

УДК 539.43: 621.791:669.71

ВПЛИВ ПРОСТОРОВОГО РОЗТАШУВАННЯ СТИКІВ ПІД ЧАС ЗВАРЮВАННЯ НА МІЦНІСТЬ І ЦИКЛІЧНУ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ З'ЄДНАНЬ

Т. М. ЛАБУР¹, О. П. ОСТАШ², Ю. В. ГОЛОВАТЮК², В. М. УЧАНІН²,
М. Р. ЯВОРСЬКА¹, М. П. ПАШУЛЯ¹, В. А. КОВАЛЬ¹, В. С. ШИНКАРЕНКО¹

¹ Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Досліджено закономірності впливу просторового розташування стику (під кутом 0, 30°, 45°, 90° відносно горизонтальної площини) за різних швидкостей імпульсно-дугового зварювання (23, 40, 57 m/h) плавким електродом листів конструкційного алюмінієвого сплаву АМг5М товщиною 4 mm з використанням присадкового дроту ЗвАМг6 на фізико-механічні властивості зварних з'єднань. Показано, що, керуючи тепловкладенням у зварювальний метал і швидкістю кристалізації металу ванни, можна зварювати без використання підкладних формувальних елементів. Оптиміальні характеристики циклічної тріщиностійкості металу швів цих зварних з'єднань отримано за розміщення стиків під кутом 30° відносно горизонтальної площини. Попередній контроль властивостей цих зварних з'єднань можна здійснювати неруйнівним вихрострумовим методом за питомою електропровідністю металу.

Ключові слова: алюмінієвий сплав АМг5М, зварні з'єднання, технологія зварювання, міцність, циклічна тріщиностійкість.

Забезпечення високої якості зварних з'єднань елементів конструкцій, зокрема оболонкових, за різного просторового розташування стиків відносно горизонтальної площини в умовах імпульсно-дугового зварювання плавким електродом на сьогодні є актуальною, ще недостатньо вивченою науково-технічною задачею. Це пов'язано з обмеженістю літературних даних про структуру і фізико-механічні характеристики металу різних зон зварних з'єднань, отриманих за таких умов [1–8]. Імпульсно-дугове зварювання плавким електродом характеризується періодичним чергуванням базового та імпульсного струму. Перенесення електродного металу залежить від співвідношення сили тяжіння та фізичних властивостей розплавленого металу в зварювальній ванні. Стабільні умови горіння дуги за періодичного чергування імпульсів зварювального струму з різними параметрами та перенесення електродного металу в ванну визначають характер формування структури і геометричні розміри швів. Особливо це спостерігали за зварювання в монтажних умовах, коли шви формуються за різного просторового розташування стику відносно горизонтальної площини. Експериментально встановлено, що завдяки модуляції швидкості зварювання напруга дуги та швидкість подачі дроту можуть бути незмінними. Це дає змогу визначити параметри потужного тимчасового імпульсу, який накладається на дугу постійного струму для отримання керованого переносу електродного металу залежно від просторового розташування стиків. Таким чином, можна встановити технологічні режими зварювання за оптимального впливу гравітаційного чинника (сили тяжіння) та фізичних властивостей розплавленого металу, а також вивчити особливості їх впливу на динаміку

руху рідкого металу у зварювальній ванні, оскільки саме вона визначає формування структури, дефектність і механічні властивості металу шва.

Мета роботи – дослідити закономірності формування швів з алюмінієвого сплаву АМг5М та зміни їх структурно-механічних властивостей за різних швидкостей зварювання і просторового розташування стиків.

Матеріал і методики. Досліджували зварні з'єднання заготовок розміром 250×100 mm (рис. 1а), вирізаних з листів товщиною 4 mm зі сплаву АМг5М (складу (mass%): 5,2 Mg; 0,2 Cu; 0,4 Si; 0,4 Fe; 0,4 Mg; 0,15 домішки; решта Al; у відпаленому стані за границь текучості $\sigma_Y = 130$ МПа і міцності $\sigma_U = 305$ МПа та відносного видовження $\delta = 15\%$). Під час зварювання вздовж напрямку вальцювання листів (RD на рис. 1а) за наявності і відсутності формувальної підкладки в умовах вільного проплаву та кристалізації металу стики розташовували під різними кутами β до горизонтальної площини (рис. 1b).

