

**О. К. Радченко, О. В. Дерев'янку, Ю. М. Романенко, П. І. Лобода,
В. А. Кривошея***

ПАЙКА ТВЕРДОГО СПЛАВУ КОМПОЗИЦІЙНИМ ПРИПОЄМ

Розглянуто застосування композиційного припою МФ9 на основі хімічної сполуки Cu_3P , виготовленого методом порошкової металургії, при отриманні нероз'ємного з'єднання пластин сплаву ВКЗ та сталі 12Х18Н10Т. Визначено вплив товщини шару композиційного припою МФ9 на з'єднання двох тіл при створенні ефекту паяння за рахунок електромеханічної обробки великої потужності (SPS процес) на установці СТРУМ-902. Аналіз металографічних структур, а також залежностей між твердістю та режимами з'єднання пластин показав, що завдяки застосуванню SPS процесу властивості компонентів практично не змінюються.

***Ключові слова:** прокатка, мідно-фосфорний припій, електричний струм великої потужності, механічне навантаження, пайка, змочування, мікротвердість.*

Вступ

Розвиток нових галузей промисловості, зростаючий обсяг виробництва, його механізація і автоматизація потребують заміни багатьох дорогих припоїв дешевшими і одночасно висувається ряд додаткових вимог щодо процесів паяння: зменшення зазорів між сполученнями деталей, виключення операцій з видалення флюсу, зниження температури паяння, точне дозування витратних матеріалів [1]. Збільшення міцності з'єднань за рахунок застосування низьколегованих сплавів з підвищеною міцністю дозволить значно розширити область використання паяних конструкцій в промисловості. За останні роки у механізованих і автоматизованих процесах паяння виробів з міді і її сплавів суттєво зросла потреба в припоях у вигляді дроту діаметром 1—2 мм і менше та плоских заставних елементах з товщиною 200—250 мкм.

Евтектика Cu—P та сплави на її основі відносяться до найбільш легкоплавких мідьмістких припоїв. Ці припої мають низьку в'язкість та електропровідність, близьку до міді, завдяки чому вони знаходять широке застосування в електротехнічній промисловості [2]. Припої, що отримані розпиленням мідно-фосфорних сплавів, представлені головним чином у вигляді порошку або паст [3]. Спикання порошків цього класу взагалі не описане в літературі. Пізніше була запропонована технологія одержання стрічок припою із суміші цих порошків та порошку електролітичної міді [4], але вони не знайшли застосування з причини підвищеної в'язкості при

*О. К. Радченко — доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ; О. В. Дерев'янку — науковий співробітник, цієї ж установи; Ю. М. Романенко — провідний інженер, Національний технічний університет України "КПІ", Київ; П. І. Лобода — доктор технічних наук, професор, член-кор. НАНУ, декан інженерно-фізичного факультету, цієї ж установи; В. А. Кривошея — студент, цієї ж установи.

розплавленні. Завдяки середньо температурному синтезу були одержані порошки мідно-фосфорних сплавів з високою формованістю [5, 6], з яких вдалося виготовити стрічки припою товщиною 200—250 мкм [7]. Можливість використання таких припоїв для паяння міді та її сплавів показана у роботі [8]. Питання застосування таких припоїв для з'єднання залізовміщуючих сплавів є дискусійним, хоча деякі позитивні результати були одержані при використанні швидкісного нагріву [9]. На сьогоднішній день вирішення проблеми паяння мідно-фосфорними припоями залізовміщуючих сплавів залишається відкритим.

Метою роботи є створення технології з'єднання твердого сплаву із підкладкою зі сталі за допомогою електричного струму великої потужності та механічного навантаження з використанням припоїв на мідно-фосфорній основі.

Обладнання, що використане для створення нероз'ємних з'єднань

Для проведення науково-технічних досліджень застосовано технологію іскроплазмового спікання (ІПС), що у світі одержала найменування як "SPS technology" та достатньо широко використовується, наприклад, в Італії, Угорщині, Німеччині, Японії, США, Україні, Росії, Казахстані, Китаї, Індії та починає розвиватися у Туреччині.

Для припоїв на основі речовин із підвищеною в'язкістю (наприклад, припій композиційний МФ9) застосування технології ІПС є самим зручним способом з'єднання матеріалів, який базується на використанні безпосереднього пропускання електричного струму крізь об'єкти.

