

## ЕЛЕКТРОННО-ПУЧКОВИЙ МЕТОД ФОРМУВАННЯ З'ЄДНАННЯ АЛЮМІНІЙ-МІДЬ

**Донець Станіслав Євгенович,**кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,  
Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України  
ORCID: 0000-0002-1258-1434,  
e-mail: s.j.donets@gmail.com**Литвиненко Володимир Вікторович,**доктор технічних наук, старший науковий співробітник, директор,  
Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України  
ORCID: 0000-0003-4850-2555,  
e-mail: vvlytyvnenko@ukr.net**Лонін Юрій Федорович,**доктор технічних наук, старший науковий співробітник, начальник відділу,  
ORCID: 0000-0003-2601-5035  
e-mail: lonin@kipt.kharkov.ua**Пономарьов Анатолій Григорович,**кандидат фізико-математичних наук, начальник лабораторії,  
ORCID: 0000-0001-6914-6057,  
e-mail: anapon@kipt.kharkov.ua

*Запропоновано спосіб одержання з'єднання алюміній мідь, який полягає у одночасному опроміненні пластин алюмінію та міді імпульсом високопотужного електронного пучка. В результаті розпорошений пучком матеріал алюмінію осаджується на поверхню мідної підкладки, яка також активується електронним пучком. Покриття має ділянки більшого та меншого проникнення алюмінію в мідь. Зроблена чисельна оцінка розподілу температури та поля зміщень матеріалу мідної підкладки. Проведені металографічні дослідження, енергодисперсійний аналіз та фрактографічні дослідження. Зроблено висновок про доцільність розвинення такого підходу для практичних застосувань.*

**Ключові слова:** алюміній, мідь, композит, електронний пучок, електронна мікроскопія.DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.1>**Вступ**

Проблема одержання з'єднань алюміній – мідь для електротехнічної галузі є достатньо актуальною, що зумовлює пошук шляхів синтезу відповідних конекторів, які були б найменш вразливими до процесів окислення. На теперішній час один з перспективних напрямів розвитку матеріалознавства полягає в одержанні сполучень різних металів, які в рівноважних умовах не піддаються з'єднанню або не є взаєморозчинними в твердому стані. Технологічна перспективність такого підходу полягає в досягненні комплексу потрібних експлуатаційних характеристик, завдяки наявності певних властивостей у кожного окремого металу. До таких сполучень належить система алюміній-мідь, оскільки обидва ці метали є хорошими електричними провідниками, але в певних умовах експлуатації було доречним поєднання їх характеристик. Так, наприклад, мідь є кращим провідником та більш стійким до дії вологості, але алюміній має більш високе значення міцності, що важливо, наприклад, в атенюаторах, де поверхня піддається ударним навантаженням внаслідок високої швидкості спрацьовування. Слід зазначити, що різноманітні варіанти роз'ємних з'єднань міді з алюмінієм мають той недолік, що поверхня алюмінію з часом окислюється і таким чином погіршується контакт.

**Аналіз публікацій**

Набувають розвитку підходи щодо одержання сполучення мідь – алюміній в твердотільному стані [1], формування

з'єднань засобами лазерного зварювання [2] зварювання шляхом тертя [3] та інші. В роботі [4] здійснювалось зварювання низькоенергетичним електронним пучком, та проводився аналіз будови інтерфейсного шару. Разом з тим подальші технологічні перспективи полягають у залученні інструментів переведення матеріалів, що сполучаються, в різконерівнований стан та активації її електронної підсистеми. До таких інструментів належать сильноточкові пучки електронів, і їх технологічні застосування останнім часом набувають поширення [5,6]. Так відомими є результати роботи [7], що полягають у збільшенні значень мікротвердості сплавів внаслідок опромінення сильноточковим пучком електронів а також надано результати нанесення захисних шарів алюмінію. Особливість такої технології нанесення полягає в тому, що під дією пучка відбуваються розплавлення матеріалу фольги, який наноситься та матеріалу підкладки, при цьому інтерфейсний шар утворюється переважно за рахунок гідродинамічного перемішування матеріалів, що забезпечує хорошу адгезію. До переваг подібного способу нанесення покриттів належить також можливість одержання досить великих товщин покриттів та одержання градієнтного інтерфейсного шару, який утворюється за рахунок вищезгаданого процесу перемішування. Таким чином, цю технологію доречно апробувати для одержання композиту алюміній – мідь.