Зварювали плавким електродом з використанням обладнання MW 2000 фірми "Fronius". Стикові з'єднання отримували однопрохідним зварюванням імпульсним струмом із застосуванням стандартного присадкового дроту ЗвАМг6 з діаметром 1,6 mm. Захисний газ під час зварювання – аргон вищого гатунку (ГОСТ 10157-79). Середні значення зварювального струму, напруги на дузі та параметри імпульсів струму фіксували за допомогою осцилографа. Якість швів оцінювали за результатами виявлення дефектів типу тріщин, непроварів, пор, використовуючи метод рентгенографії (ГОСТ 7512-89). За цими результатами встановили оптимальні параметри зварювання: струм 102...105 А; напруга дуги 18,6...19,6 V, за яких утворюється щільний шов за мінімальної кількості дефектів (пор).

Алюмінієвий сплав АМг5М і присадковий дріт традиційно очищали хімічним способом, а безпосередньо перед зварюванням торець стиків механічно зачищали на глибину не менше 0,1 mm. Кут нахилу пальника під час зварювання становив $10 \dots 15^\circ$ відносно площини стиків, відстань між соплом пальника та зварювальним металом – 8...10 mm, довжина дуги (відстань між металом і кінцем дроту) – 3...5 mm, витрати захисного газу – 20 l/min.

Особливості формування швів контролювали, вимірюючи їх геометричні розміри за допомогою електронного штангенциркуля АРТ-34460-150 (похибка вимірювання 0,03 mm). Аналізували зміну середньої ширини b і висоти h шва, а також ширини b_1 і висоти h_1 кореня шва (рис. 1b).

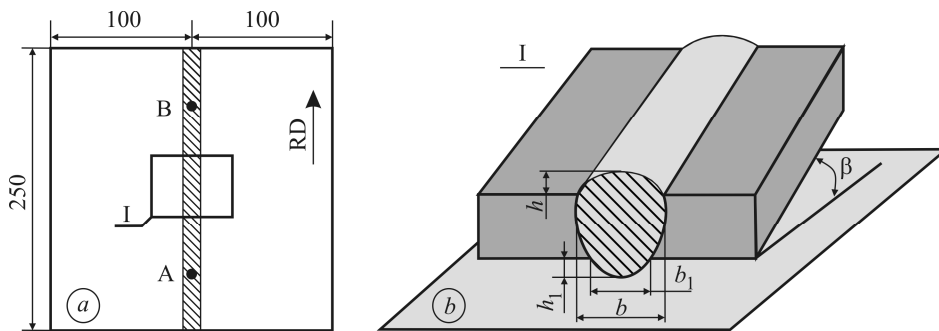


Рис. 1. Схеми зварного з'єднання (а) і розташування стиків під кутом β відносно горизонтальної площини (b); RD – напрям вальцювання листів.

Fig. 1. Schemes of a welded joint (a) and its location at angle β relatively to the horizontal plane (b); RD – sheet rolling direction.

Визначали проплавлювальну здатність зварювальної дуги за різного нахилу стиків до горизонталі залежно від швидкості зварювання ($v_w = 23, 40$ і 57 m/h) та оцінювали її вплив на геометричні розміри швів (рис. 1b) та їх властивості.

Структурно-механічний стан металу у різних зонах з'єднань залежно від технології зварювання оцінювали за його питомою електропровідністю (χ), використовуючи вихрострумний структуроскоп ВЕП-21 [9] з похибкою вимірювання 0,1 MSm/m.

