

## ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ БІМЕТАЛЕВИХ ТОНКОЛИСТОВИХ З'ЄДНАНЬ Al–Ti МЕТОДОМ ДИФУЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ У ВАКУУМІ

Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинець, Є.В. Половецький

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Приведено результати досліджень ефективності застосування технології дифузійного зварювання в вакуумі для отримання тонколистового біметалу алюміній-титан розміром 120×120 мм. Досліджено вплив параметрів зварювання на мікроструктуру та механічні властивості з'єднань. Встановлено, що зварювання матеріалів з фольги ускладнене внаслідок її низької деформаційної здатності. Використання при зварюванні в якості «активаторів» термічно стійких порошоків з SiC та WC не дозволяє отримати якісні з'єднання через впровадження твердих часточок в матеріал, що зварюється, та утворення дефектів у вигляді наскрізних отворів. Показано, що використання сталеві сітки для активації пластичної деформації на контактних поверхнях фольги дозволяє суттєво знизити тиск зварювання та отримати бездефектні з'єднання між титаном та алюмінієм, з вищими в 1,7 рази значеннями міцності у порівнянні з шаруватими з'єднаннями Al+Ti, отриманими без використання сітки. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 6.

*Ключові слова:* алюміній, титан, фольга, біметалеві з'єднання, дифузійне зварювання

Панелі зі сплавів алюмінію завдяки низькій питомій вазі та корозійній стійкості в атмосферних умовах знайшли широке використання в авіакосмічній галузі та машинобудуванні. Попередні дослідження авторів роботи [1] показали, що міцність тришарової алюмінієвої панелі обмежується міцністю стільникового заповнювача. Для розширення можливостей застосування подібних конструкцій існує необхідність в заміні матеріалу заповнювача на більш стійкий до стиснення. Так, в роботі [2] було запропоновано замінити заповнювач зі сплаву алюмінію АЦ5К5 на сплав титану ВТ6С товщиною 3...4 мм. Але, з урахуванням того, що питома вага титану вдвічі більша, ніж у алюмінію, його використання в якості заповнювача призведе до суттєвого збільшення загальної ваги конструкції, що при використанні в авіакосмічній галузі небажано.

Розробка нових матеріалів, які мають підвищені механічні властивості, для роботи в специфічних умовах навантаження в галузях авіа-, ракетобудування, хімічної промисловості тощо, є актуальною. В останні роки значну увагу науковців привернули шаруваті композиційні матеріали (ШКМ) через можливість поєднувати в собі властивості металів, що входять до їх складу [3–5]. Алюміній завдяки його низькій щільності, високій теплопровідності та корозійній стійкості широко використовується в різних галузях. Титан при відносно низькій щільності володіє антикорозійними властивостями та високою міцністю. Легкі шаруваті композиційні матеріали Al–Ti, що поєднують в собі властивості обох металів, мають ви-

сокі значення міцності, жорсткості і ударної в'язкості [6, 7]. З огляду на це виникає необхідність в розробці технології отримання таких ШКМ для подальшого використання при виготовленні стільникового заповнювача.

В попередній роботі авторів [8] було показано, що з'єднання фольги з Al та Ti на режимах зварювання нижчих за температуру плавлення алюмінію (660 °C) запобігає утворенню суцільного інтерметалідного прошарку між шарами цих металів. З огляду на це доцільно застосовувати методи з'єднання в твердій фазі, зокрема перспективним є дифузійне зварювання в вакуумі (ДЗВ). Відомо, що для покращення зварювання необхідно створити в стику умови для збільшення деформацій зсуву, що може бути досягнуто завдяки використанню активаторів пластичної деформації у вигляді перфорованих прошарків, сітки або порошкової суміші. Автори роботи [9] при зварюванні тонкої біметалевої фольги пропонують використовувати рухомі підкладки з порошкового матеріалу.

