

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ З'ЄДНАНЬ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ АМг5М, ОТРИМАНИХ У РІЗНИХ ПРОСТОРОВИХ ПОЛОЖЕННЯХ СТИКІВ

Т.М. Лабур, М.Р. Яворська, В.А. Коваль

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

Досліджено вплив швидкості зварювання (23, 40, 57 м/год) в умовах дії плавкого електрода на характер вільного проплаву і кристалізації швів сплаву АМг5М у різних просторових положеннях стиків. Встановлено, що оптимальні теплофізичні умови формування дрібнозернистої структури швів з'єднань відбуваються, коли швидкість зварювання становить 40 м/год. Міцність швів при цьому підвищується на 10...15 % без зниження рівня пластичності. Відмінною особливістю структури швів, отриманих на різних швидкостях зварювання, є розміри та форма дендритів та фазових включень у міжкристалітному просторі. Бібліогр. 6, табл. 5, рис. 1.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, імпульсно-дугове зварювання плавким електродом, швидкість зварювання, фізико-механічні властивості зварних з'єднань, структура, дослідження

Технологічні можливості імпульсно-дугової технології дозволяють мінімізувати величину погонної енергії в умовах зварювання, зменшити втрату міцності та підвищити ресурс з'єднань порівняно з традиційними дуговими способами зварювання плавленням та зменшити ширину швів без суттєвого збільшення вартості зварювального обладнання [1, 2].

Слід відзначити, що імпульсно-дугове зварювання плавким електродом (ІДЗПЕ), зазвичай, застосовують з метою покращення технологічних умов з'єднання алюмінієвих сплавів, оскільки при коливаннях струму протяжність дугового проміжку зменшується та відбувається прискорене розплавлення металевго електрода, що забезпечує інтенсивне відокремлення металевго краплі та скидання її в напрямку зварювальної ванни. Безперервна модуляція (без застосування підкладного формуючого елемента) режиму при цьому дозволяє виконувати зварювання металу у «вільному положенні» навіть при наявності локальних зазорів в стикових з'єднаннях довжиною до 100 мм та шириною до 1 мм [3]. Стабільні умови горіння дуги при періодичному чергуванні імпульсів зварювального струму різної величини та перенесення електродного металу в ванну визначає характер формування структури швів та їх механічних властивостей. Особливо це стосується зварювання, яке відбувається в монтажних умовах, коли шви формуються в різних просторових положеннях стику відносно горизонтальної площини.

Зменшення величини погонної енергії і кількості розплавленого металу сприяє формуванню

однорідної та дисперсної структури з'єднань у стані металу після зварювання в цілому [4]. Слід відмітити, що подрібнення мікроструктури дає унікальну можливість, коли можна одночасно підвищити міцність і в'язкість сплавів, оскільки в дрібнозернистих матеріалах накопичується менше дефектів (дислокацій) і бар'єрів, що зумовлює необхідність підвищення необхідної для руйнування зовнішньої напруги [5].

Є потреба визначення оптимальної швидкості зварювання у різних положеннях стиків відносно горизонтальної площини, оскільки це впливає на формування вільного проплаву та кристалізацію швів. Особливо це важливо при зварюванні алюмінієвих сплавів, чутливих до термічного циклу.

В зв'язку з викладеним було проведено комплексне дослідження стосовно впливу швидкості зварювання плавким електродом в умовах вільного проплаву і кристалізації швів стикових з'єднань на формування структури швів та рівень їх фізико-механічних властивостей в залежності від просторового розташування стиків на прикладі сплаву АМг5М товщиною 4 мм, оскільки даний сплав широко застосовується при виготовленні зварних деталей та вузлів у конструкціях широкого спектру [5, 6].

