

УДК 621.91.02-05

doi:10.20998/2413-4295.2021.03.06

## МЕХАНІЗМИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ПРИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ РОЗПЛАВУ ПРИПОЮ В УМОВАХ МАГНІТНО-ДИНАМІЧНИХ ВПЛИВІВ ДЛЯ ТВЕРДОСПЛАВНИХ ІНСТРУМЕНТІВ

А. М. КУЗЕЙ<sup>1</sup>, В. Я. ЛЕБЕДЕВ<sup>1\*</sup>, П. Ю. ЦИКУНОВ<sup>1</sup>, А. М. СЛІПЧУК<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup> Фізико-технічний інститут НАН Білорусії, м. Мінськ, РЕСПУБЛІКА БЕЛАРУСЬ

<sup>2</sup> кафедра технології машинобудування, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА

\*e-mail: fti\_lebedev@mail.ru

\*\*e-mail: andsl@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** Методами оптичної та електронної скануючої мікроскопії вивчені процеси утворення розплавів при контактній взаємодії легкоплавкого (сплав системи Cu-Zn) і тугоплавкого (Fe-Ni) компонентів припоїв у процесі індукційної пайки твердого сплаву до сталевого тримача. Показано, що у результаті термічного і магнітно-динамічного впливу високочастотного електромагнітного поля на компоненти композиційного припою формується паяний шов підвищеної міцності, структура якого забезпечується за механізмом дисперсного зміцнення. Дослідження процесів контактної взаємодії легкоплавких і тугоплавких компонентів припоїв під час процесу паяння інструменту показало, що формування припою в паяних швах протікає через ряд стадій і не призводить до формування мікроструктур, що характерні для сплавів на основі систем мідь-залізо-фосфор, мідь-цинк-нікель, мідь-цинк-залізо. Таким чином, застосування композиційних припоїв дозволяє знизити температуру пайки на 40-50 К, збільшити концентрацію лежучих елементів у припої та змінити його структуру. Зазначені переваги композиційних припоїв забезпечують зниження термічного впливу на контактні матеріали, підвищують міцності шва і дозволяють контролювати товщину паяного шва, а це важливо при паянні твердих сплавів систем WC-TiC (TaC). Високі початкові швидкості розчинення частинок нікелю в мідно-цинкових розплавах і розчинність міді, цинку в нікелі призводять до утворення в розплаві квазірідких частинок нікелевого сплаву. При охолодженні розплав формуються частинки іншого, ніж навколишній сплав складу. Вони морфологічно пов'язані із зерновою структурою припою. Утворений сплав (припій) має структуру композиційного матеріалу, в якому частки металу, збагачені нікелем, і відіграють роль армуючого елемента.

**Ключові слова:** індукційний нагрів; мікроструктури; композиційний матеріал; твердий сплав; паяний шов; пайка; припій; флюс

## MECHANISMS OF STRUCTURAL-PHASE TRANSFORMATIONS DURING CRYSTALLIZATION OF SOLDER MELT UNDER CONDITIONS OF MAGNETIC-DYNAMIC INFLUENCES FOR CARBIDE TOOLS

А. М. КУЗЕЙ<sup>1</sup>, В. Я. ЛЕБЕДЕВ<sup>1</sup>, П. Ю. ТSYKUNOV<sup>1</sup>, А. М. СЛІПЧУК<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State scientific institution "Physical-Technical Institute of the national academy of sciences of Belarus", Minsk, REPUBLIC OF BELARUS

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

**ABSTRACT** The processes of melt formation were studied by methods of optical and electron scanning microscopy. These processes occur during induction brazing of a hard alloy to a steel holder and contact interaction of low-melting (copper-zinc system alloy) and refractory (iron-nickel) components of the solders. It is shown that the effect of a thermal and magnetic-dynamic high-frequency electromagnetic field on the components of the composite solder is how a high-strength solder joint is formed. The structure is forming by disperse hardening mechanism. The research of the contact interaction process for low-melting and high-melting components of solders during the soldering process of the tool showed that the formation of solder in brazed seams occurs through a number of stages and this does not lead to the formation of microstructures that are characteristic of alloys based on copper-iron-phosphorus, copper-zinc-nickel and copper-zinc-iron. Thus, the use of composite solders can reduce the soldering temperature by 40-50 K and increase the concentration of alloying species in the solder and change its structure. These advantages of composite solders reduce the thermal impact on contact materials, increase the strength of the weld and allow you to control the thickness of the brazed weld, and this is important when soldering hard alloys of WC-TiC (TaC) systems. High initial dissolution rates of nickel particles in the copper-zinc melt and the solubility of copper, zinc in nickel lead to the formation in the melt of quasi-liquid particles of the nickel alloy. When the melt is cooled, particles other than the surrounding alloy composition are formed. They are morphologically related to the grain structure of the solder. The formed alloy (solder) has the structure of a composite material in which the metal particles are enriched in nickel, and have the role of a reinforcing element.

**Keywords:** induction heating; microstructures; composition material; hard alloy; brazed seam; soldering; solder; flux metal

### Вступ

Підвищення ефективності металообробного інструменту забезпечується за рахунок застосування більш досконалого обладнання, а також використання нових інструментальних матеріалів, в

тому числі твердих сплавів, надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору (КНБ) і алмазу. В сучасній металообробці, незважаючи на пріоритетне застосування лезового інструменту, що оснащується змінними багатограними пластинами з твердих сплавів і надтвердих матеріалів, досить затребуваним

є напаяний інструмент. Особливо це важливо для одиничного і дрібносерійного виробництва, ремонтних робіт та унікальних операцій. Переточування лез під конкретні умови виробництва і технологічні поєднання «оброблений матеріал – інструментальний матеріал – вимоги креслення деталі» дозволяє найбільш ефективно керувати режимами обробки і досягати заданого рівня параметрів обробленої поверхні.