З урахуванням сказаного вище, метою даної роботи було дослідити особливості дифузійного зварювання у вакуумі тонколистових матеріалів з алюмінію і титану з використанням активаторів пластичної деформації у вигляді порошку або сталеві сітки.

В якості матеріалу для досліджень була використана фольга з алюмінієвого сплаву АД1 і титанового сплаву ВТ1-0 з товщиною відповідно 150 та 60 мкм. Розмір листів становив 120×120 мм. Хімічний склад матеріалів приведено в таблиці. Перед зварюванням зразки зачищали за допомогою шабера та знежирювали спиртом.

Фальченко Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3028-2964>, Петрушинець Л.В. – <https://orcid.org/0000-0001-7946-3056>, Половецький Є.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8113-0434>

© Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинець, Є.В. Половецький, 2020

Хімічний склад сплавів АД1 і ВТ1-0 [10]

Сплав	Вміст елементів, мас. %								
	Al	Ti	Fe	Si	Mn	Cu	Mg	Zn	Сума домішок
АД1	Основа	0,15	0,3	0,3	0,025	0,02	0,05	0,1	–
ВТ1-0	–	Основа	0,025	0,10	–	–	–	–	0,30

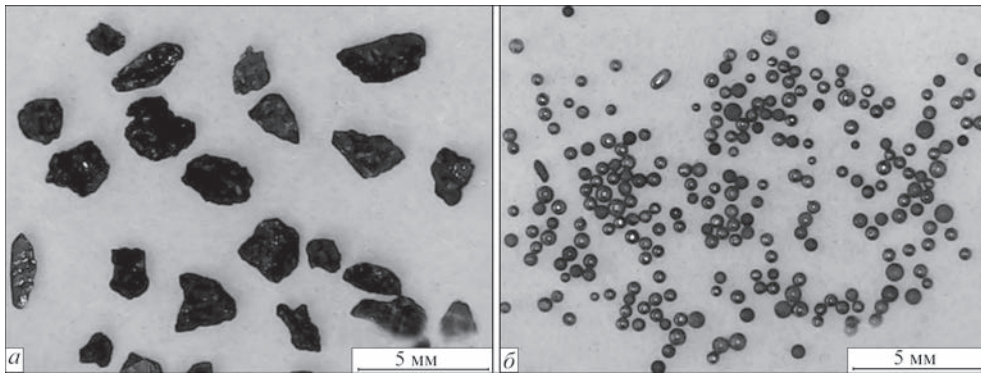


Рис. 1. Вигляд порошку SiC (а) і WC (б), який використовували в дослідженнях при зварюванні фольги алюмінію з титаном

Зварювання проводили у вільному стані у вакуумній камері установки П115, яка оснащена системою радіаційного нагріву. Збірку зі зразками встановлювали між масивними штоками зі сталі з відшліфованими поверхнями.

Нагрівання здійснювали молібденовими нагрівачами, розташованими навколо зразків. Температуру нагрівання контролювали хромель-алюмелевою термопарою, зафіксованою на оснащенні. Тиск до зразків прикладали від пресу через нижній шток. Контроль значення тиску здійснювали за допомогою динамометру.

Для локалізації деформації по поверхні фольги при зварюванні використовували підкладки з порошку SiC або WC, або металеву сітку з нержавіючої сталі 12Х18Н9Т товщиною 1 мм з розміром комірки 4×4 мм.

При виборі порошку виходили з того, що він повинен бути термічно стабільний при температурі зварювання. Застосовували порошок SiC неправильної форми з фракцією часток відповідно 2...3 мм та сферичний порошок WC з фракцією часток 0,5...1,0 мм (рис. 1).

Зварювання проводили на режимі: температура  $T_{зв} = 580 \text{ }^\circ\text{C}$ , тиск  $P_{зв} = 5...20 \text{ МПа}$ , тривалість зварювання  $t_{зв} = 20 \text{ хв}$ .

