

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ З'ЄДНАННЯ ЛАТУНЬ–СТАЛЬ, ОТРИМАНОВОГО ПЛАКУВАННЯМ В АВТОВАКУУМІ

І.П. Серебряник, М.А. Полещук, Т.О. Зубер, А.І. Бородин, А.Ю. Тунік, О.А. Лось

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

Розглянуто технологічні особливості отримання з'єднання латунь–сталь методом нагрівання в автовакуумі. Товщина латунного шару після механічної обробки становила 10 мм. Дослідженнями структур та хімічного складу різних зон з'єднання підтверджено розчинно-дифузійний характер взаємодії рідкої латуні зі сталлю. Виміри мікротвердості показали відсутність твердих і крихких структур. Високу якість з'єднання підтверджено механічними випробуваннями двошарового з'єднання на статичний вигин, відрив та зріз. Бібліогр. 17, табл. 2, рис. 8.

Ключові слова: латунь, сталь, двошарове з'єднання, нагрівання в автовакуумі

Вступ. З'єднання латуні з вуглецевими сталями використовують при виготовленні різних виробів. Це двошарові втулки, опорні вузли [1], листовий прокат з плакуючим шаром зі сплавів міді [2], з'єднання сталевих та чавунних деталей, у яких латунь використовують як припой [3]. Здебільшого такі з'єднання формуються за умов атмосферного тиску. Паяні з'єднання отримують також у вакуумі або контрольованій атмосфері.

Нормативна документація на виготовлення трубних ґрат для сучасних трубчастих теплообмінників передбачає високу якість з'єднання латунь–сталь при площі з'єднання понад $1,5 \cdot 10^4$ см² і товщині плакуючого шару 10 мм [4].

Мета роботи – розробка економічної технології виготовлення якісного з'єднання латунь–сталь великої площі з товщиною латуні до 10 мм. При цьому повинно використовуватись існуюче обладнання промислових підприємств.

Дослідна частина цієї роботи є продовженням виконаних досліджень взаємодії рідкої міді зі сталлю [5] і підтвердила їхні основні висновки.

Матеріали та методики досліджень. Сталеву основу з'єднання виготовляли зі сталі Ст14Г2 [6], латунний шар – з латуні Л59 [7]. Зібраний пакет для плакування герметизували зварюванням вакуумно-щільними швами. Вакуумним насосом 2НВР-5ДМ з пакета відкачували повітря до $2 \cdot 10^{-2}$ Па.

Нагрівання зразків проводили в термічній печі СНОЛ-04534.

Методом металографічного аналізу досліджували макро- і мікроструктуру поздовжнього та поперечного перерізів отриманих з'єднань. Дослідження проводили за допомогою оптичного мікроскопа «Neophot-32», оснащеного приставкою для цифрової зйомки. Систему реєстрації зображень здійснювали за допомогою комп'ютерної програми QuickPhoto.

Зразки для металографічних досліджень готували за стандартними методиками. Виміри мікротвердості проводили на твердомірі М-400 фірми «LECO» при навантаженні 0249 і 0496 Н. Реактиви для виявлення мікроструктури зразків (табл. 1) підібрано згідно з нашими розробками та рекомендаціями роботи [8].

Дослідження зразків методами растрової електронної мікроскопії (РЕМ), рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА) проводили на приладі «Jamp-9500F» фірми «Jeol» (Японія) з встановленим на ньому рентгеновським енергодисперсійним спектрометром INCA Penta FETx3 (OXFORD INSTRUMENTS). Енергія первинного електронного пучка становила 10 кеВ при струмі 0,5 мА для методів РЕМ і РСМА та струмі 10 мА для методу Оже-електронної спектроскопії. Спектри Оже реєстрували з енергетичним

