

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-9-17](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-9-17)

УДК 621.791.14

**Тетяна Михайлівна Лабур¹, Анатолій Григорович Полкляцький²,
Юрій В'ячеславович Фальченко³, Лідія Вячеславівна Петрушинець⁴**

¹доктор технічних наук, головний науковий співробітник відділу фізико-металургійних процесів зварювання легких металів та сплавів

Інститут електрозварювання НАН України (Київ, Україна)

E-mail: labur@paton.kiev.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4064-2644>

Scopus Author ID: 6506343754

²кандидат технічних наук,

старший науковий співробітник відділу фізико-металургійних процесів зварювання легких металів та сплавів

Інститут електрозварювання НАН України (Київ, Україна)

E-mail: pokliatskyi@paton.kiev.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2145-973X>

Scopus Author ID: 7801331498

³доктор технічних наук, завідувач відділу фізико-металургійних процесів зварювання легких металів та сплавів

Інститут електрозварювання НАН України (Київ, Україна)

E-mail: falchenko@paton.kiev.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3028-2964>

ResearcherID: W-2793-2017. Scopus Author ID: 7801687476

⁴кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник відділу фізико-металургійних процесів зварювання легких металів та сплавів

Інститут електрозварювання НАН України (Київ, Україна)

E-mail: petrushynets@paton.kiev.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7946-3056>

ResearcherID: G-2891-2016. Scopus Author ID: 55521777800

СТАТИЧНА ТРИЩИНОСТІЙКІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ МАГНІЄВОГО СПЛАВУ МА2-1М, ОТРИМАНИХ НЕПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ І ТЕРТЯМ ІЗ ПЕРЕМІШУВАННЯМ

Визначено стійкість до руйнування при позацентричному розтягу зварних з'єднань зі сплаву МА2-1М товщиною 2 мм, отриманих ТІГ і FSW. Показана висока чутливість сплаву до концентраторів напружень незалежно від технології зварювання. Міцність зварних з'єднань (ТІГ – 167...223 МПа, FSW – 178...201 МПа) близька до значень основного металу (176...230 МПа). Збільшення швидкості зварювання FSW з 8 до 24 м/год підвищує показники ПРЗТ і ПРПТ на 30–40 %. Зародження тріщини у швах з технологічним посиленням, зварених ТІГ на швидкості 20 м/год., відбувається при 41,1 Дж/см², в зоні сплавлення – 31,3 Дж/см². У швах без посилення тріщина поширюється при 10,3...11,8 Дж/см², у зоні сплавлення – 21,7...23,3 Дж/см². Процес FSW забезпечує кращу стійкість швів до поширення тріщин (10,2...19,9 Дж/см²).

Ключові слова: магнієвий сплав МА2-1М; аргонодугове зварювання неплавким електродом (ТІГ); зварювання тертям з перемішуванням (FSW); структурні зони зварних з'єднань; стійкість до руйнування; зародження тріщини; поширення тріщини.

Рис.: 1. Табл.: 2. Бібл.: 17.

Постановка проблеми. Магнієві сплави відносять до легких конструкційних матеріалів, які характеризуються середньою міцністю в діапазоні 228...290 МПа та значною термічною стійкістю (до 450 °С) [1]. Мала щільність сплавів 1,74–2,0 г/см³ [2] (у 4 рази нижча за сталь) сприяє їх застосуванню у виробках, де головним показником є маса, що дозволяє зменшити силу інерції при високих швидкостях їх переміщення [3–5]. Саме такі агрегати використовуються в аерокосмічній та автомобільній техніці, рухомих частинах текстильних і друкарських машин тощо.

Коло використання магнієвих сплавів у зварних конструкціях, спорудах і технологічному обладнанні пов'язано з вимогами надійного забезпечення експлуатації виробів, оскільки під впливом навколишнього середовища та режимів навантаження однотипні конструкції можуть руйнуватися в однакових умовах за різними механізмами [4]. Тому