З метою отримання нероз'ємного з'єднання використано стаціонарну дослідну установку, яка створена для здійснення ІПС – СТРУМ-902 (рис. 1). Установка дозволяє створювати необхідні умови для одержання проміжного шару із порошкових композицій при електромеханічній обробці зони паяння (рис. 2), а саме:

формувати необхідну густину електричного струму промислової частоти крізь об'єкти із швидкістю зростання струму у перші секунди 250—300 А/с;

підтримувати необхідний рівень механічного навантаження.



Рис. 1. Загальний вигляд устаткування СТРУМ-902

Fig. 1. General view of STRUM-902 equipment

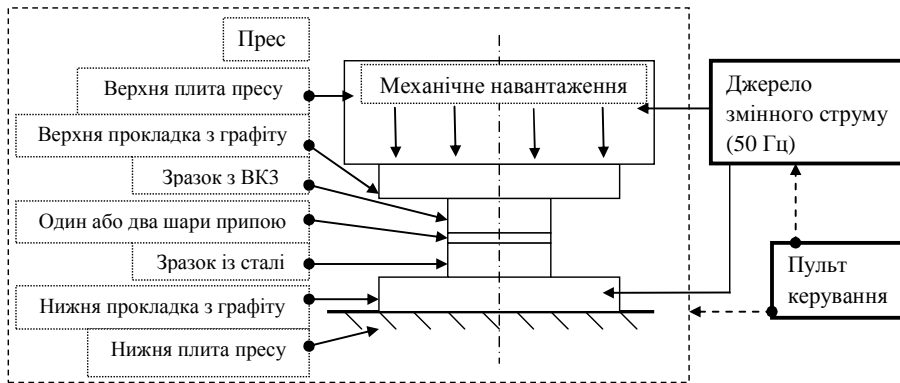


Рис. 2. Схематичне зображення установки та розташування об'єктів дослідження

Fig. 2. The schematic image of equipment and the accommodation of research objects

Об'єкти та результати досліджень

В якості зразків були взяті фрагменти стрічки композиційного припою МФ9 (рис. 3, а) та пластини розмірами 10x10x3 мм із твердого сплаву марки ВКЗ [10] та сталі марки 12Х18Н10Т [11] (рис. 3, б).

Між двома пластинками розташовували стрічку композиційного припою МФ9 та додавали флюс № 209, на відміну від промислових технологій паяння, де зазвичай використовують литі припої МФ7 та МФ9 промислового виготовлення [12, 13]. Гідравлічний прес електростанції СТРУМ-902 (рис. 2) створював механічне навантаження для покращення умов проходження струму. Внаслідок електромеханічної дії стрічка

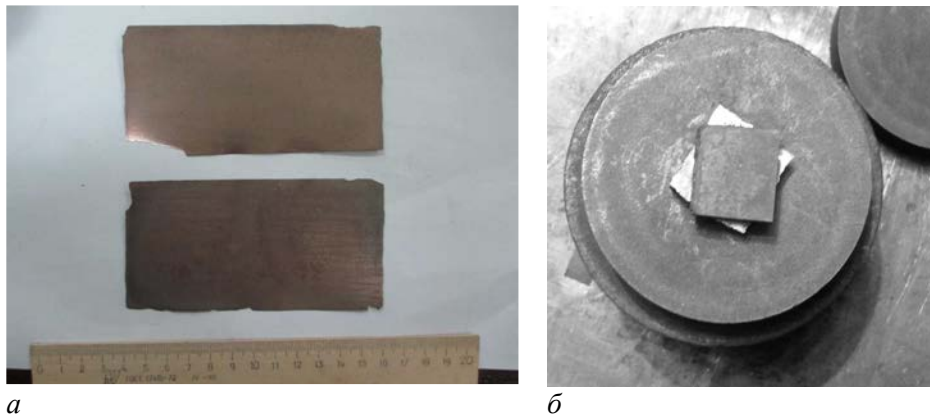


Рис. 3. Фрагменти стрічки композиційного припою МФ9 (а) та зразки в початковому стані на графітовій підкладці (б)

Fig. 3. Fragments of a strip of composite solder МФ9 (а) and samples at an initial stage on a graphite substrate (б)

