

КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНА ТРИВКІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СПЛАВУ АМГ5М, ОТРИМАНИХ У РІЗНИХ ПРОСТОРОВИХ ПОЛОЖЕННЯХ СТИКІВ

Л.І. Ниркова, С.О. Осадчук, С.Ю. Коваленко, Л.В. Гончаренко, А.В. Клименко

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

Оцінено опірність суцільній корозії основного металу сплаву АМГ5М системи легування Al–Mg, визначено групи тривкості в рухомому потоці 3%-го NaCl «стійкий», в 3% NaCl+0,1% H₂O₂, нейтральному соляному тумані, періодичному зануренні в 3 %-й NaCl, за підвищеної вологості – «підвищено стійкий». Випробуваннями зварних з'єднань, виконаних у різних просторових положеннях стиків (0, 30 та 90°) відносно горизонтальної площини, встановлено, що на опірність розшарувальній корозії не впливає просторове положення пластин при зварюванні, а найменша глибина міжкристалітної корозії встановлена для з'єднань, отриманих під кутом 30° (0,080 мм). Виявлено особливості електрохімічних властивостей зварного з'єднання, отриманого під кутом 30°: більш позитивний потенціал корозії та найменший порівняно з іншими зварними швами граничний дифузійний струм. У змодельованих умовах нейтрального соляного туману впродовж 180 діб встановлено зменшення міцнісних і пластичних властивостей з'єднань: у ненапруженому стані межа міцності зменшується не більше ніж на 2 %, межа плинності – приблизно на 1...7 %, відносне подовження – на 12...28 %. У напруженому стані показники зменшуються інтенсивніше: межа міцності на 7...18 %, межа плинності – на 2...52 %, а відносне подовження – на 8...92 % відповідно. Руйнування з'єднань відбувається по зоні сплавлення та зоні термічного впливу, в деяких випадках – по зварному шву, а зразків, що випробовувалися у напруженому стані, по корозійним дефектам. Не виявлено переважного впливу просторового положення при зварюванні заготовок на корозійну тривкість зварних з'єднань. Запропоновано використовувати ці з'єднання за умови оптимального вибору просторового положення при зварюванні, що забезпечить найбільш прийнятні показники механічних властивостей. Бібліогр. 14, табл. 3, рис. 8.

Ключові слова: алюмінієвий сплав АМГ5М, зварні з'єднання, просторове положення стиків, корозійно-механічна тривкість, потенціометрія, вольт-амперометрія, міжкристалітна корозія, розшарувальна корозія, корозія при постійній деформації, прискорені корозійні випробування

Вступ. Високолеговані сплави серії АМГ5, АМГ6, АМГ6-1 та ін. набули широкого промислового застосування як конструкційні матеріали в літакобудуванні, космічних апаратах, суднобудуванні, зварювальних ємностях тощо, що обумовлено не лише їхньою високою міцністю, корозійною стійкістю, підвищеною пластичністю, які властиві пересиченому твердому розчину магнію в алюмінії, а й високою здатністю до зварювання і відсутністю необхідності у зміцнювальній термічній обробці [1–4].

Одним з основних чинників прогнозування тривалої працездатності конструкції є зміна здатності конструкції та окремих вузлів витримувати навантаження від впливу корозійних процесів (зміна механічних, міцнісних, втомних властивостей матеріалу) [5–9].

Для сплавів системи Al–Mg утворення неперервних ниткоподібних ланцюгів β'-фази призводить до падіння пластичності, що зумовлює дотримання вимог оптимальних режимів термічної обробки сплавів. За умов низькотемпературного, але довготривалого нагрівання розпад пересиченого твердого розчину різко погіршує стійкість до

міжкристалітної корозії, особливо в зоні зварного шва. Зокрема, підвищення температури нагрівання від 100 до 200 °С призводить до розвитку міжкристалітної корозії основного металу (глибиною до 0,140 мм), зростання глибини міжкристалітної корозії зварного з'єднання від 0,105 до 0,280 мм (по зоні термічного впливу) та до 0,560 мм (по зоні сплавлення) [1].

Тривалий відпал сплаву АМГ6 (більше 8 год) за температур 150, 200, 225 °С призводить до підвищення схильності до міжкристалітної корозії в розчині 3% NaCl + 1% HCl упродовж 30 діб [9]. При підвищенні температури відпалу швидкість суцільної корозії також зростає приблизно від 4 (відпал 125 °С) до ~10 г/(м²·год) (відпал 150 °С) та 7 г/(м²·год) (відпал 225 °С).

Для алюмінієвого сплаву 5056, що деформується, через перенасичення алюмінієвої матриці магнієм існує висока ймовірність виділення фази β-Al₃Mg₂. Наявність інших інтерметалідів (субмікроскопічних та крупніших Al₁₂Mg₂Cr, Al₆(Mn, Fe)) суттєво не впливає на його корозійну тривкість [3].

Опірність сплавів системи Al–Mg міжкристалітній і розшарувальній корозії, а також корозій-

Ниркова Л.І. – <https://orcid.org/0000-0003-3917-9063>, Осадчук С.О. <https://orcid.org/0000-0001-9559-0151>, Коваленко С.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-5012-3437>, Гончаренко Л.В. – <https://orcid.org/0000-0001-8371-2078>, Клименко А.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9148-8221>

© Л.І. Ниркова, С.О. Осадчук, С.Ю. Коваленко, Л.В. Гончаренко, А.В. Клименко, 2022

ному розтріскуванню обумовлена зародженням перехідної (β') і рівноважної (β -Mg₂Al₃) фаз на межі розділу (зерна, інтерметалідні частки тощо) та дислокаціях через розпад твердого розчину [2]. Потенціал корозії β -фази в нейтральному водному середовищі становить $-0,930$ В, у кислому – різниця потенціалів між фазами і твердим розчином становить $0,338$, в лужному – $0,24$ (для сплавів з вмістом 1% Mg) і $0,18$ В (для сплавів з вмістом 9% Mg). Процес корозії в нейтральних і кислих середовищах лімітується електрохімічним розчиненням частинок, що виходять на поверхню сплаву і безпосередньо контактують з електролітом. Глибина пітингу в морській воді для сплаву АМг5М протягом першого року експлуатації може сягати $1,50$, протягом п'яти років – $2,47$ мм. З іншого боку, сприятливий вплив структурної анізотропії, властивий для сплавів у незагартованому стані, при якому прискорюється розпад твердого розчину та не відбувається зміни характеру розподілу виділень на межах зерен, призводить до суттєвого підвищення стійкості до пітингової корозії. Гартування сумарним ступенем деформації 50% з подальшим стабілізаційним відпалом суттєво підвищує міцнісні властивості сплавів Al–Mg зі збереженням задовільних характеристик пластичності та не погіршує корозійну тривкість [10].

Для алюмінієвих сплавів, що термічно зміцнюються, властиве зниження межі корозійної втоми. Для сплавів АМг6 і АМг6-1 в 3% -му розчині NaCl зниження цього показника становило $40\ldots 60\%$ при $N = 5 \cdot (10^6 \ldots 10^7)$ циклах навантаження, що обумовлено структурною електрохімічною гетерогенністю сплаву, і, як наслідок, зміщенням електродного потенціалу в область від'ємніших значень при навантаженнях, які зростають з рівнем циклічних напружень [11].

