

SCOPE OF PAPER IN ENGLISH

PACS numbers: 06.60.Vz, 61.72.Mm, 61.72.S-, 62.20.-x, 81.20.Vj, 81.30.Fb, 81.40.Jj

Вплив Со на структуру і механічні властивості лютованих з'єднань ковар–неіржавка сталь

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

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11,
03150 Київ, Україна*

У роботі наведено результати досліджень впливу кобальту на структуру та механічні властивості лютованих різномірних з'єднань ковар (29НК)–неіржавка сталь (12Х18Н10), що одержані шляхом вакуумного лютування із застосуванням лютців системи Cu–Mn–Co. Мікрорентгеноспектральними дослідженнями лютованих різномірних з'єднань доведено, що у лютованих швах формується структура твердого розчину на основі міді, яка містить незначну кількість дискретних зерен γ -фази (твердого розчину на основі Fe–Mn–Co). Збільшення концентрації кобальту у вихідному лютці з 0,5 до 4,5% мас. призводить до незначного підвищення його концентрації у твердому розчині на основі міді і значного підвищення його концентрації у дискретних зернах γ -фази з 8,44 до 19,7% мас. Такі структурні особливості лютованих з'єднань позитивно впливають на їхні механічні властивості і сприяють збільшенню міцності на зріз лютованих напускних різномірних з'єднань ковар–неіржавка сталь з 374 до 434 МПа.

Ключові слова: структура лютованих з'єднань ковар–неіржавка сталь, твердий розчин, лютці системи мідь–марганець–кобальт, міцність на зріз.

The paper presents the results of studies of the influence of cobalt on the structure and mechanical properties of kovar (29HK)–stainless steel

Corresponding author: Svitlana Vasylivna Maksymova
E-mail: maksymova@paton.kiev.ua

*E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,
11 Kazymyr Malevych Str., UA-03150 Kyiv, Ukraine*

Citation: S. V. Maksymova, P. V. Kovalchuk, and V. V. Voronov, Influence of Co on Structure and Mechanical Properties of Kovar–Stainless Steel Braze Joints, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43, No. 4: 553–566 (2021) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.04.0553](https://doi.org/10.15407/mfint.43.04.0553).

(12X18H10) brazed dissimilar joints obtained by vacuum brazing using brazing filler metal of the Cu–Mn–Co system. Micro X-ray spectral studies of brazed dissimilar joints prove that a structure of a solid solution based on copper is formed in brazed joints, which contains a small amount of discrete grains of the γ -phase (solid solution based on Fe–Mn–Co). An increase in the concentration of cobalt in the initial brazing filler metal from 0.5 to 4.5% wt. leads to a slight increase in its concentration in a solid solution based on copper and a significant increase in its concentration in discrete grains of the γ -phase—from 8.44 to 19.7% mass. Such structural features of brazed joints positively affect their mechanical properties and contribute to an increase in the shear strength of kovar–stainless steel brazed overlap dissimilar joints from 374 to 434 MPa.

Key words: structure of kovar–stainless steel brazed joints, solid solution, brazing filler metal of copper–manganese–cobalt system, shear strength.

(Отримано 29 квітня 2020 р.; остаточн. варіант — 17 березня 2021 р.)

1. ВСТУП

У сучасних умовах широке застосування знаходять різномірні вузли, які поєднують в собі властивості двох основних матеріалів і відповідають потребам промисловості та вимогам до їхніх експлуатаційних характеристик. До таких вузлів відносять з'єднання неіржавкої сталі аустенітного класу (12X18H10) з прецизійним стопом ковар (Fe–29Ni–17Co), які завдяки технічним і економічним показникам, використовують для виготовлення різних електронних приладів і конструкцій у космічній і ядерній промисловості [1–3].

Для поєднання даних металів використовують лютування та різні види зварювання. Зокрема, найбільшого поширення набуло лазерне і дифузійне зварювання. Через суттєві відмінності термомеханічних і металургійних властивостей металів, що поєднуються, виникають численні перешкоди на шляху створення якісних різномірних з'єднань. До таких перешкод належать інтерметаліди, що утворюються у зоні зварного шва, які сприяють підвищенню мікротвердості у зоні стоплення і негативно впливають на механічні властивості [1, 2–4].

За допомогою дифузійного зварювання з тиском за температури 900°C та витримки протягом 240 хвилин з використанням нікелевої фольги одержані якісні з'єднання з відносним подовженням 38,75%. Результати експериментів показують, що нікелеву фольгу можна використовувати як ефективне бар'єрне покриття для з'єднання даної пари матеріалів [5]. Слід зазначити, що даний метод не призначений для виготовлення тонкостінних конструкцій, так як за навантаження 34,66 МПа може відбуватися деформація основного матеріалу [6].