Для визначення механічних властивостей зварних з'єднань зразки вирізали і навантажували перпендикулярно до осі зварного шва. Характеристики міцності і пластичності встановлювали на стандартних зразках-смугах завширшки 20 mm [10]. Визначали коефіцієнти міцності $K_U^I = \sigma_U^{WJ} / \sigma_U^{BM}$ і $K_U^{II} = \sigma_U^{WM} / \sigma_U^{BM}$, де σ_U^{WJ} – міцність зварного з'єднання (WJ) з технологічним посиленням шва; σ_U^{WM} – міцність металу шва (WM) без технологічного посилення; σ_U^{BM} – міцність основного металу (BM), а також оцінювали пластичність металу шва за значенням кута α загину зразка до руйнування [10].

Характеристики циклічної тріщиностійкості (ЦТ) визначали на зразках-смугах шириною 30 mm з гострим (радіус 0,1 mm) боковим вирізом вздовж осі зварного шва за стандартною методикою [11]. Будували діаграмами швидкостей росту втомної макротріщини – залежності $da/dN - \Delta K$ за частоти 10...12 Hz і коефіцієнта асиметрії $R = 0,1$ циклу навантаження у повітрі при 20°C. Довжину тріщини виміряли катетометром КМ-6 за 25-кратного збільшення з похибкою 0,02 mm. Діаграми описували аналітичними залежностями:

$$da/dN = C_1(\Delta K - \Delta K_{th})^{n_1}, \text{ при } 10^{-10} \leq da/dN \leq 10^{-8} \text{ m/cycle};$$

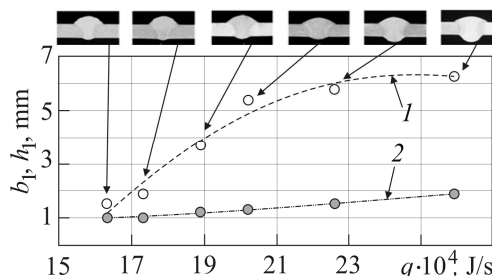
$$da/dN = C_2(\Delta K)^{n_2}, \text{ при } 10^{-8} \leq da/dN \leq 10^{-5} \text{ m/cycle}.$$

Характеристиками ЦТ матеріалів вибрали поріг втоми $\Delta K_{th} = \Delta K_{10}^{-10}$ та циклічну в'язкість руйнування $\Delta K_{fc} = \Delta K_{10}^{-5}$ – розмахи коефіцієнта інтенсивності напружень за швидкості росту тріщини $da/dN = 10^{-10}$ і 10^{-5} m/cycle, відповідно. Для оцінювання ефективності технології зварювання порівнювали тріщиностійкість металу швів і основного металу, при цьому зразки основного металу вирізали поперек напрямку вальцювання листів (Т-Л зразки).

Результати та їх обговорення. Геометричні і структурно-механічні особливості зварних швів. Під час зварювання зі швидкістю 23 m/h ширина шва змінюється залежно від кута β просторового розташування стиків: у вертикальному ($\beta = 90^\circ$) спостерігали найменшу ширину шва ($b = 9,3$ mm), а найширший шов ($b = 9,8$ mm) – при $\beta = 0$, що пов'язано з відповідною кінетикою кристалізації металу під час охолодження зварювальної ванни. Найменшу ширину кореня шва ($b_1 = 4,4$ mm) отримали за орієнтації стику в горизонтальній площині ($\beta = 0$), а зі зростанням кута нахилу ($\beta = 90^\circ$) вона збільшується до 5,7 mm.

Рис. 2. Вплив проплавлювальної здатності зварювальної дуги на форму кореня шва (1 – ширина b_1 ; 2 – висота h_1 , див. рис. 1b).

Fig. 2. Influence of penetrating ability of welding arc on weld root form (1 – width b_1 ; 2 – height h_1 , see. Fig. 1b).