Властивості алюмінієвих сплавів залежать від наявності вторинних фаз, які утворюються при фазових перетвореннях під час формування та обробки. Для підвищення комплексу експлуатаційних характеристик сплавів системи Al–Mg одним з найбільш перспективних заходів є легування скандієм [12], при якому формується лита недритна дрібнозерниста структура та підвищується пластичність, тріщиностійкість матеріалу, температура рекристалізації холоднодеформованих напівфабрикатів завдяки утворенню дисперсних Al₃Sc часток в об'ємі матеріалу та опірності локальній корозії. Гаряче деформування методом прокатки та пресування сприяє підвищенню межі багаточислової втомної міцності сплаву на 20% до $190\ldots 195$ МПа та забезпечує високу опірність основного металу і зварних з'єднань розшарувальній корозії. На корозійну тривкість, крім електрохімічної гетерогенності структурних складо-

вих, впливає руйнування поверхневих захисних плівок під час прикладання напружень розтягу або стиску [13].

При всіх методах зварювання плавленням зварні з'єднання сплаву системи Al–Mg мають високі механічні властивості [13], що забезпечило їх широке застосування в різних галузях промисловості, зокрема суднобудуванні. Під час ремонтно-відновлювальних робіт виникає необхідність зварювати безпосередньо на об'єкті, коли з'єднують фрагменти розташовуються не завжди горизонтально. Ймовірно, що властивості зварних з'єднань, отриманих у різних просторових положеннях відносно горизонтального, можуть відрізнятись. На сьогодні даних щодо впливу просторового положення зварювальних елементів на корозійно-механічну тривкість зварних з'єднань не знайдено. Мета роботи – дослідити та оцінити корозійно-механічну тривкість зварних з'єднань сплаву АМг5М, отриманих у різних просторових положеннях стиків.

Методика експериментів. Досліджували зразки основного металу і зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМг5М завтовшки 4 мм, виконаних плавким електродом. Для зварювання сплаву застосовували дріт СвАМг6 діаметром $1,6$ мм. Технологічні аспекти зварювання детально обговорено в роботі [14]. Хімічний склад сплаву (спектральний аналіз виконано на спектрометрі ДФС-36) у вагових відсотках такий: $5,2$ Mg; $0,2$ Cu; $0,4$ Si; $0,4$ Fe; $0,4$ Mg; $0,15$ домішки; решта Al.

Дослідження проводили на зварних з'єднаннях, виконаних вздовж напрямку прокату зі швидкістю 40 м/год [14]. Кут нахилу пальника під час зварювання становив $0,30$ 90° відносно площини стику, відстань між соплом пальника і зварюваним металом – $8\ldots 10$ мм, довжина дуги (відстань між металом і кінцем дроту) – $3\ldots 5$ мм, витрати захисного газу – 40 л/хв.

Мікроструктуру зварних з'єднань досліджували на металографічних шліфах, які готували за стандартною методикою. Мікроструктуру виявляли електролітичним травленням у розчині складу: 930 мл $\text{CH}_3\text{COOH} + 70$ мл HClO_4 .

Електрохімічні дослідження проводили в 3% -му NaCl на зразках з'єднань, виконаних у горизонтальному, вертикальному положеннях та під кутом 30° відносно горизонтальної площини за допомогою притискної комірки з робочою площею $1,44 \cdot 10^{-5}$ (для основного металу), $1,96 \cdot 10^{-5}$ м² (для зварного з'єднання). Застосовували методи потенціометрії, вольт-амперометрії, потенціостат ПИ-50-1.1 і програматор Пр-8. Робочим електродом слугували основний метал та зварний шов зварного з'єднання, електродом порівняння – насичений хлорид-срібний електрод ЭВЛ-1М1, до-

поміжним – платиновий електрод. Перед зняттям кривих поверхню зразків зачищали і знежирювали. Вольт-амперні криві знімали в потенціодинамічному режимі зі швидкістю розгортки потенціалу $5 \cdot 10^{-4}$ В/с.

Опірність суцільній корозії визначали методом масометрії за стандартною методикою. Швидкість втрати маси зразків v_m , г/(м²·год) обчислювали за зміною маси зразка і тривалості досліджень за формулою

$$v_m = \frac{\Delta m}{ST}, \quad (1)$$

де $\Delta m = m_1 - m_2$ – корозійні втрати зразка, г; m_1 , m_2 – маса зразка відповідно до і після корозійних випробувань, г; S – площа поверхні зразка, м²; T – тривалість досліджень, год.

Лінійну швидкість корозії v_l (мм/рік) розраховували за формулою:

$$v_l = \frac{8760v_m}{\rho}, \quad (2)$$

де ρ – густина металу, г/см³; 8760 – кількість годин у році.

Густина алюмінієвих сплавів, яка становить 2,7 г/см³, враховували при обчисленні.

Опірність міжкристалітній, розшарувальній корозії та корозійному розтріскуванню оцінювали відповідно до ГОСТ 9.021, ГОСТ 9.904, ГОСТ 9.019. Корозійні та корозійно-механічні дослідження основного металу та зварних з'єднань проводили на ненапружених зразках і зразках при постійній деформації. Зварний шов розташовували перпендикулярно напрямку дії напруження розтягу. Зразки у вигляді бруса навантажували за чотириточковою схемою за умови забезпечення постійного напруження в основному металі $0,95 \sigma_T$ та проводили корозійні випробування у камері соляного туману впродовж 30 та 180 діб згідно з ГОСТ 9.913. На зразках після корозійних випробувань визначали механічні властивості. Механічні випробування проводили згідно з ГОСТ 1497 на машині ZDM зі швидкістю переміщення траверси 6 мм/хв до руйнування.

Результати та їх обговорення. Корпуси суден, виготовлені зі сплаву системи Al–Mg, можуть зазнавати атмосферної корозії при підвищеній вологості, у тому числі, при наявності хлоридів, корозії за умов періодичного змочування та рухомого потоку рідини, корозії при повному зануренні у хлоридвмісне середовище. Оскільки всі ці чинники можуть бути наявними одночасно, дослідили корозійну тривкість основного металу сплаву в часі з періодичним визначенням швидкості корозії з метою виявлення найбільш інтенсивного.

Корозійні дослідження. Основними видами корозійних уражень основного металу сплаву АМг5М у зазначених вище середовищах є потемніння поверхні та корозійні плями (рис. 1).

Найбільша швидкість корозії досягається через 30 діб експонування (рис. 1, а), з продовженням тривалості випробувань вона зменшується. Найбільша швидкість корозії спостерігалась у рухомому потоці (~0,03 мм/рік) і в нейтральному соляному тумані, ~0,02 мм/рік (рис. 2, криві 2, 5). За умов підвищеної вологості, в 3%-му NaCl та при періодичному зануренні у 3%-й NaCl значення швидкості корозії не

