

МІЦНІСТЬ І СТРУКТУРА СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ МАГНІЄВОГО СПЛАВУ МА2-1М, ОТРИМАНИХ АРГОНО- ДУГОВИМ ЗВАРЮВАННЯМ НЕПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ І ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ

А.Г. Покляцький¹, В.С. Федорчук¹, С.І. Мотруніч¹, Ю.В. Фальченко¹, М. Sahul²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Чеський технічний університет. 166 36, м. Прага, Чехія. E-mail: miroslav.sahul1@fs.cvut.cz

У статті проаналізовано результати досліджень структурних особливостей та межі міцності стикових з'єднань листів конструкційного магнієвого сплаву МА2-1М завтовшки 2 мм, отриманих аргонодуговим зварюванням неплавким електродом і тертям з перемішуванням. Показано, що, при зварюванні тертям з перемішуванням, внаслідок інтенсивної пластичної деформації металу у швах формується дрібнокристалічна структура. Встановлено, що мікротвердість металу в такому зварному з'єднанні має мінімальні значення в зоні термомеханічного впливу зі сторони відходу поблизу зони термічного впливу, де і відбувається руйнування зразків при їх статичному розтягуванні. Межа міцності зразків зварних з'єднань, отриманих тертям з перемішуванням, та зразків зі знятими до рівня основного матеріалу проплавами і додатково зачищеними підсиленнями швів, отриманих плавленням, знаходиться на рівні 233...236 МПа, що становить ~84 % від цього показника для основного матеріалу. Бібліогр. 13, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: магнієвий сплав, зварювання тертям з перемішуванням, аргонодугове зварювання, структура, мікротвердість, міцність

Вступ. Магнієві сплави широко використовуються в якості конструкційних матеріалів для виготовлення легких міцних вузлів аерокосмічної та автомобільної техніки, а також рухомих елементів текстильної і друкарської техніки, що дозволяє зменшити силу інерції при високих швидкостях їх переміщення [1–3]. Ефективність застосування таких сплавів обумовлена низькою питомою вагою магнію (1,74 г/см³), високою міцністю його сплавів (228...290 МПа) і значною їх термостійкістю (до 450 °С) [4].

Більшість магнієвих сплавів успішно зварюються методами зварювання плавленням. Як і для алюмінієвих сплавів, найчастіше використовується аргонодугове зварювання неплавким (вольфрамівим) електродом (АДЗНЕ). Для зварних з'єднань магнієвих сплавів, отриманих плавленням, характерні такі ж дефекти у вигляді пор, макровключень оксидних плівок і гарячих тріщин, які виникають при зварюванні алюмінієвих сплавів [5, 6]. Тому для отримання якісних нероз'ємних з'єднань магнієвих сплавів перспективним способом є зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) [7]. Завдяки формуванню швів у твердій фазі без розплавлення зварюваних кромок вдається уникнути вище згаданих дефектів. Крім того, при ЗТП не потрібні присадний дріт (виготовлення якого ускладнене високою крихкістю магнієвих сплавів) і захисний інертний газ,

завдяки чому забезпечується економія витрат на матеріали [8].

Проведені зарубіжними спеціалістами експериментальні дослідження свідчать про ефективність застосування такого способу зварювання для магнієвих сплавів. Отримані з'єднання мають дрібнокристалічну структуру швів і високі механічні властивості [9, 10].

Мета даної роботи – дослідити структурні особливості та визначити механічні властивості зварних з'єднань листів конструкційного магнієвого сплаву МА2-1М завтовшки 2 мм, отриманих АДЗНЕ і тертям з перемішуванням.

Методика проведення досліджень. Для оцінки механічних властивостей зварних з'єднань використовували листи серійного магнієвого сплаву МА2-1М завтовшки 2 мм системи легування Mg–Al–Zn–Mn, який крім магнію містить, мас. %: 4,5 Al, 0,95 Zn, 0,47 Mn, 0,3 Fe, 0,06 Si, 0,01 Cu. Механічні властивості таких листів наведені в таблиці.