За швидкості зварювання 40 m/h, коли скорочується час перебування металу при високій температурі, спостерігали зменшення на 5% геометричних розмірів швів, а за швидкості 57 m/h – на 10%. Загалом розміри кореня шва зростають зі

збільшенням погонної енергії зварювання q (рис. 2): більше ширина b_1 і менше висота h_1 .

Оцінку структурно-механічного стану різних зон зварних з'єднань залежно від швидкості зварювання і просторового розташування стиків виконували за допомогою сканування їхньої поверхні вихрострумовим давачем з кроком 2 мм. За усередненими результатами вимірювання питомої електропровідності (ПЕП) після зняття технологічного посилення шва встановлено залежність значень ПЕП металу цих зон від способу зварювання. Характер розподілу ПЕП у різних зонах практично збігається з відповідним розподілом твердості. Видно (рис. 3а), що в зоні термічного впливу (HAZ) ПЕП рівна визначеній для основного металу (ВМ), в околі лінії сплавлення вона дещо знижується, а мінімальні значення відповідають металу шва (WM). Відомі кореляційні залежності між ПЕП, структурними параметрами і механічними характеристиками низки алюмінієвих сплавів свідчать [12, 13], що зниження ПЕП пов'язане зі зменшенням їх пластичності, тобто метал шва є критичною зоною досліджуваних зварних з'єднань з точки зору схильності до крихкого руйнування. Тому в подальшому увагу зосередили на вивченні зміни властивостей саме цієї зони.

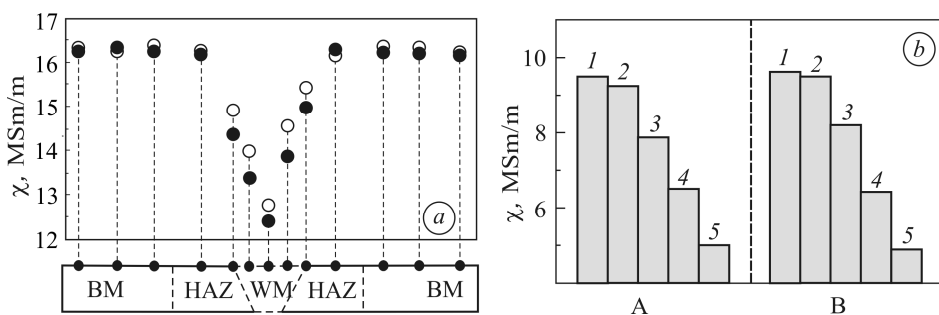


Рис. 3. Зміна питомої електропровідності металу різних зон зварних з'єднань, отриманих за швидкості зварювання 23 м/х (○) і 57 м/х (●) при куті $\beta = 90^\circ$ (а) та її значення, виміряні вздовж осі шва, залежно від кута β ($v_w = 57$ м/х): 1 – $\beta = 0^\circ$; 2 – 30° ; 3 – 45° ; 4 – 60° ; 5 – 90° (б). А і В – точки вимірювання (див. рис. 1а).

Fig. 3. Change of the electrical conductivity of the metal of different zones of welded joints obtained at welding speed of 23 m/h (○) and 57 m/h (●) at angle $\beta = 90^\circ$ (a) and also its values measured along the axis of the weld (welding speed of 57 m/h) depending on angle β :

1 – $\beta = 0^\circ$; 2 – 30° ; 3 – 45° ; 4 – 60° ; 5 – 90° (b).

A and B are the measurement points (see. Fig. 1a).

Значення ПЕП, виміряні вздовж осі шва з технологічним посиленням (точки А і В на рис. 1а), залежать від кута β просторового розташування стику під час зварювання (рис. 3б): при $\beta = 0^\circ$ і $\beta = 30^\circ$ вони майже однакові, а при $\beta = 45^\circ \dots 90^\circ$ – суттєво менші. Це може свідчити про відхилення від оптимального структурно-механічного стану металу, який отримують при $\beta = 0 \dots 30^\circ$. При цьому така картина ідентична на всій довжині зварного шва (гістограми А і В на рис. 3б практично однакові).