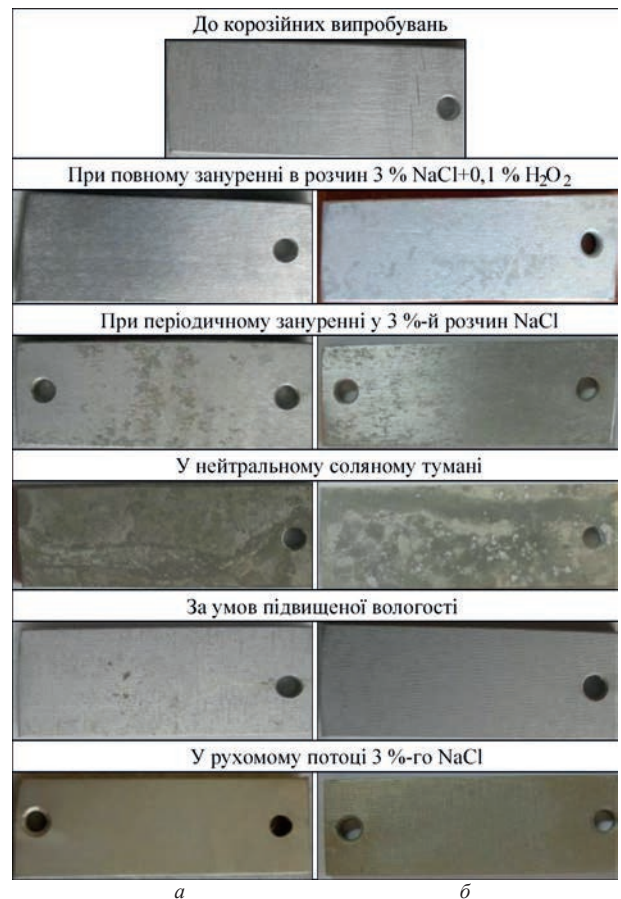


Рис. 1. Поверхні зразків основного металу сплаву АМг5М до та після корозійних випробувань в середовищах різної корозивності впродовж 30 (а), 90 (б) діб

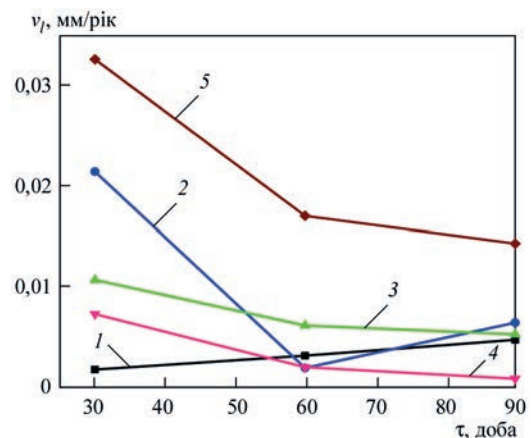


Рис. 2. Зміна швидкості корозії сплаву АМг5М впродовж різного часу в середовищах: 1 – 3% NaCl+0,1% H₂O₂; 2 – нейтральний соляний туман; 3 – періодичне занурення у 3%-й розчин NaCl; 4 – підвищена вологість; 5 – рухомий потік 3%-го NaCl

перевищувало 0,01 мм/рік (рис. 2, криві 1...4), що відповідало групі стійкості металу – «стійкий».

З продовженням тривалості випробувань до 90 діб швидкість корозії сплаву зменшилася у всіх середовищах, але найбільші значення отримано в нейтральному соляному тумані та рухомому потоці рідини (рис. 2, криві 2, 5). Метал у цих середовищах віднесли до групи стійкості – «стійкий» згідно з ГОСТ 9.502. Після впливу розчину 3% NaCl + 0,1% H₂O₂ (рис. 2, крива 1), нейтрального соляного туману (рис. 2, крива 2) та періодичного занурення у 3%-й NaCl (рис. 2, крива 3), на поверхні утворилися корозійні плями, які через 90 діб вкривали площу відповідно на 10, 50 та 40 %. Подальші прискорені корозійні дослідження проводили у нейтральному соляному тумані, оскільки такі корозійні умови відтворюють вплив найвагоміших чинників – температури, хлоридів, тонкоплівкової корозії.

Отже, корозійна тривкість сплаву в рухомому потоці рідини оцінена балом 4, що відповідає групі стійкості «стійкий» (значення швидкості корозії знаходяться в інтервалі від 0,005 до 0,01 мм/рік). За інших корозійних впливів (у розчині 3% NaCl + 0,1% H₂O₂, нейтральному соляному тумані, періодично-

му зануренні у 3%-й NaCl, за підвищеної вологості) корозійна тривкість сплаву оцінена балом 2...3, що відповідає групі стійкості «підвищено стійкий» (швидкість корозії не перевищує 0,01 мм/рік).

Електрохімічні дослідження. Потенціал корозії металу зварних швів, отриманих у горизонтальному та вертикальному положеннях від'ємніше, ніж основного металу приблизно на 14 та 43 мВ відповідно, зварних швів, виконаних під кутом 30°, позитивніше майже на 75 мВ (рис. 3, а). Різниця потенціалів між основним металом та металом шва для зварних швів, отриманих у вертикальному положенні та під кутом 30° перевищує допустиме (табл. 2). Зазначимо, що згідно з ГОСТ 9.005 допустимим вважають контакт різних зон зварного з'єднання, якщо різниця потенціалів між основним металом і зварним швом не перевищує 30...50 мВ.

З аналізу поляризаційних кривих встановили, що у 3%-му розчині NaCl корозія відбувається з катодним контролем (дифузійним) (рис. 3, з-е). Довжина області активного анодного розчинення на зварних швах, отриманих у горизонтальному і вертикальному положеннях, незначно більша, ніж на основному металі, на зварному шві, отриманому під кутом 30°, менше.

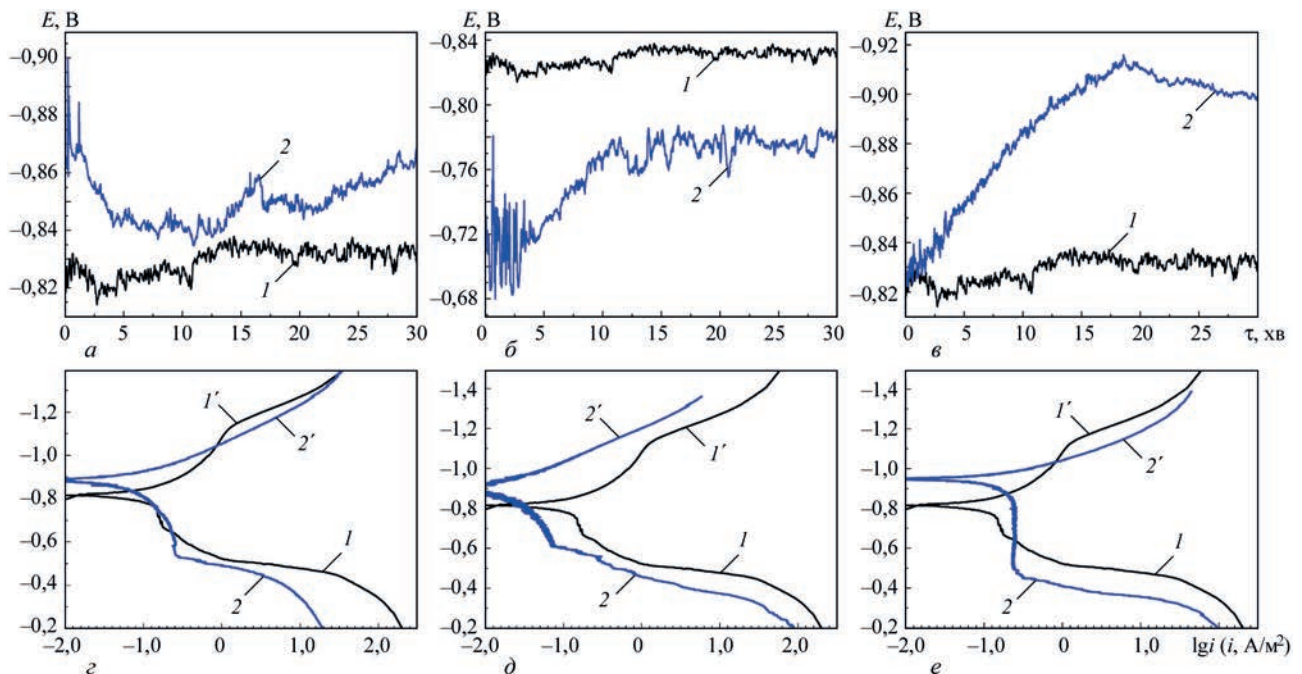


Рис. 3. Потенціали корозії (а-в) та вольт-амперні криві (з-е) у 3 %-му NaCl на основному металі (1') сплаву АМг5М і зварних швах (2'), отриманих у просторових положеннях: а, з – 0°; б, д – 30°; в, е – 90°: 1, 2 – анодні криві; 1', 2' – катодні криві