**Методика проведення експерименту**

Досліджуючи можливості створення нових технологій

на основі сильно струмових релятивістських електронних пучків слід розуміти, що наявні установки не є поширеними і можливості експериментаторів мають вкладатися в технічні можливості прискорювача. Нами застосовувався прискорювач ТЕМП-А ННЦ Харківський фізико-технічний інститут НАН України, його параметри наступні: енергія електронів 350 кеВ, струм пучка 2 кА, тривалість фронту імпульсу 5 мкс.

Можливість зміни діаметру пучка є більш гнучкою: від 20 до 70 мм, форма пучка може бути як суцільною так і трубчастою в залежності від геометрії катоду. Разом з тим для описаних вище ефектів нанесення покриттів з застосуванням електронного пучка була властива схема, коли пучок спочатку приходив на матеріал фольги, втрачав частину енергії а потім потрапляв на матеріал підкладки. В роботах [6,8] описана методика нанесення покриттів з застосуванням імпульсних електронних пучків. Здійснювати одночасне опромінення обох матеріалів шляхом сканування не видається можливим з огляду на невелику тривалість імпульсу. Синхронне опромінення двома імпульсами також є задачею, яку важко реалізувати. Тому було запропоновано підхід, який полягав в розподілі поля електронного пучка протягом дії одного імпульсу на алюміній та мідь рис. 1.

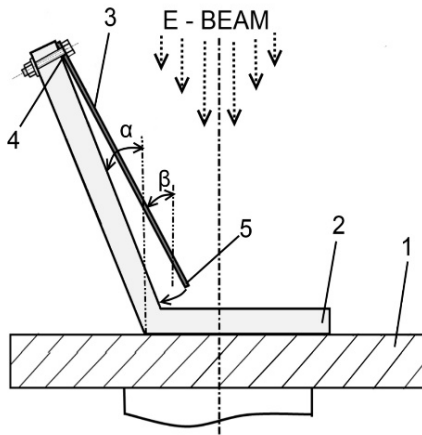


Рис.1. Схематичне зображення опромінюваної мішені: 1 – колектор, 2 – Al-пластина, 3 – Cu-зразок, 4 – пружне кріплення Cu-зразка до алюмінієвої пластини, 5 – вільний кінець Cu – зразка [6,8]

Зазвичай технологія нанесення покриття містить декілька основних складових: спосіб підготовки підкладки, на яку наноситься матеріал; спосіб активації (вилучення) та транспорту матеріалу, який наноситься; контроль та керування потоком матеріалу, активація матеріалу підкладки. Запропонований нами спосіб виконує всі попередньо означені задачі протягом дії одного імпульсу. Розподіл поля електронного пучка може регулюватися лише шляхом зміни кутів  $\alpha$  та  $\beta$  на рис. 1. Слід враховувати, що при проходженні сильно струмового пучка під певним кутом до поверхні електропровідної пластини відбувається електродинамічна взаємодія зі струмом, що індукується в пластині. Особливістю взаємодії електронного пучка з поверхнею на відміну, наприклад, від лазерного випромінювання, є те, що область максимального поглинання енергії припадає на підповерхневі шари і плавлення матеріалу починається вглибині мішені. Внаслідок цього формується газоплазмовий факел [9, 10], який міс-

ить як крапельну фазу речовини, так і паро-плазмову. Відповідно в подальшому відбувається конденсація продуктів абляційного викиду як на власну поверхню – зворотня конденсація, так на суміжно розташовану поверхню. На формування взаємного сполучення двох матеріалів впливають наступні чинники: температура, до якої нагріваються матеріали внаслідок дії пучка, наявність механічних напружень внаслідок виникнення температурних градієнтів, розподіл матеріалу в полі газоплазмового факелу. Даний ефект широко застосовується для одержання покриттів також при взаємодії іонних пучків з поверхнею металів [11] та продуктів електроерозійного видалення [12].