### Мета та постановка проблеми

Підвищення вимог до режимів різання поряд із застосуванням нових інструментальних матеріалів вимагає відповідного підвищення міцності і надійності їхнього з'єднання з корпусом. Важливою вимогою забезпечення якості з'єднання матеріалів є мінімізація перегріву матеріалів, зниження температури пайки і зменшення взаємодії припою з напаяними матеріалами. Нагрівання припою і державки повинно бути, за можливості, рівномірним і з мінімальним перепадом температур по глибині. Виконання даних вимог при паянні деталей на установках індукційного нагріву з використанням немагнітних припоїв є досить проблематичним, у зв'язку з тим, що нагрівання припою відбувається за рахунок теплопередачі від нагрівання державки, а кількість джерел тепла індуктованих струмами високої частоти у самому припої невелика. Використання флюсів зі зниженою до 650–750 К температурою плавлення значно підвищує швидкість нагрівання припою у з'єднанні, що обумовлено конвекцією розплаву флюсу під дією магніто-динамічних сил, які створюються електромагнітним полем індуктора індукційного установи. Таким чином, проблеми рівномірного нагріву деталей при пайці актуальні. Одним із варіантів вирішення цієї проблеми може бути розробка більш ефективних припоїв і флюсів, що адаптовані до високих швидкостей нагріву, і є характерними при використанні струмів високої частоти. Слід звернути увагу на взаємне розташування індуктора і деталі з метою оптимального розподілу електромагнітного поля в контактній зоні.

### Сучасний стан проблеми пайки лезового інструменту

Індукційна пайка у даний момент є найбільш поширеним способом виготовлення твердосплавного інструменту. При його пайці використовують готові припої й флюси, і спеціалізоване індукційне промислове обладнання [1–3]. Ефективність індукційного нагріву визначається безліччю факторів: характеристиками генератора та індуктору (частота струму, ефект близькості й т.п.), фізико-хімічними характеристиками матеріалів, що з'єднуються між собою [4,5].

Зі збільшенням частоти струму генератора різко зростає відмінність в температурах на поверхні й у глибині матеріалів, що паяються. Градієнти температур у приповерхневих шарах матеріалів, які паяються, відмінності в теплопровідності твердих сплавів і конструкційних сталей, і одночасно високі температури пайки, призводять до утворення тріщин в інструменті, паяних швах, окисленні твердих сплавів [3–4]. Нівелювати вплив градієнтів температур, відмінностей у фізико-хімічних характеристиках матеріалів, що з'єднуються, можна за рахунок зниження температури пайки. Для пайки пластин твердих сплавів до сталевих державок широко застосовуються припої на основі сплавів систем Cu-Zn-Ni-Mn з температурами пайки 1225–1275К [1, 2]. Зниження температури пайки і зміна мікроструктури паяних швів дозволяє підвищити їхню міцність і знизити вплив високих температур на тверді сплави.

### Методики дослідження і обладнання

Дослідження впливу швидкості нагріву, складу флюсу і припою на мікроструктуру припою і паяного шва було проведено на з'єднаннях твердосплавних пластин T15K6, T5K10, BK8 зі сталевими державками зі сталі 40X із січенням 25x20. Зазор між робочою частиною державки та індуктором обирали у межах 10–40 мм. Індуктор виконаний з одним витком та перетином провідника 12x12 мм. Величина зазору між індуктором і частиною державки, що паяється, дозволяє змінювати перепад температур на ділянці державка – пластина твердого сплаву. З'єднання сталь–сталь виконували на циліндричних зразках діаметром 10 мм зі сталі 45 при спайці їх торців із застосуванням кільцевого індуктору.

Вибір частоти генератора визначається розмірами і формою виробу. Контроль нагріву зони пайки здійснювався переміщенням деталі щодо індуктору. Як джерело нагріву застосовувався високочастотний генератор потужністю 80 кВт. Робоча частота при пайці становила 49,5 кГц. Швидкості нагріву становила 40–50 К / с.

Дослідження морфології і мікроструктури поверхонь державок, твердосплавних пластин, паяних швів і оброблених пластин твердих сплавів проводили на растрових електронних мікроскопах VEGA TESCAN і MIRAS TESCAN, апаратному комплексі MICRO, оптичних мікроскопах МБС2000 і БМ11. Діаметричні вимірювання виконували на мікротвердомірі Duramin 5. Температура твердосплавних пластин і корпусу інструменту контролювалися пірометром марки Optris-ST2MH з діапазоном вимірюваних температур 660–1775 К.

Мікроструктуру припоїв у паяних швах виявляли травленням у 30% розчині азотної (1 мас. частина) і соляної кислоти (3 мас. частини).

У якості припою використовували шихту з порошків мідно-цинкових сплавів (Л63, ПС63),

порошку мідно-фосфористого сплаву (8% мас.) з добавками порошоків нікелю і заліза (концентрація 10 мас. %). Як флюс використовували композиційний матеріал у вигляді частинок скла KBF<sub>4</sub>- Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> евтектичного сплаву, в яких знаходяться частинки евтектики CaCl-NaCl у кількості 10% мас.

