УДК 621.791.31 **doi:10.20998/2079-0775.2019.1.05**

О. В. КРАХМАЛЬОВ, О. І. ЗІНЧЕНКО, С. Г. КОВАЛЕВСЬКИЙ, О. В. КОРНІЄНКО

ВПЛИВ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА МІЦНІСТЬ ПАЯНИХ З'ЄДНАНЬ

Робота присвячена термодинамічним дослідженням відносної міцності паяних з'єднань при низьких температурах. Встановлено, що при наявності електроліту паяне з'єднання схильне до руйнування від реакції окислення, як по основному металу, так і по припою. З метою збільшення терміну експлуатації паяних з'єднань необхідно після закінчення процесу паяння деталей ретельно видаляти залишки флюсів. Термодинамічні розрахунки доводять відносну міцність паяних з'єднань при від'ємних температурах. Складність проблеми міцності паяних з'єднань пояснюється наявністю комплексу фізико–механічних, хімічних і конструктивно–технологічних факторів, що відповідають за формування паяних з'єднань та їх умов експлуатації. За будь–якою додатною температурою ізобарний потенціал має від'ємне значення. Якщо рівновага хімічної реакції зміщена вліво і має від'ємний знак, то вона активно протікає. Чим далі у ряду електрохімічної активності перебувають один від одного основний метал (або метали) і компоненти припою, тим активніше протікають процеси та окислення.

Ключові слова: технологія паяння; припій; електроліт; паяне з'єднання; міцність; ізобарний потенціал; температура

А. В. КРАХМАЛЕВ, Е. И. ЗИНЧЕНКО, С. Г. КОВАЛЕВСКИЙ, О. В. КОРНИЕНКО

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ПРОЧНОСТЬ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Работа посвящена термодинамическим исследованиям относительной прочности паяных соединений при отрицательных температурах. Установлено, что при наличии электролита паяное соединение склонно к разрушению от реакций окисления, как по основному металлу, так и по припою. С целью увеличения срока службы паяных соединений необходимо после окончания процесса пайки деталей тщательно удалять остатки флюсов. Термодинамические расчеты доказывают относительную прочность паяных соединений при отрицательных температурах. Сложность проблемы прочности паяных соединений объясняется наличием комплекса физико-механических, химических и конструктивно–технологических факторов, отвечающих за формирование паяных соединений и их условий эксплуатации. При любой положительной температуре изобарный потенциал имеет отрицательное значение. Если равновесие химической реакции смещено влево и имеет отрицательный знак, то она активно протекает. Чем дальше в ряду электрохимической активности находятся друг от друга основной металл (или металлы) и компоненты припоя, тем более активно протекают процессы и окисления.

Ключевые слова: технология пайки; припой; электролит; паяное соединение; прочность; изобарный потенциал; температура

O. KRAKHMALYOV, O. ZINCHENKO, S. KOVALEVSKYI, O. KORNIIENKO

INFLUENCE OF OPERATING CONDITIONS ON SOLDERED JOINTS STRENGTH

The work is devoted to thermodynamic studies of the relative strength of soldered joints at negative temperatures. It has been established that in the presence of electrolyte, the soldered joint is prone to destruction from oxidation reactions, both in the base metal and in solder. In order to increase the service life of soldered joints, it is necessary to remove residual fluxes carefully after the end of the soldering process. Thermodynamic calculations prove the relative strength of soldered joints at low temperatures. The complexity of the problem of soldered joints strength is explained by the presence of a complex of physico-mechanical, chemical, and structural-technological factors responsible for the formation of soldered joints and their operating conditions. At any positive temperature, the isobaric potential has a negative value. If the equilibrium of a chemical reaction is shifted to the left and has a negative sign, then it is actively flowing. The further the base metal (or metals) and soldered components are from each other in the series of electrochemical activity, the more actively processes and oxidations proceed.

Keywords: soldering technology; solder; electrolyte; soldered joint; strength; isobaric potential; temperature

Вступ. Проблема міцності паяних з'єднань є досить складною, що пояснюється наявністю цілого комплексу фізико-механічних, хімічних і конструктивно-технологічних чинників, що відповідають за формування паяних з'єднань та їх умов експлуатації.

