

## ДЕЯКІ ПЕРЕВАГИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ 1201, ОТРИМАНИХ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ

А.Г. Покляцький, С.І. Мотруніч, І.М. Клочков, Т.М. Лабур

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)

У статті проаналізовані структурні особливості, характеристики міцності та стійкості до зародження та розповсюдження експлуатаційних тріщин стикових з'єднань алюмінієвого сплаву 1201 товщиною 2 мм, отриманих зварюванням тертям з перемішуванням (ЗТП) та аргонодуговим зварюванням неплавким електродом в аргоні (АДЗНЕ). Показано, що при ЗТП в результаті інтенсивної пластичної деформації металу в ядрі шва формується дрібнокристалічна структура з розміром зерен 5...6 мкм. У зоні термомеханічного впливу спостерігаються деформовані протяжні зерна, орієнтовані у напрямку переміщення пластифікованого металу, та дрібні рівновісні зерна, розмір яких коливається в межах 4...12 мкм. Тоді як при АДЗНЕ цього сплаву метал шва має характерну литу структуру з великими (0,20...0,25 мм) дендритами. Відсутність проплавів і підсилень на швах, отриманих ЗТП, дозволяє уникнути високих рівнів концентрації напружень у місцях переходу від шва до основного матеріалу, які негативно впливають на експлуатаційні та ресурсні характеристики зварних з'єднань. Особливості формування нероз'ємних з'єднань у твердій фазі при ЗТП сприяють також зменшенню ступеня розміщення металу в зоні зварювання та підвищенню їх межі міцності, стійкості до зародження та розповсюдження експлуатаційних тріщин. Бібліогр. 15, рис. 7.

*Ключові слова:* мікроструктура, твердість, межа міцності, стійкість до зародження та розповсюдження експлуатаційних тріщин

Протягом останніх двадцяти років зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) широко застосовується у багатьох країнах світу для укрупнення плоских та об'ємних панелей, які використовуються при виготовленні корпусів суден, поромів, вагонів і т. п. [1–5]. Знайшов своє застосування такий процес отримання нероз'ємних з'єднань у твердій фазі в автомобілебудуванні, електротехніці, будівництві, а також в аерокосмічній техніці, включаючи паливні баки для рідкого водню та рідкого кисню [2, 6–9]. У нас для виготовлення зварних конструкцій, які працюють при низьких температурах, використовується термічно зміцнюваний сплав 1201 системи легування Al–Cu–Mn, що містить 5,8...6,8 % Cu та 0,2...0,4 % Mn. Він має високу (>425 МПа) міцність і зберігає пластичність до –253 °С. Крім того, наявність у сплаві марганцю і титану забезпечує йому значну жаростійкість. Задовільна зварюваність сплаву дозволяє широко використовувати його для виготовлення зварних конструкцій, які працюють тривалий час при температурах до 200 °С, а короткочасно – до 300 °С. Але при зварюванні плавленням в результаті розплавлення певного об'єму з'єднуваних матеріалів та зварювального дроту в загальній зварювальній ванні та наступної їх кристалізації в металі шва та прилеглих до нього ділянках відбуваються значні структурні перетворення і доволі часто виникають дефекти у вигляді

пор, макровключень оксидної плівки та гарячих тріщин. Внаслідок цього міцність зварних з'єднань сплаву 1201, отриманих зварюванням плавленням, у більшості випадків не перевищує 70 % від міцності основного матеріалу [10, 11].

При ЗТП формування шва відбувається у твердій фазі в результаті нагрівання за рахунок тертя деякого об'єму з'єднуваних матеріалів до пластичного стану і його перемішування спеціальним інструментом у замкнутому просторі, обмеженому підкладкою та робочими поверхнями бурта і наконечника інструмента. Тобто, процес утворення нероз'ємного з'єднання відбувається без застосування дугового розряду та без розплавлення і кристалізації металу, і при цьому немає потреби додатково використовувати присадний дріт і захисний газ. Завдяки цьому процес ЗТП має ряд суттєвих переваг у порівнянні зі зварюванням плавленням. Серед них варто зазначити формування дрібнокристалічної структури швів, зниження ступеня розміщення з'єднуваних матеріалів і збереження їх хімічного складу, відсутність характерних для зварювання плавленням дефектів і підвищення механічних властивостей зварних з'єднань [12, 13].