### Результати досліджень та обговорення

Формування розплаву припою в процесі індукційного нагріву шихти з композиційного припою (Cu-P) 10 мас. % Fe і флюсу починається з утворення рідкої фази – розплаву флюсу. Взаємодія між компонентами припою протікає в рідкому флюсі після утворення розплаву легкоплавкого компонента. Протягом нагрівання припою в інтервалі температур 1075–1100 К припій представляє собою трифазну систему, що складається з розплаву флюсу і прошарків суспензії з розплаву легкоплавкого компонента і частинок тугоплавкого компонента (рис. 1).

У межах температур 1075–1100 К відбувається розширення розплаву флюсу і рідко металічної суспензії легкоплавкого компонента – тугоплавкого компонента припою, проте краплі флюсу присутні й у структурі рідко металічної суспензії (рис. 1 а, б).

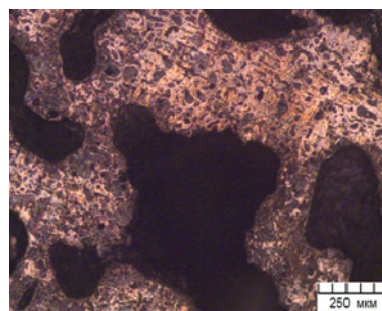
Подальше збільшення температури припою аж до досягнення температури пайки супроводжується розчиненням тугоплавкого компонента в легкоплавкому матеріалі державки і взаємодіє з ним. Залежно від складу легкоплавкого і тугоплавкого компонентів, швидкості нагріву припою, частоти електромагнітного поля, тривалості нагрівання і температури пайки формуються припії з різною мікроструктурою.

Нагрівання композиційного припою CuP-10 мас. % Fe до температури пайки 1125K супроводжується розчиненням частинок заліза в розплаві і зміною мікроструктури, які утворюються при цьому сплаві.

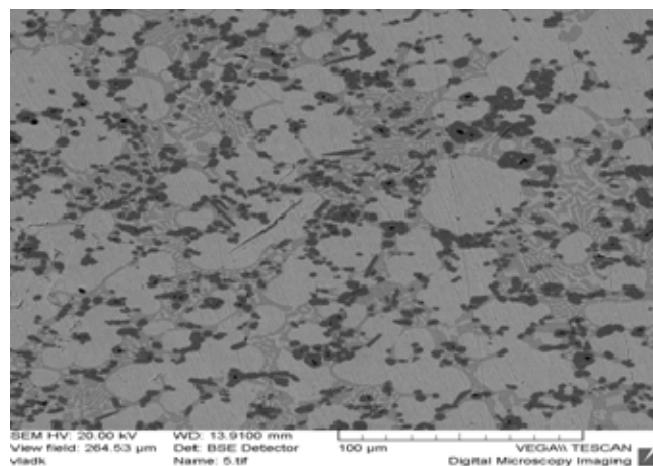
Формування гомогенної мікроструктури сплаву (припою) системи Cu-Fe-P закінчується тільки після витримки розплаву при 1125 К протягом 6 секунд. При менших витримках розплаву припою в структурі сплаву присутні частинки заліза (рис. 1 б, в).

Мікроструктури припоїв, що формуються при температурах 1000 – 1125 К і витримці впродовж 1 – 3 с являють собою матрицю з мідного сплаву, в якій розташовані безформні згустки сплаву мідь-залізо-фосфор, збагачені фосфором і залізом. У матриці з мідного сплаву (легованого фосфором і залізом) розташовані частинки зі сплаву залізо – фосфор. Такі ж частинки розташовані і в згустках сплаву залізо-фосфор-мідь (рис. 1 б, в).

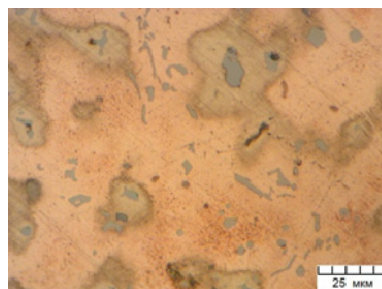
Застосування у якості легкоплавкого компонента припоїв сплавів системи Cu-Zn (Cu – 36 ... 38 мас. % Zn) з великими температурами плавлення, ніж у сплавах системи Cu-P змінює мікроструктуру припоїв.



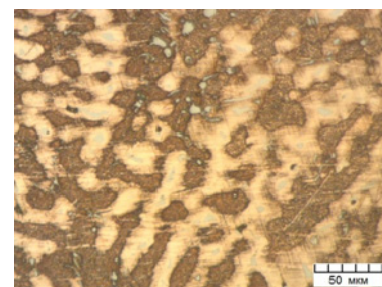
а



б



в



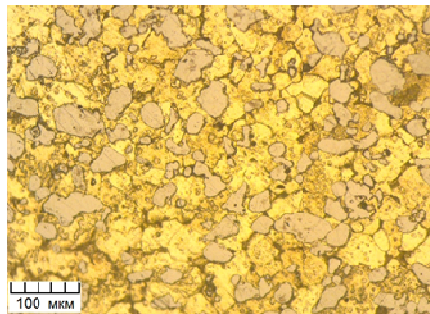
г

Рис. 1 – Мікроструктура припою CuP-10 мас. % Fe після нагрівання шихти  
а – до 1000K, б - до 1075, в – витримка 3 с при 1125 К,  
г – витримка 6 с при 1125 К, швидкість нагріву 40 К/с.