отримання нових свідчень про характеристики тріщиностійкості сплавів та їх нероз'ємних з'єднань, зварених за різними технологіями посідає важливе місце у вирішенні зазначеної проблеми. Це зумовлено насамперед особливостями механізмів формування швів. При зварюванні плавленням відбувається розплавлення крайок з'єднуваних деталей та присадного дроту з наступною їх спільною кристалізацією під час охолодження. На зазначені процеси впливають складні умови взаємодії між хімічними елементами. Крім того, порівняно з основним матеріалом утворюється кристалічна структура більших розмірів, що знижує механічні властивості швів [6; 7]. Діаграми стану магнієвих сплавів свідчать [8; 9], що легуючі елементи та шкідливі домішки при плавленні розчинюються в рідкому магнії, але не утворюють ділянок змішаних структурних зон. На це впливає хімічний склад і технологічні особливості процесу зварювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Змінити характер формування швів та зберегти властивості матеріалу у зварних вузлах дозволяє використання процесу тертя робочого інструменту з перемішування металу навколо своєї осі [10-12]. Результатом цього є формування дрібнодисперсної структури швів за температурних умов, які не перевищують 70 % від значення температури плавлення металу, що забезпечує менший ступінь зниження міцності в з'єднаннях, незначний рівень залишкових напружень, а також поздовжніх і кутових деформацій у зварних вузлах. На формування якісних швів впливають основні параметри самого процесу і конструктивні особливості робочого інструменту, а також теплофізичні характеристики сплавів, що зварюються [8; 9]. Оскільки на різних ділянках зварного з'єднання вони неоднакові, це викликає утворення структурної та фазової неоднорідності в з'єднаннях. До основного металу безпосередньо примикає зона термічного впливу, у якій метал залишається недеформованим, його структура змінюється під впливом нагрівання. Ближче до центру знаходиться зона термомеханічного впливу, де під час зварювання, крім нагрівання, відбувається активна пластична деформація металу. У центральній частині з'єднання формується ядро шва, у якому спостерігається динамічна рекристалізація. Ступінь структурної та хімічної неоднорідності з'єднань залежить від терміну перебування металу у відповідних температурних інтервалах [5; 6].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Оскільки магнієві сплави характеризуються підвищеною чутливістю до концентраторів напружень, що визначає працездатність виробу при експлуатації, тому важливо враховувати їхню стійкість при зародженні та поширенні тріщин в умовах, наближених до експлуатаційних, базуючись на експериментальній механіці руйнування [9].

Мета дослідження. Мета роботи – оцінити стійкість до зародження та поширення тріщин у різних структурних зонах зварних з'єднань магнієвого сплаву MA2-1M, отриманих технологіями зварювання неплавким електродом (TIG) і тертям з перемішуванням (FSW).

Виклад основного матеріалу. У дослідженнях були використані листи серійного конструкційного магнієвого сплаву MA2-1M товщиною 2 мм системи легування Mg-Al-Zn-Mn, який, крім магнію, містить 4,5 % Al, 0,95 % Zn, 0,47 % Mn, 0,3 % Fe, 0,06 % Si, 0,01 % Cu. У сплавах цієї системи відмічають наявність рівновісної структури та дрібнокристалічний злам, які свідчать про достатньо високий запас пластичності металу, що робить його менш чутливим до зростання швидкості деформування під час виготовлення напівфабрикатів [1]. Крім того, в інтервалі оптимальних температур експлуатації цей сплав характеризується високою технологічною пластичністю, що важливо для здійснення процесу обертання робочого інструменту при зварюванні FSW. Однак з різким зростанням швидкості деформування сплаву може спостерігатися зниження його пластичності [13].

Враховуючи зазначене, процес механізованого аргонодугового зварювання TIG здійснювали за допомогою установки АСТВ-2М від джерела живлення MW-450 ("Fronius", Австрія). Для створення сприятливих умов та інтенсивного перемішування розплавленого металу зварювальної ванни, також зменшення вірогідності утворення пор у швах використовували струм прямокутної форми електричної хвилі частотою 200 Гц. Діаметр

