

УДК 620.18 : 621.791

## ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ У ПРИПІЙНИХ СПЛАВАХ СИСТЕМИ Cu–Mn–Fe–Ni–Si

НОСЕНКО В. К.<sup>1</sup>, д. ф.-м. н., проф.,  
БРЕХАРЯ Г. П.<sup>2</sup>, д. ф.-м. н., проф.,  
БАЛАН В. З.<sup>3</sup>, н. с.,  
НИКОЛАЄВА Т. Ю.<sup>4\*</sup>, інж.

<sup>1</sup> Відділ кристалізації, Інститут металофізики НАНУ ім. Г. В. Курдюмова, бульвар Академіка Вернадського, 36, 03680, Київ, Україна, тел.: +38(050)655-06-52, e-mail: [nosenko@imp.kiev.ua](mailto:nosenko@imp.kiev.ua)

<sup>2</sup> Відділ кристалізації, Інститут металофізики НАНУ ім. Г. В. Курдюмова, бульвар Академіка Вернадського, 36, 03680, Київ, Україна, тел.: +38(050) 947-43-10, e-mail: [brekharya@ukr.net](mailto:brekharya@ukr.net)

<sup>3</sup> Відділ кристалізації, Інститут металофізики НАНУ ім. Г. В. Курдюмова, бульвар Академіка Вернадського, 36, 03680, Київ, Україна, тел.: +38(044) 424-21-26

<sup>4\*</sup>Управління головного металурга, АТ «Мотор Січ», пр. Моторобудівників, 15, 69068, Запоріжжя, Україна, тел. +38(061)720-42-96, e-mail: [tnikolayewa@gmail.com](mailto:tnikolayewa@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-5481-024X

**Анотація. Постановка проблеми.** У зв'язку з розвитком галузей машинобудування, авіа-, ракетобудування особливого значення набуває паяння нержавіючих сталей та жароміцних сплавів. Удосконалення процесу йде шляхом розроблення нових припоїв і флюсів, зменшення вмісту в них дорогоцінних металів, таких як срібло, а також пошуку оптимальних середовищ і методів паяння. Найбільш перспективні для цього за результатами втомних випробувань з'єднань припої, побудовані на основі системи мідь – марганець. **Методика.** Проведено дослідження фазової структури литих (вихідних) та екструдованих сплавів на основі Cu–Mn шляхом варіювання вмісту легуючих елементів Fe, Ni, Si за допомогою методів металографії, рентгеноструктурного, ДТА і РЕМ аналізів, а також визначено інтервали фазових перетворень. **Результати.** Наведено результати дослідження впливу легувальних елементів на властивості та характеристики припою зі сплаву на основі Cu–Mn. Виявлено, що для зниження температури плавлення припою необхідно збільшити вміст марганцю та кремнію до 30 і 3 % відповідно при вмісті заліза в межах 1,5...3 %. Ще більший вміст заліза не підвищить значно міцність паяного виробу, але при цьому може понизити рідкоплинність припою. За результатами диференціально-термічного аналізу визначено температури для процесу екструдуювання сплаву. Прокатка не викликає зміни фазового складу вихідних сплавів. **Практична значимість.** Результат проведеної роботи може використатися для визначення оптимального складу припійного матеріалу для задоволення технологічних потреб процесу паяння.

*Ключові слова:* припій; легувальний елемент; фазові перетворення; диференціально-термічний аналіз; екструдуювання

## ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ПРИПОЙНЫХ СПЛАВАХ СИСТЕМЫ Cu–Mn–Fe–Ni–Si

НОСЕНКО В. К.<sup>1</sup>, д. ф.-м. н., проф.,  
БРЕХАРЯ Г. П.<sup>2</sup>, д. ф.-м. н., проф.,  
БАЛАН В. З.<sup>3</sup>, н. с.,  
НИКОЛАЕВА Т. Ю.<sup>4\*</sup>, инж.