Аналіз структурних характеристик фольги і зварних з'єднань проводили за допомогою скануючого електронного мікроскопу CAMSCAN 4, оснащеного системою енергодисперсійного аналізу EDX INCA 200 для локального хімічного складу на плоских зразках, а також оптичного мікроскопу Viwily USB 500. Шліфи поперечного перерізу зварних з'єднань підготовували за стандартною методикою з використанням шліфувально-полірувального устаткування фірми Struers.

При дослідженні механічних властивостей на стиснення використовували цифровий контролер тиску фірми «KOLI» марки ХК3118Т1 і датчик

тиску фірми «CAS» марки MNC-1 з робочим інтервалом від 0 до 1000 кг.

Проведений нами літературний огляд [8] показав, що для отримання шаруватого матеріалу з фольги Al та Ti без утворення в стикі суцільного інтерметалідного прошарку доцільно застосовувати дифузійне зварювання в вакуумі.

При зварюванні тонкої фольги зі сплавів алюмінію необхідно брати до уваги наступні чинники:

- алюміній на поверхні має щільну, термічно стійку оксидну плівку;

- сама фольга як матеріал внаслідок виготовлення способами прокатки має нагартвану поверхню;

- зі зменшенням товщини фольги її зварювання ускладнюється внаслідок зменшення обсягу металу, здатного до пластичної деформації.

Проведені нами дослідження при зварюванні тонких матеріалів у вигляді фольги алюмінію (Al+Al) товщиною 50...200 мкм на рекомендованих в довідниковій літературі режимах [11] показали, що в стикі спостерігаються дефекти у вигляді пор. Для усунення дефектів при зварюванні

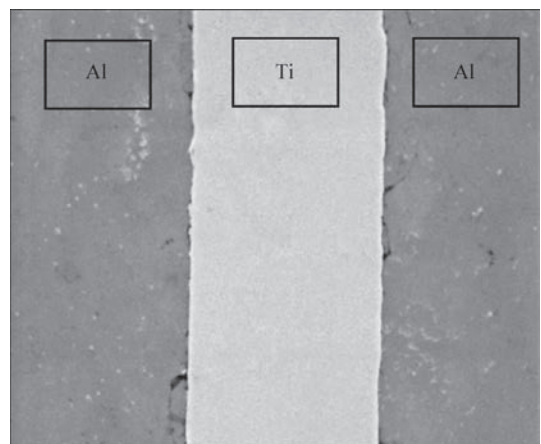


Рис. 2. Мікроструктура з'єднання Al+Ti, отриманого у вільному стані на режимі:  $T_{зв} = 580 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_{зв} = 20 \text{ МПа}$ ,  $t = 20 \text{ хв}$ .

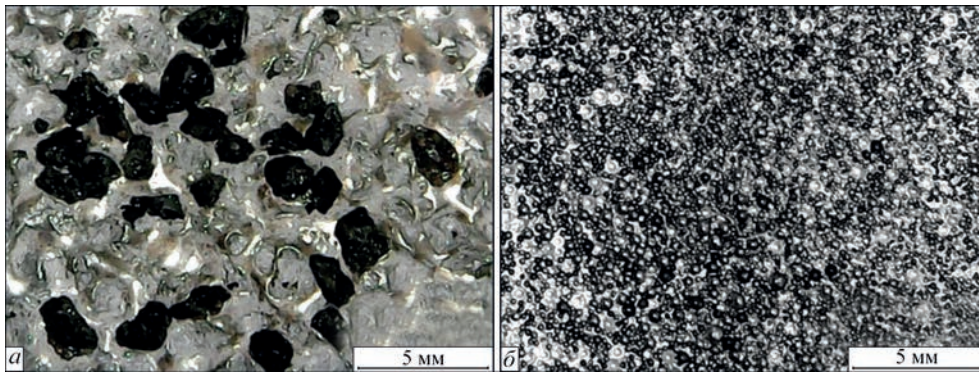


Рис. 3. Вигляд поверхні з'єднання Al+Ti після зварювання з використанням часток SiC (а) і WC (б), отриманих на режимі  $T_{зв} = 580\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{зв} = 5\text{ МПа}$ ,  $t = 20\text{ хв}$ .