неплавкого електрода становив 3,2 мм, а довжина його вильоту – 4 мм. Швидкість переміщення пальника становила 20 м/год. Це забезпечувало можливість коригування орієнтації електрода відносно осі стику чи довжини дуги у разі потреби, що зменшує тепловий вплив на зварюваний метал. Для отримання хімічного складу металу шва, близького до основного матеріалу, якості присадного матеріалу для формування підсилення шва використовували стрічку з основного матеріалу товщиною 2 мм. Її фіксували між зварюваними кромками, розмістивши між крайками канавки глибиною 1 мм і шириною 4 мм. Висота цієї стрічки становила 6...7 мм, що забезпечувало формування необхідного технологічного підсилення шва. За таких умов зварювання плавленням можливе виникнення характерних технологічних дефектів у вигляді пор і макровключень оксидних плівок, які утворюються здебільшого в кореневій частині шва, потрапляючи у проплав, які в конструкціях відповідального призначення усувається шляхом зачищення механічним способом до рівня основного матеріалу [9]. Тому в процесі виконання зазначеного технологічного експерименту безпосередньо перед зварюванням проводили механічне зачищення зварюваних крайок (з трьох сторін) і стрічки присадного матеріалу (з чотирьох сторін) на глибину 0,10...0,12 мм. Надійний захист розплавленого металу від окислення в зоні зварювання забезпечував аргон вищого сорту. Внутрішній діаметр захисного керамічного сопла при цьому становив 16 мм, а витрати газу досягали 20...22 л/хв. Формування якісних швів досягали при зварюванні на струмі 145...150 А. Зменшення величини струму викликало неповне сплавлення закладеної у стик стрічки присадного матеріалу з основним, а його збільшення – до порушення зовнішнього вигляду та зростання геометричних розмірів поперечного перерізу швів.

Процес зварювання тертям з перемішуванням листів досліджуваного сплаву здійснювали на лабораторній установці, розробленій в ІЕЗ ім. Є. О. Патона. Вона забезпечує постійну частоту обертання робочого інструмента 1420 об/хв. Стикові з'єднання отримували при швидкостях зварювання 8, 16 і 24 м/год, за яких відтворюються умови рівномірного притискання інструмента до поверхонь зварюваних крайок за допомогою супорта, що дозволило зменшити ймовірність утворення внутрішніх дефектів у швах у вигляді порожнин, притаманних даному процесу з'єднання [13]. При зварюванні використовували спеціальний робочий інструмент з діаметром бурта 12 мм і наконечником довжиною 1,85 мм у вигляді зрізаного конуса з діаметром 3,4 мм при основі бурта [14].

Експериментально-випробувальні роботи здійснювали з використанням універсальної машини типу УРУ-5. Визначення границі міцності та енергетичних параметрів з'єднань відбувалось в умовах статичного позацентрового розтягування. Діаграми «напруження – деформації» реєструвались осцилографом ОСПП-300М-1. Схема випробовування відтворювала напружений стан зварних вузлів конструкцій та відповідала технічним вимогам ASMT E 561-98 [15]. Для дослідження залучали зразки Кана з гострим надрізом ($R = 0,1$ мм) довжиною 11 мм (рис. 1). Зародження тріщини відбувається при відносно низькому енергетичному рівні в умовах одночасного їх розтягування та згинання. Надрізи в зразках, отриманих плавленням, наносили вздовж центру шва та в зоні його сплавлення з основним металом, де утворюється структурна неоднорідність з'єднань [9]. Орієнтація надрізу в зразках, отриманих тертям з перемішуванням, була як по центру шва, так і в зоні термомеханічного впливу на відстані 2,5...3,0 мм зі сторони відходу робочого інструмента, де відбувалося руйнування зразків. Зразки основного металу мали надріз, розташований паралельно напрямку прокату напівфабрикатів. Поверхня розриву при цьому також була паралельною подовжній орієнтації напівфабрикату, що характеризується найменшими значеннями властивостей [6].

Вихідні параметри тріщиностійкості визначали за результатами обробки експериментальних кривих «навантаження-деформація». Визначали питому роботу зародження тріщини (ПРЗТ) та питому роботу поширення тріщини (ПРПТ). Такий методологічний

підхід був застосований, оскільки зазначені параметри в комплексі найбільш повно характеризують особливості стану структури за різних статичних умов навантаження при експлуатації зварних конструкцій, що дозволяє спрогнозувати поведінку реального матеріалу з тріщиною або технологічним дефектом у порівнянні з основним металом. А використання при випробуванні зразків однакових розмірів і конфігурації гострого надрізу дозволяє наближатися до ймовірних умов руйнування, які можуть відбуватися при експлуатації зварної конструкції. В табл. 1 і 2 наведено механічні властивості листів магнієвого сплаву МА2-1М та його зварних з'єднань.