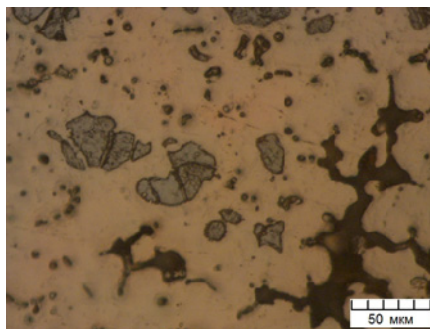
Нагрівання шихти припою до температури 1175 К супроводжується розчиненням частинок заліза у мідно-цинковому розплаві. При подальшому охолодженні рідкометалічній суспензії формується



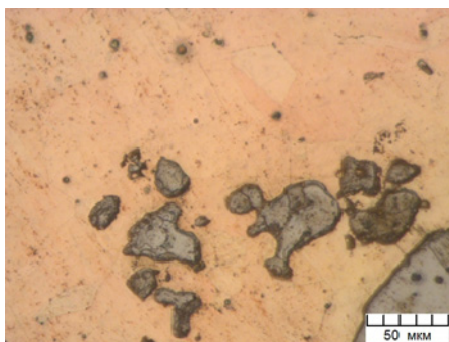
структура з частинок заліза, на поверхні якої присутня оболонка сплаву іншого складу, зерен мідного сплаву, евтектики з мідно-цинкового сплаву і прошарків флюсу (рис. 2а).



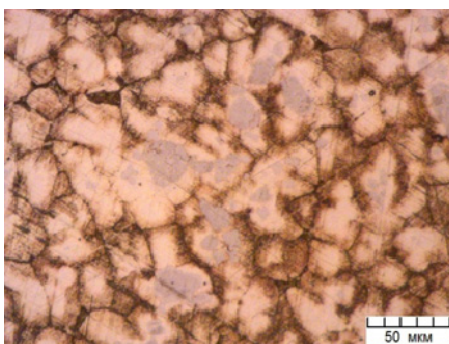
а



б



в



г

Рис. 2 – Мікроструктура припою Cu–34мас. % Zn –10 мас. % Fe. Температура нагріву 1200 К. Швидкість нагріву а, б, в – 40 К/с, г – 35 К/с. Тривалість витримки при температурі пайки: а – 1с; б – 3с; в, г – 6с

Збільшення тривалості витримки розплаву супроводжується збільшенням розмірів дифузійних зерен на поверхні частинок заліза, розчиненням частинок заліза в мідно-цинковому розплаві і збільшенням розмірів сплаву мідь-цинк-залізо (рис. 2б). Після 3 секундної витримки в структурі сплаву фіксуються частки заліза, які не розчинилися (рис. 2в).

Нагрівання шихти Cu–38 мас. % Zn – 10 мас. % Fe до 1200 К призводять до часткового розчинення частинок заліза в мідно-цинковому розплаві (рис. 2 б). У структурі припою поряд з невеликими (5–10 мкм) частинками заліза присутні і більші (40–50 мкм) і прошарку флюсу (рис. 2 б). Збільшення тривалості витримки розплаву (суспензії) при 1200 К до 3 секунд призводить до зниження кількості великих (40–50 мкм) частинок заліза в структурі сплаву. Присутність в структурі припою великих частинок заліза округлої і витягнутої форми і частинок, що представляють собою згустки з менших за розміром частинок, показує, що температура частинок перевищує температуру витримки (пайки), а великі, у вигляді згустків, частки утворилися при злитті менших за розміром частинок. Подальше збільшення тривалості витримки не призводить до формування гомогенної структури сплаву. У структурі окремих зерен присутні зони, склад яких відрізняється від сусідніх зон (і зерен). Розміри таких областей становлять 5 - 10 мкм, розміри дендритів 10 - 30 мкм (рис. 2г).

Використання у якості тугоплавкого компонента припою порошку нікелю призводить до формування мікроструктури паяного шва, показано на рис. 3.

Мікроструктура припою отримана при тривалості витримки 3 секунди є зерна з неоднорідною структурою і складом, розділені прошарками евтектики (рис. 3 а). Збільшення тривалості витримки до 6 секунд гомогенізує мікроструктуру припою проте, в структурі припою присутні частинки іншого складу (рис. 3 б).

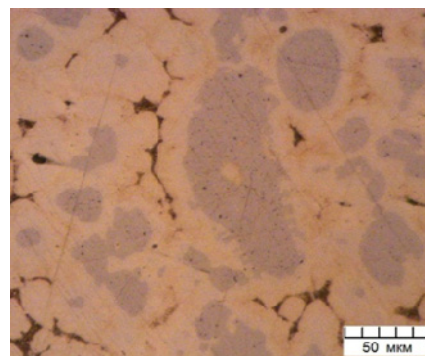
Незалежно від тривалості витримки розплавів припоїв систем CuP–Fe, (Cu–Zn–Fe (Ni) структура припоїв відрізняється від структури сплавів подібного складу, отриманих металургійним методом: відсутні характерні для литих сплавів форми дендритів, колонії дендритів мають різну структуру, окремі типи структури не можна віднести до структур утворюються при кристалізації розплавів в рівноважних умовах (рис. 2, 3).