Таблиця 1. Реактиви для металографічного травлення зразків

Мета травлення	Склад реактиву	Спосіб застосування	Примітка
Виявлення мікроструктури	HNO ₃ – 50 мл H ₂ O – 50 мл	Хімічне травлення при інтенсивному перемішуванні реактиву $t = 20$ °С, $\tau = 5 \dots 30$ с	Видалення оксидної плівки: HCl – 20 мл H ₂ O – 80 мл $\tau = 1 \dots 3$ с, $t = 20$ °С
Виявлення макроструктури	HNO ₃ – 50 мл H ₃ PO ₄ – 25 мл (CH ₃ COOH) – 25 мл	Хімічне травлення при інтенсивному перемішуванні та підігріві реактиву до $t = 70$ °С; $\tau = 3 \dots 7$ с	

Серебряник І.П. – <https://orcid.org/0000-0001-8654-1331>, Полещук М.А. – <https://orcid.org/0000-0020-5992-4641>,

Зубер Т.О. – 0000-0003-0789-1128, Тунік А.Ю. – 0000-0001-6801-6461.

© І.П. Серебряник, М.А. Полещук, Т.О. Зубер, А.І. Бородин, А.Ю. Тунік, О.А. Лось, 2022

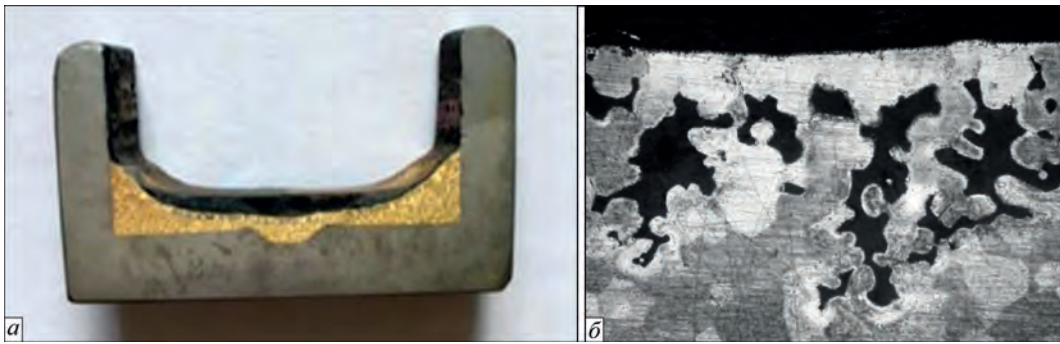


Рис. 1. З'єднання латунь–сталь, отримане відкритим нагріванням: *a* – макрошліф з'єднання; $\times 1,5$; *b* – несучільність у поверхневому шарі латуні, $\times 100$

дозволом $\Delta E/E = 0,6\%$. Перед дослідженнями поверхню зразків піддавали очищенню безпосередньо в камері аналізу приладу шляхом травлення іонами аргону Ar^+ з енергією 1 кеВ протягом 10 хв. Швидкість травлення SiO_2 становила 4 нм/хв. Вакуум у камері аналізу був у межах $5 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-5}$ Па.

Результати досліджень. Отримання якісного з'єднання латунь–сталь заливкою при використанні відкритого нагрівання в термічній печі є неможливим через утворення пор та несучільностей в латуні, спровокованих випаровуванням цинку [9]. При цьому поверхня латунного шару має дефекти на глибину до 500 мкм. Це призводить до високих трудовитрат на механічну обробку латунної поверхні та додаткових витрат латуні на технологічний припуск. На рис. 1 зображено з'єднання латунь–сталь, отримане відкритим нагріванням, та мікроструктура поверхневого шару латуні.

При пошуках заміни відкритого нагрівання розглянуто відомі способи отримання двошарових заготовок латунь–сталь: вибухове зварювання [10], дугове наплавлення під флюсом [11], лазерне зварювання [12], плазмове наплавлення [13] тощо. Однак використання цих технологій потребує проектування та виготовлення спеціального обладнання.