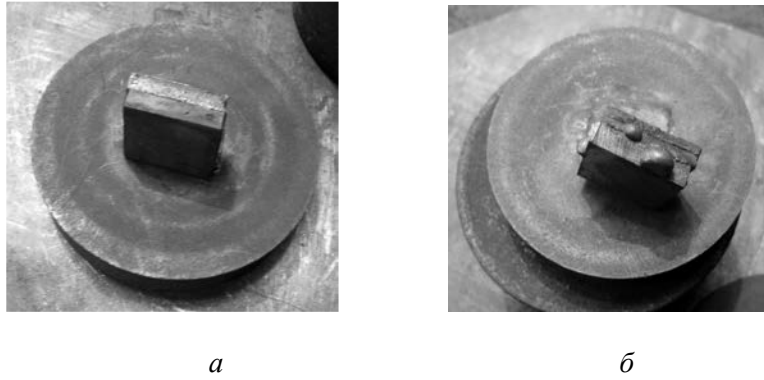


Рис. 4. Зразки з одним (а) та двома (б) шарами припою і флюсом після електромеханічної обробки

Fig. 4. Samples with one (a) and two (b) layers of solder and a flux after electromechanical processing

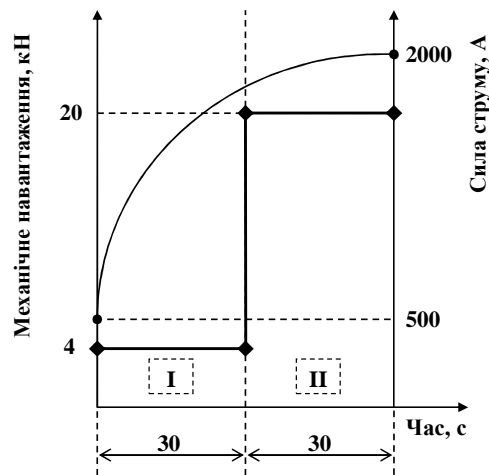


Рис. 5. Зміна параметрів процесу паяння: I — попереднє навантаження; II — кінцевий тиск

Fig. 5. Change of parameters of soldering process: I — the previous loading; II — final pressure

припою плавилася і відбувалося з'єднання двох пластинок (рис. 4). Використовуючи різні режими електромеханічної обробки, вдалося вибрати оптимальний (рис. 5) і досягти практичного результату для обраної пари: сплав ВКЗ—підкладка із сталі. Технологічні параметри процесу з'єднання твердого сплаву і нержавіючої сталі одним та двома шарами припою із додаванням флюсу № 209 наведені у табл. 1.

Т а б л и ц я 1. Технологічні параметри електромеханічної обробки

Table 1. Technological parameters of electromechanical processing

Об'єкт прошарку	Механічне навантаження, кН		Струм, кА	Нагрів, °С	Загальний час, с
	Перша ступінь	Друга ступінь			
Припій товщиною 250 мкм (рис. 4, а)	4	20	від 0,5	800	60
Припій товщиною 500 мкм (рис. 4, б)	(перші 30 с)	(наступні 30 с)	до 2	800— 900	

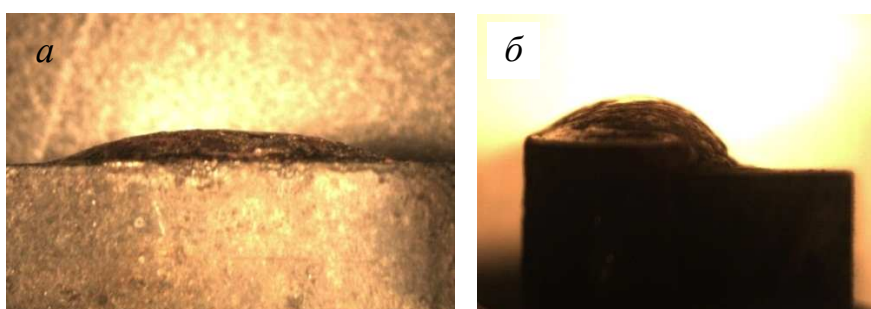


Рис. 6. Знімки крапель припою на поверхні твердого сплаву ВКЗ (а) та сталі 12Х18Н10Т (б)

Fig. 6. The photo of solder drops on firm alloy BK3 (a) and on steel 12X18H10T (b)

Відомо, що одним із важливих чинників паяння є змочування складників припоєм. Для визначення величини змочування використовували знімки зразка з краплею припою, що розтікся по поверхні пластини ВКЗ (рис. 6, а) та сталі 12Х18Н10Т (рис. 6, б) за нормальних умов паяння на повітрі за допомогою гіпертонічного розчину флюсу № 209 у H_2O [13]. Саму краплю знімали з різних сторін для того, щоби отримати більш точне значення кутів та визначити, по якій поверхні вона краще розтікається.

