

Володимир Мазанко, Олег Новомлинець, Сергій Олексієнко, Світлана Ющенко

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ МАСОПЕРЕНЕСЕННЯ У ПРОЦЕСІ ПРЕЦИЗІЙНОГО ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЮ

*Актуальність теми дослідження.* Широке застосуванням алюмінію та його сплавів у промисловості викликає необхідність вдосконалення існуючих способів одержання їх нероз'єднаних з'єднань у твердій фазі.

*Постановка проблеми.* При вивченні процесу утворення з'єднання під час зварювання у твердій фазі актуальною задачею є дослідження дифузійних процесів та встановлення закономірностей масоперенесення, що має практичне значення при розробці нових технологій зварювання.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Одним із перспективних способів з'єднання алюмінію є прецизійне електроконтактне зварювання через проміжні прошарки зі зварювального матеріалу, використання яких сприяє активзації поверхонь деталей, що зварюються, та локалізації теплової енергії в стику.

*Виділення недосліджених частин загальної проблеми.* Недослідженими залишаються процеси масоперенесення та механізми визначення оптимальної кількості проміжних прошарків при прецизійному електроконтактному зварюванні алюмінію та його сплавів.

*Постановка завдання.* Метою роботи є аналіз впливу кількості проміжних прошарків на процеси масоперенесення при прецизійному електроконтактному зварюванні алюмінію та його сплавів.

*Викладення основного матеріалу.* Відпрацювання методики дослідження здійснено на прикладі електроконтактного зварювання сплаву марки АМц із використанням різної кількості проміжних шарів з алюмінієвої фольги товщиною 11 мкм. Зварювання сплаву проводили за режимом: густина струму 300-350 А/мм<sup>2</sup>, питомий тиск 2-3 МПа, тривалість імпульсу струму 0,1-1 с. Дослідження характеристик масоперенесення проводили за допомогою методу радіоактивних ізотопів.

*Висновки відповідно до статті.* Досліджено особливості процесів масоперенесення при електроконтактному зварюванні алюмінію через прошарки. Визначено залежність коефіцієнта масоперенесення в контактній зоні від кількості прошарків. Встановлено, що при зварюванні сплаву АМц дифузійна зона є максимальною при зварюванні через 4 прошарки.

*Ключові слова:* алюміній; електроконтактне зварювання; проміжний прошарок; масоперенесення; дифузійна взаємодія; радіоактивний ізотоп; зварне з'єднання.

**Постановка проблеми.** Явище дифузії відіграє суттєве значення для багатьох технологічних процесів, а особливо для зварювання у твердій фазі. Дифузійна взаємодія у процесі зварювання однорідних та різнорідних матеріалів у кожному конкретному випадку є необхідною умовою для визначення найбільш оптимальних параметрів процесу.

Тому дослідження дифузійних процесів та встановлення закономірностей масоперенесення є актуальним завданням та має практичне значення для розроблення нових технологій зварювання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Алюміній та його сплави є одним із найбільш поширених конструкційних матеріалів авіаційної та космічної техніки, транспортного та хімічного машинобудування, автомобільної та харчової промисловості.

Одним із ефективних методів зварювання алюмінію є електроконтактне зварювання, особливостями якого є незначна тривалість процесу, висока швидкість нагріву зони з'єднання електричним струмом та значна пластична деформація металу в зоні контакту [1]. Це призводить до зниження площі перерізу зварного з'єднання та зменшення міцності зварних з'єднань. Крім цього, деякі вироби при отриманні нероз'єднаних з'єднань потребують обмеження макродеформацій.

Одним із перспективних методів одержання прецизійних нероз'єднаних з'єднань з алюмінію та його сплавів є електроконтактне зварювання через проміжні прошарки зі зварювального матеріалу [2; 3]. Використання проміжних прошарків призводить до активзації поверхонь деталей, що зварюються, та локалізації теплової енергії у стику. Однак на сьогодні в літературі відсутня інформація щодо особливостей процесу масоперенесення у процесі прецизійного електроконтактного зварювання через проміжні прошарки зі зварювального матеріалу.

Серед ефективних сучасних методів вивчення процесів дифузії та самодифузії широко застосовується авторадіографія [4]. Використання радіоактивних ізотопів відкриває нові можливості для дослідження дифузійних процесів завдяки високій чутливості, точності та інформативності.