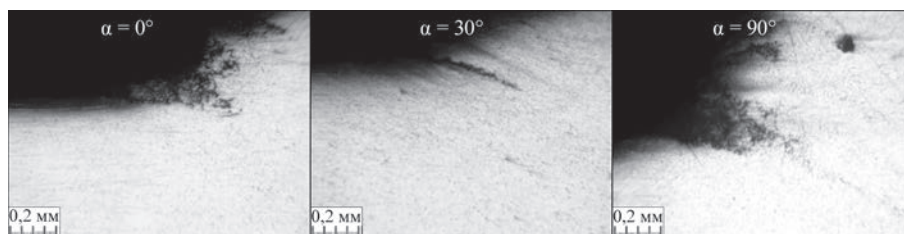


Рис. 4. Шліфи зварних зразків сплаву АМг5М, отриманих під різними кутами нахилу до горизонтальної площини при зварюванні, після випробувань опірності міжкристалітній корозії

Таблиця 1. Електрохімічні характеристики основного металу та зварних швів зварного з'єднання сплаву системи Al-Mg

Кут зварювання, град	Зона ЗЗ	E_k , В	Електрохімічні характеристики процесу		
			анодного		катодного
			b_a , В	i_d , А/м ²	
-	ОМ	-0,856	0,037	0,74	-1,13
0	ЗШ	-0,870	0,090	0,317	-1,10
30		-0,781	0,040	0,014	-1,12
90		-0,899	0,043	0,89	-1,13

Примітка. E_k – потенціал корозії b_a – нахил анодної поляризаційної кривої; i_d – граничний дифузійний струм; E_{H_2} – потенціал виділення водню

Нахили анодних кривих дорівнюють 0,037 В для основного металу сплаву, 0,09, 0,04 і 0,043 В для зварних швів, виконаних у положеннях 0, 30 і 90° відповідно. Збільшення нахилу для зварного шва, звареного у горизонтальному положенні, може свідчити про можливість його більш активного розчинення. Граничний струм відновлення кисню становив 0,74 А/м² на основному металі, 0,317, 0,014 і 0,895 А/м² на зварних швах, виконаних у положеннях 0, 30 і 90° відповідно. Потенціал початку виділення водню на основному металі та зварних швах мало відрізнявся і знаходився в межах від -1,10 до -1,13 В.

Оскільки у 3%-му розчині NaCl корозія сплаву перебігає з кисневою деполяризацією, можна очікувати, що досліджені зварні з'єднання проявлятимуть опірність корозії не гірше за основний метал. Однак відзначено деякі особливості електрохімічних властивостей зварного з'єднання, отриманого під кутом 30°, а саме: більш позитивний потенціал корозії та найменший порівняно з іншими зварними швами граничний дифузійний струм. Зроблено

припущення, що зварне з'єднання з такими електрохімічними властивостями, за умови задовільних інших показників (механічна міцність, пластичність, властивості мікроструктури) матиме найбільшу корозійну тривкість порівняно зі з'єднаннями, отриманими в інших просторових положеннях.

Дослідження опірності міжкристалітній корозії. З аналізу результатів видно, що при всіх кутах зварювання глибина міжкристалітного руйнування становила від 0,08 до 0,150 мм. Найменшу глибину міжкристалітної корозії відзначено при зварюванні при куті зварювання 30°, найбільшу – при 0 та 90° (табл. 2).

Дослідження опірності розшарувальній корозії. Основні ознаки розшарувальної корозії зварних з'єднань, виконаних у різних просторових положеннях, відзначено в Таблиці 3. Результати оцінювання опірності зразків зварних з'єднань сплаву АМг5М міжкристалітній корозії

Кут зварювання, град	Максимальна глибина руйнування границь зерен в зоні термічного впливу
0	0,150 ± 0,050
30	0,080 ± 0,025
90	0,150 ± 0,050

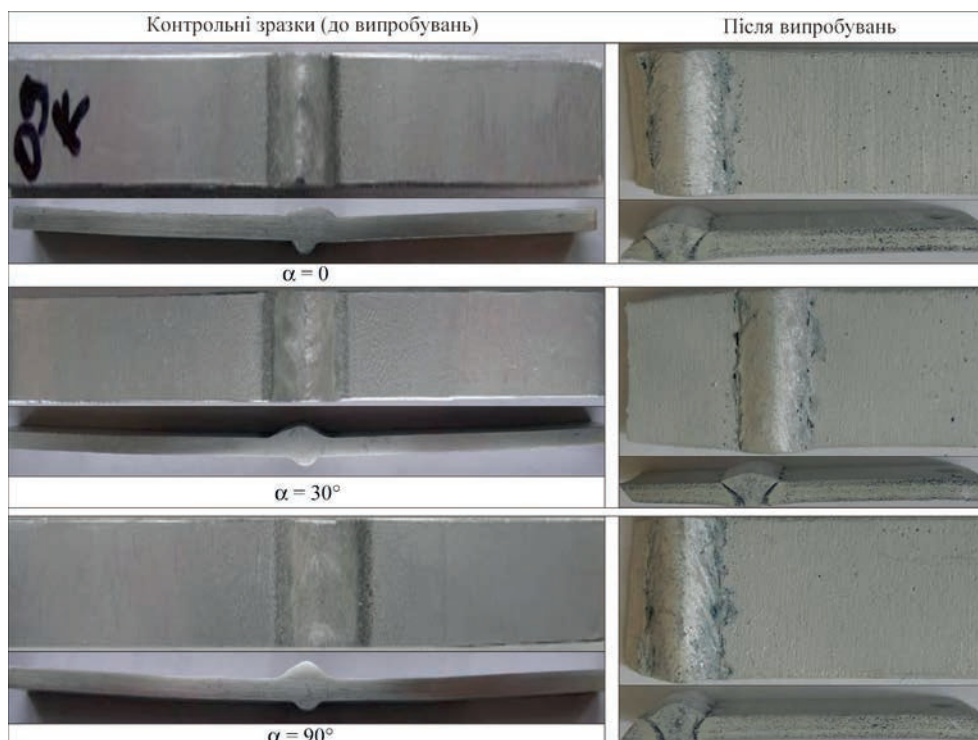


Рис. 5. Поверхні зразків зварних з'єднань сплаву АМг5М, отриманих під різними кутами нахилу до горизонтальної площини при зварюванні, після випробувань опірності розшарувальній корозії

женнях, такі (рис. 5): зміна кольору поверхні, що найбільше виражено по лінії сплавлення шва з основним металом, поодинокі дрібні пітинги на поверхні основного металу та лицьового шва, скупчення пітингів на торцях на лінії сплавлення шва з основним металом та по основному металу.