Методика дослідження. Сплав АМг5М (мас. %: 5,2 Mg; 0,04 Cu; 0,15 Si; 0,14 Fe; 0,4 Mn; 0,06 Ti) відноситься до класу магнеліт. Механічні властивості сплаву у відпаленому стані становлять: $\sigma_{\text{в}} = 305$ МПа $\sigma_{0,2} = 150$ МПа, $\delta = 20$ %. Сплав та його зварні з'єднання широко залучаються для виготовлення деталей та вузлів у різноманітних конструк-

Лабур Т.М. – <https://orcid.org/0000-0002-4064-2644>, Яворська М.Р. – <https://orcid.org/0000-0003-2016-6289>,

Коваль В.А. – <https://orcid.org/0000-0001-5154-1446>

© Т.М. Лабур, М.Р. Яворська, В.А. Коваль, 2021

Таблиця 1. Режими зварювання плавким електродом зі швидкістю 23, 40, 57 м/год сплаву АМг5М товщиною 4 мм у різних просторових положеннях

Кут нахилу до горизонтальної площини при зварюванні, град.	Швидкість зварювання, м/год								
	23			40			57		
	$U_{д}, В$	$I_{зв}, А$	$V_{др}, м/хв$	$U_{д}, В$	$I_{зв}, А$	$V_{др}, м/хв$	$U_{д}, В$	$I_{зв}, А$	$V_{др}, м/хв$
0	18,9	100	6,9	19,2	132	8,8	21,9	169	10,8
30	19,0	101	6,9	19,4	133	8,8	22,3	170	10,8
60	19,1	102	6,9	19,6	135	8,8	22,5	171	10,8
90	19,3	102	6,9	19,7	136	8,8	22,6	172	10,8

Примітка: $U_{д}$ – напруга на дузі; $I_{зв}$ – зварювальний струм; $V_{др}$ – швидкість подачі зварювального дроту

ціях, які експлуатуються в складних умовах. Оцінку результатів ІДЗПЕ сплаву АМг5М проводили за наступними критеріями: стабільність процесу, відтворюваність результатів, щільність та міцність зварного з'єднання, відсутність тріщин і пор.

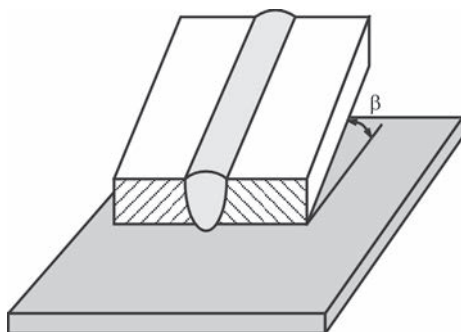


Рис. 1. Схема розташування стику під кутом β відносно горизонтальної площини при ІДЗПЕ сплаву АМг5М у різних просторових положеннях відносно горизонтальної площини

Перед зварюванням заготовки сплаву АМг5М та присадного дроту марки ЗвАМг6 знежирювали в розчині їдкою натру з багаторазовою промивкою в гарячій та холодній воді. Освітлення заготовок проводили в розчині азотної кислоти з подальшою промивкою у проточній воді. Потім заготовки висушували природним шляхом, після чого поверхню стиків сплаву шабрили в зоні зварювання на глибину не менше 0,1 мм.

Процес зварювання плавким електродом сплаву АМг5М здійснювали модульованим імпульсним струмом з використанням інверторного джерела живлення TPS 2700 фірми «Fronius» та установки ПСО-600 з регульованим кутом нахилу відносно горизонталі рухомої платформи для зварювання стиків під різним кутом β (рис. 1) в межах від 0 до 90°, яка дозволила чітко фіксувати кут нахилу стиків при зварюванні в межах від горизонтальної (0°) до вертикальної (90°) площини.

Таблиця 2. Зовнішній вигляд зварних швів сплаву АМг5М, виконаних на швидкостях зварювання 23, 40, 57 м/год у різних просторових положеннях стиків відносно горизонтальної площини

Швидкість зварювання, м/год	Кут нахилу стику відносно горизонтальної площини, град			
	0	30	60	90
23				
40				
57				

Виліт електрода становив 8...10 мм, довжина дуги (відстань між металом і кінцем дроту) складала 3...5 мм, витрати захисного газу аргону високої чистоти марки «А» (ГОСТ 10157-78) становили 20 л/хв. Зварні з'єднання отримували однопрохідним зварюванням на технологічних режимах, представлених в табл. 1 із застосуванням стандартного присадного дроту ЗвАМг6, діаметр якого дорівнював 1,6 мм. Стикові з'єднання отримували однопрохідним зварюванням.