Ефективність методу радіоактивних ізотопів у процесі дослідження зварних з'єднань, отриманих зварюванням тиском через різні прошарки, у тому числі із покриттями, встановлена авторами робіт [5–9].

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Недослідженими нині залишаються механізми визначення оптимальної кількості проміжних прошарків у процесі прецизійного електроконтактного зварювання алюмінію та його сплавів.

**Мета статті.** Метою цієї роботи є вивчення впливу кількості проміжних прошарків на процеси масоперенесення у процесі прецизійного електроконтактного зварювання алюмінію та його сплавів.

**Виклад основного матеріалу.** Відпрацювання методики дослідження процесу електроконтактного зварювання здійснено на модельній парі АМц-АМц із використанням проміжних шарів з фольги чистого алюмінію, товщина якої становила 11 мкм.

Промисловий алюмінієвий сплав марки АМц характеризується високою пластичністю та технологічністю, високою корозійною стійкістю та гарною здатністю до зварювання. Склад сплаву алюмінію марки АМц (у ваг. %) наведено у табл. 1 [10].

Таблиця 1

Склад сплаву алюмінію марки АМц (у ваг. %)

Fe	Si	Mn	Al	Cu	Zn	Домішки
до 0,7	до 0,6	1-1,5	96,35-99	0,05-0,2	до 0,1	до 0,15

Експерименти виконувалися на машині для контактного точкового зварювання МТ-1216 (номінальний зварювальний струм 12 кА, номінальна потужність 53 кВ·А, максимальний тиск на електродах 500 кг).

Зварювання сплаву АМц проводили за таким режимом: густина струму 300-350 А/мм<sup>2</sup>, питомий тиск 2-3 МПа, тривалість імпульсу струму 0,1–1 с. Процес проводили на зразках з двома, чотирма та шістьма шарами фольги алюмінію, розміщеними між зварними деталями.

Дослідження проводилися сумісно з інститутом металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України. Для аналізу характеристик масоперенесення в зоні контакту на один із зразків, який зварюється, здійснювалося нанесення радіоактивного ізотопу кобальту <sup>60</sup>Со з максимальною енергією поглинання β-випромінювання 0,067 МеВ та іонізуючою здатністю 1,48 см<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>.

Для зняття напружень та стабілізації структури зразки перед насиченням радіоактивним ізотопом відпалювалися. Після відпалу на одну з поверхонь одного зі зразків наносили шар ізотопу <sup>60</sup>Со товщиною 3-5 мкм та вихідною активністю 5·10<sup>3</sup> імп/хв.

Складання деталей здійснювалося внапуск у послідовності АМц (<sup>60</sup>Со) - фольга - АМц, причому зразок із радіоактивним ізотопом знаходився знизу. Після зварювання зразок розрізали по центру зварного з'єднання та розміщували на фоточутливій плівці для авторадіографування з наступною витримкою на ній протягом 240 годин та проявляли плівку. Після проявлення плівку фотометрували та одержували концентраційний розподіл радіоактивного ізотопу кобальту в алюмінії. Отримані авторадіограми для трьох різних випадків зображені на рис. 1 (стрілками показано місце стику деталей).

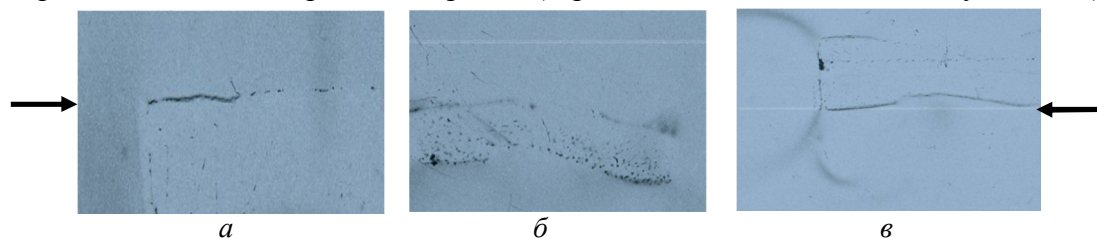


Рис. 1. Авторадіографічні відбитки зони з'єднання зразків у процесі зварювання алюмінію через фольгу: а – 2 шари; б – 4 шари; в – 6 шарів

Розподілення радіоактивного ізотопу у стику (у перерізі по центру зварного з'єднання) після зварювання для трьох різних випадків представлено у вигляді концентраційних кривих на рис. 2.