Чинний досвід використання паяння в автовакуумі для отримання з'єднань латунь–сталь [14] показав, що ця технологія забезпечує високу якість з'єднання при товщині шару латуні 0,5...3,0 мм. Використання автовакууму передбачає використання існуючого промислового обладнання з незначним доповненням. Перш за все потрібно було забезпечити отримання плакуючого шару рівномірної товщини при мінімальному припуску на механічну обробку, для чого застосовано схему плакування з примусовим підживленням (рис. 2).

На зібраному пакеті зварили всі шви і перевірили їх на герметичність. За допомогою вакуумного насоса з внутрішньої порожнини відкачали повітря до $2 \cdot 10^{-2}$ Па. Узел нагрівали в звичайній термічній печі при $T = 1000$ °С і витримці 15 хв.

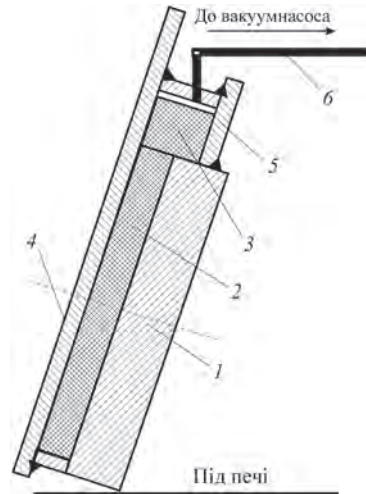


Рис. 2. Схема плакування заготовки затіканням з примусовим підживленням: 1 – основа з вуглецевої сталі; 2 – латунний лист; 3 – латунь для підживлення; 4 – кришка; 5 – накопичувач; 6 – патрубок до вакуумного насоса

Охолодження виконували з піччю до 400 °С, далі – при відкритій засувці в атмосферних умовах.

Особливістю нагрівання вузла, який знаходиться в контейнері з вакуумованою порожниною, є те, що через відсутність в порожнині газу теплопередача здійснюється тільки випромінюванням. Час, потрібний для нагрівання вузла, для конкретних розмірів зазору між стінками контейнера та поверхнею вузла, становить 13 хв. Тому при проектуванні режиму нагрівання необхідно збільшити час витримки вузла при температурі паяння на 13(15) хв.

При огляді латунного шару (після зняття кришки механічною обробкою) встановлено, що латунь повністю розплавилася як в основній порожнині, так і в порожнині для підживлення, і має місце задовільне змочування сталевих деталей. У перерізі латунні пори і несучільності не спостерігаються (рис. 3).

Міцність і надійність з'єднання латунь–сталь безпосередньо пов'язана зі структурою та складом металів у зоні контакту. Металографічними дослідженнями встановлено, що сталь Ст14Г2 після нагрівання зберігає феритно-перлітну структуру. Структура латуні Л59 є двофазною ($\alpha + \beta$),

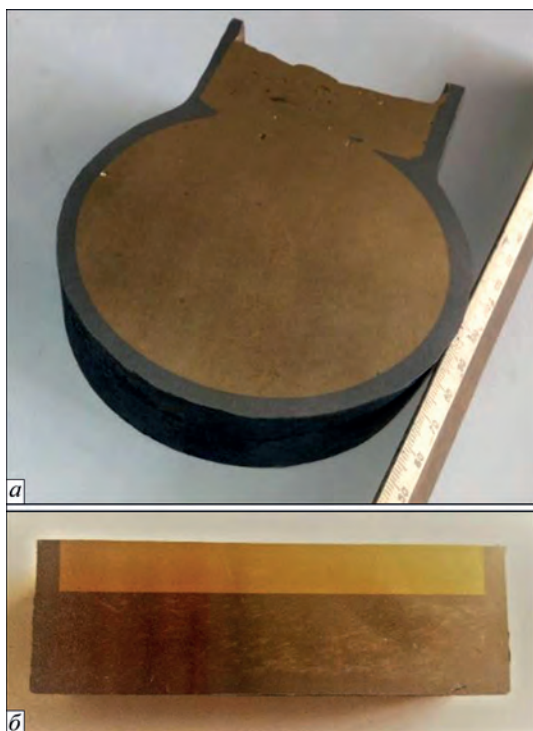


Рис. 3. Загальний вигляд (а) та діаметральний перетин (б) з'єднання латунь–сталь, отриманого в автовакуумі, $\times 0,5$