До перспективних методів одержання різномірних з'єднань неіржавка сталь–ковар відносять вакуумне лютування. У разі вибору лютців важливе значення мають їхні характеристики: температурний інтервал топлення; змочування основного металу; заповнення капілярних зазорів; забезпечення необхідних механічних властивостей лютуваних з'єднань.

Використання нікелевого аморфного лютцю MBF20 (BNi-2), що містить як депресант бор [7] і має прийнятну температуру лютування від 1040 до 1060°C, призводить до формування у лютуваному шві боридів хрому, які є крихкими інтерметалідними фазами, що негативно впливають на механічні властивості різномірних з'єднань ковар–сталь.

Відомо [8], що у випадку застосування срібного лютцю для лютування елементів ковару з неіржавкою сталлю існує ризик розтріскування матеріалу через міжкристалічну корозію. Іноді тріщини можуть з'являтися незадовго після операції лютування. Подальше нагрівання лютуваного з'єднання також може спричинити такі тріщини. Це явище називають корозійним розтріскуванням, що вимагає застосування для лютування пластичних золотомісних стопів або міді без кисню.

До перспективних відносять лютці на основі системи Cu–Mn–Co, що характеризуються структурою твердого розчину, прийнятною температурою топлення і не містять бору.

У даній роботі представлені результати мікрорентгеноспектральних досліджень структури лютуваних швів та з'ясовано вплив кобальту на механічні властивості різномірних з'єднань ковар–неіржавка сталь, що одержані шляхом вакуумного лютування із застосуванням лютців системи Cu–Mn–Co.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Як основний метал використовували неіржавку сталь 12X18H10 (Fe–(17–18)Cr–(8,0–10)Ni–≤2,0Mn–≤0,8Si–≤0,12C), що характеризується високими антикорозійними властивостями та стоп ковар марки 29НК (Fe–29Ni–17Co). Він належить до класу прецизійних стопів з низьким температурним коефіцієнтом лінійного розширення ($\alpha = (4,5–6,5) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ в інтервалі температур від –70 до +420°C). Виготовлення експериментальних лютців системи Cu–Mn–Co проводили шляхом дугової топки вольфрамовим електродом на мідній охолоджувальній підкладці. Для захисту від окиснення та вигорання легувальних елементів використовували обдування аргоном високої чистоти. Відомо, що температура гартування неіржавкої сталі 12X18H10 знаходиться у температурному інтервалі 1050–1100°C. Тому, щоб уникнути значного росту зерна і погіршення механічних властивостей лютуваних з'єднань, температура

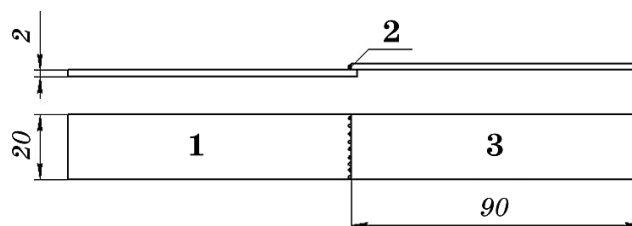


Рис. 1. Схематичне зображення лютованих зразків: 1 — 29НЖ, 2 — лютець, 3 — неіржавка сталь.

Fig. 1. Schematic image of the brazed samples: 1—29НЖ, 2—brazing filler metal, 3—stainless steel.

лютування не повинна перевищувати вказаного значення [9].

Перед лютуванням заготовки зразків (розміром $90 \times 20 \times 2$ мм³) обробляли механічним шляхом (поліруванням із застосуванням алмазного круга зернистістю 125 мкм) і знежирювали бензином Б-70 та зневоднювали за допомогою технічного спирту. Лютець (масою 0,07–0,08 г) у литому вигляді розміщували біля зазору і фіксували за допомогою контактно-зварювальної машини.

Напускні пластинчасті зразки різнорідних з'єднань ковар–неіржавка сталь (рис. 1) одержували шляхом вакуумного лютування на установці СГВ 2,4-2/15-ИЗ із застосуванням радіаційного нагріву за робочого розрідження $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па.

Як лютці використовували стопи системи Cu–Mn–Co, що відрізнялись вмістом кобальту (табл. 1).

Температуру нагріву контролювали за допомогою термопари, яку закріплювали безпосередньо на зразках, що дає змогу точно фіксувати температурний режим та керувати циклом лютування (рис. 2). Після досягнення температури лютування витримка становить 3 хв.

Для металографічних досліджень використовували лютовані напускні пластинчасті зразки, за стандартною методикою готували мікрошліфи. Особливості мікроструктури і елементний склад лютованих швів вивчали за допомогою сканувального електронного

ТАБЛИЦЯ 1. Системи експериментальних стопів і температура лютування.