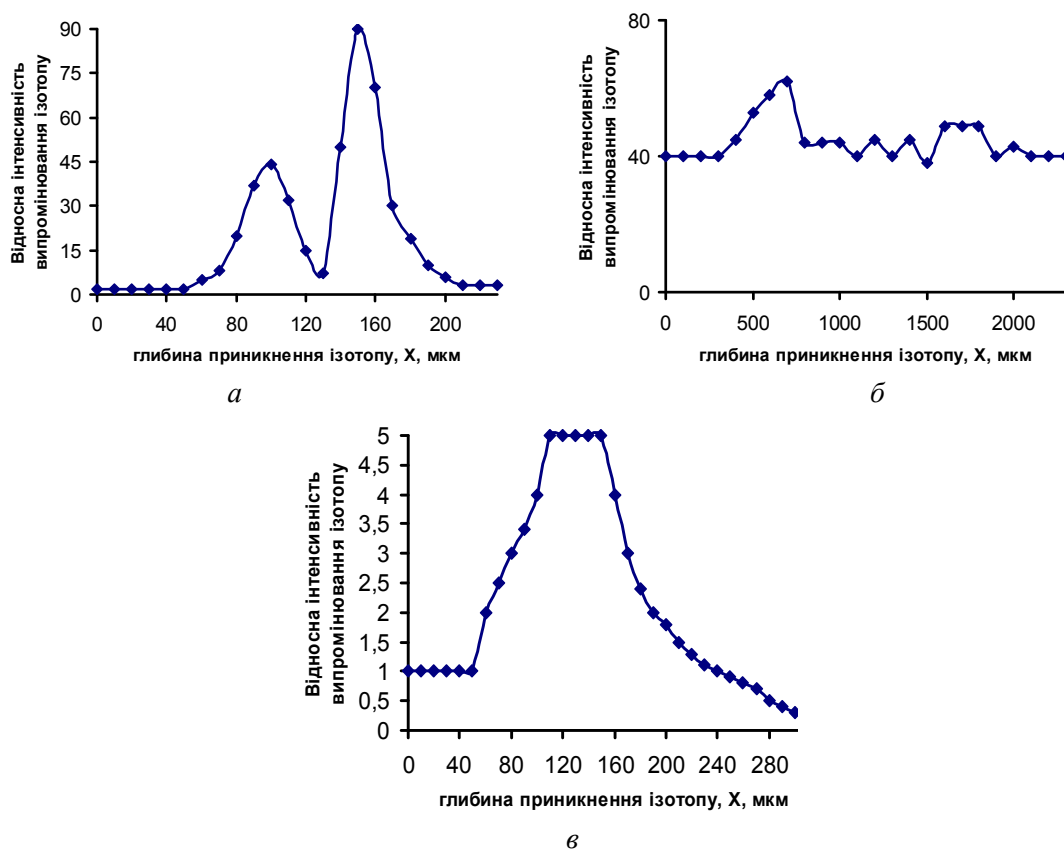


Рис. 2. Концентраційні криві розподілу радіоактивного ізотопу кобальту в алюмінії після зварювання через фольгу: а – 2 шари; б – 4 шари; в – 6 шарів

Вивчення концентраційних кривих показує, що у трьох різних випадках зварювання (через 2, 4 та 6 шарів фольги) механізми утворення з'єднань відрізняються. Про це свідчать особливості розподілу радіоактивного ізотопу в стику, форма концентраційних кривих та глибина проникнення ізотопу  $^{60}\text{Co}$  у зварні зразки.

Аналіз авторадіограми у випадку зварювання через 2 шари фольги (рис. 1, а) свідчить про наявність пор у зоні зварювання. З концентраційної кривої (рис. 2, а) випливає, що напівширина пори становить близько 20 мкм, а її протяжність – приблизно 120 мкм. Якість зварного з'єднання незадовільна, оскільки наявність пор може призвести до появи тріщин у зоні зварювання та подальшого руйнування зварного виробу в процесі експлуатації. Разом з тим спостерігається відсутність границі розділу між деталями, які зварюються, що свідчить про утворення монолітного з'єднання.