Заготовки сплаву розміром 250×100 мм зварювали однопрохідним способом вздовж прокату без використання формуючої підкладки в умовах «вільного проплаву та кристалізації металу».

Якість формування швів оцінювали за їх зовнішнім виглядом (табл. 2) та за даними рентгенографії (ГОСТ 7512-89). Для цього залучали рентгенівську установку РАП-150/300, а щільність металу шва визначали на приладі «Денситометр». Результати контролю показали, що при вибраних режимах зварювання грубих дефектів типу тріщин, непроварів, пор не спостерігалось.

Кількісну оцінку зміни показників міцності та пластичності зварних з'єднань сплаву АМг5М в залежності від швидкості зварювання виконували за результатами механічних випробувань в статичних умовах стандартних зразків (ГОСТ 1497-84) з використанням універсальної машини ЦД-4 зі шкалою 2т на зразках типу XIII (ГОСТ 6996-66). Для аналізу міцності з'єднань ($\sigma_{\text{зв.з}}$) були задіяні плоскі зразки з технологічним посиленням на

лицевій поверхні шва з усуненим коренем шва, а для оцінки міцності металу шва ($\sigma_{\text{в.мш}}$) – зразки без посилення та кореня шва. Технологічну опуклість (підсилення) та кореневі проплави швів на зразках усували механічним шляхом. Середні значення показників вираховували за експериментальними даними випробування трьох зразків. Ступінь впливу кута просторового розташування стиків на значення коефіцієнта міцності з'єднань оцінювали як $K_{\text{зв}} = \sigma_{\text{зв.з}}^{\text{зв.з}} / \sigma_{\text{в.ом}}$ або $K_{\text{зв}} = \sigma_{\text{в.мш}}^{\text{м.ш.}} / \sigma_{\text{в.ом}}$.

Деформаційну здатність – кут загину (α) – визначали на зразках основного металу та зварних з'єднань в умовах триточкового згину з прикладанням навантаження зі сторони кореню шва (ГОСТ6996-66), використовуючи метод статичного триточкового згину. Технологічне посилення та корінь шва при цьому були усунуті механічним шляхом.

Для визначення особливостей формування швів при зварюванні алюмінієвого сплаву АМг5М плавким електродом в умовах вільного проплаву і кристалізації швів у різних просторових положеннях стикових з'єднань було проведено дослідження проплавляючої здатності зварювальної дуги у різних просторових положеннях зварних стиків під час виконання імпульсно-дугового зварювання на швидкостях 23, 40, 57 м/год та оцінювали їх вплив на геометричні розміри швів: ширину (B) і висоту (H) технологічної опуклості швів, а також коефіцієнт їх форми (табл. 3).

Вимірювання розмірів швів відбувалось на макрошліфах, які були вирізані в поперечному на-

Таблиця 3. Вплив швидкості імпульсно-дугового зварювання сплаву АМг5М плавким електродом у різних просторових положеннях на геометричні розміри швів

Швидкість зварювання, м/год	Кут нахилу стиків до горизонтальної площини, град.	Геометричні параметри зварного шва		
		B	H	$K = \frac{B}{H + \delta}$
23	0	10,11...10,2	1,45...1,50	1,85
	30	9,96...10,10	1,64...1,81	1,79
	60	9,74...9,8	1,66...1,70	1,71
	90	10,03...10,26	1,87...1,93	1,72
40	0	9,0...9,1	1,97...2,01	1,50
	30	8,0...8,15	1,8...1,87	1,33
	60	7,8...8,0	2,0...2,2	1,29
	90	7,5...7,65	1,98...2,01	1,28
57	0	8,9...9,1	1,0...1,09	1,78
	30	7,89...8,03	1,8...1,97	1,35
	60	5,99...8,03	1,99...2,01	1,17
	90	5,95...6,0	2,3...2,5	0,93