Мета даної роботи – визначити переваги процесу ЗТП у порівнянні з АДЗНЕ при отриманні стикових з'єднань тонколистового алюмінієвого сплаву 1201.

Покляцький А.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-4101-2206>, Мотруніч С.І. – <https://orcid.org/0000-0002-8841-8609>

Клочков І.М. – <https://orcid.org/0000-0001-6490-8905>, Лабур Т.М. – <https://orcid.org/0000-0002-4064-2644>

© А.Г. Покляцький, С.І. Мотруніч, І.М. Клочков, Т.М. Лабур, 2021

Для досліджень використовували листи алюмінієвого сплаву 1201 товщиною 2 мм. Стикові з'єднання отримували аргондуговим зварюванням неплавким електродом в аргоні зі швидкістю 20 м/год на струмі 145 А за допомогою зварювальної установки MW-450 («Fronius», Австрія) з використанням присадного дроту Св1201 діаметром 1,6 мм. ЗТП здійснювали на розробленій в ІЕЗ ім. Є.О. Патона лабораторній установці, використовуючи спеціальний інструмент з конічним наконечником і діаметром бурта 12 мм [14], швидкість обертання якого становила 1420 об/хв., а швидкість лінійного переміщення 14 м/год. З отриманих зварних з'єднань виготовляли шліфи для дослідження структурних особливостей швів і зразки з шириною робочої частини 15 мм для визначення їх межі міцності при одноісному розтягуванні відповідно до ГОСТ 6996-66. Зразки, отримані АДЗНЕ, випробовували як зі знятими до рівня основного матеріалу проплавами, так і з додатково зачищеними підсиленнями швів. Механічні випробування зразків здійснювали на універсальному сервогідролічному комплексі MTS 318.25. Характеристики опору руйнуванню основного матеріалу та зварних з'єднань визначали на зразках Кана [15] з гострим ( $R = 0,1$  мм) надрізом, який забезпечує зародження тріщини при відносно низькому енергетичному рівні, за допомогою універсальної випробувальної машини РУ-5. Надріз розташовували таким чином, щоб його вершина співпадала з віссю шва. Межу міцності при одночасному розтягуванні та згинанні зразка та питому роботу розповсюдження тріщини визначали використовуючи отримані в процесі випро-

бувань діаграми «навантаження-деформація». Твердість металу вимірювали на лицьовій поверхні зачищених з'єднань. Ступінь розміцнення металу в зоні зварювання оцінювали на приладі «ROCKWELL» при навантаженні  $P = 600$  Н. Оцінку структурних особливостей зварних з'єднань здійснювали з використанням оптичного електронного мікроскопа МИМ-8.

В результаті проведених досліджень встановлено, що особливості процесу ЗТП призводять до утворення специфічної структури зварних з'єднань (рис. 1). У них вирізняються центральна частина (ядро) шва, сформована в основному в зоні дії робочих поверхонь наконечника інструмента (D), суміжна з нею зона термомеханічного впливу, де метал зазнавав термічного і механічного впливу внаслідок обертання та лінійного переміщення інструмента (C), а також зона термічного впливу (B), в якій структурні зміни основного металу (A) обумовлені лише зміною температури, як і при зварюванні плавленням.

Аналіз мікроструктури поперечних перерізів отриманих зварних стикових з'єднань сплаву 1201 товщиною 2 мм свідчить про те, що в ядрі шва в результаті інтенсивної пластичної деформації металу формується дрібнокристалічна структура з розміром зерен 5...6 мкм. При цьому розмір зерен та інтерметалідних включень у 5...7 разів менший, ніж в основному матеріалі, завдяки чому значно зростає об'ємна частка їх границь. У зоні термомеханічного впливу спостерігаються деформовані протяжні зерна, орієнтовані у напрямку переміщення пластифікованого металу, та дрібні рівновісні зерна, розмір яких коливається в межах 4...12 мкм. Тоді як при аргон-