Необхідною умовою для отримання міцного з'єднання деталей є здатність поверхні металу змочуватися рідким припоєм. Якщо розплавлений припой добре змочує поверхню основного метала і розтікається по ній рівномірним шаром, то і в затверділому стані припій матиме хороше зчеплення з металом і паяне з'єднання буде досить міцним.

Аналіз літератури. Метал змочується припоєм лише за умови, що його поверхня абсолютно чиста. За наявності на поверхні метала плівки оксидів або інших забруднень припій не розтікається, а утворює окремі краплі, які після твердіння легко відділяються від метала. Тому необхідно або заздалегідь очистити поверхню і запобігти її окисленню при нагріві металу, або видалити окисну плівку під час самого процесу паяння [1, 2].

У роботі [3] розглянуто контактні та капілярні процеси взаємодії евтектичних Nb–розплавів, що містять Co, Ni та Fe, з твердими підкладками систем Al_2O_3–SiO_2 та AlN–TiN при 1400–1450 °C у вакуумі 10^{-3} Па; досліджено мікроструктуру та фазовий склад продуктів взаємодії в зонах контакту та виконано термодинамічний аналіз імовірних реакцій; виявлено вплив ніобію на ці процеси та запропоновано пояснення різної змочуваності однотипних підкладок, яке базується на властивостях твердої фази, що утворюється на межі з розплавом.

Отримання активною пайкою у вакуумі адгезійно-механічних з'єднань, здатних працювати при підвищених температурах з одночасним навантаженням на кручення в різних середовищах (вакуумі, відновлюючому, окислювальному) досліджено в роботі [4].

Присутність Ni в Cu суттєво змінює мікроструктуру паяного шва: на межі з ніобієм з'являється новий прошарок з мікротвердістю 7,1–7,3 ГПа і зникають глобули, які спостерігалися в системі Cu–Nb [5].

В роботах [6, 7–10] встановлено, що міцність паяних з'єднань є практично на рівні основного металу та залежить від форми підготовки кромок.

© О. В. Крахмальов, О. І. Зінченко,
С. Г. Ковалевський, О. В. Корнієнко, 2019

Так міцність зразків з обробленням кромок V–подібними є на 50% більшою від зразків із прямими кромками.

У роботі [8] методом лежачої краплі з використанням способу капілярного очищення розплаву краплі у процесі експерименту вивчено змочування компактних матеріалів на основі міді (олов'яної, берилієвої, алюмінієвої бронз) і чистої міді низькотемпературними припайними розплавами на основі олова. Припої системи Sn–Ag–Cu виявляють більшу активність при змочуванні у порівнянні зі сплавами Sn–Pb, Sn, Sn–Bi.

Аналіз розглянутих матеріалів дає підстави для висновку про необхідність подальших досліджень у зазначеному напрямку.

Мета роботи – розрахунок ізобарного потенціалу окислення припою і основного металу для паяного з'єднання.

Методологія досліджень. Як відомо, при будь-яких видах навантаження матеріали зазнають два види напружень: нормальні (залежно від прикладання сил – що розтягують або стискають) і тангенціальні (спрямовані по дотичній).

При осьовому розтягуванні паяного з'єднання з нанесеним припоєм довільної довжини силою P нормальні напруження розтягування перпендикулярні поперечному перерізу стержня і дорівнюють:

$$\sigma = P / F, \tag{1}$$

а максимальні дотичні напруження спрямовані під кутом 45° до осі розтягування і дорівнюють половині нормальних напружень:

$$\tau = 0{,}5\sigma. \tag{2}$$

Подібні умови навантаження розглянуті у роботах [1, 2, 11, 12]. Проте ці умови не враховують умов експлуатації паяних з'єднань. За наявності розчину електроліту у будь–яких умовах експлуатації відбувається хімічна реакція окислення припою або основного металу, що призводить до послаблення паяного з'єднання.

Методи рішення задачі. Метали, маючи мале число електронів на зовнішніх енергетичних рівнях, легко віддають їх атомам елементів з високою електронегативністю. Не обов'язково, щоб метали утворювали тільки оксиди; з'єднуючись з галогенами або сіркою, метал теж окислюється, переходячи в стан позитивно зарядженого іона.