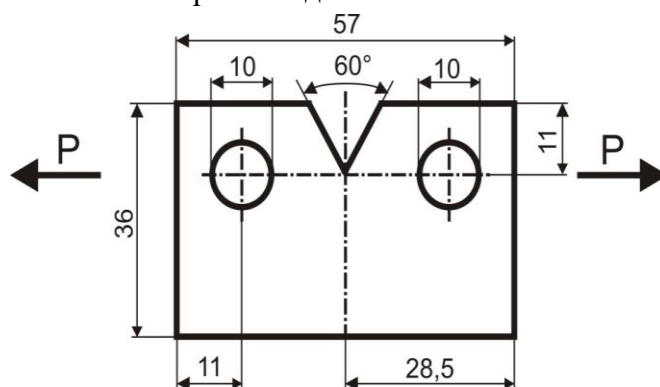


Рис. 1. Схематичне зображення зразка Кана для оцінки стійкості основного матеріалу та його зварних з'єднань до зародження та поширення експлуатаційних тріщин [16]

Таблиця 1 – Характеристики опору руйнуванню основного металу магнієвого сплаву марки МА2-1М та зварних з'єднань, отриманих аргонодуговим зварюванням неплавким електродом на швидкості 20 м/год

Технологічні особливості зразків	Розташування гострого надрізу	σ_r , МПа	ПРЗТ, Дж/см ²	ПРПТ, Дж/см ²
Основний метал				
вздовж прокату	по центру	176	32,5	6,7
поперек прокату	по центру	230	76,4	14,6
Зварні з'єднання				
Шви з посиленням	по центру шва	223	41,1	10,3
	по зоні сплавлення	192	31,3	21,7
Шви без посилення	по центру шва	167	26,9	11,8
	по зоні сплавлення	175	15,2	23

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 2 – Вплив швидкості зварювання тертям з перемішуванням на показники опору руйнуванню з'єднань магнієвого сплаву МА2-1М, отриманих тертям із перемішуванням

Швидкість зварювання, м/год	Розташування надрізу	σ_r , МПа	ПРЗТ, Дж/см ²	ПРПТ, Дж/см ²
8	по шву	<u>178...200</u> 189	<u>31,8...40,0</u> 35,9	<u>9,2...11,1</u> 10,2
	по ЗТМВ	<u>115...177</u> 146	<u>35,3...37,5</u> 36,4	<u>6,7...13,3</u> 10,0
16	по шву	<u>190...207</u> 198,5	<u>33,2...50,5</u> 41,9	<u>16,2...23,3</u> 19,9
	по ЗТМВ	<u>211...217</u> 214	<u>18,1...35,4</u> 26,8	<u>10,1...13,1</u> 11,6
24	по шву	<u>189...201</u> 195	<u>37,8...57,0</u> 47,4	<u>4,7...12,5</u> 8,6
	по ЗТМВ	<u>205...253</u> 229	<u>27,3...61,4</u> 44,4	<u>19,8...20,0</u> 19,9

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз отриманих характеристик опору руйнування основного металу сплаву МА2-1М показує, що σ_r змінюється від 176 до 230 МПа, ПРЗТ становить 32,5...76,4 Дж/см², а ПРПТ – 6,7 Дж/см² та 14,6 Дж/см². Отримані дані свідчать про наявність структурної неоднорідності досліджуваного сплаву. Зародження тріщин відбувається порівняно повільно, що може вказувати на реалізацію квазів'язкого механізму утворення мікропустот під дією пластичної деформації. Подальше швидке поширення тріщин свідчить про реалізацію квазікрихкого механізму [17].

Теплофізичні умови зварювання методом ТІГ викликають появу біля шва додаткових зон із різним структурно-фазовим станом внаслідок дії нерівновісного затвердіння металу під час охолодження, а також появу неоднорідних термічних і деформаційних полів, які визначають властивості з'єднань та механізм їх руйнування. Крихкого розтріскування сплаву при цьому не спостерігається. У всіх зразках із надрізом по центру шва тріщина виникає з вершини концентратора та поширюється вздовж зони його сплавлення з основним металом. У з'єднаннях, які мають технологічне посилення, номінальне напруження складає 223 МПа (табл. 1). Значення ПРЗТ при цьому становить 41,1 Дж/см², а ПРПТ – 10,3 Дж/см². У зоні сплавлення дані характеристики дорівнюють, відповідно: 192 МПа, 31,3 та 21,7 Дж/см², що майже збігається з аналогічними показниками основного металу.