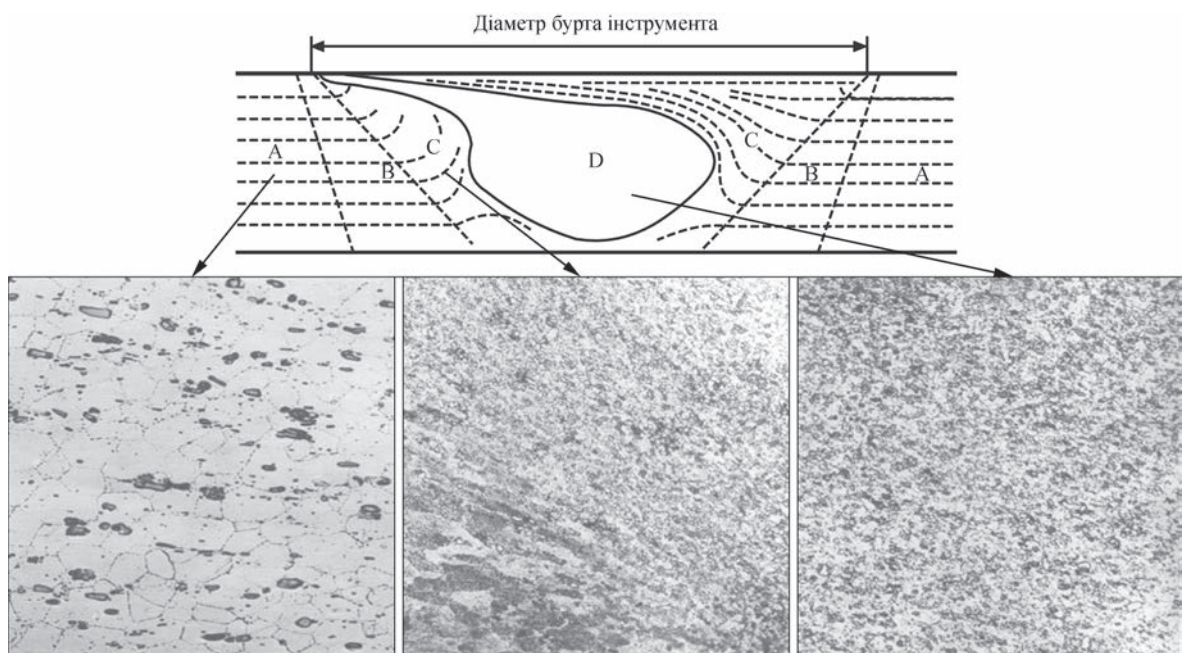


Рис. 1. Схематичне зображення характерних зон зварного з'єднання, отриманого ЗТП, і мікроструктура ( $\times 400$ ) металу в цих зонах стикового з'єднання сплаву 1201 товщиною 2 мм

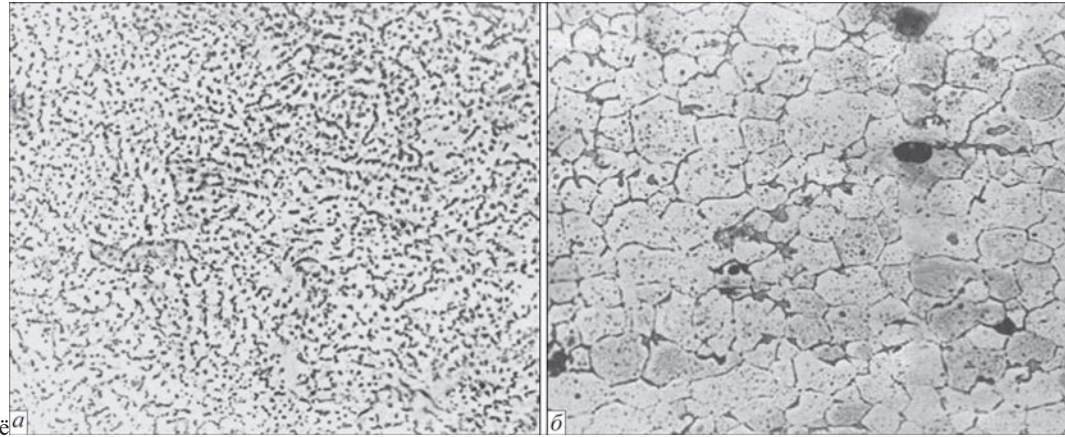


Рис. 2. Мікроструктура ( $\times 400$ ) металу шва (а) та зони сплавлення його з основним матеріалом (б), отримані при АДЗНЕ сплаву 1201 товщиною 2 мм з використанням присадного дроту Св1201

дуговому зварюванні неплавким електродом цього сплаву з використанням присадного дроту Св1201 внаслідок кристалізації розплавленого металу у шві формується характерна лита структура металу з доволі великими (0,20...0,25 мм) дендритами (рис. 2). В зоні сплавлення шва з основним матеріалом під впливом високотемпературного нагрівання металу при формуванні нероз'ємного з'єднання відбувається часткове оплавлення структурних складових границь зерен, в результаті чого на цій ділянці утворюється груба суцільна сітка крихких дрібнозернистих прошарків, які негативно впливають на механічні властивості таких з'єднань.