Розрахуємо за методикою [7, 8] ізобарний потенціал окислення припою і основного металу для паяного з'єднання: 1) мідь – припій – мідь; 2) сталь – припій – мідь. В якості припою розглянемо чисте олово, флюс – ортофосфорну кислоту і припой ПОС–40, ГОСТ 21930–76. Ізобарний потенціал – величина, що показує зміну енергії під час хімічної реакції і можливість її протікання. Його зміни виражають корисну роботу при постійних температурі і тиску.

У наведених паяних з'єднаннях можливі проходження наступних реакцій.

Для першого випадку:

$$2Cu + O_2 + 4H_3PO_4 = 2CuO + 6H_2O + 2P_2O_5, \tag{3}$$

$$2Sn + O_2 + 4H_3PO_4 = 2SnO + 6H_2O + 2P_2O_5, \tag{4}$$

$$2Pb + O_2 + 4H_3PO_4 = 2PbO + 6H_2O + 2P_2O_5. \tag{5}$$

Для другого випадку додасться ще одна реакція:

$$2Fe + O_2 + 4H_3PO_4 = 2\,FeO + 6H_2O + 2P_2O_5. \tag{6}$$

Метод ентропії заснований на рівнянні Гіббса – Гельмгольца:

$$A = Q + T\frac{dA}{dT}, \tag{7}$$

однією з форм якого є рівняння

$$\Delta Z^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0. \tag{8}$$

Для стандартних умов воно дає:

$$\Delta Z^0_{298} = \Delta H^0_{298} - T\Delta S^0_{298}. \tag{9}$$

З рівняння ізотерми хімічної реакції і рівняння (9) отримаємо:

$$\Delta Z^0 = -R \cdot T \cdot \ln K, \tag{10}$$

$$\ln K = -\frac{\Delta \cdot H^0}{R \cdot T} + \frac{\Delta \cdot S}{R}. \tag{11}$$

Цей розрахунок можна вести у калоріях і у джоулях. При розрахунку у калоріях, підставивши замість R його значення (1,986 кал), отримаємо:

$$\ln K = -\frac{\Delta \cdot H^0}{4{,}575 \cdot T} + \frac{\Delta \cdot S}{4{,}575}, \tag{12}$$

де ΔH – зміна ентальпії, Дж/моль (кал/моль);

T – температура процесу, К (^oC);

ΔS^0 – зміна ентропії, Дж/моль·К (кал/моль·К).

Рівняння (12) дає точний розрахунок тільки за стандартних умов – T = 298 К і $P = 1{,}013 \cdot 10^5$ Па. Для усіх інших випадків результат буде наближеним, оскільки не враховуються зміни величин теплоємностей, і, відповідно, ентальпій і ентропій учасників реакції.

Для спрощення розрахунків рівняння (12) можна представити у вигляді, вважаючи, що $\frac{\Delta \cdot S}{4{,}575} = N$ та $\frac{\Delta \cdot H^o}{4{,}575 \cdot T} = M$:

$$\ln K = -\frac{M}{T} + N. \tag{13}$$

Для розрахунків не в калоріях, а в джоулях рівняння (12) має вигляд:

$$\ln K = -\frac{\Delta \cdot H^0}{19{,}15 \cdot T} + \frac{\Delta \cdot S}{19{,}15}. \qquad (14)$$

Якість паяного виробу істотно залежить не лише від властивостей паяних з'єднань, але і від того, як змінюються властивості паяного (основного) матеріалу під дією нагріву при паянні і матеріалу деталей зібраного виробу, що не піддаються безпосередньо паянню, але нагріваються в технологічному процесі. Погіршення властивостей конструкційного матеріалу, передусім механічних і корозійних, під дією нагріву у процесі паяння пов'язане з його структурними змінами, що відбуваються при цьому: зняттям ефектів наклепу або нагартовування і термічної обробки, зростанням зерна і зміни стану сплаву по межах зерен, старінням або відпуском, перепалом.

При нагріві холоднодеформованого металу до температури $0{,}2\,t_{пл}$ йде перша стадія зняття наклепу або нагартовування – повернення або відпуск; при цьому вакансії переміщуються до границь зерен з міжвузельними атомами, що призводить до зменшення кількості дислокацій і зниження мікронапружень у металі і, отже, до пониження міцності та підвищення пластичності металу [12].