складається зі світлої α -матриці та дрібних ділянок β -фази, що травиться темніше (рис.4). Після проведення аналізу встановлено, що хімічний склад латуні після нагрівання змінився, зменшився вміст цинку з 40 до 37 мас. %.



Рис. 4. Мікроструктура з'єднання латунь–сталь після травлення, $\times 100$

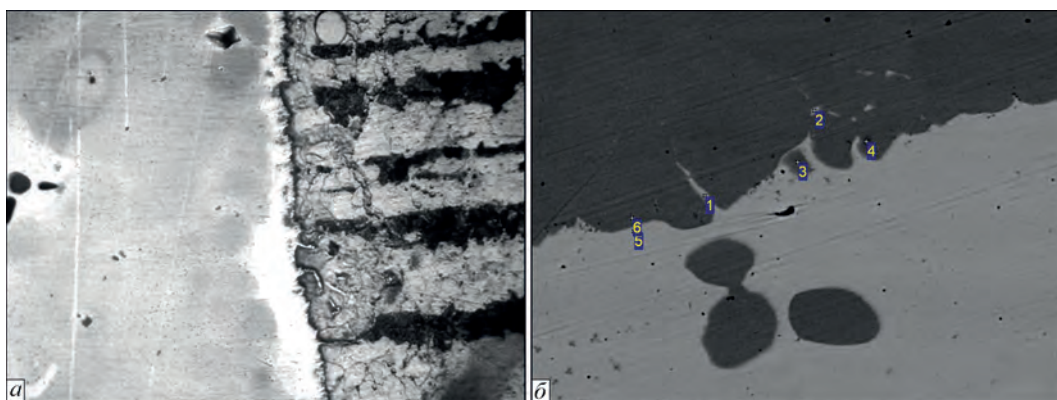


Рис.5. Зона контакту латуні зі сталлю: а – оптичне, $\times 500$; б – електронно-мікроскопічне $\times 1500$ зображення (травлено)

Принциповим при прогнозуванні надійності з'єднання є питання взаємодії рідкої латуні з твердою сталлю. Ці процеси неодноразово вивчалися різними авторами. Деякі з них стверджують, що на поверхні сталі при контакті з рідкою міддю та її сплавами в процесі наплавлення утворюються тріщини, які заповнюються рідиною [15]. У цьому разі склад металу, який заповнює «тріщину», повинен бути близьким до початкового, а вершина «тріщини» не може бути заповнена повністю відповідно до закону капілярності [5].

Інший погляд на взаємодію розплаву міді та її сплавів зі сталлю докладно наведено в [5]. Згідно з ним взаємодія розплаву латуні з твердою сталлю відбувається завдяки розчиненню та дифузії елементів, що знаходяться по границях зерен сталі, та подальшому відриву і переміщенню цих зерен в розплав. При цьому в ділянках проникнення латуні, крім вихідних елементів, мають реєструватися залізо та інші складові сталі.

При значному збільшенні зафіксовано проникнення латуні в сталь на оптичному (рис. 5, а) і електронному (рис. 5, б) мікроскопах на глибину 1,5...10 мкм. Хімічний склад металу досліджених ділянок наведено в табл. 2.

При проникненні латуні в сталь на глибину до 10 мкм в ній фіксується значна кількість заліза – 18,39...42,72 мас. % (ділянки 1,2). У зернах сталі, що відриваються і переходять в латунь (ділянки 3,4), реєструється міді – 5,68...10,85, цинку – 3,17...6,95 мас. %. В ділянках 5 і 6, де взаємопроникнення металів не спостерігається, дифузійні процеси менш значні. В латуні зафіксовано заліза 4,34, а в сталі–міді 3,49 і цинку 3,09 мас. %.

