

ВПЛИВ ЗАЛІЗА НА СТРУКТУРУ І ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИПОЇВ СИСТЕМИ Cu–Mn–Co–Fe

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

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. К. Малевича, 11. E-mail: maksymova.svitlana15@ukr.net

Наведено результати комплексних досліджень припоїв системи Cu–Mn–Co–Fe, що леговані залізом в межах 1...5 мас. %. Розрахунковим шляхом визначено температури плавлення та показано, що підвищення концентрації заліза з 1 до 5 мас. % призводить до незначного (з 912 до 923 °C) підвищення температури солідусу та суттєвого підвищення температури ліквідусу (з 931 до 1027 °C). При цьому розширюється температурний інтервал плавлення, який становить 104 °C. Результатами експериментальних досліджень з розтікання припоїв по Ковару і корозійностійкій сталі встановлено, що підвищення концентрації заліза з 1 до 5 % сприяє не тільки підвищенню температури ліквідусу, а й збільшенню площі розтікання, що обумовлено температурою плавлення твердого розчину на основі міді. Локальним мікрорентгеноспектральним аналізом визначено дискретний розподіл складових елементів і показано, що припій після розтікання містить два твердих розчини: на основі міді та на основі марганцю. Результатами досліджень паяних напускних пластинчастих з'єднань Ковар–корозійностійка сталь встановлено, що легування сплаву системи Cu–Mn–Co–Fe залізом сприяє підвищенню мікротвердості та міцності на зсув. *Бібліогр.* 22, табл. 5, рис. 11.

Ключові слова: припій мідь–марганець–кобальт–залізо, температурний інтервал плавлення, структура, мікротвердість, контактний кут змочування, твердий розчин

Вступ. З'єднання різнорідних матеріалів (Ковар–корозійностійка сталь) є одним з найскладніших завдань, що постають перед сучасними виробниками. Існують різні технології отримання з'єднань, зокрема найширше застосування набули паяння, дифузійне, електронно-променеове, лазерне зварювання та ін. [1–6]. Різнорідні з'єднання зазвичай використовуються в приладобудуванні, електроенергетичній, хімічній, нафтохімічній, атомній промисловості, де необхідно забезпечити стійкість форми та розміру при зміні температури [7–11].

Одним з основних способів отримання з'єднань такого типу є паяння. Технологічні процеси паяння дозволяють з'єднувати при необхідності деталі не по контуру, а одночасно по всій поверхні, забезпечуючи високу продуктивність процесу, можливість автоматизації зі збереженням вихідної структури основного металу за умови правильного вибору хімічного складу припою і температурного інтервалу плавлення [12].

Для паяння різних матеріалів широко використовуються в якості припоїв сплави на основі бінарної системи мідь–марганець, що характеризуються структурою твердого розчину [13]. На діаграмі стану системи мідь–марганець можна побачити наявність мінімуму на кривій ліквідусу, що відповідає температурі плавлення 870 °C і концентрації марганцю приблизно 37 ат. % [14]. При зниженні температури нагріву в бінарній системі протікають процеси упорядкування твердих

розчинів. Разом з тим слід зауважити, що двокомпонентні припої використовують не часто. Одним з важливих факторів є можливість випаровування марганцю в процесі нагріву, що впливає на хімічний склад припою та температуру плавлення. Для поліпшення технологічних характеристик паяних з'єднань застосовують додаткове легування сплавів даної системи іншими хімічними елементами [12]. До найпоширеніших відносяться нікель, залізо, кобальт, які підвищують механічні властивості не тільки припоїв, але й паяних з'єднань.

Мета даної роботи полягає в дослідженні впливу заліза на технологічні властивості припоїв системи Cu–Mn–Co–Fe, їх температурний інтервал плавлення, хімічну неоднорідність, мікротвердість та контактний кут змочування, що формується при розтіканні по Ковару і корозійностійкій сталі.

Методи досліджень та матеріали. Експериментальні сплави на базі системи Cu–Mn–4,5Co–Fe виготовляли шляхом аргоно-дугового плавлення неплавким вольфрамовим електродом на холодній мідній підкладці в середовищі аргону високої чистоти (об'ємна частка аргону не менше 99,993 %). Рівномірність розподілу легуючих елементів по об'єму зливка досягалась за рахунок п'ятикратного переплаву з перевертанням зливку.

У якості основного матеріалу використовували пластинчасті зразки розміром 20×20×2 мм з Ковару і корозійностійкої сталі 12X18H10T (рис. 1, табл. 1). Припій застосовували в литому стані.

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

В.В. Воронов — <https://orcid.org/0000-0002-0410-1154>, І.І. Дацюк — <https://orcid.org/0009-0008-1763-1382>

© С.В. Максимова, П.В. Ковальчук, В.В. Воронов, І.І. Дацюк, 2023

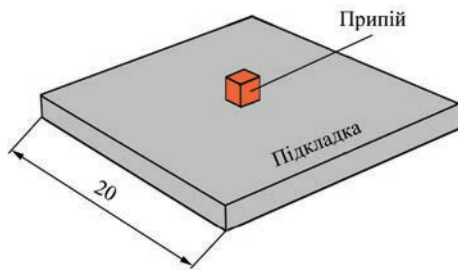


Рис. 1. Схематичне зображення підкладка-припоїв

Розтікання експериментальних припоїв проводили в вакуумній печі (СГВ 2,4-2/15-І3) з радіаційним нагрівом (розрідження робочого простору $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па) зі швидкістю нагріву $18 \dots 20$ °С/хв, охолодження — $(10 \dots 15) \pm 5$ °С/хв. Температуру нагріву ($T_n + 30$ °С) контролювали за допомогою термопари, яку фіксували на зразку (витримка становила 3 хв).