При нагріві слабодеформованих заліза, алюмінію та їх сплавів до температури ~ $0{,}3\ t_{пл}$ настає друга стадія повернення – полігонізація; при цьому формується комірчаста структура, що є наслідком утворення субзерен з кутовими межами, і пластичність металу ще більше підвищується.

При нагріві слабо холоднодеформованих металів у інтервалі температур $(0{,}3 \div 0{,}5)\,t_{пл}$ у місцях найбільшої концентрації дислокацій (на межах старих деформованих зерен) зароджуються і ростуть нові рівноважні зерна (первинна рекристалізація). При достатній витримці або при подальшому підвищенні температури текстурована структура металу замінюється рівноосними зернами рекристалізованої структури. Усе це призводить до зниження міцності і до подальшого підвищення пластичності металу.

Величина рекристалізованого зерна залежить від ступеню деформації, температури і часу рекристалізації зерна початкового розміру. Максимальний розмір зерна характерний для рекристалізації металу, підданого деформації з критичною мірою 3–15%. При цьому в металі при рекристалізації утворюється обмежене число зародків рекристалізованих зерен.

Подальше підвищення ступеню деформації призводить до зростання числа центрів рекристалізованих зерен за ступеневим, а підвищення температури нагріву – за експоненціальним законом. При подальшому підвищенні температури зростання зерен внаслідок посилення дифузійних процесів швидко прискорюється.

Температура рекристалізації сильно деформованих чистих металів, за правилом А. А. Бочвара, складає $(0{,}3 \div 0{,}4)\ t_{пл}$, а у сплавів і сталей вона істотно вища $(0{,}4 \div 0{,}5)\ t_{пл}$. Дані про таку температуру для сплавів можуть бути визначені за їх діаграмами рекристалізації, що показують залежність температури початку і кінця цього процесу від ступеню деформації при заданій тривалості нагріву, або по тривимірних діаграмах рекристалізації, що зображують залежність середньої площі зерна від ступеню деформації і температури.

Температурний інтервал паяння повинен знаходитися в температурному інтервалі активності флюсу при контакті його з металом, що паяється, і припоєм, або в інтервалі температур, при якому можливе активування поверхні, що паяється, у вакуумі, інертних або активних газових середовищах.

Вже після первинної рекристалізації змінюються також електричний опір, питомий об'єм, термо ЕРС та інші фізичні властивості металів і сплавів, наближаючись до відпаленого стану.

Збиральна рекристалізація характеризується подальшим зростанням зерен, що виникають в результаті первинної рекристалізації. При цьому відбувається аномальне зростання великих зерен, зменшення загальної довжини границь зерен, пониження поверхневої енергії металу, утворення потрійних стиків зерен під кутом 120°. Збиральна рекристалізація відбувається тим інтенсивніше, чим вище температура нагріву. Включення дисперсних фаз гальмує первинну і збиральну рекристалізацію. При ще більш високій температурі нагріву металів і сплавів може розвинутися вторинна рекристалізація, при якій відбувається аномальне зростання деяких великих зерен і утворення різнозеренної грубої структури металу.

Зміна корозійної стійкості та зменшення міцності постарених або загартованих сплавів при нагріві відбуваються в результаті штучного (>20°С) або природного (~20°С) розпаду пересичених твердих розчинів. Такий розпад здійснюється переривчасто (локально) або безперервно (однорідно).

Зміна стану металів і сплавів по межах зерен може бути наслідком перегрівання або перепалу. При перегріванні в металах і сплавах утворюється великокристалічна структура, внаслідок чого погіршуються їх механічні, особливо динамічні властивості. До перегрівання не схильні спадково дрібнозернисті сталі, такі, що містять 0,03–0,04 % Al або 0,1–0,4 % Ti, але схильні сталі із спадково великим зерном. Структурні зміни матеріалу при перегріванні можуть бути усунені подальшою нормалізацією в сплавах без фазового наклепу.

Перепал сплавів незалежно від їх початкового стану настає внаслідок оплавлення або окислення границь зерен при нагріві їх поблизу температури солідусу, що істотно знижує їх міцність, пластичність і в'язкість.