Механічні характеристики зварних швів. З практичної точки зору найбільший інтерес викликає зварювання без формувальної підкладки при $\beta > 0$. Порівняння результатів, отриманих для цього випадку при $v_w = 23$ і 40 м/х, показує (рис. 4), що відносна міцність зварного з'єднання (коефіцієнт K_U^I) та відносна міцність (коефіцієнт K_U^{II}) і пластичність (кут α) металу шва слабо залежать від кута β просторового розташування і швидкості зварювання стиків (рис. 4а, с). При цьому потрібно відзначити, що застосована технологія зварювання дозволяє

отримувати якісні зварні шви, де міцність зварного з'єднання і металу шва співмірна з міцністю основного металу ($K_U^I = 0,88...0,96$; $K_U^{II} = 0,91...0,95$). Пластичність металу шва ($\alpha = 90^\circ...122^\circ$) дещо поступається основному металу ($\alpha = 180^\circ$), але залишається значно вищою від нижньої межі, яка допускається нормативними документами на виготовлення зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів.

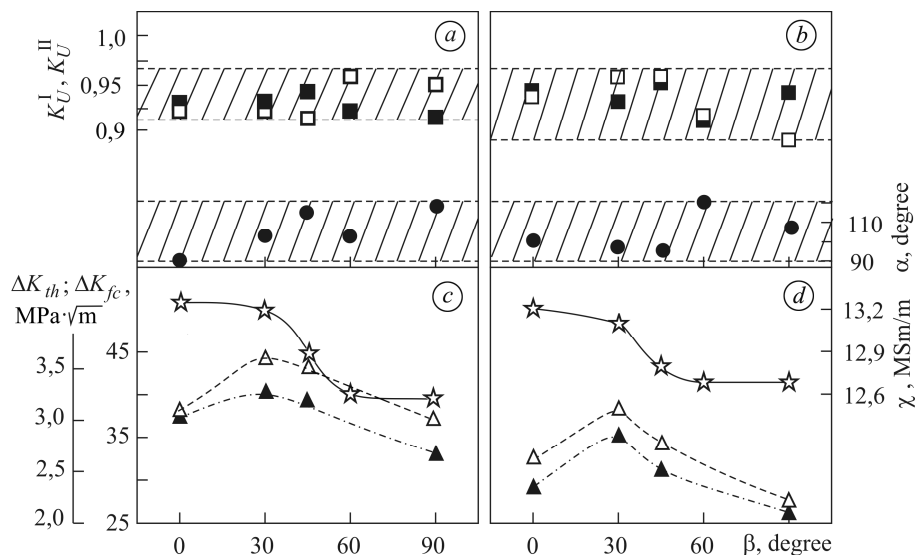


Рис. 4. Залежність фізико-механічних характеристик: відносної міцності зварного з'єднання K_U^I (\square) і металу шва K_U^{II} (\blacksquare), граничного кута загину α (\bullet), порогу втоми ΔK_{th} (\triangle), циклічної в'язкості руйнування ΔK_{fc} (\blacktriangle) і ПЕП χ (\star) металу шва від кута β за зварювання без формувальної підкладки зі швидкістю $v_w = 23$ м/х (*a, b*) і 40 м/х (*c, d*). Характеристики ЦТ і ПЕП визначені вздовж осі шва.

Fig. 4. Dependence of the physical and mechanical characteristics: relative strength of the welded joint K_U^I (\square) and weld metal K_U^{II} (\blacksquare), critical bend angle α (\bullet), fatigue threshold ΔK_{th} (\triangle), cyclic fracture toughness ΔK_{fc} (\blacktriangle) and electrical conductivity χ (\star) of the weld metal on angle β for joints obtained without forming substrate at welding speed 23 m/h (*a, b*) and 40 m/h (*c, d*). The characteristics of fatigue crack growth resistance and electrical conductivity are estimated along the weld axis.