фольги необхідно підвищувати значення параметрів процесу, а саме температуру з 500 до 600 °С та тиск зварювання з 10...15 до 40 МПа [1]. Але при зварюванні алюмінієвої та титанової фольги цей технологічний прийом результатів не дає, хоча масивні матеріали із цих сплавів мають задовільну зварюваність і при більш низьких параметрах зварювання  $T_{зв} = 560\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{зв} = 20\text{ МПа}$  [12].

Як показали наші дослідження, зварювання тонколистових біметалевих матеріалів Al+Ti (товщиною до 200 мкм) при підвищених значеннях тиску до 20 МПа ускладнено через низьку деформаційну здатність фольги. В зоні з'єднання спостерігається щільний контакт між титаном та алюмінієм з окремими порами та тріщинами (рис. 2). З урахуванням розмірів зразків використання таких зусиль призводить до значної деформації зварювального оснащення та його швидкого виходу з ладу.

Відповідно до прийому, описаному в [9], для зварювання між фольгою та оснащенням додатково розміщували прошарок з порошку SiC або WC, що створювало в окремих точках деформації зсуву та давало змогу підвищити деформаційну здатність фольги в цілому. Застосування порошку дозволило знизити тиск зварювання з 20 до 5 МПа.

Як показали проведені дослідження, при використанні порошку з SiC відбувається впровадження його часток в біметалевий матеріал, що зварюється, з утворенням значних за розміром, наскрізних, отворів нерівної форми (рис. 3, а). Також під впливом термодформаційного циклу зварювання окремі гранули SiC частково огортаються алюмінієм, що унеможливило їх подальше видалення без пошкодження біметалевого матеріалу.

Заміна порошку SiC на WC з частками сферичної форми дозволяє знизити дефектність поверхонь з'єднань: розміри отворів зменшуються, також в них зникають гострі кути (рис. 3, б). Проте зменшення розмірів часточок та їх правильна форма сприяють більш інтенсивному «поглинанню» порошку поверхнею алюмінієвої фольги.

Загальними недоліками при використанні обох «порошків-активаторів» є наступне:

- високі значення шорсткості поверхонь;
- нерівномірний розподіл часток по поверхні фольги;
- впровадження твердих часточок в матеріал, що зварюється;
- утворення дефектів у вигляді наскрізних отворів;
- збільшення ваги біметалевого зразка.

Виходячи з викладеного вище, можна зробити висновок, що застосування порошку для виготовлення тонколистового біметалевого матеріалу не дозволяє отримати з'єднання, придатні для подальшого використання.

З метою підвищення деформаційної здатності фольги з одночасним зниженням значення тиску при зварюванні в подальшому було використано в якості активатора пластичної деформації сітки зі сталі. Даний технологічний прийом дозволяє рівномірно локалізувати пластичну деформацію по всій поверхні фольги. На мікроструктурі з'єднань, отриманих з використанням сітки, між алюмінієм і титаном дефекти відсутні (рис. 4).

Для оцінки міцності отриманого біметалевого матеріалу проводили механічні випробування на стиснення. Для цього з біметалевих пластин вирізали смуги 70×12 мм та згортали з них циліндри з перекриттям країв 5 мм. Для запобігання розгортання циліндрів під час випробувань на ділян-

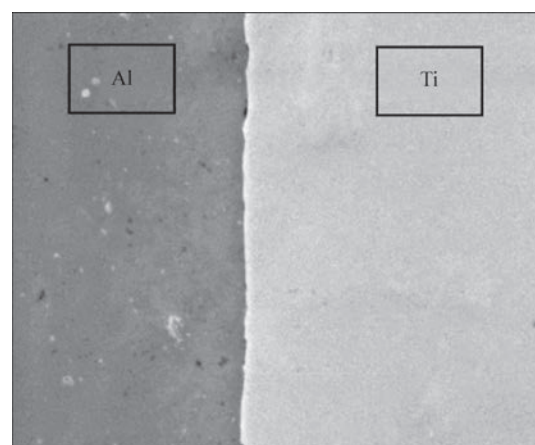


Рис. 4. Мікроструктура з'єднання Al+Ti, отриманого з використанням сітки на режимі:  $T_{зв} = 580\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{зв} = 5\text{ МПа}$ ,  $t = 20\text{ хв}$ .