Перепал у сталях і сплавах протікає в три стадії. На першій стадії відбувається збагачення границь зерен легуючими елементами. На другій стадії на границях зерен виникають порожнечі без

ознак окислення металу. На третій стадії відбувається окислення границь зерен. Виправлення структури конструкційних матеріалів після перепалу можливе тільки після першої стадії шляхом подальшої гомогенізації та відпалу. Структурні зміни на другій і третій стадіях перепалу – неусувний дефект.

Нетехнологічними вважаються температурні інтервали при досить тривалому нагріві або повільному охолодженні, в яких паяний метал зазнає структурних або фазових змін, неприпустимо погіршуючі властивості паяного з'єднання або виробу у цілому.

Окрім того, температурний інтервал паяння повинен знаходитися поза температурними інтервалами розвитку дифузійної пористості, окрихчування паяного металу у контакті з рідким припоєм і нижче температури початку неприпустимого розвитку хімічної ерозії.

Внаслідок розвитку фізико-хімічних процесів взаємодії паяного металу з припоєм, флюсом, газовим середовищем, що відбувається в часі, температурний інтервал паяння залежить від тривалості контакту конструкційного матеріалу і припою: при малій тривалості контакту цей інтервал може зміщуватися в зону більш високих температур, а при збільшенні часу контакту - в зону нижчих температур. Отже, температурний інтервал залежить від часу паяння.

Часовий режим паяння характеризується тривалістю нагріву до температури паяння, тривалістю паяння, тривалістю охолодження, тривалістю нагріву вище температури ліквідусу припою.

Результати чисельного моделювання. Фізичний зміст моделювання полягає в тому, що при температурі T рівноважний тиск кисню над оксидом дорівнюватиме зовнішньому тиску чистого кисню, тобто навіть у чистому кисні метал окислюватися не буде. Для активних металів ця температура дуже висока і знаходиться вище температури кипіння металу, а метали менш активні (тобто мідь) задовольняють цій умові при нижчих температурах.

Існує правило: коефіцієнти M і N тієї речовини, яку відновлюють, розкладають або піддають іншим перетворенням, приймають зі знаком "мінус", а результат реакції – зі знаком "плюс". Якщо є декілька молекул речовини (у нашому випадку – 2, 4 і 6), то коефіцієнти M і N теж збільшують у відповідне число разів.

Складемо відповідну таблицю (табл. 1) для першого варіанту. Алгебраїчне складання коефіцієнтів M і N призводить до наступних рівнянь:

- для міді –

$$\ln K = -\frac{59700{,}6}{T} - 571{,}606,$$

$$\Delta Z^0 = -59700{,}6 - 571{,}606T;$$

- для олова –

$$\ln K = -\frac{2428{,}72}{T} - 573{,}472,$$

$$\Delta Z^0 = -2428{,}72 - 573{,}472T;$$

- для свинцю –

$$\ln K = -\frac{31702{,}1}{T} - 572{,}99,$$

$$\Delta Z^0 = -31702{,}1 - 572{,}99T.$$

На рис. 1 показано окислення міді.

Таблиця 1 – Результати розрахунку для першого варіанту

Речовина	M	N
$4H_3PO_4$	–1856712,86	96,3216
$6H_2O$	374956,8	–219,996
$4PO_3$	1354164,4	–407,16
2CuO	67891,06	–40,7716
f	–59700,6	–571,606
$4H_3PO_4$	–1856712,86	96,3216
6H2O	374956,8	–219,996
4PO3	1354164,4	–407,16
2SnO	125162,94	–42,638
f	–2428,72	–573,472
4H3PO4	–1856712,86	96,3216
6H2O	374956,8	–219,996
4PO3	1354164,4	–407,16
2PbO	95889,54	–42,1552
f	–31702,1	–572,99

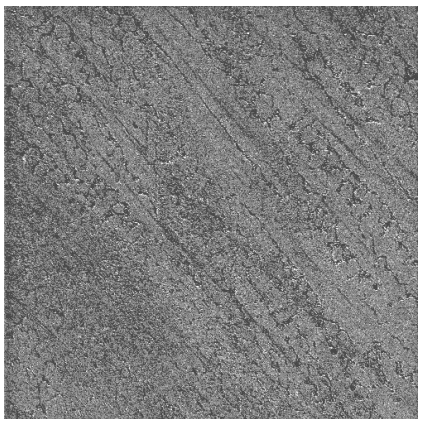

Рисунок 1 – Окислення міді:
сірий фон – мідь; рядкова структура – оксид міді;
не травлено (× 200)

З рівнянь видно, що при будь–якій плюсовій температурі ізобарний потенціал має від'ємне значення. Якщо рівновага хімічної реакції зміщена вліво і має від'ємний знак, то вона активно протікає.