Примітки: 1. Коефіцієнт форми шва дорівнює співвідношенню ширини (B , мм) шва до його товщини ($H + \delta$, мм): $K = \frac{B}{H + \delta}$.
 2. Значення K допускається в діапазоні від 0,5 до 4,0. Оптимальним вважаються значення від 1,2 до 2,0.

прямку відносно орієнтації прокату, за допомогою електронного штангельциркуля АРТ – 34460-150 з точністю вимірювання 0,01 мм. Величина похибки при вимірюванні складала $\pm 0,1$ мм.

Аналіз впливу теплофізичних умов зварювання на особливості мікроструктури швів проводили на оптичному мікроскопі при збільшенні $\times 320$.

Систематизацію результатів і побудову графічних залежностей виконували з використанням програмного забезпечення Smage Pro 30 і Statistica 5.0.

Обговорення результатів дослідження. Як засвідчують дані аналізу результатів вимірювання геометричних розмірів швів, періодичне чергування імпульсів зварювального струму різної величини та перенесення електродного металу в ванну сприяють формуванню плавного переходу поверхні зварних з'єднань до основного металу і зменшенню лусконості шва (табл. 3). Це позитивно впливає на локально напружений стан металу в зоні сплавлення шва. А на значення коефіцієнта форми шва суттєво впливають фізичні умови «вільного проплаву» та кристалізації зварної ванни в залежності від просторового положення стику. Саме азимутальна орієнтація (кут між горизонтальною площиною та площиною зварного стику) поряд зі швидкістю зварювання визначає геометричні параметри швів: ширину, висоту кореня та технологічного посилення.

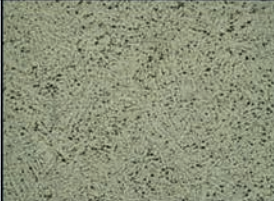

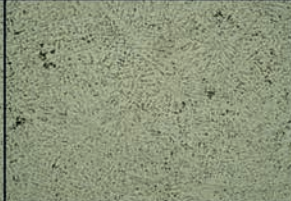
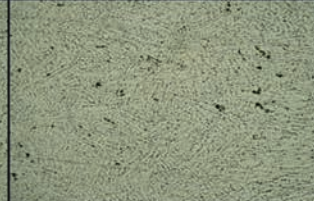








При зварюванні на швидкості 23 м/год в горизонтальній площині, тобто під кутом розташування стиків 0° , значення ширини швів коливається в межах від 10,11 до 10,2 мм. Зміна кута нахилу стиків з 30° до 60° зменшує ширину швів до 9,74 мм. Зва-

рювання стиків у вертикальному положенні (90°), навпаки, збільшує ширину швів до 10,26 мм, що може бути пов'язано з відповідною кінематикою процесу кристалізації металу під час охолодження зварювальної ванни. Іншими словами, при зварюванні на швидкості 23 м/год найбільше значення ширини шва спостерігається при розташуванні стиків в горизонтальному та вертикальному розташуванні стиків, а зміна кута нахилу зменшує ширину швів. При цьому висота технологічного посилення збільшується в залежності від просторового положення стиків під час зварювання. Найменші значення посилення мають стики, отримані в горизонтальному положенні, найбільші у вертикальному положенні стиків при зварюванні (табл. 3).

При збільшенні швидкості зварювання до 40 м/год, коли термін перебування металу в умовах високої температури скорочується, геометричні розміри швів зменшуються на 3...5 %, а на швидкості 57 м/год – на 8...10 %. Відповідно до даних вимірювання швів, їх розміри менші, ніж при зварюванні на швидкості 23 м/год, складають 7,5...9,1 мм (табл. 3). При зварюванні на швидкості 57 м/год діапазон розмірів швів становиться ширше, він змінюється від 5,95 до 9,1 мм.