У зразках з'єднань, де технологічне посилення швів було механічно усунуто, відмічається зниження рівня σ_r номінального напруження (табл. 1). Значення усіх цих показників зменшуються майже удвічі порівняно зі зразками з'єднань з технологічним посиленням, що пов'язано зі зменшенням площини перетину. Показник ПРПТ близький до значень, які мають зразки з посиленням. Його величина становить 11,8 Дж/см², а по зоні сплавлення – 23 Дж/см², що вдвічі вище, ніж в основному металі досліджуваного сплаву. Зазначене може свідчити про підвищення пластичності структури в даній зоні з'єднання внаслідок структурно-фазових перетворень за умови зварювання ТІГ.

При застосуванні технології зварювання FSW має місце зміна досліджуваних характеристик опору руйнування з'єднань в умовах позацентрового розтягу (табл. 2). Рівень σ_r з надрізом, розташованим у шві, коли швидкості зварювання становила 8 м/год, збільшується на 10...15 % порівняно з основним металом та становить 178...200 МПа, що близько до значень показника з'єднань, отриманих неплавким електродом. У зоні термо-механічного впливу значення номінальної міцності з'єднань менше на 25...30 % та складає 115...177 Дж/см². Зазначений факт вказує на суттєвий вплив структурно-фазового стану з'єднань магнієвого сплаву, отриманому FSW, оскільки метал, який нагрівається в процесі обертання робочого інструмента навколо своєї осі, переміщується та додатково викликає збільшення температури зварювального металу. Структура швів при цьому складається з окремих фрагментів твердого розчину, що мають витягнуту форму, спрямовану вдовж напрямку обертання інструмента, та фазові частки біля нього [8]. Аналогічна закономірність спостерігається також зі значеннями енергетичних показників руйнування – ПРЗТ та ПРПТ. Тріщина виникає біля вершини надрізу та поширюється в сторону основного металу, де розташовується ЗТМВ. Рівень показників не залежить від схеми нанесення гострого надрізу у шві або ЗТМВ і становить у середньому після зварювання FSW 35,9 та 36,4 Дж/см² відповідно. Поширення тріщини відбувається, коли ПРПТ становить 10,2 і 10,0 Дж/см².

Подальше підвищення швидкості обертання робочого інструмента до 16 м/год викликає підвищення значень досліджуваних показників: σ_r , ПРЗТ та ПРПТ (табл. 2), але ступінь зростання відмінний. Так, у зразках з надрізом у шві σ_r зростає лише на 8...10 %, а ПРЗТ та ПРПТ зростають на 10...15 %.

а в ЗТМВ – 15...20 %. При цьому величина показника ПРЗТ швів зростає на 10 % (33,2...50,5 Дж/см²), а в ЗТМВ знижується до 18,1...35,4 Дж/см², що може бути проявом значної чутливості структури сплаву. Процес зародження тріщини відбувається, відповідно, при 41,9 та 26,8 Дж/см², а поширення – 19,9 і 11,6 Дж/см².

Зварювання з тертям з перемішуванням зі швидкістю 24 м/год викликає зростання у швах показника міцності σ_p від 189 до 201 МПа, а в ЗТМВ – від 205 до 253 МПа, що може свідчити про більший ступінь деформації сплаву та, як результат, його зміцнення. При цьому зародження тріщини відбувається при значеннях показника ПРЗТ 37,8...57 Дж/см², що до 1,5 раза вище, ніж при зварюванні зі швидкістю 8 м/год. У ЗТМВ цей показник дорівнює 27,3...61,4 Дж/см². Водночас показник поширення тріщини (ПРПТ) швів знижується в середньому на 10% (8,6 Дж/см²), а в ЗТМВ зростає до 19,9 Дж/см².