Процес механізованого АДЗНЕ здійснювали за допомогою установки АСТВ-2М від джерела живлення MW-450 («Fronius», Австрія). Для інтенсивного перемішування розплавленого металу зварювальної ванни, завдяки чому створюються сприятливі умови для його дегазації та зменшується вірогідність утворення пор у швах, використовували струм з прямокутною формою хвилі

Федорчук В.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9929-3231>, Мотруніч С.І. – <https://orcid.org/0000-0002-8841-8609>,

Фальченко Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3028-2964>

© А.Г. Покляцький, В.С. Федорчук, С.І. Мотруніч, Ю.В. Фальченко, М. Sahul, 2023

Механічні властивості листів конструкційного магнісного сплаву МА2-1М завтовшки 2 мм

Показник	Зразки, вирізані вздовж напрямку вальцювання листів	Зразки, вирізані поперек напрямку вальцювання листів
σ_B , МПа	$\frac{279...274}{277}$	$\frac{283...279}{281}$
$\sigma_{0,2}$, МПа	$\frac{200...179}{187}$	$\frac{219...203}{210}$
δ_5 , %	$\frac{20,3...19,5}{19,9}$	$\frac{26,3...23,5}{25,0}$
α , град	$\frac{38...32}{35}$	$\frac{45...38}{42}$

Примітка. У числівнику вказані максимальні та мінімальні значення показників, а в знаменнику – їх середнє значення за результатами випробування трьох зразків.

[11] частотою 200 Гц. Діаметр неплавкого електрода становив 3,2 мм, а довжина його вильоту 4 мм. Швидкість переміщення пальника вибрали 20 м/год, враховуючи з однієї сторони бажання забезпечити мінімальний тепловий вплив на зварюваний метал, а з іншої – можливість оператора-зварювальника при необхідності коригувати орієнтацію електрода відносно осі стику чи довжину дуги. Для отримання хімічного складу металу шва близького до основного матеріалу в якості присадного матеріалу для формування підсилення шва використовували стрічку з основного матеріалу завтовшки 2 мм, яку фіксували між зварюваними кромками, опустивши на дно канавки глибиною 1 мм і шириною 4 мм. Висота цієї стрічки становила 6...7 мм, що забезпечувало формування необхідного підсилення шва. При цьому характерні для такого способу зварювання можливі дефекти у вигляді пор і макровключень оксидних плівок, які виникають здебільшого у кореневій частині шва, потрапляють у проплав, який у конструкціях відповідального призначення зачищається до рівня основного матеріалу. Безпосередньо перед зварюванням проводили механічну зачистку зварюваних кромок (з трьох сторін) і стрічки присадного матеріалу (з чотирьох сторін) на глибину 0,10...0,12 мм. Для забезпечення надійного захисту металу від окислення в зоні зварювання використовували аргон вищого сорту. При цьому внутрішній діаметр захисного керамічного сопла становив 16 мм, а витрати газу – 20...22 л/хв. Якісне формування швів за таких умов зварювання забезпечувалося на струмі 145...150 А. Зменшення величини струму призвело до неповного сплавлення закладеної в стик стрічки присадного матеріалу з основним, а його збільшення – до розвару шва.

ЗТП листів досліджуваного сплаву виконували на лабораторній установці, розробленій в ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Вона забезпечує швидкість лінійного переміщення інструмента вздовж стику (швидкість зварювання) в межах 8...38 м/год і постійну частоту його обертання – 1420 об/хв. Для зварювання використовували спеціальний інструмент власної конструкції [12] з діаметром бурта 12 мм і

наконечником довжиною 1,85 мм у вигляді зрізаного конуса з діаметром 3,4 мм при основі бурта. Стикові з'єднання листів для оцінки їх властивостей отримували при трьох швидкостях зварювання: 8, 16 та 24 м/год. При більш високих швидкостях зварювання зростає імовірність утворення внутрішніх дефектів у швах у вигляді порожнин, притаманним цьому процесу [13]. Крім того, на лабораторній установці притискання інструмента до поверхонь зварюваних кромок здійснюється оператором-зварником за допомогою супорта, що ускладнює рівномірність його регулювання при вищих швидкостях зварювання. Щоб запобігти попаданню в зону формування шва можливих поверхневих забруднень та оксидних плівок безпосередньо перед зварюванням проводили механічну зачистку зварюваних кромок (з трьох сторін) на глибину 0,10...0,12 мм.