Для термодинамічних розрахунків температурного інтервалу плавлення досліджуваних припоїв використовували спеціалізовану програму для моделювання властивостей багатокомпонентних сталей та сплавів JMatPro v.7.0. компанії «Sente Software». Даний програмний комплекс дозволяє здійснювати термодинамічні розрахунки для багатокомпонентних систем. Ці розрахунки базуються на оцінці енергетичних функцій Гіббса для кожної фази при заданій температурі [16–18].

Металографічні дослідження та мікрорентгеноспектральний аналіз експериментальних припоїв проводили на литих зразках з полікристалічною структурою (після плавлення). При цьому всі сплави охолоджували до кімнатної температури з однаковою швидкістю. За стандартною методикою готували мікрошліфи та проводили дослідження їх мікроструктури із застосуванням скануючого електронного мікроскопа TescanMira 3 LMU. Локаль-

ний розподіл елементів в окремих фазах визначали мікрорентгеноспектральним аналізом з використанням енергодисперсійного спектрометра Oxford Instruments X-max 80. Шліфи досліджували без хімічного травлення в режимі BSE. Локальність вимірювань складала до 1 мкм.

Мікротвердість припоїв за Віккерсом (HV) у вихідному стані досліджували із застосуванням стаціонарного твердоміра NOVOTEST TC-MKB-1M з навантаженням 0,05 Н ($\tau = 15$ с), похибка вимірювань становила 5 %. Для вимірювання площі розтікання використовували програму Image-Pro Plus 6.0. Застосування даної програми дозволило провести точні вимірювання та аналіз отриманих даних щодо розтікання. Крім того, програма дозволяє отримувати візуальне представлення результатів у зручному для подальшого використання форматі. Міцність на зріз паяних напускних пластинчастих з'єднань визначали при кімнатній температурі із застосуванням випробувальної машини ZDM 10 Zwick-1488.

Результати досліджень та обговорення. Термодинамічними розрахунками визначено температури солідусу та ліквідусу досліджуваних припоїв системи Cu–Mn–4,5Co–Fe (табл. 2).

Проведеними розрахунками встановлено, що збільшення концентрації заліза з 1 до 5 % у сплаві системи Cu–Mn–Co–Fe призводить до підвищення температури ліквідусу з 931 до 1027 °С. Температура солідусу змінюється незначно (з 912 до 923 °С). За результатами визначених температур побудовано графік, який відображає вплив заліза на інтервал плавлення сплавів і показує, що з підвищенням концентрації заліза температурний інтервал плавлення значно розширюється (рис. 2).

Подальша обробка даних методами статистичного аналізу дозволила отримати залежності кіль-

Таблиця 1. Хімічний склад основного матеріалу [15]

Марка матеріалу	Хімічний елемент, мас. %									
	Fe	Ni	Co	C	Si	Mn	Cr	Ti	Al	Cu
Ковар 29НК	51,14...54,5	28,5...29,5	17...18	0,03	0,3	0,4	0,1	0,1	0,2	0,2
12X18H10T	67	9...11	–	0,12	0,8	2	17...19	0,4...1	–	0,3

Таблиця 2. Склад і розрахункові температури солідусу та ліквідусу експериментальних припоїв

№ припою	Склад, мас. %	Температура, °С	
		T_c	T_n
1	Cu–Mn–4,5Co–1Fe	912	931
2	Cu–Mn–4,5Co–2Fe	915	946
3	Cu–Mn–4,5Co–2,5Fe	917	957
4	Cu–Mn–4,5Co–5Fe	923	1027

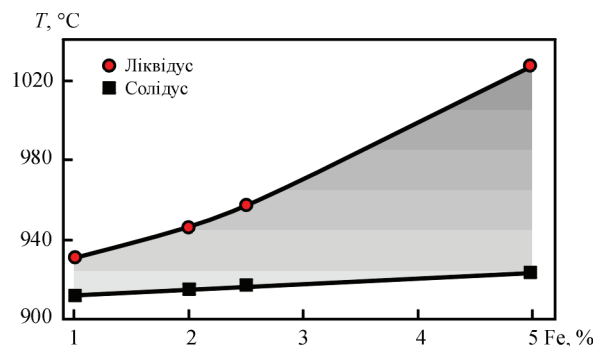


Рис. 2. Вплив заліза на інтервал плавлення сплавів системи Cu–Mn–4,5Co–Fe

кості рідкої фази від температури нагріву для кожного сплаву, які свідчать про плавне збільшення кількості рідкої фази при підвищенні концентрації заліза з 1 до 2,5 % (рис. 3, а–в).

При нагріві сплавів, що містять 5 % заліза, з підвищенням температури з 925 до 937 °С кількість рідкої фази стрімко збільшується (рис. 3, г). Подальше підвищення температури (з 937 до 1027 °С) незначно впливає на збільшення кількості рідкої фази (у межах 83...100 %). Отримані дані добре узгоджуються з результатами експериментів з розтікання припоїв по основному металу (Ковару і корозійностійкій сталі), які будуть наведені нижче.

Проведеними металографічними дослідженнями і результатами мікрорентгеноспектрального аналізу встановлено, що сплави Cu–Mn–4,5Co–(1–5)Fe характеризуються двофазною структурою, яка утворена двома твердими розчинами. Локальним мікрорентгеноспектральним аналізом визначено дискретний розподіл складових елементів в окремих фазах.

На прикладі досліджень сплаву системи Cu–Mn–Co–Fe, який містить 5 % Fe, показано, що його структура є двофазною і складається з двох твердих розчинів, які характеризуються явно вираженою ліквіацією, притаманною сплавам сис-

теми Cu–Mn [19]. Основною фазою є твердий розчин (рис. 4, табл. 3, спектр 2) на основі міді (α -Cu), по границях зерен якого виділяються дендрити твердого розчину на основі марганцю (γ -Mn), що збагачені залізом, кобальтом та міддю (рис. 4, табл. 3, спектр 1).

