuk, P.V., Voronov, V.V. (2021) Vacuum brazing of Kovar–molybdenum dissimilar joints. *The Paton Welding J.*, 7, 13–18. <https://doi.org/10.37434/tpwj2017.02.03/>
 - Maksymova S.V., Voronov V.V., Kovalchuk P.V., Larionov A.V. (2017) Influence of temperature of the brazing on structure of brazed heterogeneous molybdenum–stainless steel joints. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol. J.*, 39(9), 1227–1237 DOI:10.15407/mfint.39.09.1227

References

FEATURES OF THE STRUCTURE OF MOLYBDENUM-COVAR BRAZED 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

The work presents the results of metallographic and X-ray microspectral studies of molybdenum-Kovar overlap joints, which were produced by vacuum brazing with application of brazing filler metal based on Cu-Mn-Co system. The influence of soaking at brazing temperature on brazed seam structure formation was studied. Local X-ray microspectral analysis was used to determine the number of structural components of the brazed seam: copper-based solid solution, individual iron-based grains, reaction layer in the form of a continuous band on molybdenum - brazing filler metal interface. It was found that longer soaking at the brazing temperature promotes an increase of the reaction layer width from 1 to 3 ~m and leads to formation of a faceted morphology from the brazed seam side and to microcracks initiation in it, but it does not affect molybdenum concentration, which at different soaking (1...15 min.) is in the range of 55.81...59.05 wt. %. In the solid solution (matrix) manganese concentration decreases with longer soaking, copper concentration rises, but the quantity of iron practically does not change, and it is in the range of 4.52... 4.95 wt. %. In single grains of the dark phase, observed near the interface with Kovar, longer soaking promotes an increase of iron and nickel concentration and lowering of manganese and copper content. 14 Ref., 3 Tabl., 9 Fig.

Keywords: Kovar, molybdenum, vacuum brazing, brazing filler metal, structure, brazed seam, soaking, reaction layer, X-ray microspectral analysis

Надійшла до редакції 07.04.2022

Materials, methods and technologies

24th International Conference

19-22 August, 2022

Burgas, Bulgaria

<http://bit.ly/2Aa6Jk3>