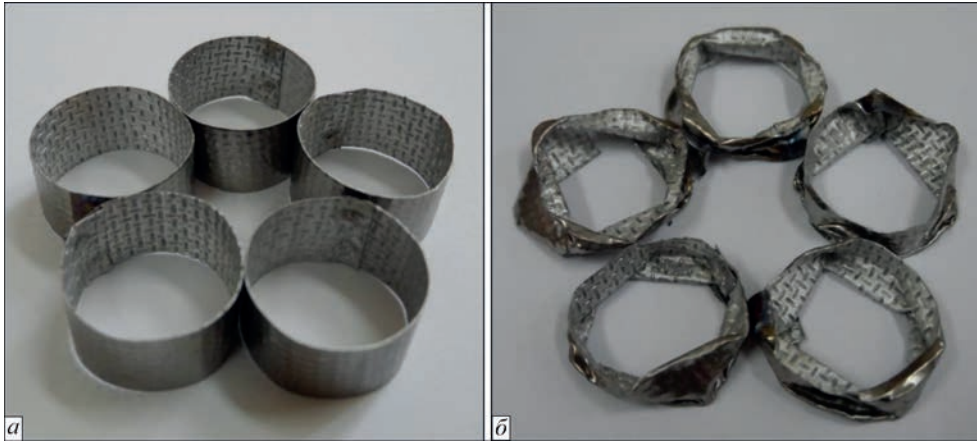


Рис. 5. Загальний вигляд циліндричних зразків до (а) і після (б) випробувань на стиснення

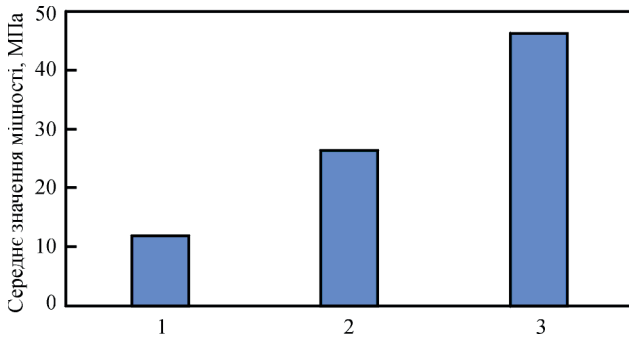


Рис. 6. Результати механічних випробувань на стиснення циліндричних зразків: 1 – фольга з вихідного алюмінію; 2 – біметал Al+Ti; 3 – біметал Al+Ti, отриманий з використанням сітки

ці покриття матеріалу методом контактної зварювання ставили дві прихватки. Далі сформовані таким чином зразки стискали з контрольованим ступенем осадження в 50 % від початкової висоти. На рис. 5 наведений зовнішній вигляд зразків до і після випробувань на стиснення.

Отримані результати показали, що міцність біметалевих з'єднань Al+Ti, отриманих з використанням сітки в 3,8 рази вища ніж у з'єднань з чистого алюмінію (46,3 проти 12,1 МПа), та в 1,7 рази перевищує міцність з'єднань Al+Ti, отриманих без використання сітки (46,3 проти 26,5 МПа) (рис. 6).

Також було встановлено, що на біметалевих зразках, отриманих з використанням сітки при випробуваннях на стиснення, відшарування фольги не відбувається.