Наглядно проілюструвати структурні перетворення металу при ЗТП внаслідок його інтенсивної пластичної деформації може мікроструктура поверхні зварного з'єднання, представлена на рис. 3. На ньому чітко видно зміну розмірів зерен зварюваного металу біля краю бурта інструмента на межі зони термічного впливу (зліва) із зоною термомеханічного впливу (справа). На ділянках, які безпосередньо взаємодіяли з робочими поверхнями інструмента (зона термомеханічного впливу і шов) відбувається різке подрібнення зерен зварюваного металу.

В результаті проведених досліджень встановлено, що завдяки формуванню нероз'ємних з'єднань на підкладці без канавки і без використання

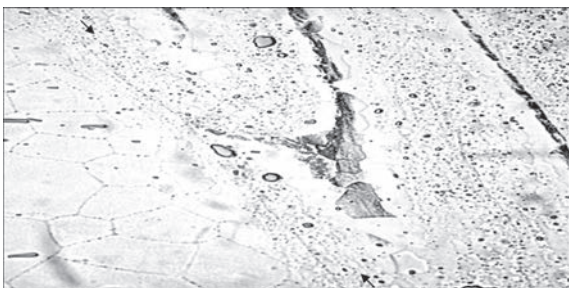


Рис. 3. Мікроструктура ( $\times 500$ ) поверхні зварного з'єднання сплаву 1201 товщиною 2 мм на межі зони термічного впливу (зліва) із зоною термомеханічного впливу (справа), отриманого ЗТП

присадного дроту отримані при ЗТП шви за формою та розмірами вигідно відрізняються від зварених плавленням (рис. 4). Відсутність проплавів і підсилень на таких швах дозволяє уникнути високих рівнів концентрації напружень у місцях переходу від шва до основного матеріалу, які негативно впливають на експлуатаційні та ресурсні характеристики зварних з'єднань.

Крім того, в результаті проведених досліджень показано, що особливості формування нероз'ємних з'єднань у твердій фазі при ЗТП сприяють також зменшенню ступеня розміцнення металу в зоні зварювання та підвищенню його механічних властивостей. Так, вимірювання твердості

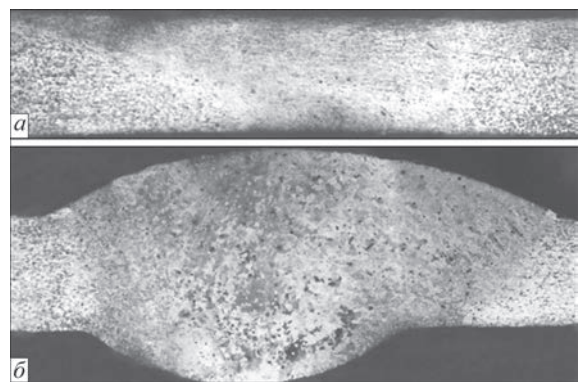


Рис. 4. Поперечні перерізи швів сплаву 1201 товщиною 2 мм, отриманих ЗТП (а) та АДЗНЕ (б)

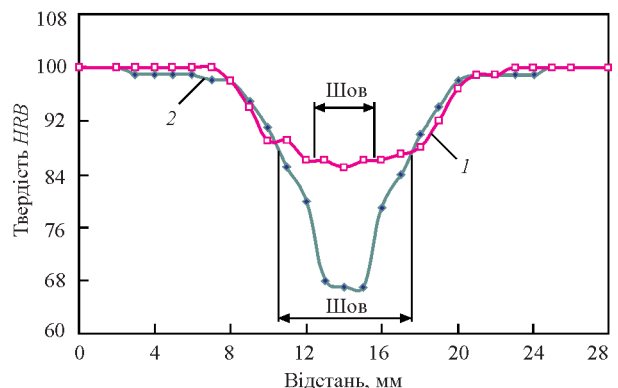


Рис. 5. Розподіл твердості у зварних з'єднаннях сплаву 1201 товщиною 2 мм, отриманих ЗТП (1) та АДЗНЕ (2)

металу в зоні формування шва показали, що при ЗТП вона значно вища, ніж при АДЗНЕ (рис. 5). Зварні з'єднання, отримані у твердій фазі, мають мінімальну твердість металу на рівні  $HRB\ 85\dots 86$  у шві та зонах спряження його з основним матеріалом. Тоді як при АДЗНЕ сплаву 1201 з використанням присадного дроту Св1201 мінімальна твердість металу в центральній частині шва знаходиться на рівні  $HRB\ 67\dots 68$ , а в зоні сплавлення шва з основним матеріалом – на рівні  $HRB\ 87\dots 88$ .