Для оцінки індукованого температурного поля і поля механічних напружень в об'ємі твердого тіла зумовленого абляцією під дією сильно струмового релятивістського електронного пучка (СРЕП), було розв'язано термо-механічну задачу у рамках термоеластичності для однорідного тіла, що було верифіковано використовуючи експериментальні дані [13-15]. По-перше, було знехтувано можливими флуктуаціями струму пучка вздовж його перерізу. Для спрощення розрахунків, розглядаємо задачу у двовимірній координатній площині зразка  $\{x, y\}$ , де вісь  $x$  означає глибину зразка і вісь  $y$  означає ширину, чи вироджений просторовий розподіл електронного пучка по поверхні опромінення. Модельний зразок є однорідною пластинкою  $\{0..H_x \times 0..H_y\}$  в  $\Omega \in R^2$ , де ширина зразка є більшою за його товщину  $H_y > H_x$ . Пластина опромінюється електронним пучком перпендикулярно до його поверхні  $\Gamma_1$ .

Класичне рівняння Фур'є поширення тепла в твердому тілі має нефізичну властивість поширення теплових хвиль в середовищі з довільною швидкістю. Таким чином, з огляду на високі швидкості нагрівання а також значення тиску, вважається необхідним введення в розгляд релаксаційного теплового рівняння значення часу  $\tau_r$ , зумовленого скінченністю швидкості поширення температурного поля в металі (1):

$$\bar{q}(\bar{r}, t + \tau_r) = -k \nabla T(\bar{r}, t + \tau_r), \quad (1)$$

де  $k$  є коефіцієнтом теплопровідності. Тривалість імпульсу опромінення є значно більшою за час електрон-фононої релаксації  $\tau_p \gg \tau_r$  ( $\tau_r \leq 10^{-12}$  s). Також прийнято в моделі, що встановлена рівновага між електронною і йонною підсистемами. Далі, застосовано закон Максвела-Катанео (2), як варіація класичного рівняння Фур'є при  $\tau_r > 0$ :

$$\bar{q}(\bar{r}, t + \tau_r) = -k \nabla T(\bar{r}, t) - \tau_r \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} - k \tau_r \nabla_r \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

Для закону збереження (3), вводимо функцію потужності теплового джерела  $Q$ . Рівняння для температурного поля визначається гіперболічним диференціальним (4):

$$\frac{\partial T(\bar{r}, t)}{\partial t} = -\frac{\nabla \cdot \bar{q}}{\rho c} + \frac{Q}{\rho c}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \tau_r \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} =$$

$$= \frac{1}{\rho c} \{ \nabla \cdot (k \nabla T) + \tau_r \nabla \cdot (k \nabla \frac{\partial T}{\partial t}) + Q + \tau_r \frac{\partial Q}{\partial t} \}, \quad (4)$$

де  $c$  - теплоємність,  $\rho$  – густина [13,14,15].

Розподіл частинок матеріалу алюмінію в полі газоплазмового факелу має цілком наочне візуальне відображення на

мідній підкладці рис. 3.

Зображення растрового електронного мікроскопа з різних ділянок поверхні наведені на рис. 4 Так периферійна частина покрита краплями алюмінію рис.4 а, тоді як розташована ближче до вісі газоплазмового факелу має характерний бронзо-

вий блиск рис.4 б, що свідчить про перемішування матеріалів. Область мідної підкладки, що розташована найближче до алюмінію, має ознаки наплавлення алюмінію рис.4 в. Свідченням більш глибокого проникнення алюмінію на різних ділянках є результати енергодисперсійного аналізу – рис.5.