Електронні зображення мікроструктури сплавів Cu–Mn–Co–(1–5)Fe (у вихідному стані) свідчать про деякі морфологічні зміни, що обумовлені впливом легуючого елементу — заліза (рис. 5). На підставі аналізу даних структур можна дійти висновку, що збільшення концентрації заліза з 1 до 5 % у сплавах системи Cu–Mn–Co–Fe призводить до подрібнення структурних складових і формування дрібнокристалічної структури (рис. 5).

На підставі мікрорентгеноспектральних досліджень встановлено взаємозв'язок між концентрацією заліза в припої і в окремих фазах. Так, підвищення концентрації заліза з 1 до 5 % в експериментальних припоях призводить до незначного

Таблиця 3. Хімічний склад окремих фаз сплаву Cu–Mn–4,5Co–5Fe

Спектр	Хімічні елементи, мас. %			
	Mn	Fe	Co	Cu
1	39,41	22,59	16,73	21,27
2	32,97	3,37	4,48	59,18

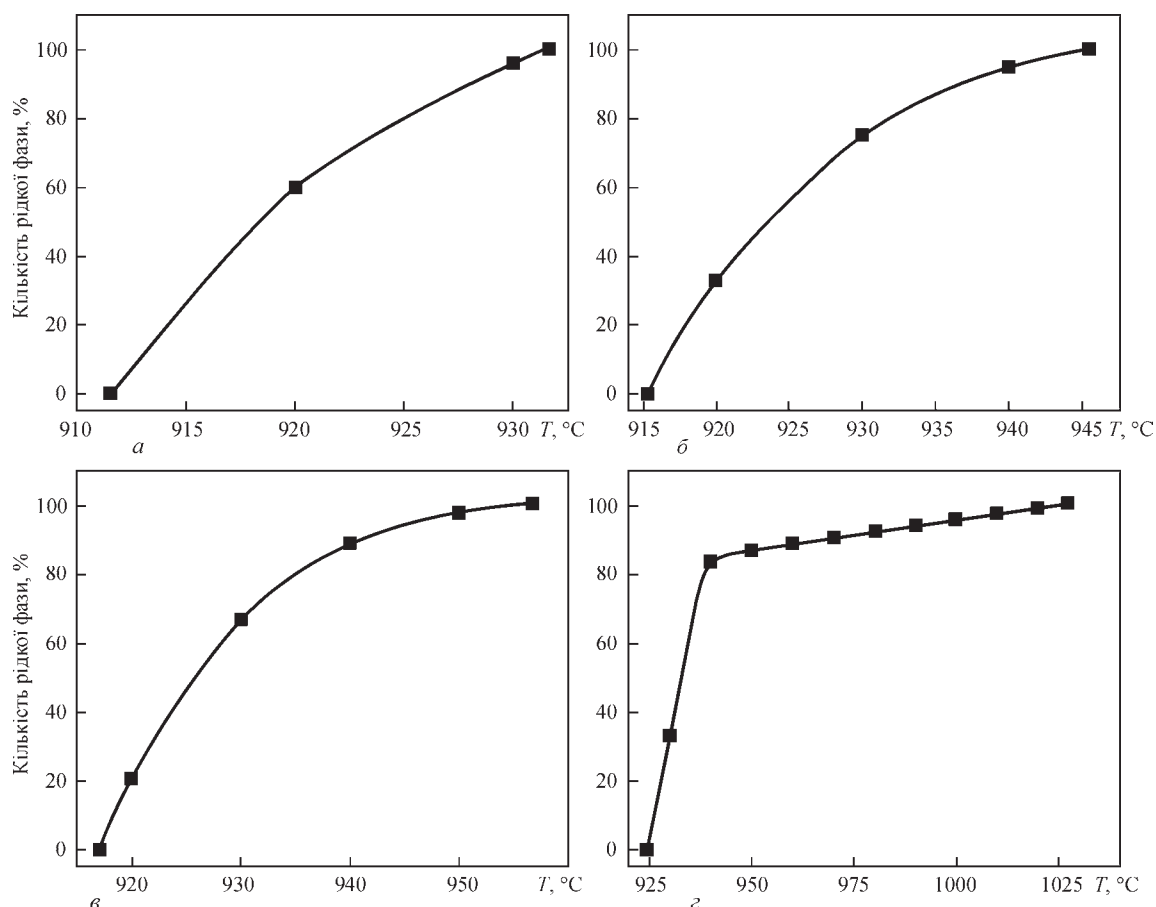


Рис. 3. Кількість рідкої фази в сплавах системи Cu–Mn–Co–Fe в залежності від температури та від вмісту Fe в %: 1 (а); 2 (б); 2,5 (в) та 5 (г)

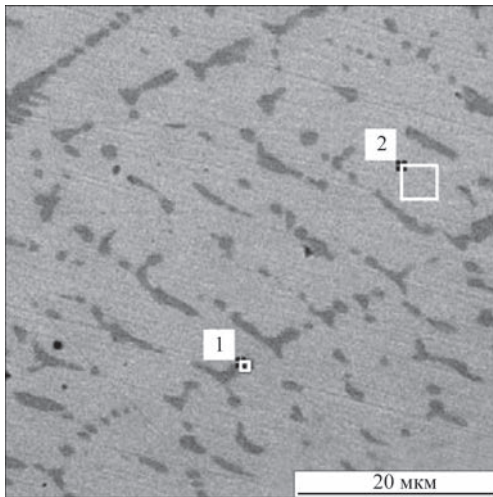


Рис. 4. Мікроструктура сплаву Cu–Mn–4,5Co–5Fe

збільшення його кількості з 0,3 до 3,37 % в α -твердому розчині на основі міді. При цьому в γ -фазі (на основі марганцю) спостерігається значне підвищення концентрації заліза — до 22,59 мас. % (при легуванні залізом в кількості 5 %) (рис. 6). Така структурна гетерогенність обумовлює підвищення мікротвердості припоїв (рис. 7).