Як свідчать дані, представлені в табл. 3, значення коефіцієнта форми шва залежить не тільки від кута нахилу стиків при зварюванні, але й від швидкості зварювання. При цьому спостерігається зниження його величини у зворотній пропорційності до кута розташування стиків у просторовому положенні стиків під час зварювання

Таблиця 4. Характер зміни мікроструктури швів зварних з'єднань сплаву АМг5М, отриманих плавким електродом при різних швидкостях зварювання: 23, 40, 57 м/год в умовах різного положення стиків відносно горизонтальної площини

Швидкість зварювання, м/год	Кут нахилу стику відносно горизонтальної площини, град			
	0	30	60	90
23				
40				
57				

(табл. 3). При збільшенні кута нахилу стиків значення коефіцієнта зменшується.

Мікроструктура швів зварних з'єднань сплаву АМг5М товщиною 4 мм, отриманих зі швидкостями зварювання 23, 40, 57 м/год у різних просторових положеннях відносно горизонтальної площини показана в табл. 4. Слід відмітити, що у досліджуваних зразках за температурних умов спостерігалися утворення характерних структурних особливостей, пов'язаних з просторовою орієнтацією зварювальних стиків [4]. Як показує їх аналіз, морфологія будови швів визначається градієнтом температур на границі розділу твердого розчину рідкого металу та фаз, швидкості кристалізації, а також характером розташування легуючих елементів у вихідному металі.

Незалежно від швидкості зварювання під дією термічного циклу утворюються рівновісні кристаліти та відбувається ряд фазових перетворень, а на кількість фаз та їх протяжність в міжзереному прошарку впливає просторове положення стиків. Цьому сприяють параметри зварювального струму, напруги на дузі та відповідна швидкість зварювання. В початковий період кристалізації у металі відбуваються структурні перетворення, а саме розпад пересиченого твердого розчину та утворення проміжних (метастабільних) фаз, які в подальшому переходять у рівноважні фази, та спостерігається коагуляція (збільшення) нерозчинних (інтерметалідних) фаз заліза та кремнію, що потрапляють у метал на стадії його металургійного виробництва. Як видно з табл. 4, отримані шви щільні та мають дендритну будову незалежно від просторового положення стиків при зварюванні. Водночас, їх орієнтація відносно горизонтальної площини визначає розмір структурних складових. Найбільш крупні дендрити утворюються в умовах, коли зварювання здійснюють в горизонтальному положенні (0°), найменші – під кутом 30° .

Дослідження структури швів показало, що у всіх варіантах просторового положення утворюється характерна для алюмінієвих сплавів дендритна будова. Кристаліти мають рівновісний характер розташування, їх розміри коливаються від 30 до 70 мкм. Вздовж границі кристалітів спостерігаються тонкі прошарки фазових утворень. Найменші розміри кристалітів незалежно від швидкості зварювання спостерігаються у випадку, коли стики сплаву АМг5М розташовані під кутом 30° відносно горизонтальної площини. Структура швів майже однорідна та утримує дрібні кристаліти твердого розчину (табл. 4). Фазові утворення мають дисперсні розміри, вони рівномірно розташовані в міжкристалічних прошарках, а їх форма більш округла порівняно зі зварюванням, коли стики розташовані в інших просторових положеннях.

В умовах зварювання, коли стики сплаву АМг5М розташовані під кутом 60° відносно горизонтальної площини, поряд з характерними структурними перетвореннями, аналогічні попереднім просторовим положенням, відмічається утворення більш товстих прошарків виділень вторинних фаз та евтектичних утворень. При зварюванні стиків на вертикальній площині (90°) товщина фазових прошарків зростає майже вдвічі при зварюванні на швидкості 23 м/год. Збільшення розмірів включень спостерігається, коли процес зварювання відбувається зі швидкістю 57 м/год.