Під час аналізу авторадіограми (рис. 1, б) та концентраційної кривої (рис. 2, б) у випадку зварювання через 4 шари фольги наявність пор не виявлена. Спостерігається відсутність чіткої границі розмежування між зразками, які зварюються, та фольгами, що свідчить про утворення монолітного з'єднання. Глибина проникнення ізотопу в алюміній у цьому випадку значно вище, ніж у попередньому.

Особливу увагу привертає той факт, що весь об'єм зразка, який не містить ізотоп, заповнений відламками зразка, вкритого ізотопом. Цей ефект, очевидно, пояснюється проходженням явища надглибокого проникнення частинок у металічну перешкоду [11; 12], що проявляється у проникненні частинок на значну глибину в метал (сотні та тисячі їх діаметрів) у процесі руху цих частинок з великою швидкістю (вище  $10^3$  м/с) та налітання на металічну перешкоду.

З аналізу концентраційної кривої у разі зварювання алюмінію через 6 шарів фольги (рис. 2, в) випливає, що в зоні контакту зразків утворюються протяжні зони дифузійної взаємодії металів, які зварюються (рис. 2, в). При цьому чітко спостерігається асиметрія вказаних кривих у бік, де розміщені фольги.

Оцінка величин коефіцієнтів масоперенесення  $D_m$  проводилась за формулою Ейнштейна [13]:

$$D = \frac{x^2}{2\tau}, \quad (1)$$

де  $x$  – глибина проникнення ізоотопу, см;  $\tau$  – тривалість процесу зварювання, с.

Визначені за даними концентраційними кривими коефіцієнти масоперенесення у перерізі по центру кожного зразка наведено у табл. 2 (зразок № 1 – зварений через 2 шари фольги, зразок № 2 – через 4 шари, зразок № 3 – через 6 шарів).

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів масоперенесення радіоактивного ізоотопу

Номер зразка					
№ 1		№ 2		№ 3	
$D_m, \text{см}^2/\text{с}$					
зліва	справа	зліва	справа	зліва	справа
$6,4 \cdot 10^{-5}$	$6,25 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-2}$	$7,2 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$

З одержаних результатів видно, що коефіцієнт масоперенесення у процесі зварювання через 4 шари фольги у 2–3 рази вище, ніж у інших двох випадках. Слід відзначити, що значення коефіцієнтів приблизно у 4–6 разів є вищими порівняно із коефіцієнтом самодифузії алюмінію.

При відпалі алюмінію при температурі 873 К коефіцієнт самодифузії Al становить  $D_{\text{Al-Al}} = 6,1 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}$ , а дифузії Co в Al при тій самій температурі  $D_{\text{Co-Al}} = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$  [14]. Результат такого пришвидшеного масоперенесення можна пояснити протіканням у процесі зварювання явища аномального масоперенесення в металах та сплавах, яке спостерігається при імпульсних впливах [8; 9].

Розраховані за формулою (1) значення коефіцієнтів масоперенесення зображено у вигляді гістограми на рис. 3.

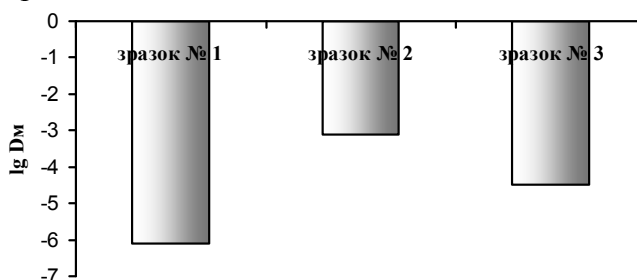


Рис. 3. Гістограма величин коефіцієнтів масоперенесення у перерізі по центру кожного зразка

Очевидно, що максимальне значення коефіцієнта масоперенесення спостерігається у зразку № 2, отриманого електроконтактним зварюванням через 4 шари алюмінієвої фольги, що свідчить про найбільш ефективне проходження дифузійних процесів у зоні з'єднання.

**Висновки і пропозиції.** Показано ефективність використання радіографічного методу для дослідження дифузійних процесів у процесі прецизійного електроконтактного зварювання.

Встановлено, що під час електроконтактного зварювання сплаву АМц через проміжні прошарки з алюмінію товщиною 11 мкм коефіцієнти масоперенесення в зоні контакту залежать від кількості прошарків.