Результати експериментів з розтікання експериментальних припоїв по Ковару і корозійностійкій сталі (відповідно до розрахованих температур плавлення) свідчать про задовільне змочування основних металів в умовах вакууму. При цьому формуються контактні кути невеликих розмірів у межах $4...22^\circ$ по Ковару і $6...10^\circ$ — по корозійностійкій сталі. Слід зауважити, що розтікання супроводжується певними кінетичними особливостями. Спочатку плавиться твердий розчин на основі міді, який у вигляді плоского фронту поширюється по основному металу і утворює ореол по периметру тугоплавкої складової припою, яка зосереджена в центральній зоні пластинчастого зразка (рис. 8).

Це є результатом того, що в процесі нагрівання відбувається часткове випарування марганцю [20], що обумовлено високою пружністю пари останнього. Це наглядно підтверджується кольором припою після розтікання (рис. 8). Окрім того, у γ -фазі (на основі марганцю) значно підвищується концентрація тугоплавких елементів: заліза і кобальту, що підтверджено результатами мікрорентгеноспектральних досліджень. У твердому розчині на основі міді кількість заліза теж під-

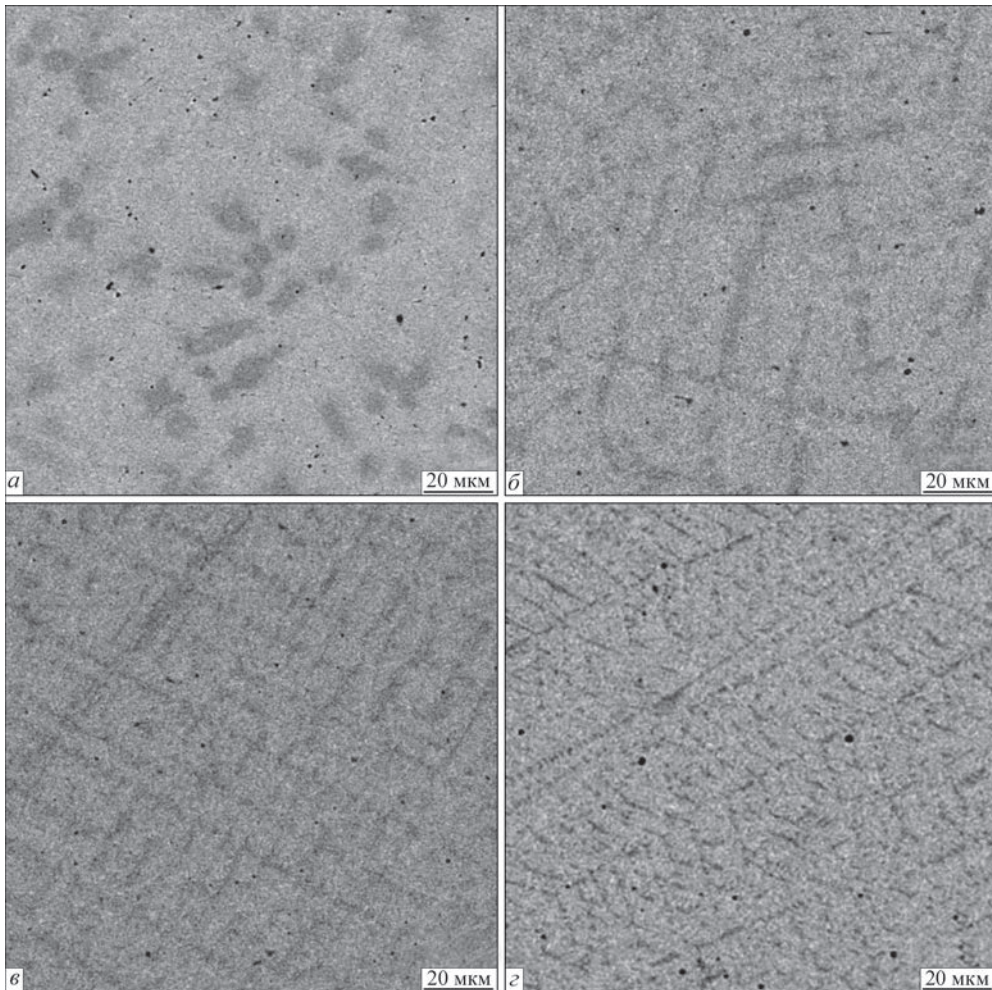


Рис. 5. Мікроструктура сплавів системи Cu–Mn–Co–Fe, що містять різну концентрацію Fe в %: 1 (а); 2 (б); 2,5 (в) та 5 (г)

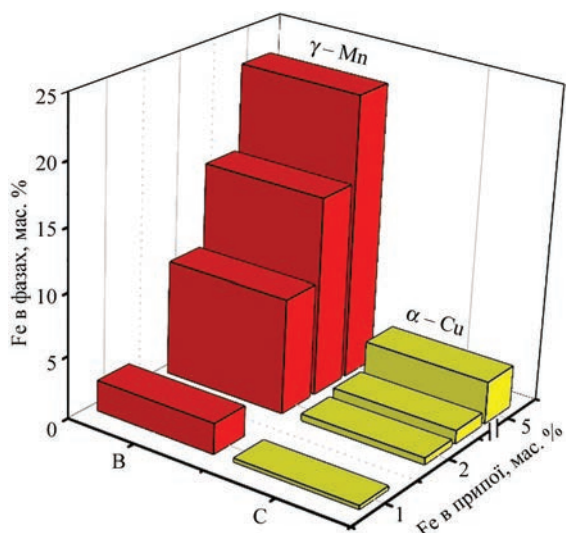


Рис. 6. Залежність концентрації Fe в окремих фазах від вмісту в вихідному припої

вищується, але незначно, що встановлено мікрорентгеноспектральним аналізом краплі припою після розтікання. Суттєва гетерогенність за хімічним складом краплі припою (при розтіканні) призводить до збільшення різниці між температурами