Аналіз отриманих результатів дослідження стійкості руйнування магнієвого сплаву МА2-1М показує, що зміни напруженого стану, які виникають внаслідок дифузії та структурно-фазового перетворення металу під час зварювання, доцільно враховувати, залучаючи параметри експериментальної механіки руйнування. Зазначене може бути зумовлено проявами механізму розпаду твердого розчину при нагріванні та коагуляції зміцнювальної інтерметалідної фази в структурі магнієвого сплаву при охолодженні [8–10]. Підтверджено, що застосування технології FSW, на відміну від зварювання неплавким електродом, забезпечує зростання номінальної міцності та енергетичних показників – ПРЗТ та ПРПТ. Це може бути викликано дією пластичної деформації металу під час виконання процесу тертя робочого інструменту та подальшого перемішування навколо осі. Характеристики опору руйнуванню швів суттєво перевищують аналогічні значення показників основного металу, а для ЗТМВ збігаються. Процес відбувається переважно шляхом в'язкого мікромеханізму руйнування.

Висновки. Уперше визначена стійкість зварних з'єднань магнієвого сплаву МА2-1М товщиною 2 мм, отриманих аргонодуговим зварюванням неплавким електродом і тертям з перемішуванням, до експлуатаційного руйнування. Встановлено, що чутливість його зварних з'єднань до гострого надрізу не залежить від способу зварювання. Підтверджена доцільність залучання експериментальної механіки руйнування для поглибленого вивчення стану окремих локальних ділянок зварних з'єднань, утворених під час зварювання структурно-фазовими перетвореннями.

Показано, що в умовах дії одночасного розтягування та згину міцність сплаву МА2-1М становить 176...230 МПа. Міцність швів, зварених неплавким електродом, визначається наявністю технологічного посилення і становить 167...223 МПа, а в зоні сплавлення дещо менше (175...192 МПа). При зварюванні тертям з перемішуванням рівень міцності швів визначається швидкістю обертання робочого інструменту (8...24 м/год) навколо своєї осі та коливається від 178 до 207 МПа, а в ЗТМВ – 115...253 МПа.

Встановлено, що технологічний процес FSW незалежно від швидкості зварювання магнієвого сплаву МА2-1М забезпечує більшу стійкість з'єднань, як при зародженні (35,9...47,4 Дж/см²), так і поширенні тріщин (8,6...19,9 Дж/см²). Аналогічна закономірність спостерігається і в ЗТМВ, але рівень показників на 30...40 % нижчий та наближається до значень основного металу. Значення показників ПРЗТ і ПРПТ з'єднань, отриманих зварюванням неплавким електродом, залежать від наявності технологічного посилення швів. У разі його присутності значення ПРЗТ становить 41,1 Дж/см², а в зоні сплавлення – 31,3 Дж/см². Механічне усунення посилення викликає зниження вдвічі да-

них показників. Аналогічна залежність також спостерігається і на етапі поширення тріщини (ПРПТ). З'єднання з посиленням мають, відповідно, значення 10,3 і 21,7 Дж/см², а при його відсутності – 11,8 і 23,3 Дж/см². Основний метал сплаву МА2-1М характеризується вздовж прокату значеннями ПРЗТ = 32,5 Дж/см² і ПРПТ = 6,7 Дж/см², а поперек – 76,4 та 14,6 Дж/см² відповідно.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автор(и) використовували ChatGPT для перевірки англійської граматики в розширеній анотації. Після використання цього інструменту/сервісу автор(и) переглянув(ли) та відредагував(ли) зміст за потреби і взяв(ли) на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Avedesian, M. M., & Baker, H. (1999). *Magnesium and magnesium alloys*. Metals Handbook. ASM International.
2. Jayasathyakawin, S., Ravichandran, M., Baskar, N., Anand Chairman, C., & Balasundaram, R. (2020). Mechanical properties and applications of Magnesium alloy – Review. *Materials Today: Proceedings*, 27, 909–913. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.255>.
3. Zuemer, N. (1998). Magnesium alloys in new aeronautic equipment. In *Proceedings of the Conference on Magnesium Alloys and Their Applications* (pp. 125–132). Wolfsburg, Germany.
4. Luo, A. A. (2002). Magnesium: Current and potential automotive applications. *JOM*, 54(2), 42–48. <https://doi.org/10.1007/BF02701073>.
5. Shapiro, A. E. (2005). Brazing magnesium alloys and magnesium matrix composites. *Welding Journal*, 84(10), 33–43.
6. Іщенко, А. Я., & Лабур, Т. М. (2013). *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Наукова думка.
7. Hongjie, L., Jis, M., Wencai, L., Guohua, W., Jiawei, S., Xin, T., & Peijin, C. (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. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.157>.
8. Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., et al. (1991). *Friction stir butt welding* (International Patent Application No. PCT/GB92/02203; GB Patent Application No. 9125978.8).
9. Pietras, A., & Zadroga, L. (2003). Rozwój metody zdrzewania tarcowego z mieszaniami materiału zgrzeiny (FSW) i możliwości jej zastosowania. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*, 5, 148–154.
10. Lee, W. B., Leon, Y. M., & Jung, S. B. (2003). Joint properties of friction stir welded AZ31B-H24 magnesium alloy. *Materials Science and Technology*, 19(6), 785–790. <https://doi.org/10.1179/026708303225001867>.
11. Aritoshi, M. (2005). Friction stir welding of magnesium alloy sheets. *Journal of the Japan Welding Society*, 23(3), 18–23.
12. Poklutskiy, A. G., Fedorchuk, V. E., Motrunich, S. I., Falchenko, Yu. V., & Sahul, M. (2024). 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. *The Paton Welding Journal*, 2, 14–18. <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.02.03>.
13. Poklyatskii, A. G. (2019). Prediction of parameters of friction stir welding of sheet aluminium alloys. *The Paton Welding Journal*, 8, 37–42. <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.08.06>.
14. Іщенко, А. Я., & Покляцький, А. Г. (2010). *Інструмент для зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів* (Патент України, № 54096).
15. ASTM International. (1998). *Standard test method for K_{IC} testing of metallic materials*. (ASTM E561-98).