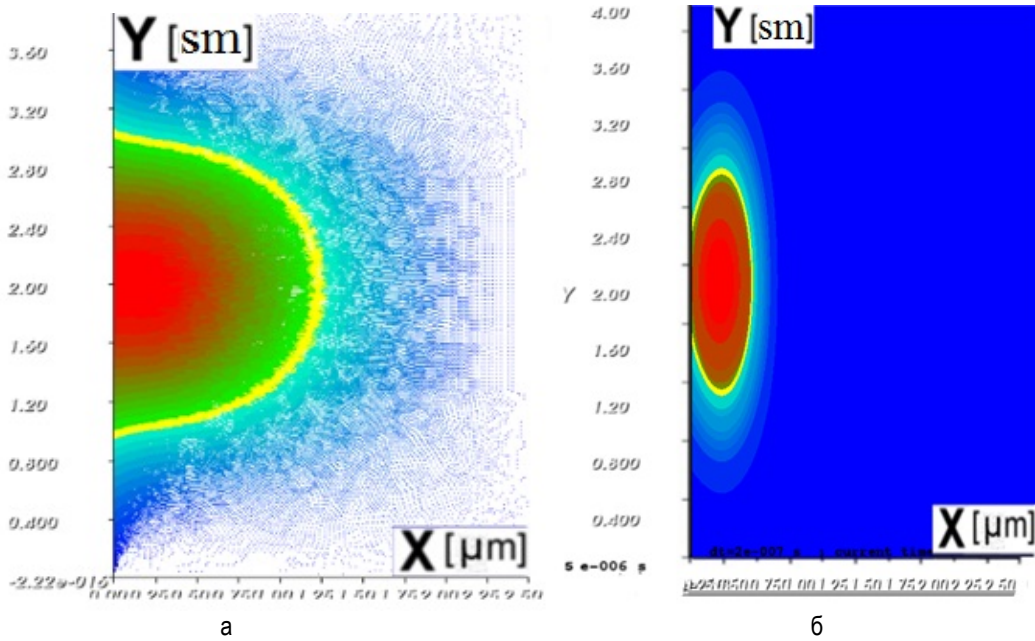


Рис.2. Просторовий розподіл у мідній пластині: а) поля зсувів; б) поля температур