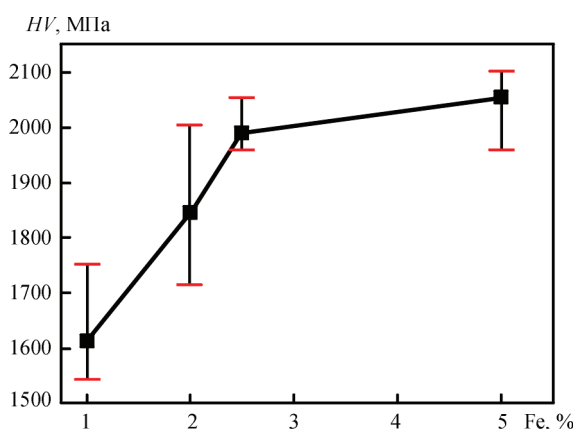


Рис. 7. Вплив концентрації заліза на мікротвердість припоїв системи Cu–Mn–Co–Fe

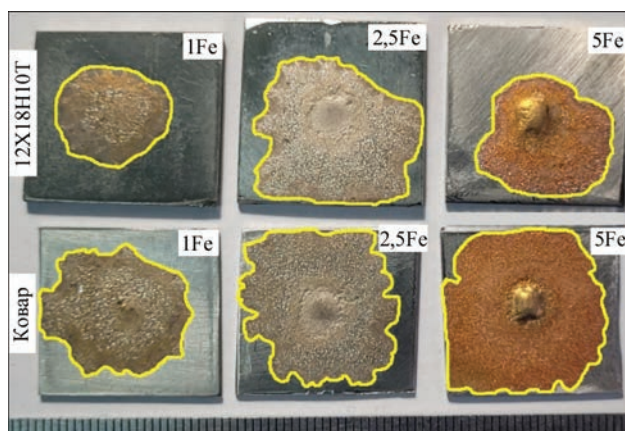


Рис. 8. Зовнішній вигляд зразків після розтікання припоїв з різною кількістю заліза по корозійностійкій сталі та Ковару плавлення обох складових. Оскільки два твердих розчини характеризуються різною температурою плавлення, то при змочуванні основного металу спочатку розтікається твердий розчин мідь–марганець, який і утворює ореол по периметру краплі припою. Схематичне зображення припою після розтікання наведено на рис. 9.

Таким чином, при збільшенні концентрації заліза в припоях системи Cu–Mn–Co–Fe підвищується температура ліквідусу, що потребує відповідного підвищення температури нагріву при проведенні експериментів з розтікання. Це сприяє кращому розтіканню легкоплавкої складової — твердого розчину на основі міді [21].

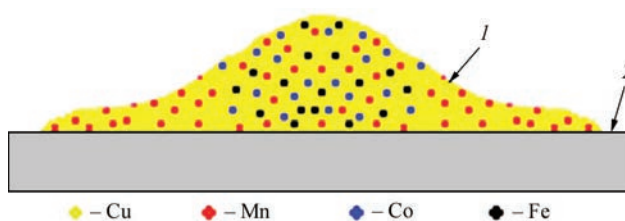


Рис. 9. Схематичне зображення припою після розтікання: крапля припою (1) і підкладка основного металу (2)

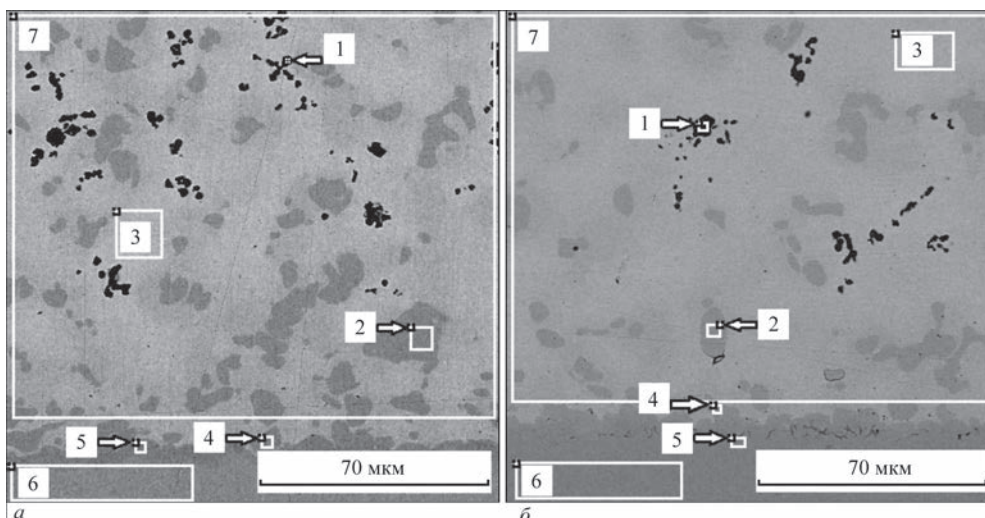


Рис. 10. Мікроструктура припою № 1 після розтікання по Ковару (а) і корозійностійкій сталі (б)

Аналіз отриманих результатів мікрорентгеноспектральних досліджень і локального розподілу елементів у краплі припою №1 (після розтікання) вказує на аналогічну тенденцію формування структури (як і у вихідному припої). Емпіричним шляхом доведено, що зі збільшенням кількості заліза в припої підвищується його концентрація в твердих розчинах на основі міді та на основі марганцю. Зокрема визначено, що фаза на основі системи марганець-мідь теж збагачується залізом — до 13,47 % і кобальтом — до 27,85 % (рис. 10, табл. 4, спектр 2). Разом з тим, під час дослідження виявлено дендрити на основі марганцю (86,06 % Mn) (рис. 10, а, табл. 4, спектр 1).