<sup>1</sup> Отдел кристаллизации, Институт металлофизики НАНУ им. Г. В. Курдюмова, бульвар Академика Вернадского, 36, 03680, Киев, Украина, тел.: +38(050)655-06-52, e-mail: [nosenko@imp.kiev.ua](mailto:nosenko@imp.kiev.ua)

<sup>2</sup> Отдел кристаллизации, Институт металлофизики НАНУ им. Г. В. Курдюмова, бульвар Академика Вернадского, 36, 03680, Киев, Украина, тел.: +38(050) 947-43-10, e-mail: [brekharya@ukr.net](mailto:brekharya@ukr.net)

<sup>3</sup> Отдел кристаллизации, Институт металлофизики НАНУ им. Г. В. Курдюмова, бульвар Академика Вернадского, 36, 03680, Киев, Украина, тел.: +38(044) 424-21-26

<sup>4\*</sup> Управление главного металлурга, АО «Мотор Сич», ул. Моторостроителей, 15, 69068, Запорожье, Украина, тел.: +38(061)720-42-96, e-mail: [tnikolayewa@gmail.com](mailto:tnikolayewa@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-5481-024X

**Аннотация. Постановка проблемы.** В связи с развитием отраслей машиностроения, авиа-, ракетостроения особое значение приобретает пайка нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов. Усовершенствование процесса пайки идет путем разработки новых припоев и флюсов, уменьшения содержания в них драгоценных металлов, таких как серебро, а также изыскания оптимальных сред и методов пайки. Наиболее перспективными для этого по результатам усталостных

испытаний соединений являются припой на основе системы медь – марганец. **Методика.** Проведено исследование фазовой структуры литых (исходных) и экструдированных сплавов на основе Cu–Mn путем варьирования содержания легирующих элементов Fe, Ni, Si с помощью методов металлографии, рентгеноструктурного, ДТА и РЭМ анализов, а также определены интервалы фазовых превращений. **Результаты.** В работе приведены результаты исследования влияния легирующих элементов на свойства и характеристики припоя из сплава на основе Cu–Mn. Выявлено, что для понижения температуры плавления припоя необходимо увеличить содержание марганца и кремния до 30 и 3 % соответственно при содержании железа в пределах 1,5...3 %. Больше содержание железа значительно не повысит прочность паяного изделия, но при этом может понизить жидкотекучесть припоя. По результатам дифференциально-термического анализа определены температуры для процесса экструдирования сплава. Прокатка (волочение) не приводит к изменению фазового состава исходных сплавов. **Практическая значимость.** Результат проделанной работы может использоваться для определения оптимального состава припойного материала, который удовлетворяет технологическим потребностям процесса пайки.

*Ключевые слова:* припой; легирующий элемент; фазовые превращения; дифференциально-термический анализ; экструдирование

## INFLUENCE FEATURES OF ALLOYING ELEMENTS ON STRUCTURE AND PHASE TRANSFORMATION IN SOLDER ALLOY OF CU–MN–FE–NI–SI SYSTEM

NOSENKO V.K.<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Phys./Math.), Prof.,  
BREKHARYA G.P.<sup>2</sup>, Dr. Sc. (Phys./Math.), Prof.,  
BALAN V.Z.<sup>3</sup>, Sc. Res.,  
NIKOLAYEVA T.Yu.<sup>4\*</sup>, eng.

<sup>1</sup> Department of Crystallography, G.V. Kurdyumov's Institute of Metal Physics, Academician Vernadsky Boulevard, 36, 03680, Kiev, Ukraine, tel.: +38(050)655-06-52, e-mail: [nosenko@imp.kiev.ua](mailto:nosenko@imp.kiev.ua)

<sup>2</sup> Department of Crystallography, G.V. Kurdyumov's Institute of Metal Physics, Academician Vernadsky Boulevard, 36, 03680, Kiev, Ukraine, tel.: +38(050) 947-43-10, e-mail: [brekharya@ukr.net](mailto:brekharya@ukr.net)