Складемо відповідну таблицю (табл. 2) для другого варіанту. Алгебраїчне складання коефіцієнтів M і N призводить до наступних рівнянь:

- для міді –

$$\ln K = -\frac{59700{,}6}{T} - 571{,}606,$$

$$\Delta Z^0 = -59700{,}6 - 571{,}606T;$$

- для олова –

$$\ln K = -\frac{2428{,}72}{T} - 573{,}472,$$

$$\Delta Z^0 = -2428{,}72 - 573{,}472T;$$

- для свинцю –

$$\ln K = = -\frac{31702{,}1}{T} - 572{,}99;$$

$$\Delta Z^0 = -31702{,}1 - 572{,}99T;$$

- для заліза –

$$\ln K = -\frac{9925{,}72}{T} - 563{,}06,$$

$$\Delta Z^0 = -9925{,}72 - 563{,}06T.$$

На рис. 2 показано окислення олова.

Таблиця 2 – Результати розрахунку для другого варіанту

Речовина	*M*	*N*
$4H_3PO_4$	–1856712,86	96,3216
$6H_2O$	374956,8	–219,996
$4PO_3$	1354164,4	–407,16
CuO	67891,06	–40,7716
f	–59700,6	–571,606
$4H_3PO_4$	–1856712,86	96,3216
$6H_2O$	374956,8	–219,996
$4PO_3$	1354164,4	–407,16
SnO	125162,94	–42,638
f	–2428,72	–573,472
$4H_3PO_4$	–1856712,86	96,3216
$6H_2O$	374956,8	–219,996
$4PO_3$	1354164,4	–407,16
PbO	95889,54	–42,1552
f	–31702,1	–572,99
$4H_3PO_4$	–1856712,86	96,3216
$6H_2O$	374956,8	–219,996
$4PO_3$	1354164,4	–407,16
FeO	117665,94	–32,226
f	–9925,72	–563,06

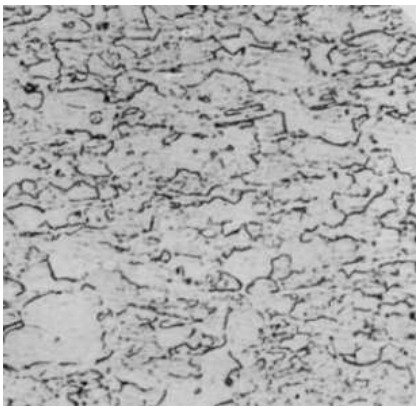

Рисунок 2 – Окислення олова:
сірий фон – олово; рядкова структура – оксид олова;
не травлено (× 200)

З рівнянь видно, що при будь–якій плюсовій температурі ізобарний потенціал має від'ємне значення. А оскільки рівновага хімічної реакції зміщена вліво та має від'ємний знак, то вона активно протікає і у другому випадку.

Висновки.

1. За наявності електроліту паяне з'єднання схильне до руйнування від реакцій окислення як по основному металу, так і по припою. Очевидно, чим далі у ряді електрохімічної активності знаходяться один від одного основний метал (чи метали) і компоненти припою, тим активніше протікають процеси їх окислення.

2. З метою збільшення терміну служби паяних з'єднань необхідно після закінчення процесу паяння деталей ретельно видаляти залишки флюсів, у першу чергу, рідких.

3. Термодинамічні розрахунки доводять відносну міцність паяних з'єднань при від'ємних температурах.