При розтіканні даного припою по корозійностійкій сталі також формуються тверді розчини на основі міді та на основі марганцю (рис. 10, б). Концентрація заліза в зернах фази на основі марганцю та на основі міді практично не змінюється (рис. 10, б, табл. 5).

Таблиця 4. Хімічний склад основного металу та окремих фаз при розтіканні по Ковару

Спектр	Хімічні елементи, мас. %				
	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
1	86,06	0,83	1,15	0,27	11,70
2	40,71	13,47	27,85	0,52	17,47
3	27,15	1,10	3,92	0,39	67,44
4	39,51	14,91	27,97	0,78	16,73
5	34,50	24,52	24,94	3,34	12,60
6	0,51	52,97	17,58	28,61	0,33
7	3,93	3,66	9,76	0,50	54,15

Після розтікання припою № 1 по корозійностійкій сталі формується аналогічна структура, яка теж утворена двома твердими розчинами та включеннями фази на основі марганцю (рис. 10, б). Локальним мікрорентгеноспектральним аналізом визначено, що зерна на основі марганцю, які кристалізуються на тлі твердого розчину α -Cu, містять таку ж кількість заліза (13,37 %), як і при розтіканні по Ковару. Концентрація заліза у твердому розчині теж не змінюється.

Децю вищу концентрацію легуючих елементів в окремих фазах після розтікання припою по основному металу можна пояснити нерівноважними термодинамічними умовами кристалізації припою, наявністю градієнта концентрацій складових елементів на міжфазній границі припою з основним металом, що призводить до протікання дифузійних процесів і структурної гетерогенності.

Отриманими результатами досліджень доведено, що збільшення кількості заліза у вихідному припої з 1 до 5 % призводить до підвищення його концентрації в структурних складових. Так, у твердому розчині Cu–Mn (матриця) спостерігається незначне підвищення концентрації заліза з 1,1 до 3,0 % при розтіканні по Ковару та з 0,36 до 2,6 % — по корозійностійкій сталі (рис. 11, а).

Слід зазначити, що в твердому розчині на основі γ -Mn виявлено стрімке підвищення концентрації заліза (з 13,47 до 42,65 %) після розтікання припою № 4 по Ковару (рис. 11, б). Аналогічне

Таблиця 5. Хімічний склад основного металу та окремих фаз при розтіканні припою № 1 по корозійностійкій сталі

Спектр	Хімічні елементи, мас. %							
	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
1	16,73	0,11	0,00	79,72	0,43	0,23	0,32	2,46
2	0,00	0,00	0,68	42,00	13,37	28,10	0,00	15,85
3	0,00	0,00	0,00	28,61	0,36	2,66	0,00	68,36
4	0,00	0,00	0,89	41,84	13,86	27,20	0,00	16,22
5	0,31	0,24	15,28	11,40	60,55	4,28	6,57	1,38
6	0,53	0,28	17,65	1,27	71,21	0,34	8,72	0,00
7	0,00	0,00	0,21	32,16	2,88	7,69	0,00	57,06

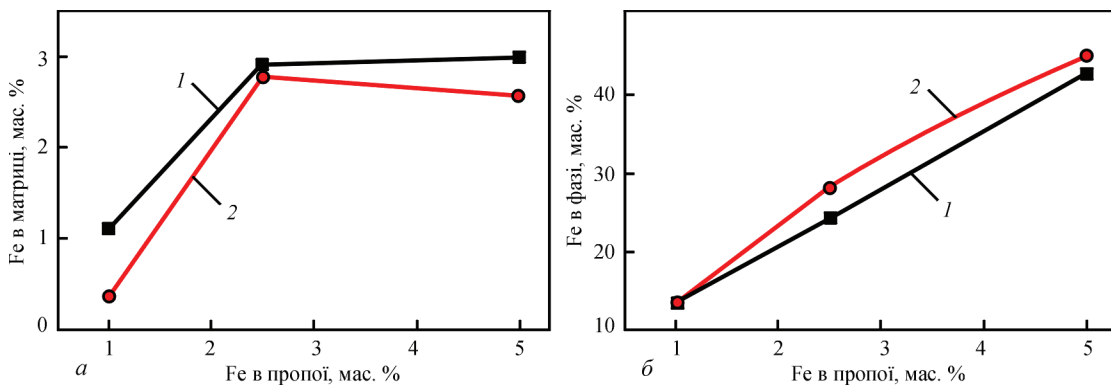


Рис. 11. Вплив Fe на його концентрацію в: твердому розчині на основі α -Cu (а) та на основі γ -Mn (б) після розтікання припоїв по Ковару (1) і корозійностійкій сталі (2)

збільшення кількості заліза (з 13,37 до 44,82 %) спостерігається і при розтіканні по корозійностійкій сталі (рис. 11, б). Результати електронної мікроскопії і мікрорентгеноспектрального аналізу добре корелюють з результатами механічних випробувань.

Попередніми дослідженнями встановлено [22], що при паянні різнорідних напускних з'єднань Ковар-корозійностійка сталь припоєм Cu–Mn–4,5Co міцність на зсув становить 434 МПа. Легування даного припою залізом в кількості 1 % призводить до зміцнення двох твердих розчинів залізом і, відповідно, до підвищення міцності на зсув з 434 до 488 МПа.