З отриманих зварних з'єднань виготовляли шліфи для дослідження структурних особливостей швів та оцінки ступеня розміщення металу в зоні зварювання. Мікротвердість металу вимірювали на торцевих поверхнях шліфів за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3. Оцінку структурних особливостей зварних з'єднань здійснювали з використанням оптичного мікроскопа ММТ-1600В. Визначення межі міцності при одноосному розтягуванні зразків з шириною робочої частини 15 мм проводилися відповідно до ДСТУ EN ISO 4236х на універсальному сервогідролічному комплексі МТС 318.25. Зразки, отримані АДЗНЕ, випробовували як зі знятими до рівня основного матеріалу проплавами, так і з додатково зачищеними підсиленнями швів.

Результати та обговорення. Аналіз мікроструктури зварного з'єднання, отриманого СТП, показав, що вона складається з класичних для такого методу зварювання зон: основного матеріалу, зони термомеханічного впливу, зони термічного впливу та металу шва зі сформованим ядром (рис. 1). Зерна металу шва в 3...5 разів дрібніші, ніж у зварюваного металу. Найбільш подрібнена структура спостерігається в ядрі металу шва. Вимірювання мікротвердості металу на поперечних шліфах в різних зонах зварного з'єднання, отриманого тертям з перемішуванням, засвідчи-

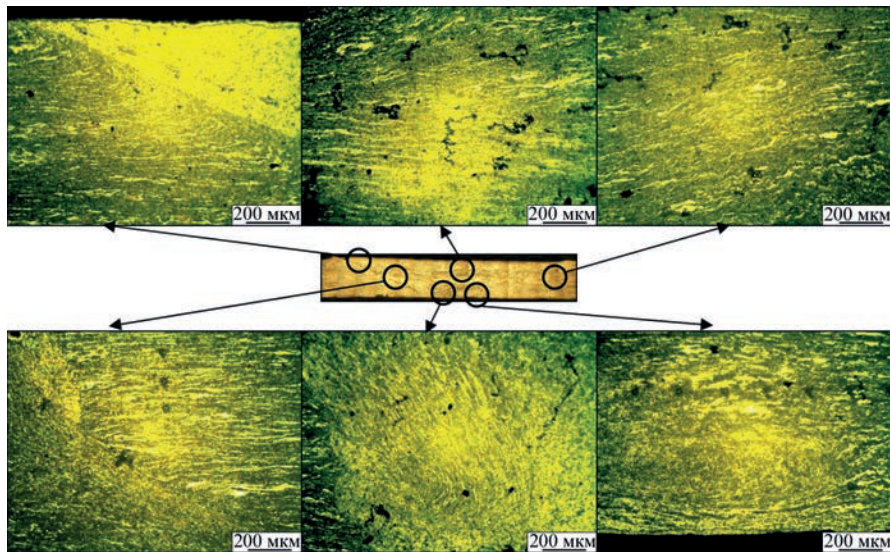


Рис. 1. Фрагменти мікроструктури стикового з'єднання конструкційного магнієвого сплаву MA2-1M завтовшки 2 мм, отриманого ЗТП