Таблиця 2. Хімічний склад металу досліджених ділянок з'єднання, мас. %

Номер ділянки	Si	Mn	Fe	Cu	Zn
1	0,10	0,12	18,39	49,66	28,97
2	0,04	0,16	42,72	33,84	20,30
3	0,36	0,16	79,14	10,85	6,95
4	0,22	0,08	76,80	5,68	3,17
5	0,03	0,08	4,34	59,26	33,48
6	0,25	0,00	90,84	3,49	3,09

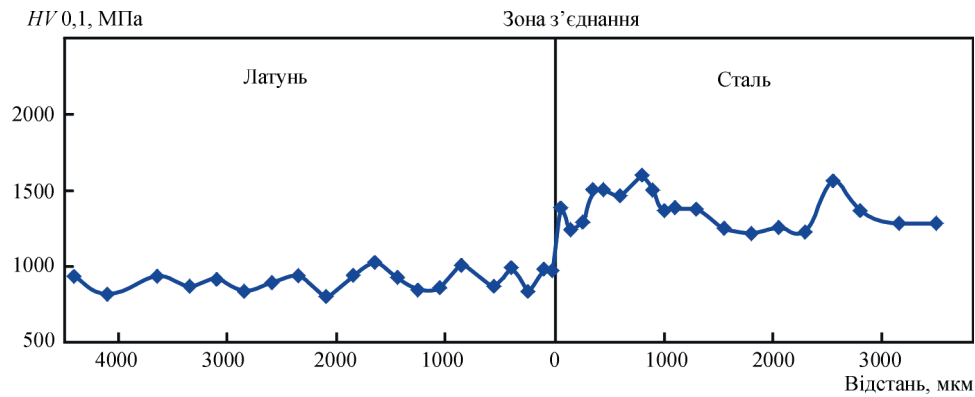


Рис. 6. Мікротвердість металу в з'єднанні латунь-сталь

При аналізі мікротвердості в ділянках латуні та сталі, що знаходяться біля зони контакту, не виявлено утворення твердих і крихких структур (рис. 6). У той же час необхідно звернути увагу на структуру сталі в зоні контакту з латунню (рис. 7).

Ланцюжок зерен темного кольору з боку сталі – це зерна перліту. Як відомо, вуглець сталі з міддю не взаємодіє. Концентрація його в зоні контакту зростає, що може призвести при тривалій витримці (більше 30 хв) до утворення з боку сталі ланцюжка крихких зерен перліту вздовж границі контакту. В зв'язку з цим тривалість витримки в печі обмежено 15 хв. У результаті накопичення перліту були незначні, про що свідчать дослі-

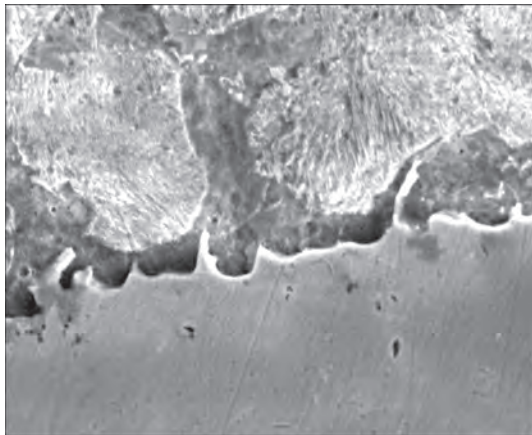


Рис. 7. Мікроструктура сталі в зоні контакту латунь-сталь, ×1600

дження мікротвердості. Той же ефект мав місце при вивченні взаємодії рідкої міді зі сталлю [5].