Більш якісне змочування поверхні твердого сплаву ВКЗ, зумовлене тим, що він має нижчу теплопровідність (табл. 2), ніж сталь 12Х18Н10Т, через не таке швидке розсіювання тепла, що сприяє кращому змочуванню за рахунок збереження більшої температури у зоні контакту [14]. Після вимірювання кутів проводили обчислення за допомогою комп'ютерної програми SeoimageLab v1.0. За результатами розрахунків середні кути змочування для контактних пар припій—ВКЗ і припій—сталь 12Х18Н10Т склали 18,5 та 49,1° відповідно.

Т а б л и ц я 2. Теплопровідність компонентів

T a b l e 2. Heat conductivity of components

Компонент	Температурний інтервал, °С	Теплопровідність, λ , Вт/(м·К)	Джерело
Твердий сплав ВКЗ	700—800	50,2	[10]
Сталь 12Х18Н10Т	700—800	575—596	[11]
Композиційний припій МФ9	714—730	—	[15]
Припій МФ7	707—820		
Припій МФ9	750—800	360,8—369,7	[12, 16]

Т а б л и ц я 3. Твердість HV (100) об'єктів дослідження (ГПа)

T a b l e 3. Hardness HV (100) of research objects (GPa)

Вимірювання	HV ВКЗ	HV нерж.	HV ВКЗ	HV нерж.
	Зразок з одним шаром припою + флюс		Зразок з двома шарами припою + флюс	
1	14,26	2,16	2,16	2,12,2
2	14,15	2,06	2,06	1,95,3
3	13,94	2,03	2,03	2,06,9
4	15,82	2,09	2,09	2,38,7
5	15,69	2,05	2,05	2,06,9
6	15,56	2,01	2,01	2,12,2
7	14,49	2,10	2,10	2,25,3
8	12,74	1,98	1,98	1,84
9	11,61	2,04	2,04	2,11,3
Середнє значення	14,25	2,06	2,06	2,10
Стандартне відхилення	1,40	0,05	0,05	0,16
Довірчий інтервал	1,20	0,05	0,05	0,14

У напрямку, перпендикулярному зоні паяння на об'єктах, що досліджували, було визначено твердість за Віккерсом на приладі марки ПМТ-3. Для отримання більш точного результату, твердість вимірювали 2—3 рази та розраховували за формулою [17, 18].

$$HV = 1,854 P/d^2$$

Результати вимірювань твердості від шва з'єднання у глибину складників трьохшарового матеріалу зведені у табл. 3 і відповідно

показані на рис. 7. Для ліній твердого сплаву ВКЗ (рис. 7) видно збільшення твердості до відстані 250 мкм від паяного шва, що може бути зумовлене зміною внутрішнього стану ВКЗ після проходження електричного струму. Встановлений у роботі факт підвищення рівня твердості на визначеній відстані від шва потребує подальших досліджень. А от твердість підкладки із нержавіючої сталі практично не змінювалася.

На SEM зображенні (рис. 8, а) можна спостерігати взаємне проникнення речовини твердого сплаву (світла фаза) і припою (темна фаза), яке відбулося за рахунок високої температури під час проходження електричного струму через зону контактного переходу між складовими. Пористий стан паяного шва вказує на недостатню температуру або час витримки для одержання якісного паяння. На рис. 8, б паяний шов має товщину майже у 5 разів меншу, ніж початкова товщина двох шарів припою. Шов практично безпористий, але пори спостерігаються на поверхні контакту твердий сплав—припій. За рахунок дії механічного навантаження під час електромеханічної обробки частина припою витіснялася за межі пластин зразків (рис. 6, б) і формувалася у вигляді крапель на боковій поверхні. Пори можуть виникати також і внаслідок наявності вуглецю, що міститься в омилувачі, який використовувався для захисту мідного порошку марки ПМС-1 від окислення [19].