Сплави (припої) з подібними структурами можуть формуватися у результаті контактної взаємодії легкоплавкого і тугоплавкого компонентів при впливі високочастотного електромагнітного поля. Утворення однорідних за складом розплавів при контактній взаємодії двох або декількох компонентів знаходяться у різних агрегатних станах і мають різні фізико-хімічні характеристики. Вони протікають через цілий ряд стадій, на які впливає і високочастотна електромагнітна дія. В рівноважних умовах контактна взаємодія в системі твердий метал – розплав описується в рамках основних припущень

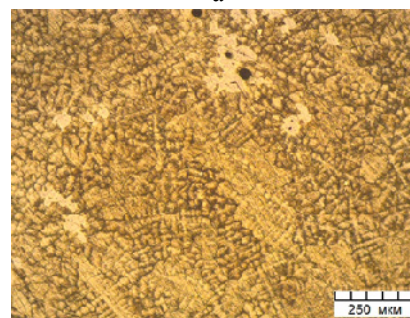
дифузійної кінетики [6,7]. Процес розчинення твердого металу в рідкому контролюється дифузією атомів розчиненого металу через дифузійний граничний шар, розміри якого залежать і від гідродинамічних умов на межі розподілу тверда фаза - розплав. На межі розподілу твердий метал – розплав протікають два конкуруючі процеси: дифузія атомів металу знаходиться в твердому стані в розплав і дифузія атомів металу в рідкому стані в твердому металі [8,9]. Залежно від металохімічних характеристик компонентів системи твердий метал – розплав дифузія атомів з рідкого металу в твердий призводить до утворення на межі розподілу прошарку інтерметалідів, розміри якої визначаються гідродинамічними умовами на межі розподілу. Відповідно до цих положень контактна взаємодія в системах CuP-Fe, (Cu-Zn) – Fe, (Cu-Zn) – Ni має привести в кінцевого результату – до утворення багатокомпонентних розплавів при охолодженні яких утворюються сплави, які повинні мати структуру із зерен (дендритів) комплексно легованого твердого розчину на основі міді, прошарків евтектики і частинок інтерметалідів. На початкових стадіях контактної взаємодії в структурі сплавів будуть присутні частинки нікелю, заліза з дифузійним зонами на поверхні (рис. 2). У структурі сплавів крім частинок нікелю, заліза, що не розчинилися, будуть присутні і безформні частки з великим вмістом нікелю (заліза), ніж навколишній їх сплав (рис. 1–3). Формування подібних мікроструктур не можна пояснити виходячи тільки з уявлень дифузійної кінетики розчинення твердих металів в рідких, а також теорії кристалізації металевих розплавів.

Формування подібних структур у сплавах, що отримані при контактній взаємодії тугоплавкого і легкоплавкого компонентів при якому вплив височастотного електромагнітного поля можливий при утворенні структурно-неоднорідних розплавів. Подальше охолодження структурно-неоднорідного рідкокристалічного розчину призведе до формування інших структур, ніж при охолодженні гомогенного розчину. Формування структурно-неоднорідних розплавів можливо в умовах нерівномірного нагрівання компонентів припою систем Cu-Zn-Ni, систем Cu-Zn-Ni-Mn, коли тепловиділення відбувається у частинках заліза (нікелю), у яких електричний опір більше, ніж у розплавку легкоплавкого компонента.

За морфологічними ознаками, області неоднорідного складу в зернах, не можна віднести до якогось елемента мікроструктури припою: зернам (дендритам), прошаркам евтектики, частинкам інтерметалідів. Незважаючи на відмінності, в складі між областями відсутні чітко виражені кордони розділу (рис. 2, 3). На окремих ділянках мікроструктури припою області неоднорідності складу перетинають межі між зернами і є загальними для декількох зерен (рис. 3).



а



б

Рис. 3 – Мікроструктура припою Cu–36 мас. % Zn + 10 мас. % Ni. Температура нагріву 1200К. Швидкість нагріву 35К/с. Тривалість витримки: а – 3 с; б – 6 с

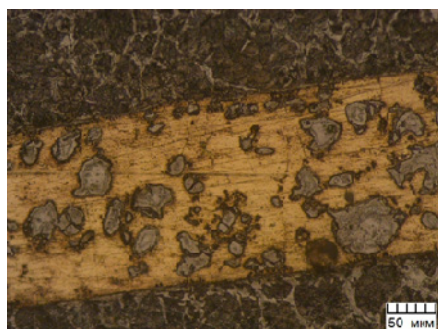
Прийнято вважати, що оптимальною структурою припою в паяних шві є структура яка складається із зерен комплексно-легованого твердого розчину і ультра дисперсних частинок інтерметалідів без пор, прошарків евтектики між зернами [1,2]. Подібну мікроструктуру мають сплави систем Cu-Zn, Cu-Zn-Ni, на основі яких розроблені припої для пайки твердих сплавів до сталевих державок і різних марок сталей [1,2]. Підвищення міцності, технологічних (плинності, хімічної стійкості) характеристик припоїв досягається, в основному, за рахунок комплексного легування, а це призводить до підвищення температури плавлення припою, і як наслідок цього, підвищення температури пайки. Введення до складу припоїв дисперсних частинок (SiC, WC і т.д.) і формування композиційних структур, представляє значні технологічні складнощі, хоча і дозволяє контролювати розміри паяного шва. Припої, що формуються у паяних швах сталь-сталь, твердий сплав-сталь при контактній взаємодії легкоплавкого і тугоплавкого компонентів мають структуру, яка характерна для композиційних матеріалів: у матриці мідного сплаву присутні дисперсні частинки зі сплаву міді (з нікелем, залізом), частина яких морфологічно пов'язана з контактними поверхнями (рис. 4).

Легування припою шляхом включення до складу порошкової шихти металевих частинок (нікелю, заліза) дозволяє, з одного боку, підвищити концентрацію легуючого елемента, а з іншого,

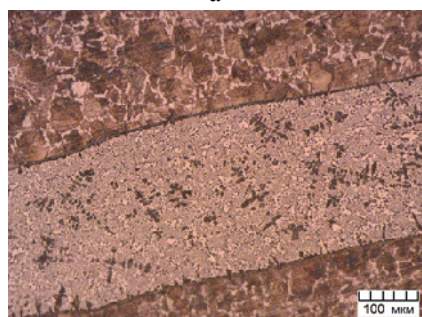


підвищити міцність шва за рахунок дисперсного зміцнення.