TABLE 1. Experimental alloy systems and brazing temperature.

| № припою | Система легування, % мас. | Температура лютування, °С |
|----------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | Cu–Mn–0,5Co | 939 |
| 2 | Cu–Mn–1,0Co | 946 |
| 3 (4) | Cu–Mn–4,5Co | 966 |

мікроскопа Tescan Mira 3 LMU, який оснащений енергодисперсійним спектрометром Oxford Instruments X-max 80 mm² і програмним забезпеченням INCA. Для візуалізації складових фаз за атомним номером і для вивчення розподілу елементів застосовували сигнал відбитих електронів (BSE), що дозволяє досліджувати шліфи без хемічного травлення [9]. Мікрорентгеноспектральний аналіз забезпечує високу локальність вимірювань (до 1 мкм). Механічні властивості визначали за кімнатної температури із застосуванням випробувальної машини ZDM 10 Zwick-1488.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Зовнішній вигляд лютованих зразків ковар–неіржавка сталь свідчить про те, що лютець добре змочує неіржавку сталь, затікає в капілярний зазор і протікає на протилежну сторону зразка (рис. 2), де формується класична плавна зворотна галтель незначних розмірів (рис. 2, б).

Результати локального мікрорентгеноспектрального аналізу лютованих з'єднань ковар–неіржавка сталь (лютець Cu–Mn–0,5Co) показали, що у лютованому шві кристалізується структура твердого розчину на основі системи Cu–Mn (рис. 3, а, табл. 2, спектр 3). У периферійній зоні лютованого шва, що знаходиться ближче до основного металу, кристалізуються зерна фази на основі твердого розчину Fe–Mn, що містять також інші складові елементи лютецю (табл. 2, спектр 2).

Дані локального мікрорентгеноспектрального аналізу добре корелюють з результатами, що одержані шляхом сканування електронним променем перпендикулярно лютованому шву (рис. 4). Вони свідчать про підвищення концентрації заліза, кобальту і хрому в часточках фази, що виділяється у лютованому шві у зоні міжфазної

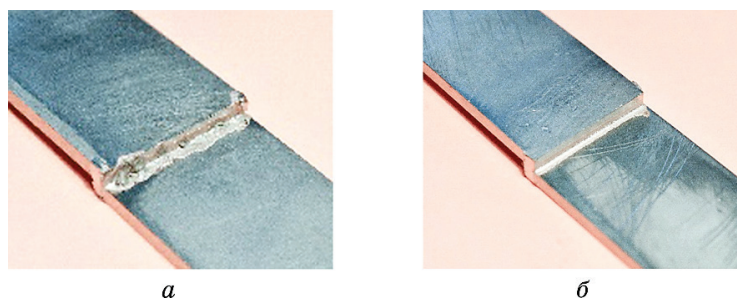


Рис. 2. Зовнішній вигляд лютованого зразка: пряма галтель (а), зворотна галтель (б).

Fig. 2. Appearance of the brazed sample: straight fillet (a), back fillet (b).

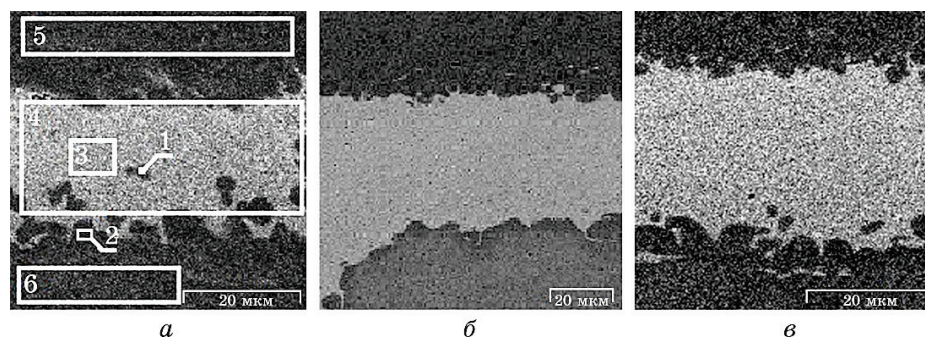


Рис. 3. Мікроструктура лютованого шва у разі застосування лютцю системи Cu–Mn–0,5Co (а) і Cu–Mn–1,0Co (б, в).

Fig. 3. The microstructure of the brazed joints when using the brazing filler metal system Cu–Mn–0.5Co (a) and Cu–Mn–1.0Co (b, c).

границі лютець–основний метал, і одночасне зниження концентрації міді (рис. 4, б, в, г, д).