Межа міцності зразків зварних з'єднань з підсиленням шва сплаву 1201, отриманих АДЗНЕ з використанням присадного дроту Св1201, знаходиться на рівні 296 МПа. Руйнування таких зразків при статичному розтягуванні відбувається в зоні сплавлення шва з основним матеріалом, де в процесі зварювання виникає сітка крихких дрібнозернистих прошарків. Зразки зі знятим підсиленням шва руйнуються при розтягуванні у центральній частині шва, де твердість металу мінімальна, і мають міцність на рівні 241 МПа. Оскільки при ЗТП присадний дріт не використовується, то зварні з'єднання не мають підсилення швів. Проте, завдяки меншому розміщенню металу в зоні зварювання та формуванню у швах і на прилеглих до них ділянках деформованої дрібнозернистої структури швів, межа міцності зразків таких з'єднань при

одновісному розтягуванні знаходиться на рівні 303 МПа. При цьому їх руйнування відбувається в зоні термомеханічного впливу в місці спряження шва з основним матеріалом.

Криві, отримані при одночасному розтягуванні та згинанні зразків Кана з гострим надрізом, свідчать про схильність сплаву 1201 до швидкого зародження та розповсюдження тріщин (рис. 6). При випробуванні зразків зварних з'єднань, отриманих АДЗНЕ, тріщина, що зароджується біля вершини концентратора у вигляді гострого надрізу, розповсюджується по металу шва. Тоді як у зразках, зварених тертям з перемішуванням, після зародження у шві вона зміщується у зону спряження шва з основним матеріалом. При цьому представлені діаграми демонструють, що швидкість зародження тріщини і характер її розповсюдження на зразках, отриманих ЗТП, приблизно такі ж, як і в основного металу. А руйнування таких зразків відбувається при навантаженнях, близьких до основного металу та набагато вищих, ніж зразків, зварених плавленням. Мінімальне значення питомої роботи розповсюдження тріщини в основному металі знаходиться на рівні  $2,7\ \text{Дж}/\text{см}^2$ , що свідчить про те, що розповсюдження тріщини в ньому відбувається легше, ніж у швах, отриманих як у твердій фазі, так і плавленням, для яких ці показники становлять  $3,8$  та  $3,5\ \text{Дж}/\text{см}^2$  відповідно.

Аналіз фрактограм поверхонь зламів зразків зварних з'єднань, отриманих ЗТП, свідчить про в'язкий характер їх руйнування (рис. 7). У центральній частині шва біля вершини надрізу чітко проглядаються неглибокі ямки без плоских ділянок рельєфу. Розповсюдження магістральної тріщини по металу такого шва вимагатиме високих енергетичних витрат і супроводжуватиметься значною пластичною деформацією. Тому тріщина при випробуванні таких зразків зміщується в зону спряження шва з основним матеріалом, де на фрактограмі зламу цієї ділянки простежуються обмежені гострими гребенями ямки, що свідчить про механізм квазісколу, для якого потрібні менші енергетичні витрати.

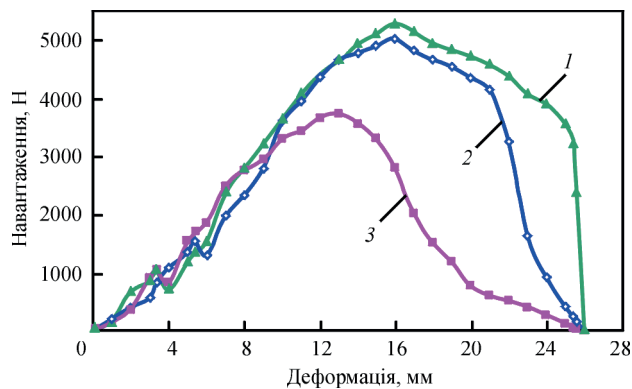


Рис. 6. Діаграми «навантаження–деформація», зафіксовані про одночасному розтягуванні та згинанні зразків Кана з гострим надрізом з ОМ (1) і зварних з'єднань сплаву 1201 товщиною 2 мм, отриманих ЗТП (2) та АДЗНЕ (3)