Неоднозначно змінюються від режимів зварювання характеристики ЦТ для металу шва (рис. 4*b, d*), оскільки параметри механіки втомного руйнування є найчутливішими до структурно-фазового стану конструкційних матеріалів [14]. Порівняно зі зварюванням стиків у горизонтальній площині ($\beta = 0$) поріг втоми ΔK_{th} і циклічна в'язкість руйнування ΔK_{fc} металу вертикальних швів ($\beta = 90^\circ$) знижується, що супроводжується зменшенням ПЕП. При $\beta = 30^\circ$ ці характеристики ЦТ, навпаки, зростають за практично незмінної ПЕП. Аналогічну якісно, але більше виражену кількісно ситуацію спостерігають за зварювання на формувальній підкладці (рис. 5), особливо зі зростанням швидкості зварювання від 23 до 57 м/х. Імовірно, за просторового розташування стиків під кутом $\beta = 30^\circ$ до горизонтальної площини вплив гравітаційного чинника на кінетику рідкого металу обумовлює оптимальне поєднання мікроструктурних параметрів і дефектності (кількості пор) металу шва.

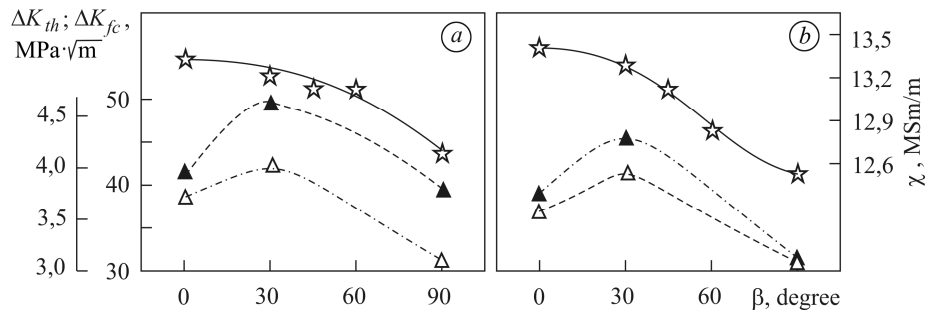


Рис. 5. Залежність характеристик ЦТ ΔK_{th} (Δ) і ΔK_{fc} (\blacktriangle) та ПЕП χ (\star) металу шва від кута β за зварювання на формувальній підкладці зі швидкістю $v_w = 23$ м/х (а) і 57 м/х (б).

Fig. 5. Dependence of fatigue crack growth resistance characteristics ΔK_{th} (Δ), ΔK_{fc} (\blacktriangle) and electrical conductivity χ (\star) of weld metal on angle β for joints obtained using forming substrate at welding speed 23 m/h (a) and 57 m/h (b).

Порівняння діаграм швидкостей росту втомної макротріщини в різних зварних швах показує (рис. 6), що за зварювання під оптимальним кутом $\beta = 30^\circ$ найвищу тріщиностійкість демонструє метал шва, отриманий на формувальній підкладці при $v_w = 23$ м/х (крива 1). При $v_w = 57$ м/х (крива 2) і при $v_w = 23$ м/х без формувальної підкладки (крива 3) характеристики ЦТ знижуються, особливо у високоамплітудній області діаграми, яка визначає циклічну в'язкість руйнування ΔK_{fc} . Найнижчу тріщиностійкість має метал шва за зварювання без формувальної підкладки при $v_w = 40$ м/х (крива 4). Таким чином, зі зростанням швидкості зварювання тріщиностійкість металу шва знижується.