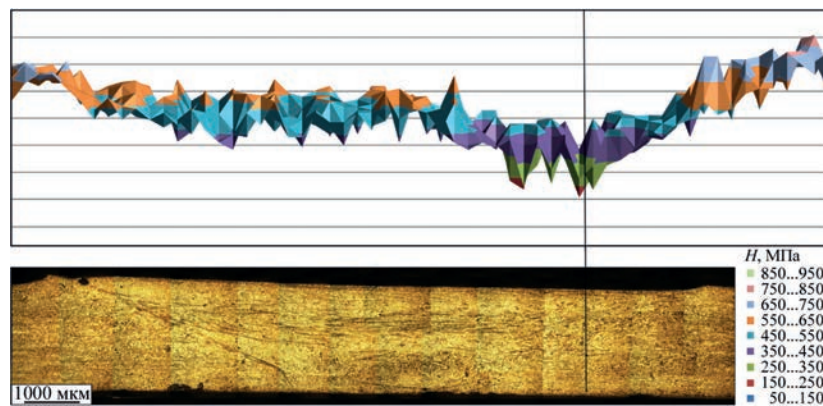


Рис. 2. Мікротвердість металу в різних зонах зварного з'єднання сплаву MA2-1M завтовшки 2 мм, отриманого ЗТП при швидкості зварювання 14 м/год

ли, що мінімальні значення вона має в зоні термомеханічного впливу зі сторони відходу поблизу (2,5...3,0 мм) зони термічного впливу (рис. 2). Відповідно, при статичному розтягуванні зразків таких зварних з'єднань вони руйнувалися в зоні термомеханічного впливу зі сторони відходу (рис. 3). При цьому з лицьової поверхні руйнування відбувалося саме на відстані 2,5...3,0 мм від межі цієї зони із зоною термічного впливу, а з кореневої – в зоні спряження шва з основним матеріалом. Межа міцності зразків зварних з'єднань, отриманих ЗТП, знаходиться на рівні 234...236 МПа і не залежить від швидкості зварювання в досліджуваному діапазоні.

Дослідження мікроструктури стикових з'єднань конструкційного магнієвого сплаву MA2-1M, отриманих АДЗНЕ, показали, що метал шва має дендритну структуру (рис. 4). Біля лінії сплавлення шва з основним матеріалом у ньому спостерігаються стовпчасті дендрити, спрямовані від лінії сплавлення в метал шва. В зоні термічного впливу відбулася рекристалізація зерен основного металу. Безпосередньо біля лінії сплавлення зерна частково оплавлені.

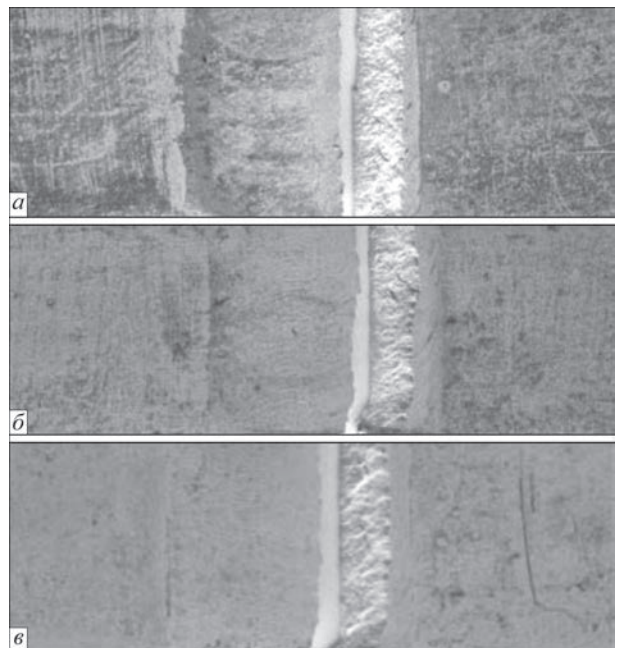


Рис. 3. Зовнішній вигляд лицьової поверхні робочої частини зруйнованих в результаті статичного розтягування зразків магнієвого сплаву MA2-1M завтовшки 2 мм, отриманих ЗТП при швидкостях зварювання 8 (а), 16 (б) і 24 м/год (в)