Комплексні результати проведених досліджень відкривають додаткові можливості підвищення технологічних властивостей мідно-марганцевих припоїв, що застосовуються при створенні паяних вузлів з різних матеріалів.

Висновки

Розрахунковим шляхом визначено, що збільшення вмісту Fe у сплавах системи Cu–Mn–Co–Fe з 1 до 5 % призводить до підвищення температури ліквідусу з 931 до 1027 °C, тоді як температура солідусу зростає незначно (з 912 до 923 °C). При цьому спостерігається значне (104 °C) розширення інтервалу плавлення припою.

Результатами мікрорентгеноспектральних досліджень та з урахуванням будови діаграм плавкості доведено, що сплави системи Cu–Mn–4,5Co–(1–5)Fe характеризуються двофазною структурою, яка складається з двох твердих розчинів. Основною фазою є твердий розчин на основі міді, який містить дендрити твердого розчину на основі марганцю, що збагачені залізом, кобальтом та міддю. Підвищення концентрації заліза в припої сприяє значному збільшенню його кількості в твердому розчині на основі марганцю (γ -фазі) і, відповідно, підвищенню мікротвердості.

Встановлено, що збільшення кількості заліза у вихідному припої з 1 до 5 % призводить до підвищення його концентрації в структурних складових після розтікання. Так, спостерігається незначне підвищення концентрації заліза (з 1,1 до 3,0 %) в твердому розчині Cu–Mn (матриці) при розтіканні по Ковару та з 0,36 до 2,6 % — при розтіканні по корозійностійкій сталі. У твердому розчині на основі марганцю спостерігається стрімке підвищення концентрації заліза з 13,47 до 42,65 % після розтікання припоїв по Ковару та з 13,37 до 44,82 % при розтіканні по корозійностійкій сталі.

Механічними випробуваннями паяних напускних з'єднань Ковар-корозійностійка сталь

доведено, що легування припою системи Cu–Mn–Co–Fe залізом у кількості 1 % сприяє підвищенню міцності на зсув з 434 (базового припою) до 488 МПа.

Список літератури/References

1. Mai, T.A., Spowage, A.C. (2004) Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminium. *Materials Science and Engineering, A*, **374**, 1–2, 224–233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.02.025>
2. Fadhali, M.M. A., Zainal, S.J., Munajat Y., Jalil, A., Rahman, R. (2010) Laser welding characterization of kovar and stainless steel alloys as suitable materials for components of photonic devices packaging. *AIP Conference Proceedings*, **1217**, 147–152. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3377802>
3. Калетина Ю.В., Ефимова Е.Д., Романов М.К. (2014) Проблемы свариваемости деталей из аустенитной стали 12X18H10T и прецизионного сплава 29НК. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **6**, 26–29. Kaletina, Yu.V., Efimova, E.D., Romanov, M.K. (2014) Problems of weldability of parts made of austenitic steel 12Kh18N10T and precision alloy 29NK. *Metal Science and Heat Treatment of Metals*, **6**, 26–29 [in Russian].
4. Sun, Z., Moio, T. (1994) Melting ratio in laser welding of dissimilar metals. *J. Mater. Sci. Lett*, **13**, 980–982. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00701444>
5. Xin, C., Jiazhen, Y., Li, N., Liu, W., Du, J., Cao, Y., Shi, H. (2016) Microstructural evolution during the brazing of Al₂O₃ ceramic to kovar alloy by sputtering Ti/Mo films on the ceramic surface. *Ceramics International*, **42**, 11, 12586–12593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.04.094>
6. Baghjari, S.H., Gholambargani, M., Akbari Mousavi S.A. (2019) Application of the pulsed Nd:YAG laser welding to investigate the effect of laser beam position on weld characteristics of AISI 420 stainless steel to kovar alloy. *Lasers Manuf. Mater. Process.* **6**, 14–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40516-018-0078-y>
7. Qiao, G.J., Wang, H.J., Gao, J.Q., Jin, Z.H. (2005) Brazing Al₂O₃ to kovar alloy with Ni/Ti/Ni interlayer and dramatic increasing of joint strength after thermal cycles. *Materials Science Forum*, **486–487**, 481–484. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.486-487.481>
8. Fang, Y.J., Jiang, X.S., Mo, D.F., Song, T.F., Shao, Z.Y., Zhu, D.G., Zhu, M.H., Luo, Z.P. (2018) Microstructure and mechanical properties of electron beam-welded joints of titanium TC4 (Ti–6Al–4V) and kovar (Fe–29Ni–17Co) alloys with Cu/Nb multi-interlayer. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2018**, 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/2042871>
9. Sun, Z., Ion, J.C. (1995) Laser welding of dissimilar metal combinations. *J. Mater. Sci.*, **30**, 4205–4214. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00361499>
10. Xiao, R., Dong, P., Chen, K. (2009) Laser beam welding of dissimilar materials. *ICALEO 2009–28th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*, Orlando, FL, USA, 102, 660–665.
11. Wang, J.L., Yang, Z.W., Wang, Y., Wang, D.P., Li, H.J. (2021) Microstructural stability and mechanical properties of Al₂O₃/Kovar 4 J34 joint vacuum brazed using Ag–5Cu–1Al–1.25Ti (wt.%) filler metal. *J. of Manufacturing Processes*, **72**, 553–564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.10.057>