У випадку застосування лютцю з підвищеною концентрацією кобальту (з 0,5 до 1% мас.) для вакуумного лютування різномірних з'єднань ковар–неіржавка сталь спостерігається аналогічна морфологічна будова лютованого шва. Його основною складовою є твердий розчин на основі системи Cu–Mn. У приграничній з основним металом зоні формується незначна кількість зерен фази Fe–Mn–Co (рис. 3, б, в).

Мікроструктура прямої і зворотної галтелі не відрізняється за хемічним складом і містить матрицю — твердий розчин на основі міді (рис. 3, а) і окремі одиничні зерна фази на основі заліза: 45,09Fe–23,9Mn–12,04Co–9,29Cu–5,91Ni–4,22Cr–0,15Si, які кристалізуються ближче до межі з основним металом (рис. 3, б, в).

ТАБЛИЦЯ 2. Хемічний склад окремих фаз лютованого шва (лутець Cu–Mn–0,5Co).

TABLE 2. Chemical composition of separate phases of the brazed joints (brazing filler metal Cu–Mn–0.5Co).

| № спектра | Хемічні елементи, % мас. | | | | | | |
|-----------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Si | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu |
| 1 | 0,20 | 5,96 | 21,91 | 46,54 | 8,44 | 6,39 | 10,57 |
| 2 | 0,12 | 5,49 | 20,82 | 44,31 | 7,74 | 8,57 | 12,95 |
| 3 | 0,08 | 0,41 | 19,92 | 4,00 | 0,78 | 5,45 | 69,37 |
| 4 | 0,00 | 1,24 | 20,06 | 8,19 | 1,49 | 6,28 | 62,74 |
| 5 | 0,45 | 16,05 | 6,49 | 66,05 | 0,77 | 8,29 | 1,90 |
| 6 | 0,00 | 0,23 | 6,29 | 48,18 | 15,53 | 23,99 | 5,78 |

У процесі нагріву після досягнення температури лютування і певній витримці основний метал взаємодіє з лютцем. Наявність градієнта концентрацій на міжфазній границі лютець–основний метал сприяє протіканню розчинно-дифузійних процесів. Швидкість їх протікання обумовлена коефіцієнтами дифузії кожного складового елемента, часом (витримкою) у разі лютування, величиною лютівного зазору та іншими параметрами. В перші секунди витримки за температури лютування метал лютованого шва насичується складовими елементами основного металу до певної концентрації, після чого формуються відповідні фази. Процес формування структури лютованого шва дуже складний і залежить від багатьох факторів.

Важливе значення мають фізико-металургійні процеси, що протікають під час лютування, метод нагріву, параметри термічного режиму, величина лютованого зазору та інші. Кристалізація металу лютованого шва відбувається у гетерогенному середовищі (різні агрегатні стани основного металу і рідкого лютцю) за наявності градієнта концентрацій. Відомо, що присутність марганцю у лютці сприяє інтенсифікації процесу розчинення основного металу у разі

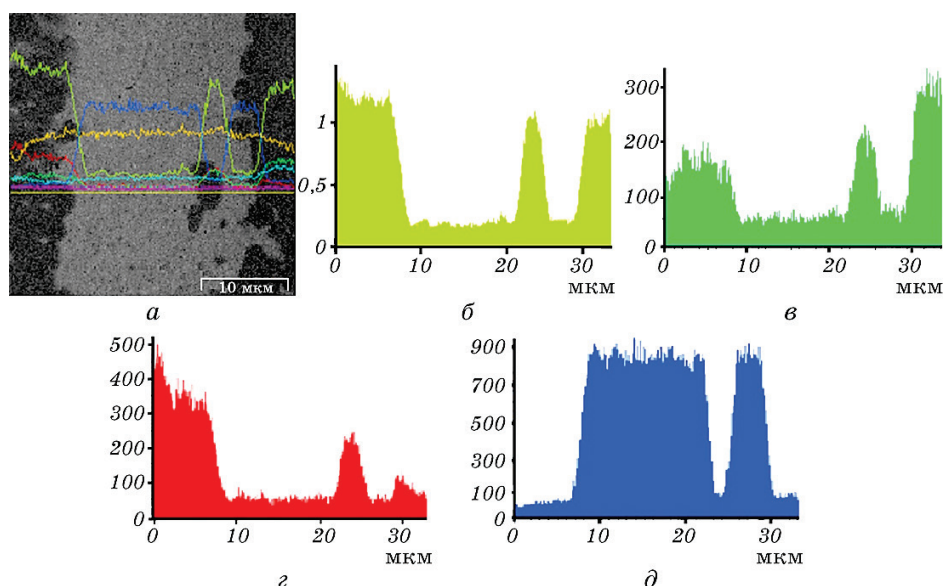


Рис. 4. Електронне зображення (а) і якісний розподіл елементів: заліза (б), кобальту (в), хрому (г) і міді (д) у разі застосування лютцю системи Cu–Mn–0,5Co.