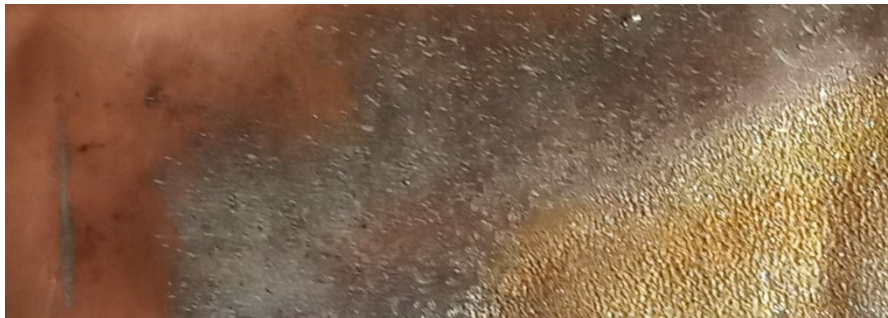


Рис. 3. Мідна пластина після конденсації абляційного потоку алюмінію

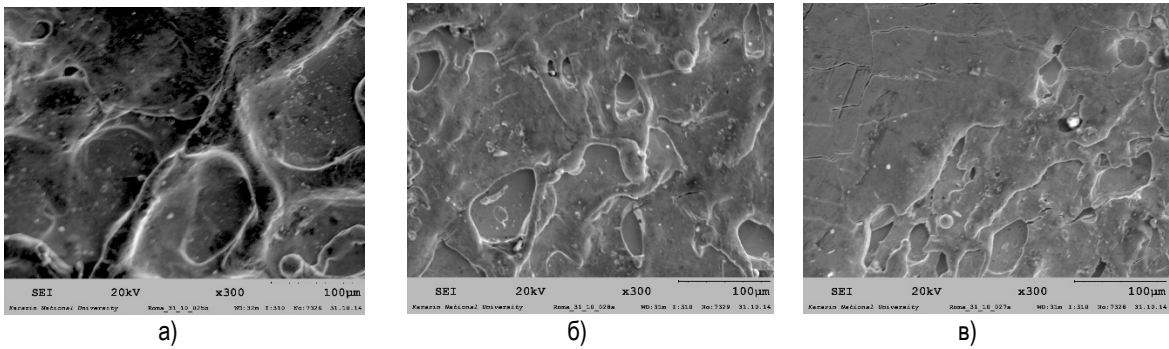


Рис.4. РЕМ зображення ділянок поверхні пластини.

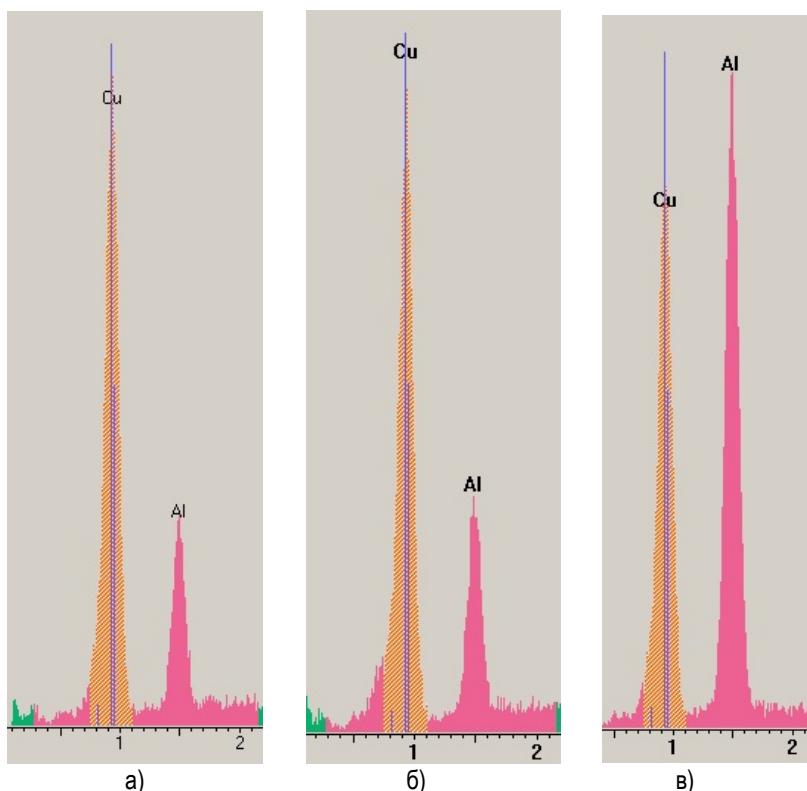


Рис.5. Результати енергодисперсійного аналізу різних ділянок (позначення а, б, в. відповідають ділянкам на рис.4 )

Разом з тим, подібна нерівномірність покриття дає можливість зрозуміти, на яких ділянках сполука мідь-алюміній є більш суцільною. З огляду на вказану нерівномірність масопереносу алюмінію ми провели аналіз мікроструктури одержаного композиту. Як видно з рис. 6. сполучення є достатньо суцільним, при цьому на окремих ділянках спостерігається

взаємопроникнення рельєфів на інтерфейсній області, що особливо важливо, наприклад, для ударних навантажень.

Одержаний композит було апробовано на стійкість до деформації гину. З фрактограм рис. 7 видно, що відшарування проходить з руйнуванням інтерфейсного шару по тілу підкладинки, як менш міцного матеріалу.