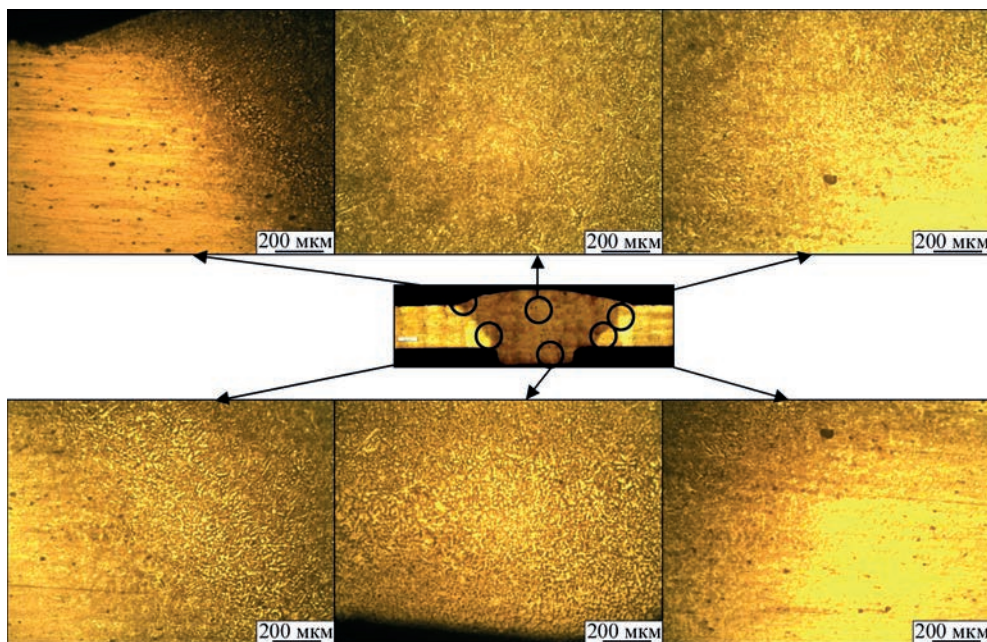


Рис. 4. Фрагменти мікроструктури стикового з'єднання конструкційного магнієвого сплаву MA2-1M завтовшки 2 мм, отриманого АДЗНЕ

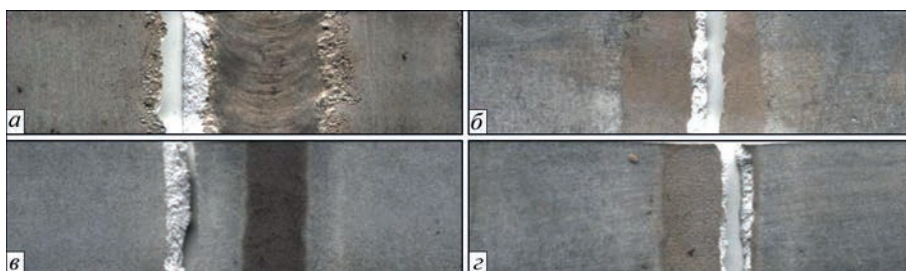


Рис. 5. Зовнішній вигляд лицьової (а, в) і кореневої (б, г) поверхонь робочої частини зруйнованих в результаті статичного розтягування зварних зразків магнієвого сплаву MA2-1M завтовшки 2 мм, з підсиленням шва (а, б) та без нього (в, г), отриманих АДЗНЕ

Зразки зварних з'єднань з підсиленням шва, отримані АДЗНЕ, мають межу міцності 267 МПа, що становить 96 % від цього показника для основного матеріалу. Руйнування їх відбувається з лицьової поверхні шва по зоні сплавлення шва з основним матеріалом, а з кореневої частини – по основному металу в зоні термічного впливу на відстані близько 5 мм від зони сплавлення шва з основним матеріалом (рис. 5). Зразки зі знятими до рівня основного матеріалу проплавами і додатково зачищеними підсиленнями швів руйнували-

ся при статичному розтягуванні по металу шва і мали межу міцності на рівні 233 МПа, що підтверджується мінімальною твердістю в центральній частині шва (рис. 6). Відповідно, руйнування зразків з лицьової поверхні шва відбувалося поблизу його центральної частини, а з кореневої – в зоні сплавлення шва з основним матеріалом.