Слід відзначити, що діаметр пітингів не перевищував 1 мм. Будь-яких візуально помітних змін ознак розшарувальної корозії зразків залежно від швидкості зварювання або просторового положення пластин під час зварювання не виявлено. Стійкість всіх досліджених зразків оцінено балом 3 за десятибальною шкалою. Ймовірно, що опірність розшарувальній корозії буде визначатися тривкістю основного металу.

Таким чином, встановлено, що на опірність розшарувальній корозії всіх досліджених зварних з'єднань сплаву, отриманого із застосуванням зазначених прийомів зварювання, просторове положення заготовок не впливає.

Дослідження опірності корозії під напруженням в нейтральному соляному тумані. Після випробувань зразків основного металу в напру-

женому стані вже після 30 діб контактування з середовищем на їх поверхні виявлено дрібні пітинги і корозійні виразки (рис. 6). Зі збільшенням тривалості витримки зразків у корозивному середовищі до 180 діб корозійні пошкодження розвиваються активніше, збільшується їхній діаметр, глибина, ступінь ураження. Характерними ознаками корозії напружених зразків також є потемніння поверхні, утворення скупчень пітингів і корозійних виразок, розміри яких та ступінь ураження поверхні виразками зростають із збільшенням тривалості контакту із середовищем (рис. 6). Максимальна глибина виразок сягає 2 мм.

Зовнішні ознаки корозії зразків основного металу сплаву корелюють зі значеннями швидкості корозії (рис. 7).

На поверхні зразків зварних з'єднань, що виконані у горизонтальному положенні (кут зварювання 0°), при випробуванні в ненапруженому стані впродовж від 30 до 180 діб як на основному металі, так і в зоні шва основними видами корозійних уражень також є потемніння поверхні й корозійні плями (рис. 6).

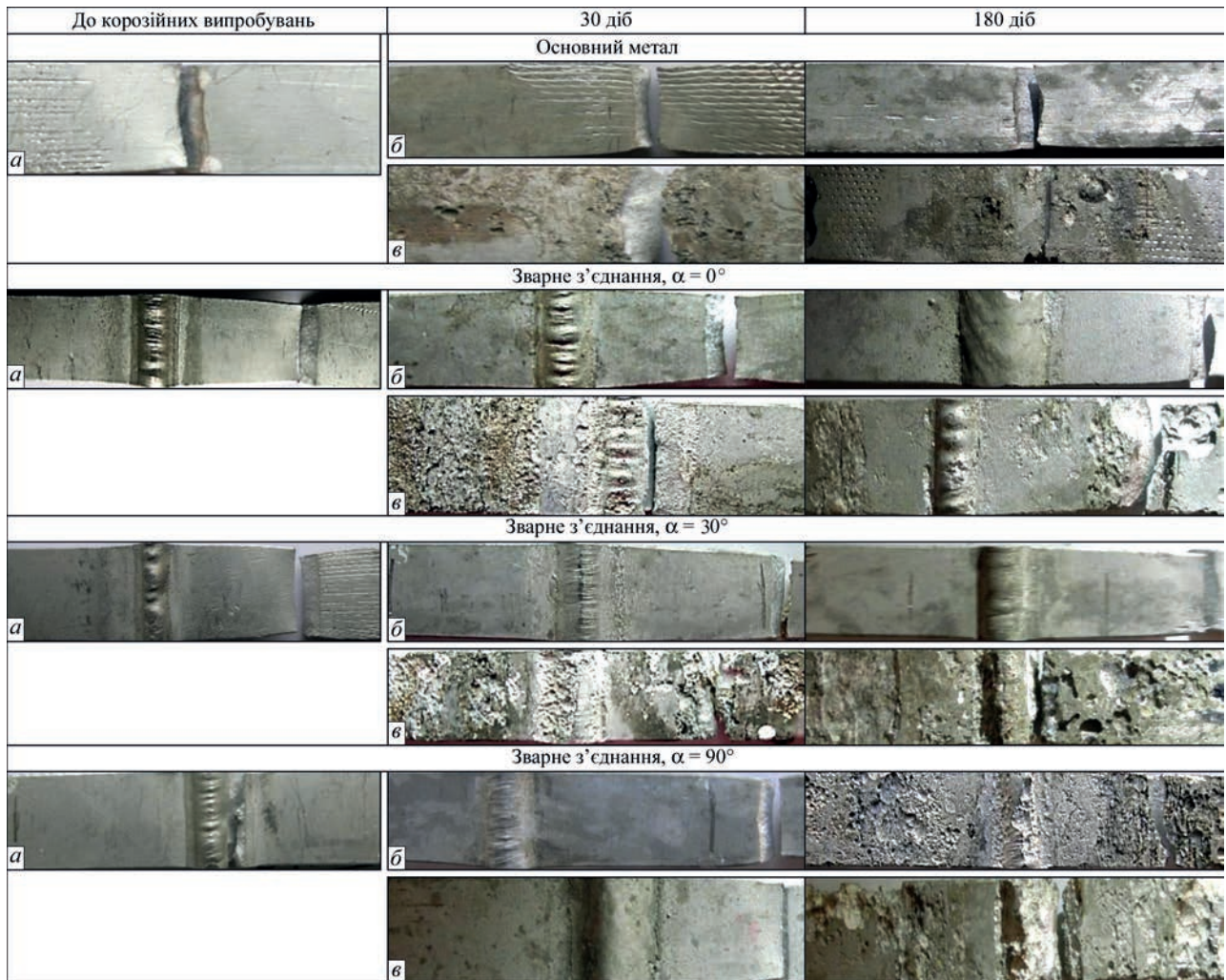


Рис. 6. Поверхні робочої частини зразків основного металу та зварних з'єднань сплаву АМг5М, отриманих при зварюванні під різними кутами відносно горизонтальної площини в області розриву до (а), після корозійно-механічних випробувань у ненапруженому (б) і напруженому (в) станах впродовж різного часу

Швидкість корозії зразків зменшувалася при тривалості корозійних випробувань від 30 до 180 діб:

у ненапруженому стані для основного металу від 0,0071 до 0,0010 мм/рік; для зварних з'єднань, виконаних під кутом $\alpha = 0^\circ$, від 0,0094 до 0,0013; 30° від 0,0035 до 0,000023; 90° від 0,0121 до 0,0007 мм/рік;

у напруженому стані – для основного металу від 0,7807 до 0,4132 мм/рік; для зварних з'єднань, виконаних під кутом $\alpha = 0^\circ$, від 0,8678 до 0,1167; під кутом 30° 0,7104 до 0,3538; під кутом 90° від 0,4966 до 0,6562 мм/рік.

Отже, швидкість корозії зразків у навантаженому стані закономірно вище, ніж у ненапруженому (рис. 7, б). Згідно зі шкалою корозійної стійкості в напруженому стані сплав і зварні з'єднання незалежно від кута зварювання відносяться до групи стійкості «повністю стійкі» в нейтральному соляному тумані (швидкість корозії менше 0,001 мм/рік). В нейтральному соляному тумані при навантаженні за напруження $0,95\sigma_T$ як основний метал сплаву, так і зварні з'єднання відповідають групі стійкості «понижено стійкі».