16. Институт электросварки им. Е.О. Патона АН УССР. (1981) *Каталог образцов для испытаний металлов*. ИЭС им. Е.О. Патона.

17. Романів, О. М., Зима, Ю. В., & Карпенко, Г. В. (1974). *Електронна фрактографія зміцнених сталей*. Наукова думка.

References

1. Avedesian, M. M., & Baker, H. (1999). *Magnesium and magnesium alloys*. Metals Handbook. ASM International.

2. Jayasathyakawin, S., Ravichandran, M., Baskar, N., Anand Chairman, C., & Balasundaram, R. (2020) Mechanical properties and applications of Magnesium alloy – Review. *Materials Today: Proceedings*, 27, 909–913. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.255>

3. Zuemer, N. (1998). Magnesium alloys in new aeronautic equipment. In *Proceedings of the Conference on Magnesium Alloys and Their Applications* (pp. 125–132). Wolfsburg, Germany.

4. Luo, A. A. (2002). Magnesium: Current and potential automotive applications. *JOM*, 54(2), 42–48. <https://doi.org/10.1007/BF02701073>

5. Shapiro, A. E. (2005). Brazing magnesium alloys and magnesium matrix composites. *Welding Journal*, 84(10), 33–43.

6. Ishchenko, A. Ya., & Labur, T. M. (2013). Svarka sovremennykh konstruktsei iz alyuminiyevykh splaviv [Welding of modern structures from aluminum alloys]. *Naukova dumka – Scientific thought*.

7. Hongjie, L., Jis, M., Wencai, L., Guohua, W., Jiawei, S., Xin, T., & Peijin, C. (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. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.157>

8. Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., et al. (1991). *Friction stir butt welding* (International Patent Application No. PCT/GB92/02203; GB Patent Application No. 9125978.8).

9. Pietras, A., & Zadroga, L. (2003). Rozwój metody zdrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny (FSW) i możliwości jej zastosowania. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*, 5, 148–154.

10. Lee, W. B., Leon, Y. M., & Jung, S. B. (2003). Joint properties of friction stir welded AZ31B-H24 magnesium alloy. *Materials Science and Technology*, 19(6), 785–790. <https://doi.org/10.1179/026708303225001867>

11. Aritoshi, M. (2005). Friction stir welding of magnesium alloy sheets. *Journal of the Japan Welding Society*, 23(3), 18–23.

12. Poklyatskyi, A. G., Fedorchuk, V. E., Motrunich, S. I., Falchenko, Yu. V., & Sahul, M. (2024). 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. *The Paton Welding Journal*, 2, 14–18. <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.02.03>

13. Poklyatskii, A. G. (2019). Prediction of parameters of friction stir welding of sheet aluminium alloys. *The Paton Welding Journal*, 8, 37–42. <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.08.06>

14. Ishchenko, A. Ya., & Pokliatskyi, A. H. (2010). Instrument dla zvariuvannia tertiam z peremishuvanniam aliuminiyevykh splaviv [Friction stir welding tool for aluminum alloys]. (Ukrainian patent, № 54096).