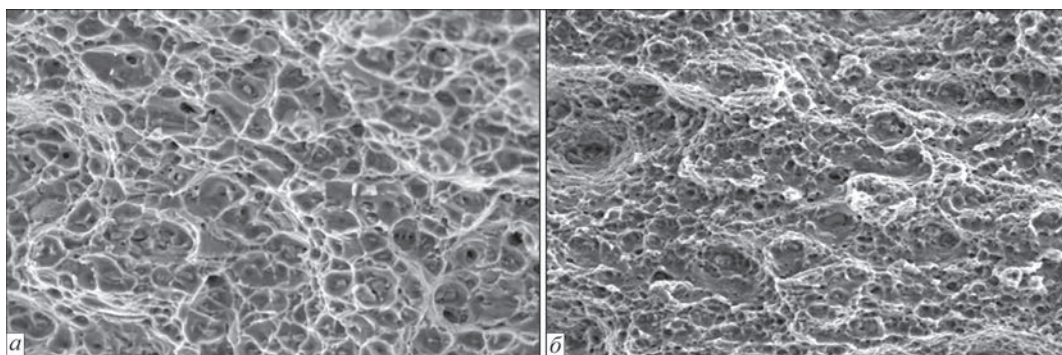


Рис. 7. Фрактограми поверхонь руйнування зразків зварних з'єднань сплаву 1201 товщиною 2 мм, отриманих ЗТП, по металу шва (а) і по зоні спряження шва з основним матеріалом (б);  $\times 500$

## Висновки

1. В результаті інтенсивної пластичної деформації металу при ЗТП сплаву 1201 в ядрі шва формується дрібнокристалічна структура з розміром зерен 5...6 мкм. У зоні термомеханічного впливу спостерігаються деформовані протяжні зерна, орієнтовані у напрямку переміщення пластифікованого металу, та дрібні рівновісні зерна, розмір яких коливається в межах 4...12 мкм. Тоді як при АДЗНЕ цього сплаву у шві формується характерна лита структура металу з розмірами дендритів 0,20...0,25 мм. В зоні сплавлення шва з основним матеріалом відбувається часткове оплавлення структурних складових границь зерен та утворюється суцільна сітка крихких дрібнозернистих прошарків, які негативно впливають на механічні властивості з'єднань.

2. Завдяки формуванню нероз'ємних з'єднань на підкладці без канавки і без використання присадного дроту у швах, отриманих ЗТП, відсутні проплави і підсилення, що дозволяє уникнути високих рівнів концентрації напружень у місцях переходу від шва до основного матеріалу, які негативно впливають на експлуатаційні та ресурсні характеристики зварних з'єднань.

3. Процес ЗТП відбувається у твердій фазі, що забезпечує значне зменшення ступеня розміщення металу в зоні зварювання та підвищення механічних властивостей зварних з'єднань сплаву 1201. Твердість металу шва, отриманого ЗТП, знаходиться на рівні *HRB* 85...86, що на 25 % вище, ніж при АДЗНЕ. Межа міцності зразків таких з'єднань при одночасному розтягуванні знаходиться на рівні 303 МПа, тоді як для зразків без підсилення шва, отриманих АДЗНЕ, цей показник становить всього 241 МПа. Показники опору руйнуванню при одночасному розтягуванні та згинанні зразків зварних з'єднань, отриманих ЗТП, свідчать про більш високу їх стійкість до зародження та розповсюдження тріщин у процесі експлуатації, ніж зварених плавленням.