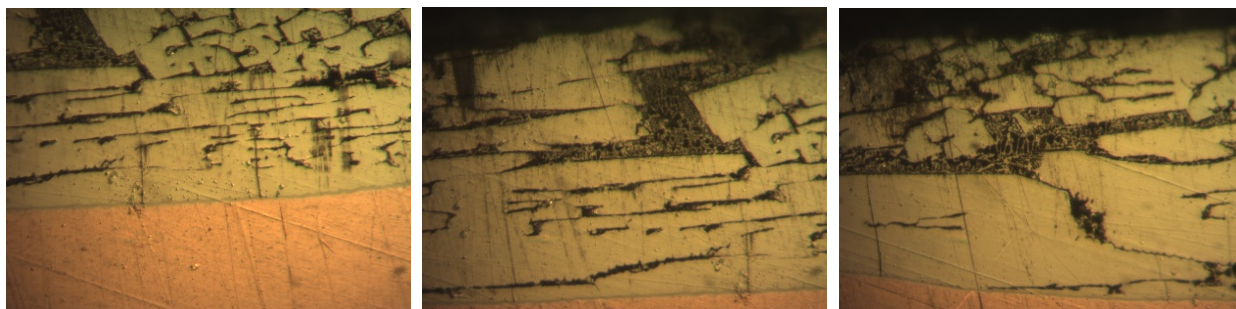


Рис. 6. Металографія ділянок шліфу інтерфейсу алюміній-мідь

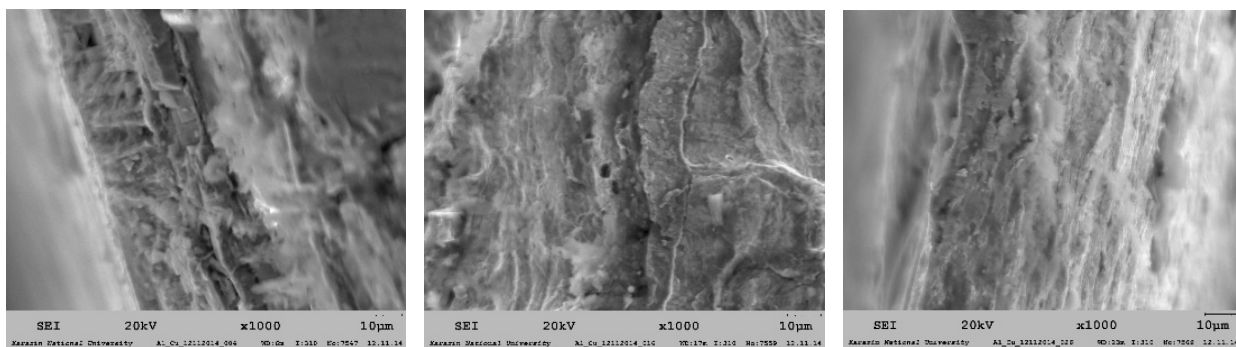


Рис. 7. Фрактограми зламу композиту алюміній-мідь.

## Висновки

Сильнострумові релятивістські електронні пучки є перспективним інструментом для створення новітніх технологій одержання композитних матеріалів, шляхом з'єднання тих

металів, які в термодинамічно рівноважних умовах не змішуються. На прикладі пари алюміній мідь показано, що шляхом імпульсної електронно-пучкової обробки можна досягти суцільного сполучення цих матеріалів, яке екранує доступ волги, та запобігає коронуванню.