Треба відзначити, кут зварювання пластин не впливає на корозійну тривкість зварних з'єднань,

яка практично дорівнює корозійній тривкості основного металу.

Після випробувань на статичний розтяг руйнування зразків основного металу в стані до корозійних випробувань відбулося в робочій частині, злам був в'язким; межа міцності становила 308 МПа, межа плинності – 149,7 МПа (рис. 8, а), відносно подовження – 25 %.

Руйнування зразків зварних з'єднань до корозійних випробувань відбулося на відстані від лінії сплавлення приблизно 15...17 мм при $\alpha = 0^\circ$; 12...16 мм при $\alpha = 30^\circ$; 10...12 мм при $\alpha = 90^\circ$.

Межа міцності з'єднань при збільшенні кута зварювання в ряду $0 \rightarrow 30 \rightarrow 90^\circ$ становила 296,5 \rightarrow 298,6 \rightarrow 291,1 МПа, межа плинності – 132,3 \rightarrow 142,0 \rightarrow 140,9 МПа (рис. 8, а). Злам мав в'язкий характер для всіх з'єднань.

Ненапружений стан. В ненапруженому стані характеристики міцності й плинності основного металу сплаву та всіх зварних з'єднань після корозійних випробувань упродовж 30...180 діб змінюються мало (рис. 8, а).

Через 180 діб випробувань межа міцності змінюється:

для основного металу від 308 до 307,9 МПа, тобто менше ніж на 1 %;

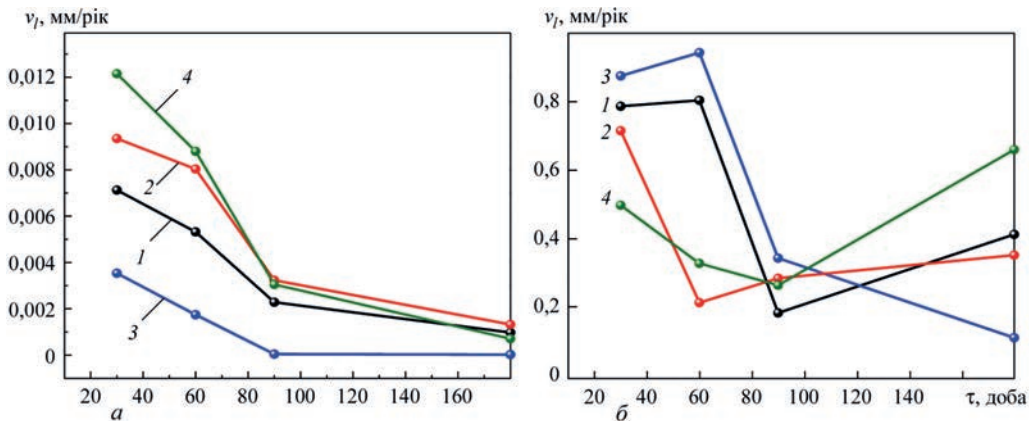


Рис. 7. Швидкість корозії зразків основного металу та зварних з'єднань, сплаву АМг5М, виконаних при швидкості зварювання $v_{зв} = 40$ м/год під різними кутами відносно горизонтальної площини, після випробувань за умов нейтрального соляного туману в ненапруженому (а) і напруженому (б) стані впродовж 180 діб: 1 – основний метал; 2–4 зварні з'єднання отримані під кутами 0, 30, 90°

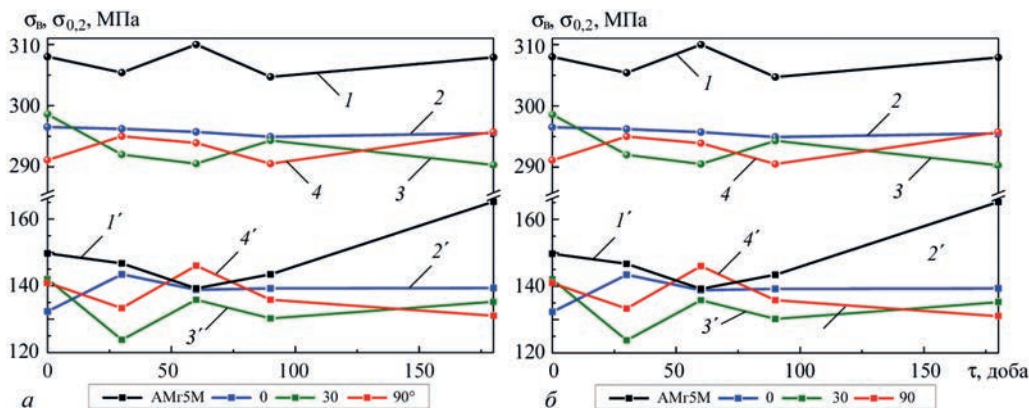


Рис. 8. Зміна межі міцності (1–4) та межі плинності (1'–4') основного металу та зварних з'єднань сплаву АМг5М, отриманих у просторових положеннях 0, 30 та 90° після випробувань за умов нейтрального соляного туману в ненапруженому (а) та напруженому (б) станах впродовж різного часу

для зварних з'єднань залежно від кута зварювання:

при $\alpha = 0^\circ$ від 296,2 до 295,5 МПа, тобто менше ніж на $\sim 1\%$;

при $\alpha = 30^\circ$ від 298,6 до 290,3 МПа, тобто на $\sim 2\%$;

при $\alpha = 90^\circ$ від 291,1 до 295,7 МПа, тобто на $\sim 2\%$.

За таких корозійних умов межа плинності змінюється:

для основного металу – від 149,7 до 145,2 МПа, тобто на $\sim 3\%$;

для зварних з'єднань залежно від кута зварювання при:

$\alpha = 0^\circ$ від 132,3 до 131,2 МПа, тобто на $\sim 1\%$;

$\alpha = 30^\circ$ від 142,0 до 135,2 МПа, тобто на $\sim 5\%$;

$\alpha = 90^\circ$ від 140,9 до 131,0 МПа, тобто на $\sim 7\%$.

Інтенсивніше контакт з корозивним середовищем вплинув на відносне подовження, що призвело до його зниження. Для основного металу відносне подовження зменшується від 25 до 19,3 % (на $\sim 23\%$), для зварних з'єднань при $\alpha = 0^\circ$ від 23,1 до 20,3 (на $\sim 12\%$); при $\alpha = 30^\circ$ від 25,2 до 18,1 % (на $\sim 28\%$); при $\alpha = 90^\circ$ від 19,6 до 17,0 % (на $\sim 13\%$).

Напружений стан. На противагу, випробування зразків у навантаженому стані призводять до помітного зниження межі міцності, плинності (рис. 8, б) та відносного подовження.

Через 180 діб випробувань спостерігали такі зміни межі міцності:

для основного металу від 308 до 233,6 МПа, що становило $\sim 24\%$;

для зварних з'єднань залежно від кута зварювання:

при $\alpha = 0^\circ$ від 296,2 до 242,2 МПа, тобто на 18 %;

при $\alpha = 30^\circ$ від 298,6 до 112,0 МПа, тобто на 62 %;

при $\alpha = 90^\circ$ від 291,1 до 85,0 МПа, тобто на 71 %.

Межа плинності за таких корозійних умов змінювалась:

для основного металу від 149,7 до 124,6 МПа, тобто на $\sim 17\%$;

для зварних з'єднань залежно від кута зварювання 2...52 %:

при $\alpha = 0^\circ$ від 132,3 до 129,4 МПа, тобто на 2 %;

при $\alpha = 30^\circ$ від 142,0 до 67,8 МПа, тобто на 52 %;

при $\alpha = 90^\circ$ від 140,9 до 77,3 МПа, тобто на 45 %.