15. ASTM International. (1998). *Standard test method for K_{IC} testing of metallic materials*. (ASTM E561-98).

16. Instytut elektrozvaraki im. Ye.O. Patona AN URSR. [Paton Institute of Electric Welding of the Academy of Sciences of the USSR]. (1981). *Kataloh obraztsov dlia ispytaniy metallov [Catalogue of specimens for metal testing]*. IES im. Ye. O. Patona.

17. Romaniv, O. M., Zyma, Yu. V., & Karpenko, H. V. (1974). Elektronna fraktohrafia zmitsnennykh stalei [Electronic fractography of hardened steels]. *Naukova dumka*.

Отримано 31.07.2025

Tetiana Labur¹, Anatolii Pokliatskyi², Iurii Falchenko³, Lidiia Petrushynets⁴

¹Doctor in Technical Sciences,
Chief Researcher of the Department of Physical-Metallurgical Processes of Welding of Light Metals and Alloys
Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: labur@paton.kiev.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4064-2644>

Scopus Author ID: 6506343754

²PhD in Technical Sciences,
Senior Researcher of the Department of Physical-Metallurgical Processes of Welding of Light Metals and Alloys
Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: pokliatskyi@paton.kiev.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2145-973X>

Scopus Author ID: 7801331498

³Doctor in Technical Sciences, Senior Researcher,
Head of the Department of Physical-Metallurgical Processes of Welding of Light Metals and Alloys
Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: falchenko@paton.kiev.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3028-2964>

ResearcherID: W-2793-2017. **Scopus Author ID:** 7801687476

⁴PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, Senior Researcher of the Department of Physical-Metallurgical Processes of
Welding of Light Metals and Alloys

Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: petrushynets@paton.kiev.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7946-3056>

ResearcherID: G-2891-2016. **Scopus Author ID:** 55521777800

STATIC CRACK RESISTANCE OF WELDED JOINTS OF MA2-1M MAGNESIUM ALLOY, OBTAINED BY A NON-CONSUMABLE ELECTRODE AND FRICTION STIR WELDING

Magnesium alloys are considered promising materials for use in aerospace and automotive engineering. However, their increased sensitivity to stress concentrators can adversely affect the material's performance during operation. Therefore, it is essential to assess their resistance to crack initiation and propagation under conditions simulating actual operation, based on the principles of experimental fracture mechanics.

This work aims to evaluate the resistance to crack initiation and propagation in different structural zones of welded joints in the MA2-1M magnesium alloy, produced using tungsten inert gas welding and friction stir welding technologies.

The resistance to failure under eccentric tensile loading of MA2-1M magnesium alloy welded joints, 2 mm in thickness and produced by argon arc welding with a non-consumable electrode (TIG) and by friction stir welding (FSW), was determined. The testing configuration replicated the stress state of welded structural joints and complied with the technical requirements of ASTM E561-98.

It has been shown that under combined tension and bending, the strength of joints welded using a non-consumable electrode is determined by the presence of technological reinforcement and ranges from 167 to 223 MPa, while in the fusion zone it ranges from 175 to 192 MPa. For friction stir welding, the strength level of the joints is determined by the rotational speed of the welding tool (8–24 m/h) and ranges from 178 to 207 MPa, with values in the heat-affected zone (HAZ) ranging from 115 to 253 MPa.

It has been established that the FSW process, regardless of the welding speed, provides greater stability of MA2-1M joints in terms of both crack initiation and propagation. The values of specific crack initiation work (SCIW) and specific crack propagation work (SCPW) for joints obtained by TIG welding are halved when the reinforcement is mechanically removed.

The resistance of welded joints of MA2-1M magnesium alloy has been determined for the first time. It has been found that the sensitivity of these welded joints to sharp notches does not depend on the welding method.

Keywords: MA2-1M magnesium alloy; argon arc welding with a non-consumable electrode (TIG); friction stir welding (FSW); structural zones of welded joints; fracture resistance; crack initiation; crack propagation.

Fig.: 1. Table: 2. References: 17.