Fig. 4. Electronic image (a) and qualitative distribution of elements: iron (б), cobalt (в), chromium (г) and copper (д) when using Cu–Mn–0.5Co brazing filler system.

лютуванні сталей [10].

Мікрорентгеноспектральний аналіз показав, що результатом взаємодії розтопленого лютцю (Cu–Mn–2Co) і твердого основного металу є утворення окрім твердого розчину на основі міді фази FeMnCo, що містить незначну кількість Cu, Ni і Cr. Відповідно до діаграм стану [11] дана сполука може відповідати γ -фазі (FeMnCo). У лютованому з'єднанні спостерігаються ділянки, в яких класичний лютований шов не візуалізується (рис. 5, *a*).

З метою визначення наявності складових елементів лютцю у даній ділянці проводили мікрорентгеноспектральні дослідження шляхом сканування електронним променем перпендикулярно до пластин і «умовного» лютованого шва на відстані 20 мкм від галтельної ділянки (рис. 5, *a*). Як свідчать результати якісного розподілу елементів, тобто характеристичні спектри складових елементів, у даній ділянці спостерігається підвищення концентрації міді і мар-

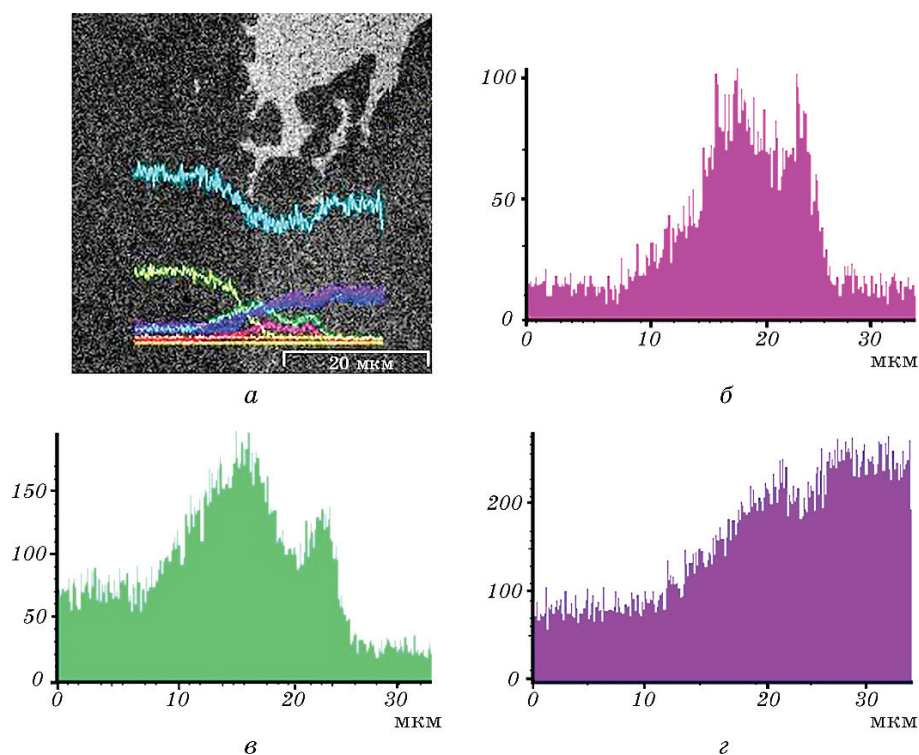


Рис. 5. Мікроструктура (*a*) і характеристичні спектри розподілу елементів у лютованому зразку: міді (*б*), марганцю (*в*) і нікелю (*г*).

Fig. 5. Microstructure (*a*) and characteristic spectra of the distribution of elements in the brazed sample: copper (*b*), manganese (*c*) and nickel (*d*).

ганцю (рис. 5, б, в). Даний факт є підтвердженням наявності твердого розчину мідь–марганець у ділянці «умовного» лютованого шва, що зумовлено діаграмами стану металічних систем, зокрема, наявністю безперервного ряду твердих розчинів у системі мідь–марганець у всьому інтервалі концентрацій [11]. Концентрація нікелю плавно підвищується (рис. 5, г).

У галтельній ділянці, біля міжфазної границі зі сторони ковару і зі сторони неіржавкої сталі формуються окремі зерна фази на основі заліза, які збагачені марганцем, кобальтом, міддю ($39\text{Fe}26\text{Mn}20\text{Co}8\text{Cu}4\text{Ni}3\text{Cr}$). Слід зазначити, що галтельна ділянка займає більшу площу порівняно зі швом, містить більшу кількість лютю, але такі особливості не впливають на характер структуроутворення. Концентрація складових елементів лютю і основного металу в даній фазі практично відповідає такій, що показана у попередніх дослідженнях. За винятком кобальту, вміст якого зростає з підвищенням його концентрації в лютці.