## Список літератури/References

1. Lahti, K. (2003) FSW – possibilities in Shipbuilding. *Svet-saren*, **1**, 6–8.
2. Kallee, S., Nicholas, D. (1998) Causing a Stir in the Future. *Welding and Joining*, **2**, 18–21.
3. Okamura, H., Aota, K., Ezumi, M. (2000) Friction Stir Welding of Aluminum Alloy and Application to Structure. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, **4**, 166–172.
4. Mori, H., Noda, M., Tominaga, T. (2007) Current state on application of friction stir welding for rolling stock. *Ibid.*, **11**, 506–510.
5. Kallee, S.W., Davenport, J., Nicholas, E.D. (2002) Railway Manufacturers Implement Friction Stir Welding. *Welding J.*, **10**, 47–50.
6. Arbegast, W.J. (2006) Friction Stir Welding After a Decade of Development. *Ibid.*, **3**, 28–35.
7. Johnsen, M.R. (1999) Friction Stir Welding Takes Off at Boeing. *Ibid.*, **2**, 35–39.
8. Kallee, S., Nicholas, E., Thomas, W. (2002) Friction stir in aerospace – the industrial way. Part II. *Bulletin TWI*, **9-10**, 13–18.
9. Takehisa, H. (2006) Friction stir welding technology of aluminum alloys for aircraft. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, **3**, 178–183.
10. Белецкий В.М., Кривов Г.А. (2005) *Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение) Справочник*. И.Н. Фридляндер (ред.). Киев, КОМИНТЕХ. ISBN 966-8550-25-0.  
Beletsky, V.M., Krivov, G.A. (2005) *Aluminium alloys. Composition, properties, technology, application: Refer. Book*. Ed. by I.N. Fridlyander. Kiev, KOMINTEKH. ISBN 966-8550-25-0 [in Russian].
11. Машин В.С., Покляцкий А.Г., Федорчук В.Е. (2005) Механические свойства соединенный алюминиевых сплавов при сварке плавящимся и неплавящимся электродом. *Автоматическая сварка*, **9**, 43–49.  
Mashin, V.S., Poklyatsky, A.G., Fedorchuk, V.E. (2005) Mechanical properties of aluminium alloys in consumable and nonconsumable electrode arc welding. *The Paton Welding J.*, **9**, 39-45.
12. Defalco, J. (2006) Friction stir welding vs. fusion weldin. *Welding J.*, **3**, 42–44.
13. Pietras, A., Zadroga, L., Lomozik, M. (2004) Characteristics of welds formed by pressure welding incorporating stirring of the weld material (FSW). *Welding International*, **1**, 5–10.
14. Іщенко А.Я., Покляцький А.Г. (2010) *Інструмент для зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів*. Пат. 54096 Україна, МПК В23К 20/12; заявник і патентовласник ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. № u201005315; заяв. 30.04.2010; опубл.25.10.2010, Бюл. №20. Ishchenko, A.Ya., Poklyatsky, A.G. (2010) *Tool for friction stir welding of aluminium alloys*. Pat. 54096 Ukraine, Int. Cl. B23K 20/12; u201005315; fill. 30.04.2010; publ. 25.10.2010 [in Ukrainian].
15. Poklyatsky, A.G. (2011) Resistance of welds on thin-sheet aluminium alloys to initiation and propagation of service cracks. *The Paton Welding J.*, **10**, 5–9.

## SOME ADVANTAGES OF WELDED JOINTS OF ALUMINUM 1201 ALLOY PRODUCED BY FRICTION STIR WELDING

A.G. Poklyatsky, S.I. Motrunich, I.M. Klochkov, T.M. Labur

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

E-mail: office@paton.kyiv.ua

The article analyzes the structural features, characteristics of strength and resistance to initiation and propagation of operational cracks of butt joints of aluminum 1201 alloy of 2 mm thickness, produced by friction stir welding (FSW) and argon arc welding with non-consumable electrode (AAWNCE). It is shown that in FSW as a result of intensive plastic deformation of the metal in the weld nugget, a fine-grained structure with a grain size of 5...6 μm is formed. In the zone of thermomechanical influence, deformed long grains are observed, oriented in the direction of movement of the plasticized metal, and small equiaxial grains, the size of which varies within 4...12 μm. Whereas in AAWNCE of this alloy the weld metal has a characteristic cast structure with large (0.20...0.25 mm) dendrites. The absence of penetrations and reinforcements in the welds produced by FSW, allows avoiding high levels of stress concentration at the places of transition from the weld to the base material, which negatively affect the service and life characteristics of welded joints. The peculiarities of the formation of permanent joints in the solid phase during FSW also help to reduce the degree of softening of the metal in the welding zone and increase their tensile strength, resistance to initiation and propagation of operational cracks. 15 Ref., 7 Fig.

*Keywords: microstructure, hardness, tensile strength, resistance to initiation and propagation of operational cracks*

Надійшла до редакції 08.07.2021