Показано, що у всіх розглянутих випадках спостерігається перерозподіл радіоактивного ізоотопу в алюмінії на десятки та сотні мікрон в обидва боки від його початкового

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

розподілу. При цьому у стикі відзначається відсутність границі розділу на шліфах зварних зразків, що свідчить про утворення якісного зварного з'єднання.

Визначено оптимальну кількість прошарків для цього способу зварювання. Встановлено, що у процесі зварювання сплаву марки АМц дифузійна зона є максимальною у разі зварювання через 4 прошарки та становить близько 2000 мкм.

**Список використаних джерел**

1. Гуляев А. И. Технология и оборудование контактной сварки / А. И. Гуляев. – М. : Машиностроение, 1985. – 254 с.
2. Прецизійне електроконтактне точкове зварювання металевих матеріалів / О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, І. В. Завальна, С. В. Половецький // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки». – 2014. – № 2. – С. 104–111.
3. Новомлинець О. О. Способи зварювання тиском алюмінієвих сплавів з обмеженням рівня деформації / О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко // Ukraine – EU. Modern Technology, Business and Law: collection of international scientific papers : in 2 parts. Part 1. Modern Priorities of Economics. Engineering and Technologies. – Chernihiv : CNUT, 2016. – Pp. 371–373.
4. Энциклопедия современной техники [Электронный ресурс]. – М. : Советская энциклопедия, 1964. – Режим доступа : <http://www.bibliotekar.ru/spravochnik-181-enciklopedia-tehniki/index.htm>.
5. Ганєєв Т. Р. Особливості дифузійної взаємодії міді та молібдену під час зварювання тиском / Т. Р. Ганєєв // Технічні науки та технології. – 2015. – № 2 (2). – С. 55–61.
6. Миграция атомов в алюминии, меди и никеле при действии деформации и импульсного электрического тока / В. Ф. Мазанко, Д. С. Герцрикен, С. П. Ворона, В. М. Миронов, В. В. Омеляненко // Вісник Черкаського університету. – 2003. – Вип. 53. Сер. Фізико-математичні науки. – С. 21–37.
7. Миронов Д. В. Диффузия в меди и никеле при действии электропластического эффекта / Д. В. Миронов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2008. – Т. 10, № 3. – С. 744–747.
8. Сидоренко С. І. Аномальне масоперенесення. Закономірності та механізми : навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей вищих закладів освіти / С. І. Сидоренко, О. В. Філатов, С. М. Волошко. – К. : Політехніка, 2008. – 68 с.
9. Массоперенос в металлах при действии магнитных полей и импульсных деформаций / Д. В. Миронов, В. М. Миронов, Д. С. Герцрикен, В. Ф. Мазанко. – Самара : Самарский университет, 2011. – 276 с.
10. Конструкционные материалы : справочник / Б. Н. Арзамасов, В. А. Бростем, Н. А. Буше и др. ; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. – М. : Машиностроение, 1990. – 688 с.
11. Киселев С. П. О механизме сверхглубокого проникания частиц в металлическую преграду / С. П. Киселев, В. П. Киселев // Прикладная механика и техническая физика. – 2000. – Т. 41, № 2. – С. 37–44.
12. Usherenko S. M. Consideration of Results on superdeep penetration of particles into metallic obstacles / S. M. Usherenko, O. A. Dibov, O. I. Koval // Journal of Engineering and thermophysics. – 2002. – Vol. 75, № 2. – Pp. 508–512.
13. Маннинг Дж. Кинетика диффузии атомов в кристаллах / Дж. Маннинг ; пер. с англ. Д. Е. Темкина ; под ред. Б. Я. Любова. – М. : Мир, 1971. – 278 с.
14. Mehrer H. Diffusion in Solids: Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion-Controlled Processes / H. Mehrer. – Luxemburg: Springer Science & Business Media, 2007. – 654 p.