З метою визначення механічних характеристик з'єднання латунь-сталь проведено випробування: на зріз плакуючого шару, на відрив плакуючого шару і статичний вигин. Випробування на зріз плакуючого шару виконували на зразках (рис. 8, а), які використовують для двошарових сталей, одержаних прокаткою [2]. Товщину плакуючого шару зразка доведено механічною обробкою до 5 мм. У результаті випробування встановлено, що межа міцності на зріз з'єднання латунь-сталь, отриманого нагріванням в автовакуумі, становить 194,2 МПа.

Випробування на статичний відрив плакуючого шару проводили на зразках, представлених на рис. 8, в. При цьому пуансон був такої форми, що забезпечував деформацію відриву в зоні з'єднання металів. Межа міцності на відрив плакуючого шару становила 266,7 МПа.

Випробування на статичний вигин плакуючим шаром всередину проводили на зразках (рис. 8, б) розміром 120×20×8 мм, діаметр пуансона – 16 мм [17]. При куті вигину тріщин 180°, видимих неозброєним оком, на поверхнях зразка не знайдено.

Обговорення результатів досліджень. Аналіз витрат на виготовлення умовної одиниці продукції дуговим наплавленням, вибуховим зварюванням та розробленою технологією нагрівання в автовакуумі показав значні економічні переваги останньої. Обрана схема розташування пакета під кутом



Рис. 8. Зразки для механічних випробувань з'єднань латунь-сталь: а – випробування на зріз плакуючого шару; б – двошарове з'єднання після випробувань на статичний вигин плакуючим шаром всередину; в – до і після випробувань на відрив плакуючого шару

до вертикалі з підживленням плакуючого шару додатковою кількістю рідкої латуні забезпечила як отримання з'єднання без ливарних дефектів і пор, так і високу якість поверхні латунного шару безпосередньо після плакування. При цьому припуск на механічну обробку був мінімальний, витрати металу та трудомісткість на механічну обробку були також значно нижче, ніж в інших варіантах.

Металографічні дослідження показали, що у зоні з'єднання крихкі структури не утворюються. Взаємодія рідкої латуні зі сталлю відбувається без утворення тріщин у сталевому шарі. Не виявлено незаповнених вершин, проникнень латуні в сталь, склад металу, близький до вихідного складу латуні з доповненням деякими елементами, що входять до сталі. Ці результати добре корелюються з результатами раніше виконаних досліджень взаємодії рідкої міді зі сталлю [5]. При взаємодії сталі та латуні не утворюються структури з високою твердістю. Зона підвищеної твердості сталі становить 3...10 мкм. Це дозволяє прогнозувати високі механічні властивості з'єднання та високу надійність виробу при роботі за умов тепловміни.

Межа міцності на зріз з'єднання латунь–сталь, отриманого нагріванням в автовакуумі, становила 194,2 МПа, що перевищує на 32 % нормативне значення (147,1 МПа) [2]. Випробування на статичний вигин двошарового з'єднання плакуючим шаром всередину показало, що з'єднання метал плакуючого та основного шарів відповідають вимогам [6, 2, 16] (вигин до паралельності сторін, тріщини відсутні). Міцність на відрив, яка становила 266,7 МПа, перевищує на 52 % нормативне значення [10] (177,8 МПа після вибухового зварювання і термічної обробки).

Висновки

1. Виконано комплекс інженерних робіт з відпрацювання технології отримання двошарового з'єднання латунь–сталь нагріванням у автовакуумі. Отримані вихідні дані дозволяють розробити виробничий технологічний процес з максимальним використанням існуючого обладнання.

2. Металографічними дослідженнями встановлено високу якість мікроструктури з'єднання.

3. Механічні характеристики виготовленого з'єднання латунь–сталь повністю відповідають вимогам нормативної документації на виробництво трубних ґрат кожухотрубних теплообмінників.

4. Виконана робота є продовженням досліджень взаємодії рідкої міді та її сплавів зі сталлю при нагріванні у автовакуумі. У цій роботі повністю підтверджено механізми взаємодії рідкої і твердої фаз, опубліковані раніше.