<sup>3</sup> Department of Crystallography, G.V. Kurdyumov's Institute of Metal Physics, Academician Vernadsky Boulevard, 36, 03680, Kiev, Ukraine, tel.: +38(044) 424-21-26

<sup>4\*</sup> Management Chief Metallurgist, JSC "Motor Sich", Motorostroiteley Av., 15, 69068, Zaporozhye, Ukraine, tel.: +38(061)720-42-96, e-mail: [mikolayewa@gmail.com](mailto:mikolayewa@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-5481-024X

**Abstract. Purpose.** In connection with development of branches of mechanical engineering, aircraft building and rocket production the soldering of stainless steels and heat resisting alloys gains special value. Improvement of the soldering process goes by the way of working out of new solders and fluxes, reduction of precious metals content, such as silver, and also researching of optimum environments and soldering methods. The most perspective for this purpose by results of fatigue tests of joints are solders on the copper-manganese base. **Methodology.** In this work researching of phase structure of Cu–Mn alloys with a different variation of the alloying elements Fe, Ni, Si content has been carried out by methods of metallography, DTA and SEM analyses as well cast (original) alloys as after extrusion; also ranges of phase transformation have been defined. **Findings.** Investigations of influence of alloying elements on properties and characteristics of solder from Cu-Mn alloy are resulted in this research. It is revealed that for decreasing of the solder melting temperature it is necessary to increase the content of manganese and silicon to 30 and 3 % respectively at the iron content within 1,5...3 %. More iron content does not raise strength of soldered product considerably, but thus can reduce fluidity of the solder. By results of the differentially thermal analysis, temperatures for extrusion process of the solder alloy are defined. Rolling does not lead to the phase composition change of initial alloys. **Practical value.** The result of the done work can be used for determination of an optimum content of solder material, which satisfies to technological requirements of the soldering process.

*Keywords:* solder; alloying element; phase transformations; the differentially-thermal analysis; extrusion

### Вступ

Для з'єднання деталей машин за допомогою паяння у виробках, що працюють за великих навантажень та підвищених температур або в корозійно-активних середовищах, як припої застосовуються спеціальні сплави. Вони призначені для заміни золото- та срібломістких припоїв для з'єднання елементів конструкцій та виробів із заліза, міді, бронзи, нержавіючої сталі з діапазоном температур паяння від 700 до 1 100 °С. Такі припої

застосовують в авіапромисловості для паяння турбінних лопаток та елементів двигунів, у гірничодобувній промисловості, криогенній техніці. Процес паяння виконується на повітрі з використанням стандартних флюсів, при цьому забезпечується достатня корозійна стійкість та міцність паяного шва.

Найбільш перспективні для з'єднань за результатами втомних випробувань припої, побудовані на основі системи медь – марганець. З точки зору процесу паяння це «ідеальні» припої, що

не мають у своїй структурі крихких евтектичних або інтерметалідних складових. Наявність упорядкованих фаз у системі мідь – марганець тільки сприяє зростанню міцнісних характеристик сплаву. Але ці сплави мають і недоліки. Перший та основний – це здатність марганцю до окиснення та вигорання, газонасичення розплаву в процесі його приготування. Другий недолік – це трудність обробки матеріалу тиском [1].

Поліпшити технологічні властивості сплавів системи мідь – марганець можна за рахунок присадки олова, одночасно знизивши масову частку марганцю.

Мікро- и макроструктура припійного сплаву Cu–Mn–Fe–Ni–Si, його фазовий склад визначаються швидкістю охолодження, тобто умовами твердіння, і залежать від співвідношення складу компонентів у них.

### Мета

Мета роботи – дослідження структури сплавів на основі Cu–Mn із різним варіюванням вмісту легуючих елементів Fe, Ni, Si для визначення оптимального складу для задоволення технологічних потреб процесу паяння. За допомогою металографічних, рентгеноструктурних, РЕМ і ДТА методів вивчали структурні і фазові складові як литих (вихідних) сплавів, так і після екструдкування, а також визначали інтервали фазових перетворень у них.