**References**

1. Guliaiev, A.I. (1985). *Tekhnologiya i oborudovaniie kontaktnoi svarki [Technology and equipment of resistance welding]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
2. Novomlynets, O.O., Oleksiienko, S.V., Zavalna, I.V. & Polovetskyi, Ye.V. (2014). Pretsyziine elektrokontaktne tochkove zvaryuvannya metalevykh materialiv [High-precision electrocontact spot welding of metallic materials]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tehnologichnoho universytetu – Visnyk of Chernihiv State Technological University*, no. 2, pp. 104–111 (in Ukrainian).
3. Novomlynets, O.O., Oleksiienko, S.V., Yushchenko, S.M. (2016). Spособы zvaryuvannya tyskom aliuminiievykh splaviv z obmezheniam rivnia deformatsii [Pressure welding technics of aluminium alloys with limitation of deformation level]. *Ukraine – EU. Modern Technology, Business and*

*Law: collection of international scientific papers: in 2 parts. Part 1. Modern Priorities of Economics, Engineering and Technologies.* Chernihiv: CNUT, pp. 371–373 (in Ukrainian).

4. *Entsiklopediia srovennoi tekhniki [Encyclopedia of modern technics]*. Moscow: Sovetskaia entsiklopediia. Retrieved from <http://www.bibliotekar.ru/spravochnik-181-enciklopedia-tehniki/index.htm>.

5. Hanieiev, T.R. (2015). Osoblyvosti dyfuziinoi vzaiedonii midi ta molibdenu pid chas zvariuvannia tyskom [Features of diffusion interaction of copper and molybdenum during the pressure welding]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technology*, no. 2 (2), pp. 55–61 (in Ukrainian).

6. Mazanko, V.F., Gertsriken, D.S., Vorona, S.P., Mironov, V.M. & Omelianenko, V.V. (2003). Migratsiia atomov v aliuminii, medi i nikelu pri deistvii deformatsii i impulsnogo elektricheskogo toka [Migration of atoms in aluminium, copper and nickel under deformation and pulse electric current]. *Visnyk Cherkaskoho universytetu – Cherkasy University Bulletin*, issue 53, pp. 21–37 (in Russian).

7. Mironov, D.V. (2008). Diffuziia v medi i nikelu pri deistvii elektroplasticheskogo efekta [Diffusion in copper and nickel under electroplastic effect]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk – Proceedings of the Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences*, vol. 10, no. 3, pp. 744–747 (in Russian).

8. Sydorenko, S.I., Filatov, O.V. & Voloshko, S.M. (2008). *Anomalne masoperenesennia. Zakonomirnosti ta mekhanizmy [Anomalous mass transfer. Regularities and mechanisms]*. Kyiv: Politekhnik (in Ukrainian).

9. Mironov, D.V., Mironov, V.M., Gertsriken, D.S. & Mazanko, V.F. (2011). *Massoperenos v metallakh pri deistvii magnitnykh polei i impulsnykh deformatsii [Mass transfer in metals under magnetic field and pulsed deformations]*. Samara: Samarskii universitet (in Russian).

10. Arzamasov, B.N. (ed.), Brosten, V.A., Bushe, N.A. et al. (1990). *Konstruktсионnye materially: spravochnik [Structural Materials: Handbook]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).

11. Kiselev, S.P. & Kiselev, V.P. (2000). O mekhanizme sverkhglubokogo pronikaniia chastits v metallicheskuu pregradu [On the mechanism of ultradeep penetration of particles into metal barrier]. *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaiia fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 41, no. 2, pp. 37–44 (in Russian).

12. Usherenko, S.M., Dibov, O.A., Koval, O.I. (2002). Consideration of Results on superdeep penetration of particles into metallic obstacles. *Journal of Engineering and thermophysics*, vol. 75, no. 2, pp. 508–512.

13. Manning, J., Liubov, B.Ia. (ed.) (1971). *Kinetika diffuzii atomov v kristalakh [Diffusion Kinetics for Atoms in Crystals]* (Temkin, D.E., Trans.). Moscow: Mir (in Russian).

14. Mehrer, H. (2007). *Diffusion in Solids: Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion-Controlled Processes*. Luxemburg: Springer Science & Business Media.

*Volodymyr Mazanko, Oleh Novomlynets, Serhii Oleksiienko, Svitlana Yushchenko*

## INVESTIGATION OF MASS TRANSFER PROCESSES DURING HIGH-PRECISION ELECTRIC RESISTANCE WELDING OF ALUMINIUM

**Urgency of the research.** Wide application of aluminium and its alloys in industry causes the necessity of improvement current getting ways of their permanent joints in solid phase.