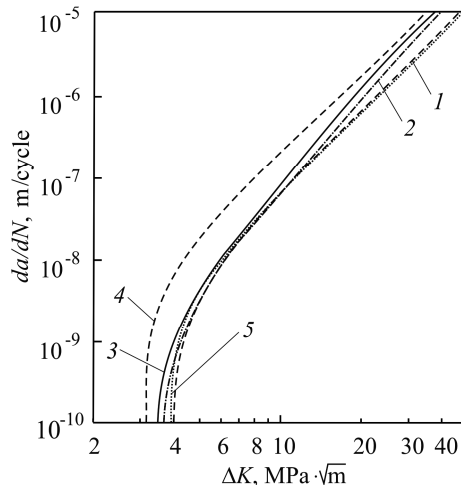


Рис. 6. Порівняння діаграм швидкостей росту втомної макротріщини в металі шва за зварювання стиків під кутом $\beta = 30^\circ$ та в основному металі: 1 – метал шва, $v_w = 23$ м/х, на формувальній підкладці; 2 – метал шва, 57 м/х, на підкладці; 3 – метал шва, 23 м/х, без підкладки; 4 – метал шва, 40 м/х, без підкладки; 5 – основний метал, Т-Л зразки.

Fig. 6. Comparison of fatigue cracks growth rates in the weld metal under joints welding at angle $\beta = 30^\circ$ and also in base metal: 1 – weld metal, welding speed 23 m/h using forming substrate; 2 – weld metal, welding speed 57 m/h using forming substrate; 3 – weld metal, welding speed 23 m/h without forming substrate; 4 – weld metal, welding speed 40 m/h without forming substrate; 5 – base metal (T-L specimens).

Порівнюючи ці дані з результатами випробування основного металу (крива 5), коли втомна тріщина росте вздовж напрямку вальцювання листів (Т-Л зразки), тобто паралельно осі зварного шва (див. рис. 1а), можна констатувати, що

метал шва з'єднань, зварених за просторового розташування під оптимальним кутом $\beta = 30^\circ$ на формувальній підкладці зі швидкістю $v_w = 23$ м/х (крива 1) за характеристиками ЦТ практично не поступається основному металу. Коли зварювати з цією ж швидкістю без підкладки (крива 3), то тріщиностійкість металу шва і основного металу в припороговій і середньоамплітудній ділянках діаграм майже однакова, а у високоамплітудній – метал шва за тріщиностійкістю дещо поступається основному металу.

ВИСНОВКИ

Вперше досліджено закономірності впливу просторового розташування стику за різних швидкостей імпульсно-дугового зварювання плавким електродом листів конструкційного алюмінієвого сплаву АМг5М з використанням присадкового дроту ЗвАМг6 на фізико-механічні властивості зварних з'єднань. Експериментально встановлено, що стабільність зварювання “у висячому положенні” забезпечують шляхом модуляції параметрів зварювального струму, напруги на дузі та швидкості зварювання. Це дає змогу керувати тепловкладенням у зварювальний метал і швидкістю кристалізації металу ванни та зварювати без використання підкладних формувальних елементів.

Характеристики циклічної тріщиностійкості чутливіші до зміни структурно-механічного стану металу шва зварних з'єднань листів цього сплаву порівняно з його характеристиками міцності і пластичності за статичного навантаження. Їх оптимальні значення в монтажних умовах досягають за розташування стиків під кутом 30° відносно горизонтальної площини. Попередній контроль властивостей цих зварних з'єднань можна здійснювати неруйнівним вихрострумовим методом за питомою електропровідністю металу.

РЕЗЮМЕ. Исследованы закономерности влияния пространственного положения стыков (под углом 0, 30°, 45°, 90° относительно горизонтальной плоскости) при различных скоростях импульсно-дуговой сварки (23, 40, 57 м/х) плавящимся электродом листов конструкционного алюминиевого сплава АМг5М толщиной 4 мм с использованием присадочной проволоки ЗвАМг6 на физико-механические свойства сварных соединений. Показано, что, управляя тепловложением в сварочный металл и скоростью кристаллизации металла ванны, можно осуществлять сварку без использования подкладных формирующих элементов. Установлено, что оптимальные характеристики циклической трещиностойкости металла швов этих сварных соединений обеспечивает размещение стыков в монтажных условиях под углом 30° относительно горизонтальной плоскости. Предварительный контроль свойств этих сварных соединений можно осуществлять неразрушающим вихретоковым методом по значению удельной электропроводности металла.