Області неоднорідності складу сплаву (припою) в паяних швах, що отриманий шляхом взаємодії компонентів шихти під час паяння, морфологічно пов'язані з оточуючим сплавом, і контактують із сусідніми поверхнями (рис. 4).



а



б

Рис. 4 – Мікроструктура припою (а) і паяного шва (б)  
Швидкість нагріву 40 К / с, температура пайки  
1200К, витримка 4 с.

а – композиційний припій (Cu 48 мас. % Zn –  
10 мас. % Fe)

б – композиційний припій (Cu 48 мас. % Zn –  
10 мас. % Ni)

Області неоднорідності складу в структурі припоїв можна розглядати і як елемент їх структури, що подібний частинці дисперсної (армуючої) фази в дисперсно зміцнених композиційних матеріалах. В залежності від металохімічних характеристик компонентів в композиційному припої, умов пайки «дисперсна фаза» може представляти собою область неоднорідності складу, і в різній ступені розчинену частку компонента припою. У системах Cu-P-Fe, (Cu-Zn) - Ni, (Cu-Zn-Ni-Mn) - Ni дисперсна фаза в припоях, переважно представляє собою область неоднорідності складу в зерні. У системах (Cu-Zn) - Fe, (Cu-Zn-Ni-Mn) - Fe дисперсна фаза являє собою переважно частку сплаву залізо-цинк-мідь (рис. 4 а).

Таким чином, застосування композиційних припоїв дозволяє знизити температуру пайки на 40–50 К, збільшити концентрацію легуючих елементів в припої і змінити його структуру. Зазначені переваги композиційних припоїв забезпечують зниження

термічного впливу на контактні матеріали, підвищують міцності шва і дозволяють контролювати товщину паяного шва, а це важливо при паянні твердих сплавів систем WC-TiC (TaC).

## Висновки

Дослідження процесів контактної взаємодії легкоплавких і тугоплавких компонентів припоїв під час процесу паяння інструменту показало, що формування припою в паяних швах протікає через ряд стадій і не призводить до формування мікроструктур, які характерні для сплавів на основі систем мідь-залізо-фосфор, мідь-цинк-нікель, мідь-цинк-залізо. Високі швидкості розчинення частинок нікелю в розплавах мідь-цинк обумовлені конвекційним переміщенням розплаву легкоплавкого компонента під дією магнітно-динамічних сил, резистивним виділенням тепла в частинках нікелю (заліза), високими значеннями розчинності нікелю в мідно-цинкових розплавах і розчинність міді в нікелі при температурі пайки. Високі початкові швидкості розчинення частинок нікелю в мідно-цинкових розплавах і розчинність міді, цинку в нікелі призводять до утворення в розплаві квазірідких частинок нікелевого сплаву. При охолодженні розплаву формуються частинки іншого, ніж навколишній сплав складу. Вони морфологічно пов'язані із зерновою структурою припою. Утворений сплав (припій) має структуру композиційного матеріалу, в якому частки металу, збагачені нікелем, і відіграють роль армуючого елемента. Контактна взаємодія розплавів мідь-цинк з частинками заліза через низькі значень розчинності заліза в мідно-цинкових розплавах незважаючи на резистивне тепловиділення в частинках, не призводять до повного розчинення частинок заліза. Такі частинки заліза (сплаву на основі заліза) виконують функції дисперсної фази в структурі композиційного матеріалу.

## Список літератури

1. Liu Y., Tu K.N. Low melting point solders based on Sn, Bi, and In elements. *Materials Today Advances*. 2020. Vol. 8. doi: 10.1016/j.mtadv.2020.100115.
2. Liu Y, Pu L., Yang Y. et al. A high-entropy alloy as very low melting point solder for advanced electronic packaging. *Materials Today Advances*. 2020. Vol. 7. doi: 10.1016/j.mtadv.2020.100101.
3. Tu K, Liu Y., Li M. Effect of Joule heating and current crowding on electromigration in mobile technology. *Applied Physics Reviews*. 2017. Vol. 4. doi: 10.1063/1.4974168.
4. Zhang Y, Zuo T.T., Tang Z., et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*. 2014. Vol. 61. P. 1–93. doi: 10.1016/j.pmatsci.2013.10.001.
5. Kabir Opeyemi, Otun Yali Yao, Xinying Liu, Diane Hildebrandt. Synthesis, structure, and performance of carbide phases in Fischer-Tropsch synthesis: A critical review. *Fuel*. 2021. Vol 296. doi:10.1016/j.fuel.2021.120689.