З використанням лютю Cu-Mn-4,5Co вакуумне лютування різнорідних з'єднань ковар–неіржавка сталь виконували відповідно до термічного режиму (рис. 6).

Результати досліджень показують, що подальше збільшення концентрації кобальту з 0,5 до 4,5% у вихідному лютці системи Cu-Mn незначно впливає на морфологію шва. Основною складовою лютованого шва залишається твердий розчин на основі системи мідь–марганець, що містить незначну кількість інших складових елементів (рис. 7, табл. 3).

З обох сторін периферійних ділянок лютованого шва, що прилягають до основного металу, формуються зерна фази $\text{FeMnCo}(\text{Cu}, \text{Ni}, \text{Cr})$. Концентрація складових елементів практично не змінюється,

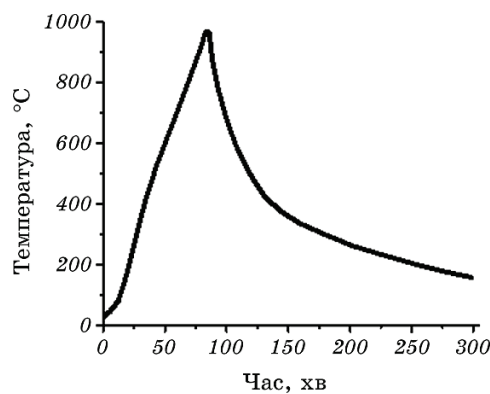


Рис. 6. Термограма циклу лютування зразків лютцем Cu-Mn-4,5Co .

Fig. 6. Thermogram of the brazing cycle of the samples with Cu-Mn-4.5Co brazing filler metal.

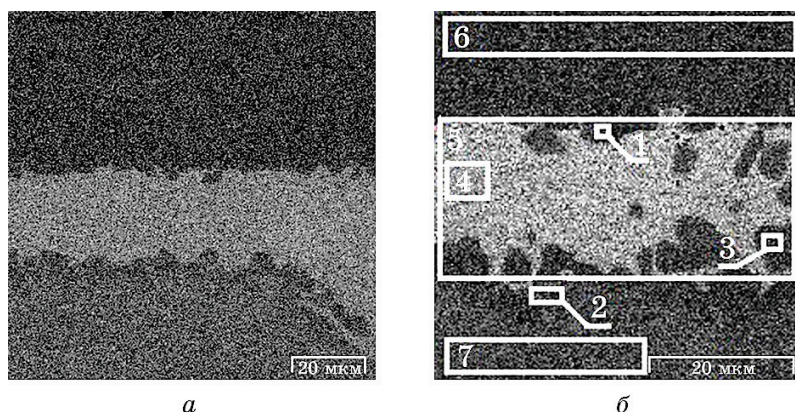


Рис. 7. Мікроструктура лютованого шва у разі застосування лютцю Cu–Mn–4,5Co.

Fig. 7. The microstructure of the brazing seam when using Cu–Mn–4.5Co brazing filler metal.

але підвищується концентрація кобальту до 17,43–19,83%. Слід зазначити, що кількість таких зерен теж збільшується (рис. 7, б).

Локальним мікрорентгеноспектральним аналізом визначено, що збільшення кількості кобальту у вихідному лютці з 0,5 до 4,5% призводить до підвищення його концентрації у структурних складових лютованого шва. Так, у твердому розчині Cu–Mn спостерігається плавне незначне підвищення концентрації кобальту з 0,78 до 2,74% (рис. 8).

Стрімке підвищення концентрації кобальту відбувається в зернах фази на основі системи Fe–Mn–Co за збільшення його кількості у вихідному лютці з 0,5 до 2% (рис. 8). Подальше збільшення вмісту кобальту з 2 до 4,5% майже не впливає на його концентрацію у

ТАБЛИЦЯ 3. Хімічний склад окремих фаз у лютованому шві.

TABLE 3. The chemical composition of the individual phases in the brazing seam.

| № спектру | Хімічні елементи, % мас. | | | | | | |
|-----------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Si | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu |
| 1 | 0,29 | 4,79 | 25,19 | 36,25 | 19,83 | 5,22 | 8,43 |
| 2 | 0,23 | 2,57 | 24,92 | 37,76 | 17,43 | 8,30 | 8,79 |
| 3 | 0,22 | 3,99 | 26,00 | 34,31 | 19,71 | 5,73 | 10,03 |
| 4 | 0,00 | 0,52 | 22,27 | 4,28 | 2,74 | 5,53 | 64,66 |
| 5 | 0,12 | 1,63 | 22,73 | 12,50 | 7,15 | 5,56 | 50,29 |
| 6 | 0,46 | 17,69 | 2,60 | 69,13 | 0,80 | 8,64 | 0,68 |
| 7 | 0,28 | 0,09 | 0,56 | 52,82 | 17,34 | 28,90 | 0,00 |

даній фазі (рис. 8).