Висновки

1. Мікротвердість металу зварного з'єднання, отриманого ЗТП, має мінімальні значення в зоні термомеханічного впливу зі сторони відходу поблизу (2,5...3,0 мм) зони термічного впливу, де і відбувається руйнування таких зразків при їх статичному розтягуванні.

2. Метал шва, отриманого АДЗНЕ, має дендритну структуру. Поблизу зони сплавлення шва з основним матеріалом у ньому спостерігаються стовпчасті дендрити, спрямовані від лінії сплавлення в метал шва. Мінімальна твердість спостерігається по центру шва. При зварюванні цього сплаву тертям з перемішуванням внаслідок інтенсивної пластичної деформації металу у центральній частині (ядрі) шва утворюються зерна в 5 ра-

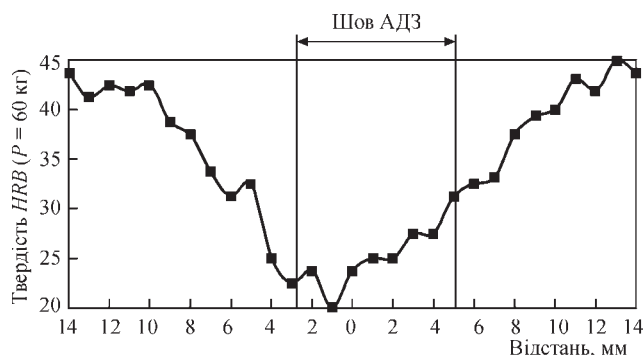


Рис. 6. Твердість металу зварного з'єднання сплаву MA2-1M завтовшки 2 мм, отриманого АДЗНЕ

зів дрібніші за структуру основного металу. В зоні термомеханічного впливу відбувається повна зміна орієнтації зерен у напрямку переміщення робочих поверхонь інструмента. В результаті у ній формуються протяжні витягнуті зерна, орієнтовані вздовж цієї траєкторії.

3. Зразки з підсиленням шва, отримані АДЗНЕ, мають максимальну межу міцності (267 МПа), що становить 96 % від цього показника для основного матеріалу. Межа міцності зразків зварних з'єднань, отриманих ЗТП, як і зразків зі знятими до рівня основного матеріалу проплавами і додатково зачищеними підсиленнями швів, зварених плавленням, знаходиться на рівні 233...236 МПа.

Список літератури/References

- Zuemer, N. (1998) Magnesium alloys in new aeronautic equipment. Proc. Of the Conf. on Magnesium Alloys and their Applications, Wolfsburg, Germany, 125–132.
- Luo, A.A. (2002) Magnesium: Current and potential automotive applications. *JOM*, February, 42–48.
- Shapiro, A.E. (2005) Brazing Magnesium Alloys and Magnesium Matrix Composites. *Welding J.*, 10, 33–43.
- Avedesian, M.M., Baker, H. (1999) *Magnesium and Magnesium Alloys*, Metals Handbook. Materials Park, Ohio, ASM International.
- Sachin, K., Chuansong, W. (2017) Review: Mg and Its Alloy – Scope, Future Perspectives and Recent Advancements in Welding and Processing. *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)*, 24, 6, 1–37. Doi: 10.11916/j.issn.1005-9113.17065.
- Hongjie, L., Jis, M., Wencai, L. et al. (2022) Influence of TIG welding process parameters on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg–8Li–3Al–2Zn–0.5Y alloy. *Journal of materials research and technology*, 20, 4114–4129. Doi: 10.1016/j.jmrt.2022.08.157.
- Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C. et al. (1991) Friction Stir Butt Welding. Int. Patent Application № PCT/GB 92/02203; GB Patent Applications № 9125978.8.
- Defalco, J. (2006) Friction Stir Welding vs. Fusion Welding. *Welding J.*, 3, 42–44.
- Lee, W.B., Leon Y.M., Jung, S.B. (2003) Joint properties of friction stir welded AZ31B–H24 magnesium alloy. *Materials Science and Technology*, 6, 785–790.
- Aritoshi, M. (2005) Friction Stir Welding of Magnesium alloys Sheets. *Journal of the Japan Welding Society*, 3, 18–23.
- Poklyatsky, A.G., Grinyuk, A.A. (2001) Effect of parameters of asymmetric and modulated currents on quality of aluminium alloy welded joints. *TPWJ*, 7, 33–36.
- 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. С.О. Патона НАН України. № u201005315; заяв. 30.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.
- Ishchenko, A.Ya., Poklyatskyi, A.G. (2020) Tool for friction stir welding of aluminium alloys. Pat. 54096 Ukraine, Int. Cl. B23K 20/12; PWI, No. u201005315, fill. 30.04.2010, publ. 25.10.2010 [in Ukrainian].
- Poklyatskii, A.G. (2019) Prediction of parameters of friction stir welding of sheet aluminium alloys. *TPWJ*, 8, 37–42.