Порівняльний аналіз показників міцності зварних з'єднань і металу швів, зварених плавким електродом зі швидкістю 23 м/год, показав (табл. 5), що міцність швів у зразках з технологічним посиленням становить 280...291 МПа та залежить від кута нахилу зварювальних стиків відносно горизонтальної площини. Найвищі значення міцності спостерігаються у з'єднаннях, які були зварені під кутом 30 та 60° . Міцність швів (у зразках без технологічного посилення) становить 272,9...282,8 МПа. Коефіцієнт міцності для зразків з технологічним посиленням $K_B^{3.3}$ складає від 0,92 до 0,96, а без посилення – $K_B^{м.ш}$ від 0,89 до 0,93 від рівня міцності основного металу ($\sigma_{B,ЗВ} = 305$ МПа). Показники пластичності таких з'єднань майже вдвічі нижче за значення основного металу і складають 78...113%.

При швидкості зварювання 40 м/год, коли зменшується термін перебування металу при високій температурі та забезпечуються більш раціональні теплофізичні умови для утворення дрібнокристалічної структури швів, відбувається підвищення на 10...15 % рівня міцності у зварних з'єднаннях, отриманих під кутом 30° відносно горизонтальної площини, без втрати належного рівня їх пластичності (табл. 5). Саме на такій швидкості створюються найбільш сприятливі теплофізичні умови формування щільних швів з дрібною кристалічною структурою, яка забезпечує не тільки високий рівень міцності, але й показника пластичності зварних з'єднань. Коефіцієнт міцності зварних з'єднань, отриманих на швидкості 40 м/год, також збільшується на 1,5...9,0 % та складає для зразків з технологічним посиленням $K_B^{3.3} = 0,88...0,98$, а без посилення – $K_B^{м.ш} = 0,91...0,95$ від рівня основного металу.

Ступінь дисперсності структури залежить від просторового положення стику при зварюванні. Найменші розміри структурних складових спостерігаються у швах, зварювання яких відбувалося під кутом 30° . Рівень міцності при цьому становить 298,4 МПа. Пластичні властивості зварних з'єднань, які були встановлені на зразках з технологічним посиленням та без нього зберігають

Таблиця 5. Вплив швидкості зварювання плавким електродом та просторового положення стиків на механічні властивості зварних з'єднань сплаву АМг5М δ = 4 мм

Механічні властивості	Швидкість зварювання $V_{зв}$, м/год											
	23				40				57			
	Просторове положення при виконанні процесу зварювання, град.											
	0	30	60	90	0	30	60	90	0	30	60	90
$\sigma_{в.зв}$, МПа	287,0	286,1	297,0	268,3	274,7	285,5	266,4	258,6	282,4	263,5	258,2	244,9
	276,2	286,1	288,8	287,7	287,5	300,4	274,8	267,7	285,1	273,0	259,5	256,7
	276,4	282,7	288,0	289,9	295,2	309,2	295,2	278,5	289,4	281,1	270,8	271,3
	279,9	285,0	291,3	281,8	285,8	298,4	278,8	268,5	285,9	272,3	262,8	257,6
$\sigma_{в.м.ш.}$, МПа	268,8	285,1	283,8	268,6	283,5	281,5	275,0	284,7	266,1	260,7	274,0	267,5
	284,8	281,0	283,0	278,4	288,0	286,0	276,4	286,0	268,1	279,8	275,3	273,9
	294,7	280,2	273,8	271,6	288,8	283,2	285,4	287,0	279,8	282,8	281,5	281,1
	282,8	282,1	280,2	272,9	286,8	283,8	278,9	285,8	271,3	274,6	276,9	274,2
α , град.	68	102	93	106	91	90	95	101	78	77	82	84
	78	104	102	107	109	105	150	113	89	84	100	92
	89	110	116	126	100	98	122	107	92	81	91	102
	78	105	103	113					86			93
$K_{в}^{з.з} = \sigma_{в.зв} / \sigma_{в.о.м}$	0,92	0,93	0,96	0,92	0,94	0,98	0,91	0,88	0,94	0,89	0,86	0,84
$K_{в}^{м.ш.} = \sigma_{в.м.ш.} / \sigma_{в.м.ш.}$	0,93	0,92	0,92	0,89	0,94	0,93	0,91	0,94	0,89	0,90	0,91	0,90