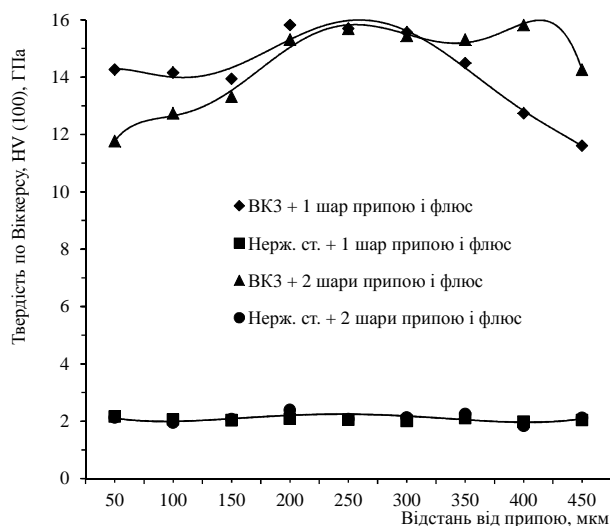


Рис. 7. Зміна твердості в залежності від відстані від припою

Fig. 7. Change of hardness depending on distance from solder

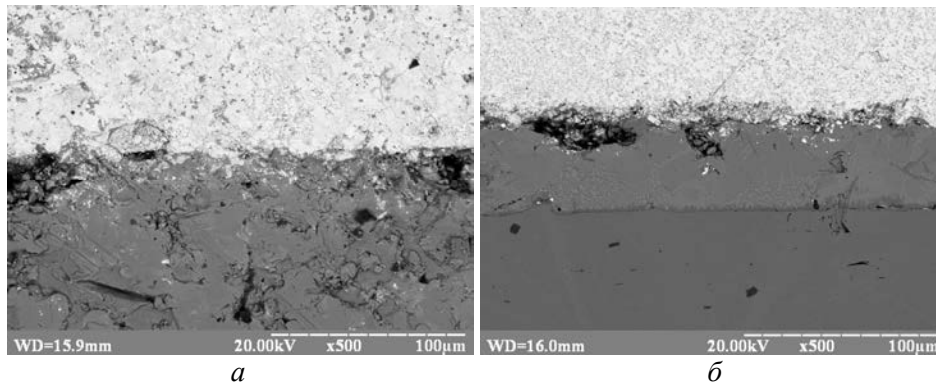


Рис. 8. SEM зображення області з'єднання зразків з одним шаром (а) та з двома шарами (б) припою і флюсом після електромеханічної обробки

Fig. 8. SEM images of joining area of samples with one layer (a) and with two layers (b) of solder and a flux after electromechanical processing

Висновки

За допомогою установки іскроплазмового спікання СТРУМ-902 отримано зразки типу "сандвіч" твердий сплав ВКЗ—нержавіюча сталь 12Х18Н10Т із застосуванням одного або двох проміжних шарів композиційного припою МФ9 та флюсу № 209.

Аналіз металографічних зображень виявив факт незначного проникнення композиційного припою МФ9 у поверхні тіл, що з'єднували за допомогою електромеханічної обробки зони паяння.

У напрямку, перпендикулярному паяному шву, спостерігається немонотонна зміна твердості від 11,77 до 15,81 ГПа лише на твердому сплаві ВКЗ, яка напевне зумовлена дією електричного струму. Твердість за Віккерсом нержавіючої сталі 12Х18Н10Т фактично не змінюється і варіюється в інтервалі 2,06—2,10 ГПа.

Проведене дослідження змочуваності припоєм поверхні твердого сплаву і нержавіючої сталі показало, що в умовах паяння кут змочування становить 18,5 та 49,1° відповідно.

РЕЗЮМЕ. Рассмотрено применение композиционного припоя МФ9 низкоэнергетического способа изготовления на основе химического соединения Cu_3P в звене технологической цепочки при получении неразъемного соединения пластин сплава ВКЗ и стали 12Х18Н10Т. Определено влияние толщины слоя композиционного припоя МФ9 на соединение двух тел при создании эффекта пайки при электромеханической обработке большой мощности (СТРУМ-902). Анализ зависимости между видом металлографических структур, микротвердостью и режимами соединения пластин показал, что благодаря применению медно-фосфорного композиционного припоя МФ9 с флюсом № 209 свойства компонентов практически не изменяются.

Ключевые слова: прокатка, медно-фосфорный припой, пайка, смачиваемость, микротвердость.