### Результати

Із використанням оптичного мікроскопа Neophot-2 та растрового електронного мікроскопа JSM-6360LA (JEOL, Японія) проведено візуальні дослідження мікроструктури вихідних сплавів на мікрошліфах, травлених у 50 % розчині HNO<sub>3</sub>. Металографічні дослідження показали, що мікроструктура всіх сплавів цієї системи в литому стані з повільним охолодженням злитків масою 2...3 г має подібний характер. Приблизно на 90 % вона складається з дендритів первинного твердого розчину Si, Mn, Ni у міді, розмір яких мало залежить від вмісту цих елементів у сплаві (рис. 1). Більш витравлені включення спостерігаються у між дендритному просторі  $\alpha$ -твердого розчину на основі міді (рис. 1 в). За даними локального мікроаналізу, ці включення являють собою інтерметаліди, до складу яких входять марганець (40 %), залізо (47 %), нікель (3 %), мідь (3 %) та інші елементи.

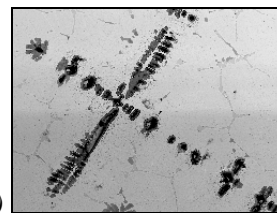
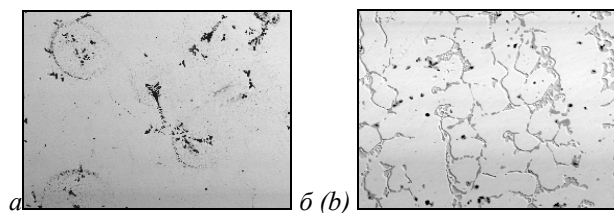


Рис. 1. Мікроструктура вихідних зливків системи Cu–Mn–Fe–Ni–Si з різним умістом заліза: а – Fe < 0,005 ваг. % ( $\times 200$ ); б – Fe = 0,5 ваг. % ( $\times 500$ ); в – Fe = 2,82 ваг. % ( $\times 200$ ) / Fig. 1. Microstructure of initial ingots of Cu–Mn–Fe–Ni–Si system with different iron content а – Fe < 0,005 wt. % ( $\times 200$ ); б – Fe = 0,5 wt. % ( $\times 500$ ); в – Fe = 2,82 wt. % ( $\times 200$ )

Поява нових фаз у структурі сплавів даної системи у разі збільшення вмісту кремнію і заліза зазвичай супроводжується деяким укрупненням структури  $\alpha$ -твердого розчину та зменшенням її витравлення. У вихідних сплавах можна також спостерігати окремі практично шаровидні включення розмірів в інтервалі від 0,5 до 2 мм (рис. 2).

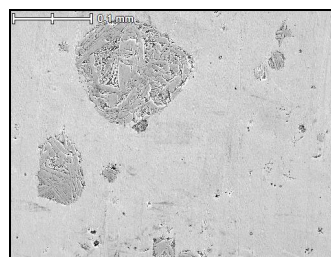


Рис. 2. Мікроструктура сплаву Cu<sub>65,5</sub>Mn<sub>25</sub>Fe<sub>6,5</sub>Ni<sub>1,5</sub>Si<sub>1,5</sub> із зоною ліквідації ( $\times 250$ ) / Fig. 2. Microstructure of Cu<sub>65,5</sub>Mn<sub>25</sub>Fe<sub>6,5</sub>Ni<sub>1,5</sub>Si<sub>1,5</sub> alloy with segregated area ( $\times 250$ )

Ці включення, за даними локального мікроаналізу, збагачені залізом та марганцем. Зменшити ліквідацію у сплавах вдається за умови значного збільшення швидкості охолодження розплаву, наприклад, заливання його в масивну високотеплопровідну виливницю. Як свідчать результати рентгенографічних досліджень, фазовий склад сплавів при цьому не змінювався. При цьому із збільшенням вмісту заліза дисперсність первинних кристалів  $\alpha$ -твердого розчину на основі міді також зменшувалася [2].