STRENGTH AND STRUCTURE OF MA2-1M MAGNESIUM ALLOY BUTT JOINTS PRODUCED BY ARGON ARC WELDING WITH A NON-CONSUMABLE ELECTRODE AND BY FRICTION WITH STIRRING

A.G. Poklyatskyi¹, V.E. Fedorchuk¹, S.I. Motrunich¹, Yu.V. Falchenko¹, M. Sahul²

¹ E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., Kyiv, 03150, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

² Czech Technical University. 166 36, Prague, Czech Republic. E-mail: miroslav.sahul1@fs.cvut.cz

The article analyzes the results of research of structural features and tensile strength of butt joints of 2 mm thick sheets of structural MA2-1M magnesium alloy produced by argon arc welding with a non-consumable electrode and by friction with stirring. It is shown that in friction stir welding as a result of intense plastic deformation of the metal, a fine crystalline structure is formed in the welds. It was determined that microhardness of the metal in such a welded joint has minimum values in the zone of thermomechanical effect on the side of the deviation near the heat-affected-zone, where the fracture of the specimens occurs during their static tension. Tensile strength of specimens of welded joints produced by friction with stirring, and specimens with penetrations removed to the level of the base material and additionally cleaned reinforcements of welds produced by melting, is at the level of 233...236 МПа, which amounts to ~84% of this index for the base material. Ref. 13, Tabl. 1, Fig. 6.

Key words: magnesium alloy, friction stir welding, argon arc welding, structure, microhardness, strength

Надійшла до редакції 22.09.2023

КАТАЛОГ

найбільш широковідомих порошкових дротів компанії ТОВ «ТМ.ВЕЛТЕК»

Київ-Дніпро 2023, 48 с., www.weldtech-group.com

ЗМІСТ

- | | |
|--|--|
| 1. Порошкові дроти для зварювання | - низько- і середньолеговані сплави; |
| - вуглецевих і низьколегованих сталей; | - сплави, стійкі до абразивного зношення при низьких ударних навантаженнях; |
| - низьколегованих конструкційних сталей підвищеної міцності і високоміцних сталей; | - сплави, стійкі до абразивного зношення при помірних ударних навантаженнях; |
| - хромомолібденових теплотривких сталей; | - сплави, стійкі до абразивного зношення при високих ударних навантаженнях; |
| - різномірних сталей, наплавлення перехідних шарів і зварювання сталей з обмеженою зварюваністю. | - термообробні сталі для інструментального оснащення; |
| 2. Порошкові дроти для зміцнюючого наплавлення | - порошкові дроти для зміцнюючого наплавлення. |
| - деформаційно-зміцнювані сплави; | |
| - нержавіючі мартенситні і феритні сталі; | |

Каталог можна замовити в редакції журналу «Автоматичне зварювання»