## Список використаної літератури.

1. Bergmann, Jean & Petzoldt, Franziska & Schürer, René & Schneider, Stefan. (2013). Solid-state welding of aluminum to copper - Case studies. *Welding in the World*. 57. 10.1007/s40194-013-0049-z.
2. R.S. Chopde, S.P. Gadewar, M.P. Khond, M.J. Rathod / Study on Laser beam Welding of Copper and Aluminum joint // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* e-ISSN: 2278-1684,p-ISSN: 2320-334X PP. 65-74 6th National Conference RDME 2017, 17th- 18th March 2017.
3. D.S. Chaudhari Joining of aluminum to copper by friction stir welding // *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)* ISSN: 2349-2163 Volume 1 Issue 8 (September 2014).- p.18-21
4. C. Otten, U. Reisgen, M. Schmachtenberg Electron beam welding of aluminum to copper: mechanical properties and their relation to microstructure *Welding in the World* .-2016, Volume 60, Iss. 1, pp 21–31
5. A.G. Kobets et al. Melting effects of high-current relativistic electron beam on aluminum alloy 1933 // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2015, v. 51, N 5, p. 478–482.
6. S.Ye. Donets et al / Aluminum surface coating of copper using high-current electron beam // *Problems of atomic science and technology*.-No4(98). Ser. Plasma electr. & new meth. of Acc. Iss. 9-2015 p.302-305
7. A. Weisenburger, W. An, V. Engelko, A. Heinzl, A. Jianu, F. Lang, G. Mueller, F. Zimmermann. Intense Pulsed Electron Beams Application of Modified Materials // *Acta Physica Polonica A*. 2009, № 6, v. 115, p. 1053-1055.
8. S.Donets, V.Klepikov, O.Startsev, V.Uvarov, Yu.Lonin / Formation of Aluminum-Copper Composite Using High-Current Electron Beam Irradiation // *Proceedings of the 2019 IEEE 9th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties, NAP 2019 9075689*
9. V.F. Klepikov, V.V.Lytvynenko, Yu.F.Lonin, A.G.Ponomarev, O.G.Tolstolutskiy, V.V.Uvarov, V.T.Uvarov / The dynamics of the gas – plasma torch induced by the high current REB on solid state targets // *Problems of atomic science and technology*. Ser. Plasm. phys. № 1(59) .-is.15.-2009.- p.119-121
10. W. An, Ya. E. Krasik, R. Fetzer, B. Bazylev, G. Mueller, A. Weisenburger, V. Bernshtam / Characterization of high-current electron beam interaction with metal targets // *Journal of Applied Physics* 110, 093304 (2011); doi: 10.1063/1.3660764
11. Xiangdong Kang, Katsumi Masugata and Kiyoshi Yatsui Ablation Plasma Temperature Produced by Intense, Pulsed, Ion-Beam Evaporation // *Japanese Journal of applied physics* .-v.33.-p.2.-№ 78
12. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, and M. Ya. Dovzhyk, Investigation of Regularities of the Processes of Formation of Surface Layers with Electroerosive Alloying. Part I, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 38, No. 12: 1611—1633 (2016) (in Russian)
13. V.F. Klepikov et al. Physical and mechanical properties of titanium alloy VT1-0 after high-current electron beam irradiation // *Problems of Atomic Science and Technology*. 2015, N 2, p. 39-42.
14. Zenker, R. Modern Thermal Electron Beam Processes—Research Results and Industrial Application. *Metallurgia Italiana*, 101, 2009 1-8.
15. A E Mayer, E N Borodin, V S Krasnikov, P N Mayer / Numerical modelling of physical processes and structural changes in metals under intensive irradiation with use of CRS code: dislocations, twinning, evaporation and stress waves // *Journal of Physics: Conference Series* 552 (2014) 012002

**Donets S.Ye.**, Institute of Electrophysics and Radiation Technologies NAS of Ukraine

**Lytvynenko V.V.**, Institute of Electrophysics and Radiation Technologies NAS of Ukraine

**Lonin Yu.F.**, NSC Kharkiv Institute of Physics and Technology

**Ponomarev A.G.**, NSC Kharkiv Institute of Physics and Technology

### **The electron beam method for formation of the aluminum-copper joints**

A method for obtaining an aluminum-copper compound is proposed, which consists in the simultaneous irradiation of aluminum and copper plates with a pulse of a high-power electron beam. As a result, the aluminum material sprayed by the beam is deposited on the surface of the copper substrate, which is also activated by the electron beam. The coating has areas of greater and lesser penetration of aluminum into copper. A numerical estimate of the temperature distribution and displacement fields of the copper substrate material is made. Metallographic researches, energy dispersion analysis and fractographic researches are carried out. The conclusion about expediency of development of such approach for practical applications is made.

**Key words:** aluminum, copper, composite, electron beam, electron microscopy.

Дата надходження до редакції: 12.04.2021