Список літератури

1. Парфенова Л. В., Парфенов А. Н. и др. Прочность соединений при пайке двухфазными припоями. *Сварочное производство*. 1976. № 1. С. 8–15.
2. Николаев Г. А., Киселев А. И. Работа мягкой прослойки паяных соединений. *Сварочное производство*. 1960. № 12. С. 23–30.
3. Журавльов В. С., Сидоренко Т. В., Карпець М. В., Коваль О. Ю. Контактні та капілярні процеси в перспективних для паяння системах “евтектичні розплави ніобію з кобальтом, нікелем і залізом – неметаліві матеріали систем Al_2O_3–SiO_2 та AlN–TiN”. *Порошкова металургія*. Київ: ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України. 2018. № 09/10. С. 94–104.
4. Габ І. І., Стецюк Т. В., Костюк Б. Д., Мартинюк С. І., Найдіч Ю. В. Адгезійно-механічне з’єднання оксидних матеріалів з металами. *Адгезія розплавів і пайка матеріалів*. Київ: ІПМ ім. І.М. Францевича НАН України. 2015. № 48. С. 117–124.
5. Журавльов В.С. Про можливість паяння ніобію з алюмооксидною керамікою ВК94–1 міддю і мідно–нікелевими припоями без використання тиску. *Адгезія розплавів і пайка матеріалів*. Київ: ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України. 2015. № 48. С. 94–102.
6. Матвієнків О. М. *Удосконалення технології ремонту польових магістральних трубопроводів: дис. … канд. техн. наук: 05.15.13.* Івано-Франківськ, 2017.
7. Матвієнків О. М., Шлапак Л. С. Вплив підготовки кромок на напруженодеформований стан паяних з’єднань оцинкованих труб польових магістральних трубопроводів. Науковий вісник ІФНТУНГ. Івано-Франківськ. 2017. № 1 (42). С. 80–87.
8. Красовський В. П., Вишняков Л. Р., Красовська Н. О., Коханий В. О. Визначення змочуванності компактних матеріалів на основі міді олововмісними сплавами. *Адгезія розплавів і пайка матеріалів*. Київ: ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України. 2015. № 48. С. 3–10.
9. Парфенов А. Н. *Низкотемпературные припои и флюсы. Справочник по пайке под ред. И. Е. Петрунина*. Изд. 3–е, М.: Машиностроение, 2003. 179 с.
10. Парфенов А. Н. Феноменологическая теория смачивания и растекания расплавов. *В сб. международного семинара: «Пайка. Современные технологии, материалы, конструкции»*. М.: ЦРДЗ. 2001. № 2. С. 134–142.
11. Єрмолаєв Г. В., Квасніцький В. В., Квасніцький В. Ф., Максімова С. В., Харунов В. Ф., Чигарьов В. В. *Паяння металів. Підручник*. Миколаїв.: НУК, 2015. 337 с.
12. Мальцев М. В. *Металлография цветных металлов и сплавов*. М.: Металлургия, 1976. 125 с.

References (transliterated)

1. Parfenova L. V., Parfenov A. N. i dr. Prochnost' soedinenij pri pajke dvuhfaznymi pripojami [The strength of the compounds when soldering two–phase solders]. *Svarochnoe proizvodstvo*. 1976, no. 1, pp. 8–15.
2. Nikolaev G. A., Kiselev A. I. Rabota mjagkoj proslojki pajanyh soedinenij [Work of solder joints soft layer]. *Svarochnoe proizvodstvo*. 1960, no. 12, pp. 23–30.
3. Zhuravl`ov V. S., Sy`dorenko T. V., Karpecz` M. V., Koval` O. Yu. Kontaktni ta kapilyarni procesy` v perspekty`vny`x dlya

payannya sy`stemax “evtekty`chni rozplavy` niobiyu z kobal`tom, nikelem i zalizom – nemetalevi materialy` sy`stem Al_2O_3–SiO_2 ta AlN–TiN” [Contact and capillary processes in prospective systems for soldering "eutectic molybdenum of nickel with cobalt, nickel and iron - nonmetallic materials of systems Al_2O_3–SiO_2 and AlN–TiN]. *Poroshkova metalurgiya*. Ky`yiv: IPM im. I. M. Francevy`cha NAN Ukrayiny`. 2018, no. 09/10, pp. 94–04.