6. Thiyagu M., Karunamoorthy L., Arunkumar N. Thermal and tool wear characterization of graphene oxide coated through magnetorheological fluids on cemented carbide tool inserts. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 19. Iss. 4. P. 1043–1055. doi:10.1016/j.acme.2019.05.005.
7. Woydt M., Huang S., Vleugels J., Mohrbacher H., Cannizza E. Potentials of niobium carbide (NbC) as cutting tools and for wear protection. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2018. Vol. 72. P. 380–387. doi:10.1016/j.ijrmhm.2018.01.009.
8. Khaskov M., Shestakov A., Sorokin O., Zelenina I. Synthesis of carbon matrix with tunable carbide formation ability for reactive infiltration techniques. *Ceramics International*. 2020. Vol. 46, Iss. 13. P. 21632–21637. doi: 10.1016/j.ceramint.2020.05.269.
9. Cinca N., Beake B., Harris A., Tarres E. Micro-scale impact testing on cemented carbides. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019. Vol. 84. doi:10.1016/j.ijrmhm.2019.105045.
10. Лашко С. В., Лашко Н. Ф., Нагапетян И. Г. *Проектирование технологий пайки металлических изделий*. Москва: Машиностроение, 2014. 522 с.
11. *Справочник по пайке*. Под ред. Петрунина И. Е. 3-е изд. Москва: Машиностроение, 2003. 480 с.
12. Немков В. С., Демидович В. Б. *Теория и расчет устройств индукционного нагрева*. Ленинград: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.
13. Бузюев А. Н. *Разработка и исследование системы индукционного нагрева для пайки многослойных изделий: диссертация... кандидата технических наук: 05.09.10*. Самараю 2006. 136 с.
14. Новосадов В. С., Дьяченко С. В., Пашков И. Н. *Влияние термического цикла пайки на структуру и механические свойства сталей*. Тольятти: ТГУ. 2008. С. 15–24.
15. Иденті Г. *Фізико-хімічна гідродинаміка*. Москва: Изд. АН СССР, 1952. 537 с.
16. Аксельруд Г. А., Можанов А. Д. *Растворение твердых веществ*. Москва: Химия, 1977. 272 с.
17. Залкин В. М. Контактное плавление веществ, образующих эвтектические системы с промежуточной фазой. *Журнал физ. химии*. 1983. 53(2). С.499–502.
18. Иванов Л. И., Земсков В. С., Кубасов В. Н. *Плавление, кристаллизация и фазообразование в невесомости*. Москва: Наука, 1989. 256 с.
5. Kabir Opeyemi, Otun Yali Yao, Xinying Liu, Diane Hildebrandt. Synthesis, structure, and performance of carbide phases in Fischer-Tropsch synthesis: A critical review. *Fuel*, 2021, Vol 296, doi:10.1016/j.fuel.2021.120689.
6. Thiyagu M., Karunamoorthy L., Arunkumar N. Thermal and tool wear characterization of graphene oxide coated through magnetorheological fluids on cemented carbide tool inserts. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2019, Vol. 19, Iss. 4, pp. 1043–1055, doi:10.1016/j.acme.2019.05.005.
7. Woydt M., Huang S., Vleugels J., Mohrbacher H., Cannizza E. Potentials of niobium carbide (NbC) as cutting tools and for wear protection. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2018, Vol. 72, pp. 380–387, doi:10.1016/j.ijrmhm.2018.01.009.
8. Khaskov M., Shestakov A., Sorokin O., Zelenina I. Synthesis of carbon matrix with tunable carbide formation ability for reactive infiltration techniques. *Ceramics International*, 2020, Vol. 46, Iss. 13, pp. 21632–21637, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.05.269.
9. Cinca N., Beake B., Harris A., Tarres E. Micro-scale impact testing on cemented carbides. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, Vol. 84, doi:10.1016/j.ijrmhm.2019.105045.
10. Lashko S. V., Lashko N. F., Nagapetyan I. G. *Proyektirovaniye tekhnologii payki metallicheskih izdeliy [Design of technology for soldering metal products]*. Moscow: Mashinostroyeniye, 2014, 522 p.
11. *Spravochnik po payke [Soldering guide]*. ed. Petrunin I. Ye. 3-ed. Moscow: Mashinostroyeniye, 2003, 480 p.
12. Nemkov V. S., Demidovich V. B. *Teoriya i raschet ustroystv induktsionnogo nagreva [Theory and calculation of induction heating devices]*. Leningrad: Energoatomizdat, 1988, 280 p.
13. Buzuyev A. N., *Razrabotka i issledovaniye sistemy induktsionnogo nagreva dlya payki mnogoslonykh izdeliy [Development and research of an induction heating system for soldering multilayer products]: dissertatsiya...kandidata tekhnicheskikh nauk : 05.09.10*. Samara, 2006, 136 p.
14. Novosadov V. S., D'yachenko S. V., Pashkov I. N. *Vliyaniye termicheskogo tsikla payki na strukturu i mekhanicheskiye svoystva staley [Influence of the thermal cycle of brazing on the structure and mechanical properties of steels]*. Tol'yatti: TGU, 2008, 15–24 pp.
15. Levich V.G. *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika [Physicochemical hydrodynamics]*. Moscow: AS SSSR, 1952, 537 p.
16. Aksel'rud G. A., Mozhanov A. D. *Rastvoreniye tverdykh veshchestv [Dissolving solids]*. Moscow: Khimiya, 1977, 272 p.
17. Zalkin V. M. *Kontaknoye plavleniye veshchestv, obrazuyushchikh evtekticheskiye sistemy s promezhutochnoy fazoy [Contact melting of substances forming eutectic systems with an intermediate phase]*. *Zhurnal fiz. khimii*, 1983, 53(2), pp. 499–502.
18. Ivanov L. I., Zemskov V. S., Kubasov V. N. *Plavleniye, kristallizatsiya i fazoobrazovaniye v nevesomosti [Melting, crystallization and phase formation in zero gravity]*. Moscow: Nauka, 1989, 256 p.