Збільшення кремнію в вихідному сплаві (> 0,5 мас. част. в %) викликає появу нової структурної складової – евтектики Cu–Mn<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> (фаза темного кольору). За даними [4; 5], у всіх сплавах незалежно від вмісту заліза і кремнію, спостерігається  $\beta$ -фаза (Mn<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>) або ізоструктурна до неї фаза (Mn,Fe)<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> за наявності заліза у сплаві. Методами рентгенографії встановлено, що у випадку збільшення вмісту Fe  $\geq 1$  мас. част. в % у сплаві спостерігається ще одна додаткова фаза –  $\gamma$ -твердий розчин на основі заліза змінного складу по марганцю та кремнію, при цьому відбувається перерозподіл інтенсивності та зміна рефлексів  $\beta$ -фази [3]. За

даними мікроаналізу, до складу  $\gamma$ -твердого розчину входить 5... 9 мас. част. в % кремнію.

Литі сплави із вмістом заліза не більше 2,5 % характеризуються наявністю неоднорідної структури, зумовленої практично абсолютною нерозчинністю заліза в міді. Частинки заліза в процесі плавки і твердіння відтягують кремній та марганець із розплаву, що оточує їх (склад  $\alpha$ -фази звичайно збіднений цими елементами), утворюючи згодом  $\gamma$ -твердий розчин на основі заліза змінного складу по марганцю та кремнію, а також силіцид ( $\beta$ -фаза).

Викладені вище особливості структури і фазового складу литих припійних сплавів – це результат фазових перетворень, що відбуваються в них у процесі твердіння. Для вивчення температурних інтервалів утворення структурно-фазових складових досліджених сплавів застосовували автоматизований комплекс для прецизійного термічного аналізу NETZSCH DSC 404 F1.

Зразки сплавів масою 1...2 г нагрівали в середовищі гелію зі швидкістю 30 °C/хв. Для гомогенізації сплаву для кожного зразка проводили три цикли нагріву до температури плавлення та охолодження разом із піччю. З кривих диференціально-термічного аналізу визначено, що температура максимального тепловиділення всіх сплавів перебуває в інтервалі 860...910 °C. У сплавах без заліза або з невеликою кількістю є пік в області температур 800...840 °C. З діаграми стану квазібінарної системи Cu–Mn–Si відомо, що температура 800 °C відповідає температурі плавлення евтектики Cu–Mn<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> [6].

Збільшення вмісту кремнію від 0,8 до 2,5 мас. % у сплаві з низьким вмістом заліза (менше 0,5 мас. %) зумовлює зменшення температури плавлення  $\alpha$ -твердого розчину через розчинення в ньому кремнію. Збільшення вмісту заліза у сплаві супроводжується помітним зростанням температур максимального тепловиділення  $T_S$  і  $T_L$  на 30...70 K. Однак слід зазначити, що у випадку заміни марганцю залізом у фазі Mn<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> відбувається підвищення температури її плавлення, так що вона може плавитися одночасно з  $\alpha$ -твердим розчином. Результати диференціально-термічного аналізу слід ураховувати для екструзії сплавів.

Вирішуючи питання з пониження температури плавлення припою, ґрунтуючись на отриманих у цій роботі результатах, необхідно збільшити вміст марганцю та/або кремнію (до 28...30 % і 2,5...3 % відповідно) при вмісті заліза в межах 1,5...3 %. Більший вміст заліза не дає можливості підвищити міцність паяних з'єднань, і при цьому, зв'язуючи в значних кількостях марганець і кремній, істотно підвищує температури солідус та ліквідус, а також, унаслідок утворення більш тугоплавких за  $\alpha$ -твердий розчин фаз, знижує рідкоплинність припою.