Одержані результати мікрорентгеноспектральних досліджень показують, що під час формування структури лютованих швів відбуваються активні взаємні дифузійні процеси складових елементів лютцю і основних металів, зокрема заліза, кобальту, нікелю, хрому, марганцю, що призводить до формування фази на основі заліза (Fe-Mn-Co), яка містить незначну кількість міді, нікелю і хрому. Виділяється дана фаза у вигляді дискретних одиничних зерен у

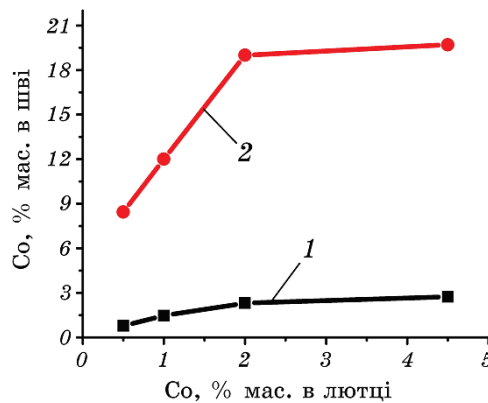


Рис. 8. Вплив кобальту у вихідному лютці на його концентрацію в складових фазах лютованого шва: у твердому розчині (1) і фазі на основі заліза (2).

Fig. 8. The influence of cobalt in the original brazing filler metal on its concentration in the constituent phases of the brazed joints: in solid solution (1) and phase based on iron (2).

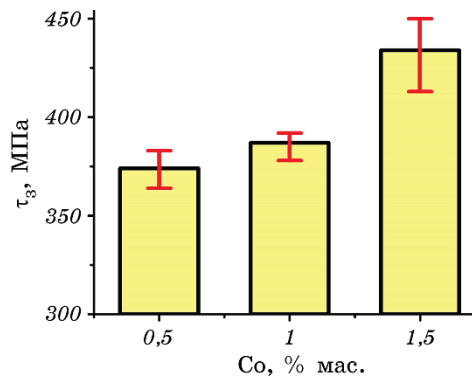


Рис. 9. Вплив кобальту на міцність (на зріз) лютованих з'єднань ковар-неіржавка сталь.

Fig. 9. The influence of cobalt on the strength (shear) of brazed joints kovar-stainless steel.

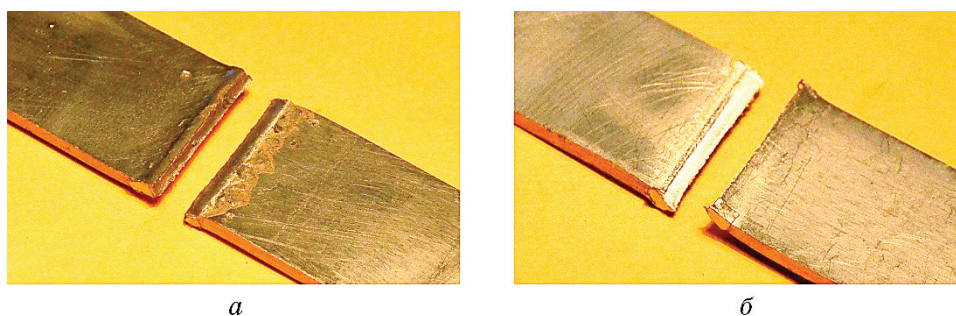


Рис. 10. Зовнішній вигляд лютованого зразка після розриву: зі сторони вхідної (а) і зворотної (б) галтелі.

Fig. 10. Appearance of brazed specimens after rupture: from straight (a) and backward (b) fillet.

твердому розчині на основі міді.

Такі структурні особливості формування лютованих швів позитивно впливають на механічні властивості лютованих з'єднань і забезпечують високу міцність на зріз (рис. 9).

Результати механічних випробувань різномірних лютованих з'єднань ковар–неіржавка сталь показали, що збільшення концентрації кобальту у вихідному лютці з 0,5 до 4,5% мас. підвищує міцність на зріз з 374 до 434 МПа (рис. 9). Руйнування лютованих зразків відбувається по лютованому шву (рис. 10).

Одержані дані свідчать про взаємозв'язок між хемічним складом лютцю у вихідному стані, структурою лютованих швів і міцністю лютованих з'єднань.