**Висновки**

1. Зварювання тонколистових біметалевих матеріалів Al+Ti ускладнено через низьку деформаційну здатність фольги. В зоні з'єднання зразків спостерігаються окремі пори та тріщини.

2. Використання активаторів пластичної деформації з тугоплавких порошків SiC та WC не дозволяє отримати якісні біметалеві з'єднання перш за все через впровадження твердих часточок в матеріал, що зварюється, та утворення дефектів у вигляді наскрізних отворів.

3. Використання сталеві сітки в якості активатора пластичної деформації на контактних поверхнях фольги дозволяє суттєво знизити тиск зварювання та отримати бездефектні з'єднання між титаном та алюмінієм, з вищими значеннями міцності у порівнянні з шаруватими з'єднаннями Al+Ti, отриманими без використання сітки.

**Список літератури/References**

- Петрушинець Л. В., Фальченко Ю. В., Федорчук В. С., Шинкаренко В. С. (2018) Можливості виготовлення зварних трьохшарових сотових панелей з алюмінієвих сплавів. *Автоматическая сварка*, 7, 31-36.
- Башурин А.В., Мастихин Е.Ю., Колмыков В.И. (2010) Диффузионная сварка пустотелых биметаллических панелей. *Заготовительные производства в машиностроении*, 1, 13-15.
- Kim, J.S., Park, J., Lee, K.S. et al. (2016) Correlation between bonding strength and mechanical properties in Mg/Al two-ply clad sheet. *Metals and Materials International*, 22, 771-780.
- Ma, M., Huo, P., Liu, W.C. et al. (2015) Microstructure and mechanical properties of Al/Ti/Al laminated composites prepared by roll bonding. *Materials Science and Engineering: A*, 636, 301-310.
- Zhang, B., Kou, Y., Xia, Y.Y., Zhang, X. (2015) Modulation of Strength and Plasticity of Multiscale Ni/Cu Laminated Composites. *Materials & Design*, 636, 216-220.
- Patselov, A., Greenberg, B., Gladkovskii et al. (2012) Layered Metal-intermetallic Composites in Ti-Al System: Strength Under Static and Dynamic Load. *AASRI Proceedings*, 3, 107-112.
- Hailiang, Yu, Cheng, Lu, A. Kiet Tieu et al. (2016) Annealing effect on microstructure and mechanical properties of Al/Ti/Al laminate sheets. *Materials Science & Engineering A*, 13, 195-204.
- Falchenko, Yu. V., Petrushynets, L. V., Polovetskii E. V. (2020) Peculiarities of producing layered metal composite materials on aluminium base. *The Paton Welding J.*, 4, 9-18.
- Лебедев Н.В., Агольцов А.Я., Семочкин А.Н. (1980) Сварка давлением алюминиевой фольги с медной. *Вопросы атомной науки и техники*, 1, 163-166.
- Карпачев Д.Г., Доронькин Е.Д., Цукерман С.А. и др. (2001) *Цветные металлы и сплавы. Справочник*. Нижний Новгород, Вента-2.
- Козаков Н.Ф. (1968) *Диффузионная сварка в вакууме*. Москва, Машиностроение.
- Григоренко Г.М., Половецкий Е.В., Фальченко Ю.В. и др. (2012) Влияние температуры подогрева на структуру биметаллических соединений АМг6 в твердом состоянии с ВТ6 способом ДСВ. *Современная электрометаллургия*, 4, 37-41.