Екструзія сплавів системи Cu–Mn не викликає зміни фазового складу, на відміну від

екструдованого дроту системи Cu–P–Sn. Досить висока пластичність дроту мідно-фосфористих припоїв зумовлена формуванням структури без значної хімічної неоднорідності твердого розчину, який виконує функцію пластичної арматури [7].

Мікроструктура дроту, отриманого методом гарячої гідроекструзії в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, має яскраво виражену сегрегацію. На рисунку 3 продемонстровано різні ділянки дроту (через 1...5 мм) сплаву системи Cu–Mn–Fe.

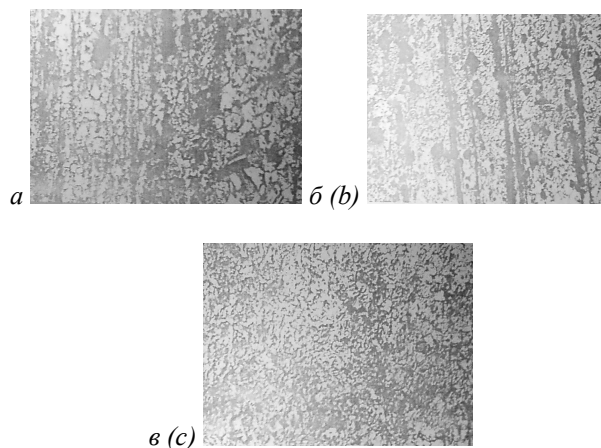


Рис. 3. Мікроструктура різних ділянок дроту після екструзії сплаву  $Cu_{70,5}Mn_{23,5}Fe_{4,5}Ni_{0,5}Si_{1,0}$  ( $\times 400$ ) / Fig. 3. Microstructure of various areas of wire after extrusion operation of  $Cu_{70,5}Mn_{23,5}Fe_{4,5}Ni_{0,5}Si_{1,0}$  alloy ( $\times 400$ )

Структура зерен дроту, незалежно від складу сплавів, характеризується значною неоднорідністю як за формою, так і за розмірами. Результати мікрорентгеноспектрального аналізу свідчать, що на окремих ділянках дроту практично повністю відсутнє залізо. Це пов'язано з макроліквідацією вихідних заготовок сплавів. Ці ділянки дроту найчастіше мають структуру зерен, що є результатом рекристалізації, яка відбувається безпосередньо в ході деформації.

Дисперсність зернистої структури сплавів після екструзії визначається кількістю ( $\beta$ ,  $\gamma$ ) фази, що утворилася при твердінні зливка.

Вимірюючи густину дроту, встановили, що сплави, які містять більшу кількість заліза, зазвичай менш щільні. Це пояснюється наявністю пор, які витягнуті вздовж дроту. Питомий електроопір такого дроту практично не змінюється, не залежить від вмісту заліза в сплаві і складає  $(10,0...10,7) \cdot 10^{-5}$  Ом·см.

## Висновки

1. Шляхом варіювання вмісту легуючих елементів встановлено, що збільшення складу марганцю та кремнію спричинює зниження температури плавлення припою при вмісті заліза в межах 1,5...3 %.

2. Збільшення складу заліза не викликає підвищення міцності паяного виробу, але знижує рідкоплинність припою.

3. За результатами диференціально-термічного аналізу визначено діапазон температур для проведення процесу екструдювання, що перебуває в межах 800...980 °С залежно від сплаву.