4. ВИСНОВКИ

Мікрорентгеноспектральними дослідженнями встановлено, що структура лютованих швів різномірних з'єднань ковар–неіржавка сталь, що одержані шляхом вакуумного лютування, і лютців системи Cu–Mn–Co складається з твердого розчину на основі міді і одиничних включень γ -фази (твердого розчину на основі Fe–Mn–Co), що містить незначну кількість інших елементів. Виділяється дана фаза переважно у периферійній зоні лютованого шва, що розташована ближче до основного металу.

Збільшення концентрації кобальту у вихідному лютці з 0,5 до 4,5% мас. сприяє незначному підвищенню його концентрації у твердому розчині з 0,78 до 2,74% мас. і стрімкому зростанню його концентрації в зернах γ -фази (твердого розчину на основі заліза) з 8,44 до 19,7% мас. Такі особливості формування структури лютованих швів позитивно впливають на міцність лютованих з'єднань.

Механічними випробуваннями визначено, що за підвищення концентрації кобальту у лютці з 0,5 до 4,5% мас. міцність на зріз лютуваних різнорідних напускних з'єднань ковар–неіржавка сталь зростає з 374 до 434 МПа.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. S. H. Baghjari and S. A. A. Akbari Mousavi, *Mater. Des.*, **57**: 128 (2014).
2. S. A. A. Akbari Mousavi and A. R. Sufizadeh, *Mater. Des.*, **30**: 3150 (2009).
3. M. Rossinia, P. Russo Spenaa, L. Cortese, P. Matteis, and D. Firrao, *Mater. Sci. Eng. A*, **628**: 288 (2015).
4. Giuseppe Casalino, Michelangelo Mortello, and Patrice Peyre, *J. Mater. Process. Technol.*, **223**: 139 (2015).
5. Tingfeng Song, Xiaosong Jiang, Zhenyi Shao, Defeng Mo, Degui Zhu, and Minhao Zhu, *Metals*, **6**, No. 11: 263 (2016).
6. В. Ф. Хорунгов, *Основы пайки тонкостенных конструкций из высоколегированных сталей* (Київ: Наукова Думка: 2008).
7. J. Schilm, A. Goldberg, U. Partsch, W. Dürfeld, D. Arndt, A. Pönicke, and A. Michaelis, *J. Sens. Sens. Syst.*, **5**, No. 1: 73 (2016).
8. G. Sidhu and R. Mathew, *IEEE Transactions on Parts, Materials and Packaging*, **4**, No. 1: 30 (1968).
9. Ф. Ф. Химушин, *Нержавеющие стали* (Москва: Металлургия: 1967).
10. И. Е. Петрунин, И. Ю. Маркова, А. С. Екатова, *Металловедение пайки* (Москва: Металлургия: 1976).
11. А. М. Захаров, *Диаграммы состояния двойных и тройных систем* (Москва: Металлургия: 1990).

REFERENCES

1. S. H. Baghjari and S. A. A. Akbari Mousavi, *Mater. Des.*, **57**: 128 (2014).
2. S. A. A. Akbari Mousavi and A. R. Sufizadeh, *Mater. Des.*, **30**: 3150 (2009).
3. M. Rossinia, P. Russo Spenaa, L. Cortese, P. Matteis, and D. Firrao, *Mater. Sci. Eng. A*, **628**: 288 (2015).
4. Giuseppe Casalino, Michelangelo Mortello, and Patrice Peyre, *J. Mater. Process. Technol.*, **223**: 139 (2015).
5. Tingfeng Song, Xiaosong Jiang, Zhenyi Shao, Defeng Mo, Degui Zhu, and Minhao Zhu, *Metals*, **6**, No. 11: 263 (2016).
6. V. F. Khorunov, *Osnovy Payki Tonkostennykh Konstruktsiy iz Vysokolegirovannykh Staley* [Basics of Brazing Thin-Walled Structures of High Alloy Steels] (Kyiv: Naukova Dumka: 2008) (in Russian).
7. J. Schilm, A. Goldberg, U. Partsch, W. Dürfeld, D. Arndt, A. Pönicke, and A. Michaelis, *J. Sens. Sens. Syst.*, **5**, No. 1: 73 (2016).
8. G. Sidhu and R. Mathew, *IEEE Transactions on Parts, Materials and Packaging*, **4**, No. 1: 30 (1968).
9. F. F. Khimushin, *Nerzhaveyushchie Stali* [Stainless Steel] (Moscow: Metallurgiya: 1967) (in Russian).
10. I. E. Petrunin, I. Yu. Markova, and A. S. Ekatoeva, *Metallovedenie Payki*

- [Metallurgy of Brazing] (Moscow: Metallurgiya: 1976) (in Russian).
11. A. M. Zakharov, *Diagrammy Sostoyaniya Dvoynykh i Troynykh Sistem* [State Diagrams of Binary and Ternary Systems] (Moscow: Metallurgiya: 1990) (in Russian).