Список літератури

1. Колесов С.Н., Колесов И.С. (2007) *Материаловедение и технология конструкционных материалов*. Учебник для вузов. 2-е изд. перераб. Москва, Высшая школа.
2. Голованенко С.А., Меандров Л.В. (1966) *Производство биметаллов*. Москва, Металлургия.
3. (2003) *Справочник по пайке*. Петрунин И.Е. (ред.). 3-е изд., перераб. и доп. Москва, Машиностроение.
4. ГОСТ 31842-2012. *Теплообменники кожухотрубные. Технические требования*.
5. Серебряник И.П. (2011) *Автовакуумная некапиллярная конструкционная пайка*. Киев, Альфа–Реклама.
6. ГОСТ 19281-89. *Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия*.
7. ГОСТ 15527-2004. *Сплавы медно-цинковые (латуни), обрабатываемые давлением. Марки*.
8. Богомолова Н.А. (1978) *Практическая металлография*. М.: Высшая школа, 272 с.
9. Перевезенцев Б.Н., Краснопецев А.Ю., Федоров А.Л. (1991) Исследование испарения цинка при контейнерной пайке медно-цинковыми припоями. *Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции «Пайка в машиностроении», Тольятти*.
10. ОСТ 5.9311-78. *Сварка металлов с помощью взрыва. Биметаллические заготовки для трубных решеток теплообменных аппаратов. Общие технические условия*.
11. (1971) *Сварка стальных конструкций*. Сборник «Производство больших конструкций». Вып. 20. Волковский А.И. (ред.). Труды НИИ ТЯЖМАШ «Уралмашзавода».
12. Шмидт М., Курынцев С.В. (2014) Получение биметаллических заготовок с помощью лазерной сварки проплавленным швом. *Автоматическая сварка*, 4, 47–51.
13. Суворин А.В. (2011) *Электротехнологические установки*. Красноярск, Сибирский федеральный университет.
14. Poleschuk, M.A., Atroshenko, M.G., Puzrin, A.L., Shevtsov, V.L. (2014) Estimation of possibility for producing fuji-strength joint of lange steel parts using the method of autovacuum brazing of threaded profile. *The Paton Welding J.*, 10, 35–37.
15. Вайнерман А.Е. (1981) Механизм межкристаллитного проникновения при наплавке медных сплавов на сталь. *Автоматическая сварка*, 6, 22–29.
16. Serebryanik, I.P., Atroshenko, M.G., Poleschuk, M.A. et al. (2018) Properties of steel-copper bimetal produced by brazing in autonomous vacuum. *The Paton Welding J.*, 5, 12–16.
17. ГОСТ 14019-2003. *Материалы металлические. Метод испытания на изгиб*.

References

1. Kolesov, S.N., Kolesov, I.S. (2007) *Materials science and technology of structural materials*. In: Manual for inst. for higher educ., 2nd Ed., Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
2. Golovanenko, S.A., Meandrov, L.V. (1966) *Production of bimetallics*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. (2003) *Handbook on soldering*. Ed. by I.E. Petrunin, 3rd Ed., Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. GOST 31842-2012. *Shell-and-tube heat exchangers. Technical requirements* [in Russian].
5. Serebryanik, I.P. (2011) *Autovacuum noncapillary structural brazing*. Kyiv, Alfa-Reclama [in Russian].
6. GOST 19281-89. *Rolled steel with increased strength. General specifications* [in Russian].
7. GOST 15527-2004. *Pressure treated copper zinc alloys (brasses). Grades* [in Russian].
8. Bogomolova, N.A. (1978) *Practical metallography*. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
9. Perevezentsev, B.N., Krasnopevtsev, A.Yu., Fedorov, A.L. (1991) Study of zinc evaporation in brazing by copper-zinc braze alloys. In: *Abstr. of Papers of All-Union Sci.-Tech. Conf. on Brazing in Mechanical Engineering, Tolyatti* [in Russian].
10. OST 5.9311-78. *Explosion welding of metals. Bimetallic billets for tube plates of heat exchange apparatuses. General specifications*.