SUMMARY. The regularities of the influence of joint space position (angle 0, 30°, 45°, 90° relatively to the horizontal plane) at various speeds of pulsed arc welding (23, 40, 57 м/х) by consumable electrode of structural aluminum alloy АМг5М sheets, 4 mm thick using filler wire ЗвАМг6 on physical and mechanical properties of welded joints are investigated. It is shown that by controlling the quantity of heat input into the weld metal and the rate of the metal bath crystallization, the welding can be carried out without use of the welding forming elements. It is found that the optimum fatigue crack growth resistance characteristics are provided by the placement of the joints at angle 30° relatively to a horizontal plane. Preliminary checking of the properties of the welded joints can be carried out by the non-destructive eddy current method using the measurement of the metal electrical conductivity.

1. Петров Г. Л. Неоднородность металла сварных соединений. – Л.: Судпромгиз, 1963. – 206 с.
2. Влияние режимов импульсно-дуговой сварки алюминия АДЮ на форму и пористость швов / В. С. Машин, В. М. Павшук, И. В. Довбищенко, П. П. Шейко // Автомат. сварка. – 1991. – № 4. – С. 57–60.

3. *Жерносеков А. М., Андреев В. В.* Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом // Автомат. сварка. – 2007. – № 10. – С. 48–51.
4. *Лебедев В. А.* Некоторые особенности дуговой механизированной сварки алюминия с управляемой импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство. – 2007. – № 11. – С. 26–30.
5. *Matsumoto Jiro.* Defects in aluminium welds and their influence on mechanical properties – 1 // J. of Light Metal Welding and Construction. – 1984. – **22**, № 10. – P. 443–449.
6. *Matsumoto Jiro.* Defects in aluminium welds and their influence on mechanical properties – 2 // J. of Light Metal Welding and Construction. – 1984. – **22**, № 10. – P. 491–497.
7. *Colchen D.* Application des calculs aux elements finis pour definir et valider des modeles analytiques de calcul de contrainte sur un assemblage bout a bout en alliage d'aluminium // Soudage et Techniques Connexes. – 2000. – **54**, № 3/4. – P. 9–16.
8. *Вплив технології зварювання на структуру і фізико-механічні властивості з'єднань з алюмінієвого сплаву АМг5М / Т. Лабур, Ю. Головатюк, М. Пашуля, М. Яворська // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій: зб. наук. праць 5-ї Міжнар. конф. (24–27.06.2014, Львів) / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2014. – С. 457–461.*
9. *Діагностика технічного стану авіаконструкцій після довготривалої експлуатації / О. П. Осташ, Д. С. Ківа, В. М. Учанін, О. І. Семенець, І. М. Андрейко, Ю. В. Головатюк // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2013. – № 2. – С. 15–22.*
10. *ГОСТ 6996-66.* Сварные соединения. Методы механических испытаний. – Введ. 01.1967.
11. *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.* ASTM Standards, E647-93. – 28 p.
12. *Наумов Н. М., Микляев П. Г.* Резистометрический неразрушающий контроль алюминиевых деформируемых сплавов. – М.: Металлургия, 1974. – 200 с.
13. *Nondestructive Testing Handbook, 2nd ed.* / R. C. McMaster, P. McIntire, M. L. Mester (Eds). Vol. 4: Electromagnetic Testing, American Society for Nondestructive Testing, 1986. – 676 p.
14. *Осташ О. П., Андрейко И. М., Головатюк Ю. В.* Деградація матеріалів і втомна довговічність тривало експлуатованих авіаконструкцій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – **42**, № 4. – С. 5–16.
(*Ostash O. P., Andreiko I. M., and Holovatyuk Yu. V.* Degradation of materials and fatigue durability of aircraft constructions after long-term operation // Materials Science. – 2006. – **42**, № 4. – P. 427–439.)

Одержано 10.09.2015