12. Сромолаєв Г.В., Квасницький В.В., Квасницький В.Ф., Максимова С.В. та ін. (2015) *Паяння металів. Підручник*. НУК, Миколаїв.
Ermolaev, G.V., Kvasnitsky, V.V., Kvasnitsky, V.F., Maksymova, S.V. et. al. (2015) *Metal brazing. Textbook*. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].
13. Салли А. (1959) *Марганець*. Москва, Metallurgizdat.
Sally A. (1959) *Manganese*. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
14. Massalski, T.B. (1990) *Binary alloy phase diagrams*. American Society for metals. Ohio, Metals Park, ASM International, CD.
15. *Марочник сталі у сплавов*. <http://www.splav-kharkov.com>
Steel and Alloy Grader: <http://www.splav-kharkov.com>
16. *Practical software for materials properties*. <https://www.sentencesoftware.co.uk/jmatpro>
17. Saunders, N., Guo, Z., Li, X., Miodownik, A.P., Schillé, J-Ph. (2003) Using JMatPro to model materials properties and behavior. *JOM*, **55**, 12, 60–65. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-003-0013-2>
18. Schillé, J-Ph., Guo, Z., Saunders, N., Miodownik, P.A. (2011) Modeling phase transformations and material properties critical to processing simulation of steels. *Materials and Manufacturing Processes*, **26**, 1, 137–143. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426910903153059>
19. (1997) *Диаграммы состояния двойных металлических систем*. Лякишев Н.П. (ред.), Т. 2, Москва, Машиностроение. (1997) *State diagrams of binary metallic systems*. Lyakishev N.P. (Ed.), Vol. 2, Moscow, Mechanical engineering.
20. (2007) *Brazing handbook 5th ed Miami*. American Welding Society.
21. Maksymova, S.V., Kovalchuk, P.V., Voronov, V.V. (2021) Vacuum brazing of kovar–molybdenum dissimilar joints. *The Paton Welding J.*, **7**, 13–18. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.07.03>
22. Максимова С.В., Ковальчук П.В., Воронов В.В. (2021) Вплив Со на структуру і механічні властивості лютованих з'єднань ковар–ніржавка сталь. *Металофізика та новітні технології*, **43**(4), 553–566. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.43.04.0553>
Maksymova, S.V., Kovalchuk, P.V., Voronov, V.V. (2021) Influence of Co on structure and mechanical properties of kovar–stainless steel brazed joints. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**(4), 553–566 [in Ukrainian].

THE INFLUENCE OF IRON ON THE STRUCTURE AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF Cu–Mn–Co BRAZING FILLER METAL

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

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

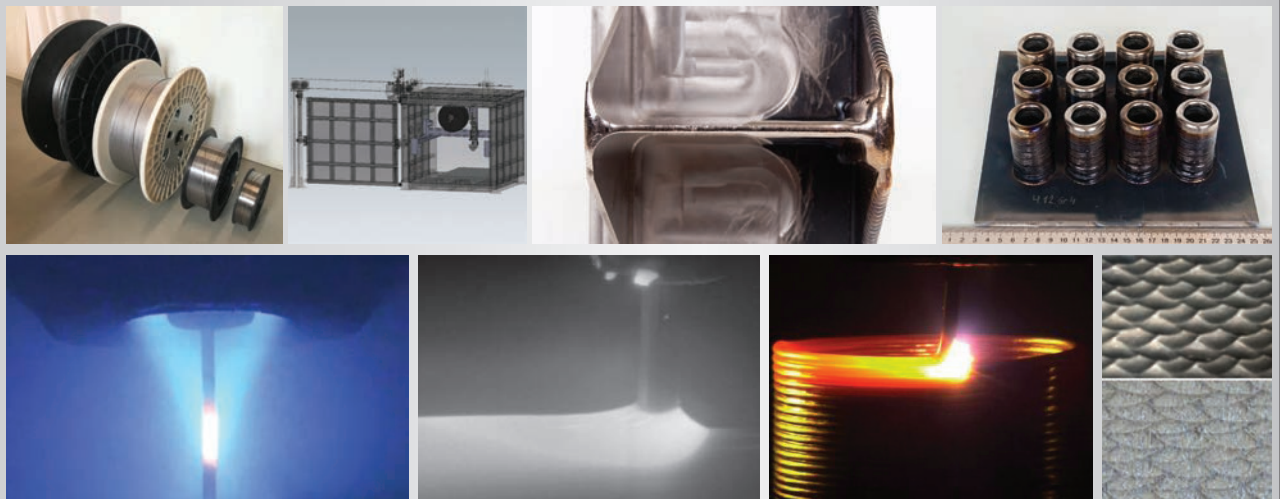
E-mail: maksymova.svitlana15@ukr.net

The results of complex studies on the brazing filler metal of the Cu–Mn–Co system alloyed with iron in the range of 1...5 wt. % are presented. The melting point was determined through calculation, and it was shown that increasing the concentration of iron from 1 to 5 wt. % leads to a slight (from 912 to 923 °C) increase in the temperature of the solidus and a significant increase in the temperature of the liquidus (from 931 to 1027 °C). At the same time, the melting temperature range expands to 104 °C. The results of experimental studies on the spread of brazing filler metal on Kovar and corrosion-resistant steel have established that an increase in the iron concentration up to 5 % contributes not only to an increase in the temperature of the liquidus but also to an increase in the spread area, which is due to the melting temperature of a copper-based solid solution. Local micro-X-ray spectral analysis established a discrete distribution of constituent elements and showed that the brazing filler metal, after spreading, contains two solid solutions: copper-based and manganese-based. The research results on the Kovar-corrosion-resistant steel brazed joints have demonstrated that the addition of iron to the Cu–Mn–Co–Fe alloy leads to an increase in microhardness and shear strength. 22 Ref., 5 Tabl., 11 Fig.

Keywords: copper–manganese–cobalt–iron brazing filler metal, melting temperature range, X-ray microanalysis, structure, microhardness, wetting angle, solid solution

Надійшла до редакції 08.06.2023

Електронно-променевий 3D друк металевим дротом



<https://xbeam3d.com/>