11. (1971) *Welding of steel structures*. In: Production of large structures, Issue 20. Ed. by A.I. Volkonsky. Trudy NPI TyaZhMash, Uralmashzavod [in Russian].
12. Shmidt, M., Kuryntsev, S.V. (2014) Producing of bimetal joints by laser welding with full penetration. *The Paton Welding J.*, **4**, 45-48.
13. Suvorin, A.V. (2011) *Electrotechnological installations*. Krasnoyarsk, SFU [in Russian].
14. Poleschuk, M.A., Atroshenko, M.G., Puzrin, A.L., Shevtsov, V.L. (2014) Estimation of possibility for producing full-strength joint of large steel parts using the method of autovacuum brazing of threaded profile. *The Paton Welding J.*, **10**, 35-37.
15. Vajnerman, A.E. (1981) Mechanism of intercrystalline penetration in surfacing of copper alloys on steel. *Avtomatich. Svarka*, **6**, 22-29 [in Russian].
16. Serebryanik, I.P., Atroshenko, M.G., Poleschuk, M.A. et al. (2018) Properties of steel-copper bimetal produced by brazing in autonomous vacuum. *The Paton Welding J.*, **5**, 12-16.
17. GOST 14019-2003. *Metallic materials. Method of bending tests*.

CHARACTERISTICS OF FORMATION AND PROPERTIES OF BRASS-STEEL JOINT PRODUCED BY AUTOVACUUM CLADDING

I.P. Serebryanyk, M.A. Poleschuk, T.O. Zuber, A.I. Borodin, A.Yu. Tunik, O.A. Los

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 technological features of producing brass-steel joint by the method of autovacuum heating are considered. The thickness of the brass layer after mechanical treatment was 10 mm. Studying the structures and chemical composition of various joint zones confirmed the solution-diffusion nature of interaction of liquid brass with steel. The measurements of microhardness showed the absence of hard and brittle structures. A high quality of the joint was confirmed by mechanical tests of the two-layer joint on static bending, rupture and shear. 17 Ref., 2 Tabl., 8 Fig.

Key words: brass, steel, two-layer joint, autovacuum heating

Надійшла до редакції 11.07.2022

КОНФЕРЕНЦІЯ



ЗВАРЮВАННЯ ТА ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ



м. Київ

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
17 листопада 2022 р.

Тематика конференції

- Зварювання та споріднені технології з'єднання та обробки перспективних конструкційних і функціональних матеріалів, фізико-хімічні процеси при їх реалізації
- Фізична та конструкційна міцність матеріалів, зварних з'єднань і конструкцій, їх діагностика та подовження ресурсу експлуатації
- Автоматизація і роботизація технологій з'єднання та обробки матеріалів, математичне моделювання процесів та інформаційні технології
- Створення нових функціональних та конструкційних матеріалів і технологій їх отримання методами спеціальної електрометалургії
- Нові процеси і технології нанесення покриттів різного призначення та інженерія поверхні
- Матеріали, технології і виробы медичного призначення
- Адитивні технології отримання виробів і елементів конструкцій на основі лазерних, електронно-променевих і дугових джерел енергії
- Технології ремонту та відновлення інфраструктурних і промислових об'єктів.

Контрольні дати

Подання заявок для участі в конференції
(доповідь наживо / on-line доповідь / стендова доповідь / без доповіді)

– тез доповідей	до 20.10.2022
– без доповіді	до 10.11.2022
Розсилка програми та збірки тез конференції	до 04.11.2022
Оплата організаційного внеску	до 16.11.2022

Організаційний комітет конференції
тел./факс: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.pwi-scientists.com/ukr/wtd2022