Як і у випадку зразків у ненапруженому стані, для напружених зразків корозивне середовище впливає на показник відносного подовження, викликаючи його зниження. Для основного металу відносне подовження зменшується від 25 до 9,7 % (на 61 %), для зварних з'єднань, виконаних при кутах: $\alpha = 0^\circ$ від 23,1 до 8,3 % (на 64 %); $\alpha = 30^\circ$ від 25,2 до 1,9 % (на $\sim 92\%$); $\alpha = 90^\circ$ – від 19,6 до 8,7 % (на 56 %).

Зазначимо, що для з'єднань, виконаних під кутами $\alpha = 0, 30^\circ$, відносне подовження отрима-

но через 90 діб корозійних випробувань, оскільки після 180 діб руйнування відбулося поза базою.

Руйнування з'єднань, виконаних під різними кутами, відбувається переважно по зоні сплавлення, зоні термічного впливу, в деяких випадках по зварному шву. Відзначено, що розрив випробуваних зразків у напруженому стані відбувся по корозійним дефектам.

Таким чином, після корозійних випробувань зразків у ненапруженому стані межа міцності основного металу сплаву АМг5М зменшується не більше ніж на 1 %, для зварних з'єднань – не більше ніж на 2 %, межа плинності – на 3% й на 1...7 % відповідно для основного металу і зварних з'єднань (рис. 8, а). Відносне подовження зменшується інтенсивніше приблизно на 23 % для основного металу й на 12...28 % для зварних з'єднань.

Напружений стан сприяє суттєвішому зниженню міцнісних і пластичних властивостей як зварних з'єднань, так і основного металу: межа міцності основного металу сплаву АМг5М зменшується приблизно на 24 %, для зварних з'єднань – від 18 до 71 %, межа плинності – на 17 % для основного металу та 2...52 % зварних з'єднань (рис. 8, б). Відносне подовження зменшується інтенсивніше приблизно на 61 % для основного металу й на 8...92 % для зварних з'єднань.

Згідно з отриманими даними впливу просторового положення заготовок при зварюванні на опірність корозії впродовж 180 діб за умов нейтрального соляного туману не виявлено. Однак для зразків у напруженому стані більша втрата міцності й пластичності відзначена для з'єднань, зварених під кутами 30, 90°. Проте для з'єднання, звареного під кутом 30°, глибина міжкристалічної корозії була найменшою. Тобто можна припустити, що вагомим чинником втрати механічних властивостей є утворення глибоких корозійних виразок, ніж просторове положення заготовок при зварюванні.

Роботу виконано за підтримки Національної академії наук України в рамках програми відомчого замовлення Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона в 2017–2021 рр. (номер державної реєстрації 0117U001188).

Висновки

1. Оцінено опірність суцільній корозії основного металу сплаву АМг5М. У рухомому потоці 3%-го NaCl основний метал є стійким (швидкість корозії знаходиться в інтервалі від 0,005 до 0,01 мм/рік); в інших середовищах (розчині 3% NaCl+0,1% H₂O₂, нейтральному соляному тумані, періодичному зануренні у 3%-й NaCl, за підвищеної вологості) підвищено стійкий (швидкість корозії не перевищує 0,01 мм/рік).

2. На опірність розшарувальній корозії зварних з'єднань не впливає просторове положення пластин при зварюванні. Найменшу глибину міжкристалітної корозії (0,080 мм) встановлено для з'єднань, отриманих при зварюванні під кутом 30°.

3. Виявлено особливості електрохімічних властивостей зварного з'єднання, отриманого під кутом 30°: більш позитивний потенціал корозії та найменший порівняно з іншими зварними швами граничний дифузійний струм. Зварне з'єднання з такими електрохімічними властивостями за умови задовільних механічних показників матиме найвищу корозійну стійкість порівняно із зварними з'єднаннями, отриманими в інших просторових положеннях.

4. У нейтральному соляному тумані впродовж 180 діб основний метал сплаву АМг5М та зварні з'єднання у ненавантаженому стані незалежно від кута зварювання оцінено як «дуже стійкі» (швидкість корозії менше 0,001 мм/рік), у навантаженому стані за напруження $0,95\sigma_T$ – «знижено стійкі». Корозійна тривкість зварних з'єднань не залежить від кута зварювання та співмірна з основним металом.

5. Після корозійних випробувань зразків у ненапруженому стані межа міцності основного металу сплаву АМг5М зменшується не більше ніж на 1 %, для зварних з'єднань – не більше ніж на 2 %, межа плинності – на 3 % й на 1...7 %, відносне подовження – на 23 та 12...28 % відповідно. Напружений стан викликає швидке зниження властивостей: межа міцності основного металу зменшується на 24 %, зварних з'єднань – на 7...18 %, межа плинності – на 17 та 2...52 %, а відносне подовження – на ~61 й 8...92 % відповідно. Руйнування з'єднань відбувається по зоні сплавлення, зоні термічного впливу, в деяких випадках – по зварному шву, а зразків, що випробовувалися у напруженому стані, по корозійним дефектам.

6. Впливу просторового положення заготовок при зварюванні на опірність корозії впродовж 180 діб за умов нейтрального соляного туману не виявлено. Проте для зразків у напруженому стані більша втрата міцності й пластичності відзначена для з'єднань, зварених під кутами 30 та 90°. За результатами визначення опірності міжкристалітній корозії найменше руйнування меж зерен спостерігали для з'єднання, виконаного під кутом 30°. Втраті механічних властивостей більшою мірою сприяє утворення глибоких корозійних виразок, ніж просторове положення заготовок при зварюванні.

Список літератури

1. Romhanji E., Popović M. (2006) Problems and prospect of Al–Mg alloys application in marine constructions. *Metalurgija*, 12 (4), 297–307. <http://TechnoRep.tmf.bg.ac.rs/handle/123456789/915>
2. Zhemchuzhnikova D., Mogucheva A., Kaibyshev R. (2013) Mechanical properties and fracture behavior of an Al–Mg–Sc–Zr alloy at ambient and subzero temperatures. *Materials*

Science & Engineering J., 565, 132–141. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.12.017>