1. Радченко А. К. Свойства припоя на основе Cu_3P , полученного методом прокатки из порошка / А. К. Радченко, А. В. Деревянко // Тез. 9-й Междунар. конф. "Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий", 15—19 августа 2016, Киев, Украина. — С. 50.
2. Лашко С. В. Пайка металлов / С. В. Лашко, Н. Ф. Лашко. — М. : Машиностроение, 1988. — 376 с.
3. Радченко А. К. Получение и применение композиционных медно-фосфорных припоев. II. Получение порошков сплава медь—фосфор низкотемпературным синтезом в защитной среде // Современные проблемы физического материаловедения. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2002. — С. 169—176.
4. Радченко А. К. Ленты композиционных припоев на основе системы медь—фосфор. — Алма—Ата : Наука, АН Каз. ССР, 1987. — Т. 1. — С. 59—63.
5. Мучник С. В. Получение и формуемость порошка фосфида меди Cu_3P / [С. В. Мучник, А. К. Радченко, О. А. Катрус и др.] // Порошковая металлургия. — 1992. — № 11. — С. 24—27.
6. Радченко О. К. Дифузійний середньотемпературний синтез фосфідів металів — екологічночиста, ресурсо- та енергозберігаюча технологія // Ресурсосбережение и экотехнологии. — 2001. — № 6. — С. 30—33.
7. Радченко А. К. Получение и применение композиционных медно-фосфорных припоев. III. Получение лент припоев из синтезированного порошка сплава медь-фосфор // Современные проблемы физического материаловедения. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2002. — С. 177—183.
8. Радченко А. К. Влияние термической обработки и небольших технологических добавок композиционных припоев на основе сплава медь—фосфор / А. К. Радченко, А. В. Зайчиков, А. В. Алёшина // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 1990. — Вып. 24. — С. 69—71.
9. Радченко А. К. Пайка разрядно-импульсным электрическим током / [А. К. Радченко, В. Б. Черногоренко, Л. И. Черненко и др.] // Там же. — 1997. — Вып. 33. — С. 123—129.
10. ГОСТ 3882-74. Сплавы твердые спеченные. Марки (с изменениями № 1—6).
11. ГОСТ 7350-77. Сталь листовая коррозионно-стойкая, жаропрочная и жаропрочная. Технические условия.
12. ГОСТ 4515-93. Сплавы медно-фосфористые. Технические условия.
13. Лоцманова С. Н. Справочник по пайке / С. Н. Лоцманова, И. Е. Петрунина, В. П. Фролова. — М.: Машиностроение, 1975. — 407 с.
14. Скороход В. В. Порошковые материалы на основе тугоплавких металлов и соединений. — Киев : Техніка, 1982. — 167 с.
15. Радченко А. К. Получение и применение композиционных медно-фосфорных припоев. IV. Сравнение температур плавления существующих припоев и припоев из синтезированного порошка медно-фосфорного сплава / А. К. Радченко, С. Н. Лакиза //

- Современные проблемы физического материаловедения. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2002. — С. 183—190.
16. *Зиновьев В. Е.* Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. — М. : Metallurgia, 1989. — 384 с.
 17. *Арзамасов Б. Н.* Материаловедение: учебник для вузов. 3-е издание / [Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин и др.]. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 648 с.
 18. *Дяченко С. С.* Фізичні основи міцності та пластичності металів: Навч. посібник. — Харків : Вид-во ХНАДУ, 2003. — 226 с.
 19. *Павленко Є. В.* Сучасні методи одержання мідного порошку, що містить нанодисперсії / Є. В. Павленко, С. Г. Єгоров. — К. : Металургія. — 2015. — Вип. 1. — С. 36—40.

Надійшла 17.08.16

**Radchenko O. K., Derev'yanko O. V., Romanenko YU. M., Loboda P. I.,
V. A. Kryvosheya**

Soldering of the solid alloy by composite solder alloy

The use of the composite MF9 solder by low-energy manufacturing method based on the chemical compound Cu_3P in the process chain link in the preparation of an all-in-one joining of plates of hard alloy (VK3 type) and steel (12X18H10T SU nomenclature) is considered. In the course of the work, the influence of the thickness of the composite solder layer of MF9 on the connection of two bodies was determined when creating the soldering effect under of electromechanical action high power by equipment (STRUM 902). Analysis of the relationship between the type of metallographic structures, microhardness and plate bonding regimes showed that due to the use of composite solder copper-phosphorus MF9 with flux 209, the properties of the components practically do not change.

Keywords: *rolling, copper-phosphorus solder, soldering, wettability, microhardness.*