#### References (transliterated)

1. Liu Y., Tu K.N. Low melting point solders based on Sn, Bi, and In elements. *Materials Today Advances*, 2020, Vol. 8, 2020, doi: 10.1016/j.mtadv.2020.100115.
2. Liu Y, Pu L., Yang Y. et al. A high-entropy alloy as very low melting point solder for advanced electronic packaging. *Materials Today Advances*, 2020, Vol. 7, doi: 10.1016/j.mtadv.2020.100101.
3. Tu K, Liu Y., Li M. Effect of Joule heating and current crowding on electromigration in mobile technology. *Applied Physics Reviews*, 2017, Vol. 4, doi: 10.1063/1.4974168.
4. Zhang Y, Zuo T.T., Tang Z., et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*, 2014, Vol. 61, pp. 1–93, doi: 10.1016/j.pmatsci.2013.10.001.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Кузей Анатолій Михайлович** – док. техн. наук, зав. лабораторії, доцент, Фізико-технічний інститут НАН Білорусії, м. Мінськ, Республіка Беларусь.

**Kuzey Anatoliy Mykhaylovych** – Doctor of Technical Sciences, Head of a laboratory, associate Professor of the State scientific institution “Physical-Technical Institute of the national academy of sciences of Belarus”, Minsk, Republic of Belarus.

**Лебедев Володимир Якович** – канд. техн. наук, с. н. с., доцент, Фізико-технічний інститут НАН Білорусії, м. Мінськ, Республіка Беларусь. ORCID: 0000-0003-2891-9708 e-mail: fti\_lebedev@mail.ru

**Lebedev Vladimir Yakovlevich** – Candidate of Technical Sciences, Leading researcher, associate Professor of the State scientific institution “Physical-Technical Institute of the national academy of sciences of Belarus”, Minsk, Republic of Belarus, ORCID: 0000-0003-2891-9708; e-mail: fti\_lebedev@mail.ru

**Цикунов Павло Юрійович** – м.н.с., Фізико-технічний інститут НАН Білорусії, м. Мінськ, Республіка Беларусь.

**Tsykunov Pavel Yurkevich** – junior researcher, State scientific institution “Physical-Technical Institute of the national academy of sciences of Belarus”, Minsk, Republic of Belarus.

**Сліпчук Андрій Миколайович** – канд. техн. наук, Національний університет «Львівська політехніка», доц. кафедри технології машинобудування, м. Львів, Україна. ORCID: 0000-0003-0584-6104; e-mail: andsl@ukr.net

**Slipchuk Andrey Nikolaevich** – Candidate of Technical Sciences, Lviv Polytechnic National University, associate Professor of the Department of Technology of Mechanical Engineering, c. Lviv, Ukraine, ORCID: 0000-0003-0584-6104; e-mail: andsl@ukr.net

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Кузей А. М., Лебедев В. Я., Цикунов П. Ю., Сліпчук А. М. Механізми структурно-фазових перетворень при кристалізації розплаву припою в умовах магнітно-динамічних впливів для твердосплавних інструментів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 3 (9). С. 40-47. doi:10.20998/2413-4295.2021.03.06.

*Please cite this article as:*

Kuzey A., Lebedev V., Tsykunov P., Slipchuk A. Mechanisms of structural-phase transformations during crystallization of solder melt under conditions of magnetic-dynamic influences for carbide tools. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv:NTU"KhPI", 2021, no.3(9), pp. 40-47, doi:10.20998/2413-4295.2021.03.06.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Кузей А. М., Лебедев В. Я., Цикунов П. Ю., Сліпчук А. Н. Механизмы структурно-фазовых превращений при кристаллизации расплава припою в условиях магнитодинамических воздействий для твердосплавных инструментов. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 3 (9). С. 40-47. doi:10.20998/2413-4295.2021.03.06.

**АННОТАЦІЯ** Методами оптичної та електронної скануючої мікроскопії вивчені процеси формування расплавів при контактному взаємодії легкоплавкого (сплав системи Cu-Zn) і тугоплавкого (Fe-Ni) компонентів припоїв в процесі індукційної пайки твердого сплава к сталюму держателю. Показано, що в результаті термічного та магнітно-динамічного впливу високо частотного електромагнітного поля на компоненти композиційного припою формується паяний шов підвищеної міцності, структура якого забезпечується механізмом дисперсного упрочнення. Дослідження процесів контактної взаємодії легкоплавких і тугоплавких компонентів припоїв в процесі пайки інструмента показало, що формування припою в паяних швах протікає через ряд стадій і не призводить до формування мікроструктур, характерних для сплавів на основі систем медь-железо-фосфор, медь-цинк-нікель, медь-цинк-железо. Таким чином, застосування композиційних припоїв дозволяє знизити температуру пайки на 40–50К, збільшити концентрацію легируючих елементів в припої і змінити його структуру. Вказані переваги композиційних припоїв забезпечують зниження термічного впливу на контактні матеріали, підвищують міцність шва і дозволяють контролювати товщину паяного шва, а це важливо при пайці твердих сплавів систем WC-TiC (TaC). Високі початкові швидкості розчинення частинок нікелю в медно-цинкових расплавах і розчинність міді, цинку в нікелі призводять до формування в расплаві квазіжидких частинок нікелевого сплаву. При охолодженні расплаву формуються частинки іншого, ніж оточуючий сплав складу. Вони морфологічно пов'язані з зерновою структурою припою. Сформований сплав (припої) має структуру композиційного матеріалу, в якому частинки металу, збагачені нікелем, виконують роль армуючого елемента.

**Ключові слова:** індукційний нагрів; мікроструктури; композиційний матеріал; твердий сплав; паяний шов; пайка; припої; флюс.

*Надійшла (received) 31.08.2021*