4. Макро- та мікрогетерогенна будова сплавів системи Cu–Mn–Fe–Si як у литому стані, так і після екструдювання, зумовлена утворенням у цих припоях поряд із  $\alpha$ -твердим розчином на основі міді,  $\beta$ - і  $\gamma$ -фаз, а також впливом механічної дії

### ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пашков И. Н. Особенности пайки порошковым припоем системы медь – марганец – никель / И. Н. Пашков, С. П. Герасимов, А. И. Пашков // Сварочное производство. – 2008. – № 10. – С. 37–41.
2. Максимова С. В. Структура и свойства сплавов системы Cu–Mn, легированных железом : монография / С. В. Максимова // Материалы и технология пайки. – Киев : ИЭС, 1991. – 81 с.
3. Meyers M. A. Observations on the ferromagnetic  $\beta$ -phase of the Cu–Mn–Sn system / M. A. Meyers, C. O. Rund, C. S. Barrett // Crystallography. – 1973. – Vol. 6. – № 1. – P. 39.
4. Туркин В. Д. Исследование сплавов системы медь – марганец – кремний / В. Д. Туркин, Д. К. Кушкикова // Сб. науч. тр. Науч.-техн. общества цвет. металлургии. – Москва : Ин-т цветных металлов и золота, 1958. – № 29. – С. 18–25.
5. Гольдшмидт Х. Дж. Сплавы внедрения. / Х. Дж. Гольдшмидт // Под ред. Н. Т.Чеботарева. – Москва : Мир, 1971. – С. 56–58.
6. Промышленные цветные металлы и сплавы : монография / [А. П. Смирягин, Н. А. Смирягина, А. В. Белова]. – Москва : Металлургия, 1974. – 48 с.
7. Носенко В. К. Дослідження фазових перетворень в екструдованих припійних сплавах на основі міді / В. К. Носенко, Г. П. Брехаря, Т. Ю. Ніколаєва // Металознавство та обробка металів. – 2015. – № 2. – С. 10–15.

### REFERENCES

1. Pashkov I.N., Gerasimov S.P. and Pashkov A.I. *Osobennosti pajki poroshkovym pripoem sistemy med'-marganec-nikel'* [Properties brazing solder powder system copper–manganese–nickel]. *Svarochnoe proizvodstvo*. [Welding production]. 2008, no. 10, pp. 37–41. (in Russian).
2. Maksimova S.V. *Struktura i svoystva splavov sistemy Cu-Mn, legirovannyh zhelezom* [Structure and properties of the alloys Cu–Mn system alloy iron]. *Materialy i tehnologiya pajki* [Materials and soldering technology]. Kiev: IES, 1991, p. 81. (in Russian).
3. Meyers M.A., Rund C.O. and Barrett C.S. Observations on the ferromagnetic  $\beta$ -phase of the Cu–Mn–Sn system. *Crystallography*. 1973, vol. 6, no. 1, p. 39.
4. Turkin V.D. and Kushkikova D.K. *Issledovanie splavov sistemy med'-marganec-kremnij* [Investigation of alloys of copper, manganese, silicon]. Coll. scientific. tr. scientific and engineering Society color metallurgy. Moscow: Institute of Nonferrous Metals and Gold Publ., 1958, no. 29, pp. 18–25. (in Russian).
5. Goldschmidt H.J. *Splavy vnedreniya* [Interstitial alloys]. Ed. by Chebotareva N.T. Moscow: Mir Publ., 1971, pp. 56–58. (in Russian).
6. Smiryagin A.P., Smiryagina N.A. and Belova A.V. *Promyshlennyye cvetnyye metally i splavy* [Industrial non-ferrous metals and alloys] Moscow: Metallurgy Publ., 1974, 48 p. (in Russian).
7. Nosenko V.K., Breharya G.P. and Nikolaeva T.Yu. *Doslidzhennya fazovih peretvoren' v ekstrudovanih pripajnih splavah na osnovi midi* [Investigation of phase transformations in soldered alloys based on copper]. *Metaloznnavstvo ta obrobka metaliv* [Metallurgy and metal processing]. 2015, no. 2, pp. 10–15. (in Ukrainian).

*Стаття рекомендована до публікації д-ром фіз.-мат. наук, проф. С. В. Лоскутовим (Україна); д-ром фіз.-мат. наук, провідним наук. співроб. Д. Г. Саввакіним (Україна).*

Надійшла до редколегії 27.05.2016

Прийнята до друку 03.06.2016