4. Gab I. I., Stecyuk T. V., Kostyuk B. D., Marty`nyuk S. I., Najdich Yu. V. Adgezijno-mexanichne z'yednannya oksy`dny`x materialiv z metalamy` [Adhesion-mechanical connection of oxide materials with metals]. Adgeziya rozplaviv i pajka materialiv. Ky`yiv: IPM im. I.M. Francevy`cha NAN Ukrayiny` 2015, no. 48, pp. 117–124.
5. Zhuravl`ov V. S. Pro mozhly`vist` payannya niobiyu z alyumook-sy`dnoyu keramikoyu VK94–1 middyu i midno–nikelevy`my` pry`poyamy` bez vy`kory`stannya ty`sku [About the possibility of soldering of niobium with aluminum oxide ceramics VK94-1 copper and copper-nickel solder without pressure]. *Adgeziya rozplaviv i pajka materialiv*. Ky`yiv: IPM im. I. M. Francevy`cha NAN Ukrayiny`. 2015, no. 48, pp. 94–102.
6. Matviyenkiv O. M. Udoskonalennya texnologiyi remontu pol`ovy`x magistral`ny`x truboprovodiv: dy`s. … kand. texn. nauk: 05.15.13 [Improving the technology of repair of field trunk pipelines. Candidate eng sci. diss. (Ph.D.)]. Ivano-Frankivsk, 2017.
7. Matviyenkiv O. M., Shlapak L. S. Vply`v pidgotovky` kromok na napruzhenodeformovany`j stan payany`x z'yednan` ocy`nkovany`x trub pol`ovy`x magistral`ny`x truboprovodiv [Influence of preparation of edges on tensely deformed state of soldered joints of galvanized pipes of field main pipelines]. Naukovy`j visny`k IFNTUNG. Ivano-Frankivs`k. 2017, no. 1(42), pp. 80–87.
8. Krasovs`ky`j V. P., Vy`shnyakov L. R., Krasovs`ka N. O., Koxany`j V. O. Vy`znachennya zmochuvannosti kompaktny`x materialiv na osnovi midi olovovmisny`my` splavamy` [Determination of the wettability of compact materials based on copper-based tin-alloys]. *Adgeziya rozplaviv i pajka materialiv.* Ky`yiv: IPM im. I. M. Francevy`cha NAN Ukrayiny`. 2015, no. 48, pp. 3–10.
9. Parfenov A. N. *Nizkotemperaturnye pripoi i fljusy* [Low temperature solders and fluxes]. Spravochnik po pajke pod red. I. E. Petrunina. Izd. 3–e, Moscow, Mashinostroenie, 2003. 179 p.
10. Parfenov A. N. Fenomenologicheskaja teorija smachivanija i rastekanija rasplavov [Phenomenological theory of wetting and spreading of melts]. *V sb. mezhdunarodnogo seminara: «Pajka. Sovremennye tehnologii, materialy, konstrukcii»*. Moscow: CRDZ. 2001, no. 2, pp. 134–142.
11. Yermolayev G. V., Kvasnicz`ky`j V. V., Kvasnicz`ky`j V. F., Maksimova S. V., Xarunov V. F., Chy`gar`ov V. V. *Payannya metaliv* [Soldering of metals]. Pidruchny`k. Mykolaiv. NUK, 2015. 337 p.
12. Mal'cev M. V. *Metallografija cvetnyh metallov i splavov* [Metallography of non–ferrous metals and alloys]. Moscow, Metallurgija, 1976. 125 p.

Надійшла (received) 21.06.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Крахмальов Олександр Вікторович (Крахмалев Александр Викторович, Krakhmalyov Oleksandr Viktorovich) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Зварювання», ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3338-9724; e–mail: krakhmalyov1@gmail.com

Зінченко Олена Іванівна (Зинченко Елена Ивановна, Zinchenko Olena Ivanivna) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2961-5861; e–mail: zinchenko.zinchenko@gmail.com

Ковалевський Сергій Германович (Ковалевский Сергей Германович, Kovalevskyi Sergei Germanovich) - кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри будівельних та дорожніх машин ім. А. М. Холодова, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6299-2223; e–mail: kov1.serg@gmail.com

Корнієнко Олег Вікторович (Корниенко Олег Викторович, Korniienko Oleh Viktorovych) – Національна академія Національної гвардії України, старший викладач кафедри вогневої підготовки, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9722-4374; e–mail: KOV1976@gmail.com