## References

- Petrushinets, L.V., Falchenko, Yu.V., Fedorchuk, V.E., Shinkarenko, V.S. (2018) Possibilities of manufacturing three-layer welded honeycomb panels from aluminium alloys. *The Paton Welding J.*, **7**, 25–29.
- Bashurin, A.V., Mastikhin, E.Yu., Kolmykov, V.I. (2010) Diffusion welding of hollow bimetal panels. *Zagotovit. Proizvodstva v Mashinostroenii*, **1**, 13–15 [in Russian].
- Kim, J.S., Park, J., Lee, K.S. et al. (2016) Correlation between bonding strength and mechanical properties in Mg/Al twoply clad sheet. *Metals and Materials Int.*, **22**, 771–780.
- Ma, M., Huo, P., Liu, W.C. et al. (2015) Microstructure and mechanical properties of Al/Ti/Al laminated composites prepared by roll bonding. *Mater. Sci. & Engin.: A*, **636**, 301–310.
- Zhang, B., Kou, Y., Xia, Y.Y., Zhang, X. (2015) Modulation of strength and plasticity of multiscale Ni/Cu laminated composites. *Materials & Design*, **636**, 216–220.
- Patselov, A., Greenberg, B., Gladkovskii et al. (2012) Layered metal-intermetallic composites in Ti–Al system: Strength under static and dynamic load. *AASRI Procedia*, **3**, 107–112.
- Hailiang, Yu, Cheng, Lu, A. Kiet Tieu et al. (2016) Annealing effect on microstructure and mechanical properties of Al/Ti/Al laminate sheets. *Mater. Sci. & Engin. A*, **13**, 195–204.
- Falchenko, Yu.V., Petrushynets, L.V., Polovetskii E.V. (2020) Peculiarities of producing layered metal composite materials on aluminium base. *The Paton Welding J.*, **4**, 9–18.
- Lebedev, N.V., Agoltsov, A.Ya., Semochkin, A.N. (1980) Pressure welding of aluminium foil to copper one. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*, **1**, 163–166 [in Russian].
- Karpachev, D.G., Doronkin, E.D., Tsukerman, S.A. et al. (2001) *Non-ferrous metals and alloys*: Refer. Book. Nizhni Novgorod, Venta-2 [in Russian].
- Kozakov, N.F. (1968) *Vacuum diffusion welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- Grigorenko, G.M., Polovetsky, E.V., Falchenko, Yu.V. et al. (2012) Influence of preheating temperature on structure of bimetal joints of AMg6 in solid state with VT6 using VDW method. *Sovrem. Elektrometall.*, **4**, 37–41 [in Russian].

## PECULIARITIES OF PRODUCING Al-Ti BIMETAL SHEET JOINTS BY THE METHOD OF VACUUM DIFFUSION WELDING

Iu.V. Falchenko, L.V. Petrushynets, Ye.V. Polovetskyi

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Given are the results of investigation of the effectiveness of application of vacuum diffusion welding technology to obtain aluminium-titanium bimetal sheets of 120×120 mm size. The effect of welding parameters on the joint microstructure and mechanical properties was studied. It is established that welding of foil materials is complicated, because of its low deformability. Application of thermally stable SiC and WC powders as «activators» in welding does not allow producing sound joints, because of hard particles embedding into the material being welded, and formation of defects in the form of through-thickness holes. It is shown that application of steel net for activation of plastic deformation on the foil contact surfaces, allows a significant lowering of welding pressure and producing defect-free joints between titanium and aluminium, with 1.7 times higher strength values, compared to layered Al+Ti joints, produced without using the net. 12 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

*Keywords: aluminium, titanium, foil, bimetal joints, diffusion welding*

Надійшла до редакції 07.07.2020

**ХІХ МІЖНАРОДНИЙ  
ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2020**  
МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

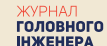
**24 - 27  
листопада**



### ОРГАНІЗАТОР:

**Міжнародний виставковий центр**

Генеральний інформаційний партнер: **ОФОРМЛЕННЯ**  
Ексклюзивний медіа партнер: **ЖУРНАЛ ГОЛОВНОГО ІНЖЕНЕРА**



Технічний партнер:



**Міжнародний виставковий центр  
Україна, 02002, Київ  
Броварський пр-т, 15  
"Лівобережна"**

☎ (044) 201-11-65, 201-11-56, 201-11-58  
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua  
www.iec-expo.com.ua, www.mvc.ukr  
www.tech-expo.com.ua