3. Tsaknopoulos K., Walde C., Tsaknopoulos D. et al. (2020) Characterization of Thermally Treated Gas-Atomized Al 5056 Powder. *MDPI: Materials*, 13, 1–11. <https://doi.org/10.3390/ma13184051>
4. Jones R.H., Baer D.R., Danielson M.J., Vetrano J.S. (2001) Role of Mg in the stress corrosion cracking of an Al–Mg alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32, 1699–1711. <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0148-0>
5. Jones R.H., Vetrano J.S., Windisch C.F. (2004), Stress Corrosion Cracking of Al–Mg and Mg–Al Alloys. *Corrosion* 60 (12). Paper Number: NACE-04121144.
6. Steiner P.J., Burns J.T. (2018) Mechanistic Studies of Intergranular Stress Corrosion Cracking in Al–Mg Alloys under Atmospheric Exposure Conditions. *Ibid.*, 74 (10), 1117–1131. <https://doi.org/10.5006/2853>
7. Sharma M.M., Tomedi J.D., Parks J.M. (2015) A microscopic study on the corrosion fatigue of ultra-fine grained and conventional Al–Mg alloy. *Corrosion Science*, 93, 180–190. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.01.020>
8. Beura V.K., Kale C., Srinivasan S. et al. (2020) Corrosion behavior of a dynamically deformed Al–Mg alloy. *Electrochimica Acta*, 354 (10), 136695. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136695>
9. Рабкин Д.М., Ягупольская Л.Н., Никитина А.В. и др. (1961) Коррозионная стойкость сплава АМг6 и его сварных соединений в зависимости от термообработки. *Автоматическая сварка*, 2(95), 40–48.
10. Похмурський, В.І., Хома, М.С. (2008) *Корозійна втома металів і сплавів*. Львів, СПОЛІОМ.
11. Покляцкий А.Г., Федорчук В.Е., Яворская М.Р. (2015) Стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением соединений сплава АМг5М, полученных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом и трением с перемешиванием. *ФХММ*, 51(5), 82–89.
12. Мардаревич Р., Винар В., Катода О. та ін. (2014) Трибохімічні особливості алюмінієвого сплаву в корозійних середовищах. *там же*, 3(10), 63–68.
13. Ищенко А.Я., Лабур Т.М. (2013) *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Київ, Наукова думка.
14. Labur T.M., Ostash O.P., Holovatyuk Y.V. et al. (2017) Influence of Alloying and Thermal Treatment on the Strength and Cyclic Crack Resistance of Welded Joints of Alloys of the Al–Cu–Mg System. Part 1. *Mater. Sci.* 53, 131–140. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0054-2>

References

1. Romhanji E., Popović M. (2006) Problems and prospect of Al–Mg alloys application in marine constructions. *Metalurgija*, 12 (4), 297–307. <http://TechnoRep.tmf.bg.ac.rs/handle/123456789/915>
2. Zhemchuzhnikova, D., Mogucheva, A., Kaibyshev, R. (2013) Mechanical properties and fracture behavior of an Al–Mg–Sc–Zr alloy at ambient and subzero temperatures. *Mater. Sci. & Engin. J.*, 565, 132–141. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.12.017>
3. Tsaknopoulos, K., Walde, C., Tsaknopoulos, D. et al. (2020) Characterization of thermally treated gas-atomized Al 5056 powder. *MDPI: Materials*, 13, 1–11. <https://doi.org/10.3390/ma13184051>
4. Jones, R.H., Baer, D.R., Danielson, M.J., Vetrano, J.S. (2001) Role of Mg in the stress corrosion cracking of an Al–Mg alloy. *Metallurg. and Mater. Transact. A*, 32, 1699–1711. <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0148-0>
5. Jones, R.H., Vetrano, J.S., Windisch, C.F. (2004) Stress corrosion cracking of Al–Mg and Mg–Al alloys. *Corrosion*, 60 (12). Paper Number: NACE-04121144.
6. Steiner, P.J., Burns, J.T. (2018) Mechanistic studies of intergranular stress corrosion cracking in Al–Mg alloys under atmospheric exposure conditions. *Ibid.*, 74 (10), 1117–1131. <https://doi.org/10.5006/2853>
7. Sharma, M.M., Tomedi, J.D., Parks, J.M. (2015) A microscopic study on the corrosion fatigue of ultra-fine grained and conventional Al–Mg alloy. *Corrosion Sci.*, 93, 180–190. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.01.020>

8. Beura, V.K., Kale, C., Srinivasan, S. et al. (2020) Corrosion behavior of a dynamically deformed Al–Mg alloy. *Electrochimica Acta*, 354 (10), 136695. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136695>.
9. Rabkin, D.M., Yagupolskaya, L.N., Nikitina, A.V. et al. (1961) Corrosion resistance of AMg6 alloy and its welded joints depending on heat treatment. *Avtomatich. Svarka*, 2(95), 40–48 [in Russian].
10. Pokhmursky, V.I., Khoma, M.S. (2008) *Corrosion fatigue of metals and alloys*. Lviv, SPOLOM [in Ukrainian].
11. Poklyatsky, A.G., Fedorchuk, V.E., Yavorskaya, M.R. (2015) Resistance to stress corrosion cracking of AMg5M alloy joints, produced by argon-arc nonconsumable electrode welding and friction stir welding. *FKhMM*, 51(5), 82–89 [in Russian].
12. Mardarevich, R., Vinar, V., Katoda, O. et al. (2014) Tribochemical peculiarities of aluminium alloy in corrosion environment. *Ibid.*, 3(10), 63–68 [in Ukrainian].
13. Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M. (2013) *Welding of modern structures from aluminium alloys*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
14. Labur, T.M., Ostash, O.P., Holovatyuk, Y.V. et al. (2017) Influence of alloying and thermal treatment on the strength and cyclic crack resistance of welded joints of alloys of the Al–Cu–Mg system. Pt 1. *Mater. Sci.* 53, 131–140. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0054-2>

CORROSION-MECHANICAL RESISTANCE OF WELDED JOINTS OF AMg5M ALLOY PRODUCED IN DIFFERENT SPATIAL POSITIONS OF BUTTS

L.I. Nyrkova, S.O. Osadchuk, S.Yu. Kovalenko, L.V. Goncharenko, A.V. Klymenko

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

The resistance to continuous corrosion of the base metal of AMg5M alloy of the Al–Mg alloying system was evaluated, the resistance groups were determined in the moving stream of 3% NaCl “resistant”, in a 3 % NaCl+0.1 % H₂O₂, neutral salt fog, periodic immersion in a 3 %- NaCl, under high humidity – “highly resistant”. Tests of welded joints produced in different spatial positions of the butts (0, 30 and 90°) relative to the horizontal plane revealed that the resistance to delamination corrosion is not affected by the spatial position of the plates during welding, and the smallest depth of intergranular corrosion was found in the joints, produced at an angle of 30° (0.080 mm). The peculiarities of electrochemical properties of the welded joint produced at an angle of 30° were revealed: more positive corrosion potential and the lowest limit diffusion current as compared to other welds. In the simulated conditions of a neutral salt fog for 180 days, a decrease in the strength and ductile properties of the joints was established: in the unstressed state, the tensile strength decreases by not more than 2 %, the yield strength – by approximately 1...7 %, the relative elongation – by 12...28 %. In the stressed state, the values decrease more intensively: the tensile strength by 7...18 %, the yield strength – by 2...52 %, and the relative elongation – by 8...92 %, respectively. The fracture of joints occurs in the fusion zone and the heat-affected zone, in some cases – in the weld, and in the samples tested in a stressed state, over corrosion defects. The predominant influence of the spatial position during welding of workpieces on the corrosion resistance of welded joints was not detected. It is proposed to use these joints under the condition of optimal selection of a spatial position during welding, which will provide the most acceptable values of mechanical properties. 14 Ref., 3 Tab., 8 Fig.

Key words: aluminum AMg5M alloy, welded joints, spatial position of butts, corrosion-mechanical resistance, potentiometry, voltammetry, intercrystalline corrosion, delamination corrosion, corrosion at constant deformation, accelerated corrosion tests

Надійшла до редакції 16.06.2022

WORLD TRADE FAIR FOR WELDING ENGINEERING —
JOINING, CUTTING, SURFACING

LET'S JOIN
THE WORLD!

11. – 15. September, 2023

REGISTER NOW!

www.schweissen-schneiden.com

DVS GERMAN WELDING SOCIETY

MESSE ESSEN

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN
No. 1
THE WORLD