**Target setting.** Investigation of diffusion processes and ascertainment of mass transfer regularities is the actual task for studying of joint formation process during welding in solid phase and it has a practical importance during the development of new welding technologies.

**Actual scientific researches and issues analysis.** One of the most perspective joining methods of aluminium in solid phase is high-precision electric resistance welding through intermediate layers of welded material. Their application promotes to activation of metal surface and localization of heat energy in the joint.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Mass transfer processes in joining zone and identification mechanisms of optimal quantity of interlayers during electric resistance welding of aluminium and alloys remain unstudied.

**The research objective.** Aim of the paper is the investigation of the influence of quantity interlayers on mass transfer processes during electric resistance welding of aluminium and alloys.

**The statement of basic materials.** Tryout of research technique has been carried out in terms of electric resistance welding of aluminium alloy AlMn1 with using of intermediate layers of aluminium foil by thickness 11  $\mu\text{m}$ . Welding has been implemented in next conditions: the current density 300-350  $\text{A}/\text{mm}^2$ ; the specific pressure 2-3 MPa; the duration current impulse 0.1-1 sec. The investigation of mass transfer characteristics has been carried out by the radioactive tracer technique.

**Conclusions.** Features of mass transfer during electric resistance welding of alloy AlMn1 through interlayers have been examined. The dependence of mass transfer coefficient on the interlayers' quantity has been determined. It has been indicated that the diffusion zone width is maximal during welding through four layers.

**Key words:** aluminium, resistance welding, intermediate layer, mass transfer, diffusion interaction, radioactive tracer, welded joint.

*Владимир Мазанко, Олег Новомлинец, Сергей Олексіенко, Светлана Ющенко*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ПРЕЦИЗИОННОЙ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ СВАРКЕ АЛЮМИНИЯ

*В связи с широким применением алюминия и его сплавов во многих отраслях промышленности актуальной задачей является усовершенствование существующих способов получения их неразъемных соединений в твердой фазе. Одним из перспективных способов соединения алюминия в твердой фазе является прецизионная электроконтактная сварка через промежуточные слои из свариваемого материала. Важным вопросом при изучении процесса образования соединения во время электроконтактной сварки является исследование процессов массопереноса в металле.*

*Проведено исследование электроконтактной сварки на модельной паре АМц-АМц с использованием промежуточных слоев из алюминиевой фольги. С помощью метода радиоактивных изотопов определены особенности диффузионного взаимодействия и массопереноса алюминия в зоне контакта. Установлено оптимальное количество промежуточных слоев для электроконтактной сварки алюминиевого сплава марки АМц.*

**Ключевые слова:** алюминий; электроконтактная сварка; промежуточная прослойка; массоперенос; диффузионное взаимодействие; радиоактивный изотоп; сварное соединение.

**Мазанко Володимир Федорович** – доктор технічних наук, професор, завідувач відділу фізики нестационарного масопереносу, Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України (бульвар Академіка Вернадського, 36, м. Київ, 03680, Україна).

**Мазанко Владимир Федорович** – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом физики нестационарного массопереноса, Институт металофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины (бульвар Академика Вернадского, 36, г. Киев, 03680, Украина).

**Mazanko Volodymyr** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Non-stationary Mass-transfer Physics, G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics (36 Academic Vernadskyi Blvd., 03680 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** vmazanko@imp.kiev.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-2494-3973>

**Scopus Author ID:** 6603857568

**Новомлинець Олег Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

**Новомлинец Олег Александрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

**Novomlynets Oleh** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** oon1@ukr.net

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-0774-434X>

**Researcher ID:** F-8166-2014

**Scopus Author ID:** 56938958300; 6507741249

**Олексіенко Сергій Владиславович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

**Олексіенко Сергей Владиславович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

**Oleksiienko Serhii** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** sv.oleks@ukr.net

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5475-4439>

**Researcher ID:** F-8197-2014

**Scopus Author ID:** 57190370561

**Ющенко Світлана Михайлівна** – асистент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

**Ющенко Светлана Михайловна** – ассистент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

**Yushchenko Svitlana** – assistant Lecturer of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** rasssveta@ukr.net

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-0863-9020>

**Researcher ID:** F-7741-2014

**Scopus Author ID:** 57190373626