Примітка: 1. Механічні властивості сплаву АМг5М: $\sigma_{в.зв} = 305$ МПа, $\sigma_{0,2.зв} = 150$ МПа, $\delta = 20$ %, $\alpha = 180^\circ$.
 2. $K_{в}$ – коефіцієнт міцності, який дорівнює відношенню показника міцності зварного з'єднання або металу шва до міцності основного металу, відповідно $K_{в}^{з.з}$ та $K_{в}^{м.ш.}$.

достатньо високі значення: 98...122 і 103...113° відповідно. Зменшення пластичності в два рази (78...92°) у зразках без посилення спостерігається лише у випадку, коли зварювання виконують в горизонтальній площині. Міцність швів у зразках без технологічного посилення дорівнює 282...286,0 МПа. Їх руйнування відбувається в основному металі біля лінії сплавлення, де внаслідок структурних перетворень знижується міцність металу в умовах термічного циклу зварювання.

Подальше зростання швидкості зварювання сплаву (57 м/год) знижує на 10...25 МПа рівень міцності з'єднань (табл. 5). При цьому коефіцієнт міцності також знижується на 5...10 % від міцності основного металу. Таким чином, в результаті експериментального дослідження встановлено суттєвий вплив швидкості зварювання на структуру та властивості швів, зварених у різних просторових положеннях, починаючи від горизонтального положення стику до вертикального (табл. 4). При швидкості зварювання 57 м/год міцність зварних з'єднань складає з 257,6 до 285,9 МПа (табл. 5). Коефіцієнт міцності з'єднань змінюється від 0,84 до 0,94, а металу швів – 0,89...0,91. Водночас, у всіх з'єднаннях спостерігається зниження показника пластичності до рівня 86...93°.

Як засвідчують експериментальні дані (табл. 5), процес зварювання можна виконувати в усіх досліджуваних просторових положеннях (0, 30, 60, 90°), але при цьому не завжди забезпечуються оптимальні теплофізичні умови для якісного формування швів з дрібнокристалічною структурою, які забезпечують належну міцність зварних з'єднань без втрати їх пластичності. При зварюванні сплаву АМг5М зі швидкістю 23 м/год доцільно його виконувати в умовах, коли

стики розташовані під кутом 60 град. Міцність такого з'єднання становить 291,3 МПа. При інших просторових положеннях стиків (під кутом 0, 30 і, відповідно, 90°) рівень міцності з'єднань становить 279,9...285,0 МПа. Показник пластичності α менший, ніж у основного металу ($\alpha = 180^\circ$), та коливається в межах 78...113° в залежності від просторової орієнтації стиків при зварюванні.

При зварюванні стиків сплаву на швидкості 57 м/год зростання міцності до 285,9 МПа відбувається лише за умов їх розташування в горизонтальному положенні, що може бути пов'язано з особливостями утворення пересиченого твердого розчину або підвищенням щільності виділень часток зміцнюючої фази порівняно з іншими варіантами розташування стиків сплаву АМг5М. Цьому сприяють утворення більшої кількості пересиченого твердого розчину та підвищення щільності виділень часток зміцнюючої фази під час наступного етапу – розпаду твердого розчину. Водночас, подальша зміна просторового положення стиків викликає зниження рівня міцності на 7...8 % при зварюванні під кутом 30°, 10...11 % – 60° та 10...11 % – у вертикальній площині (90°), досягаючи рівня 257,6 МПа. Поряд з цим також спостерігається зниження на 10...12 % показника пластичності зварних швів, що може бути зумовлено нерівномірним розподілом фазових включень, утворених легуючими елементами, вздовж міжкристалічного прошарку (табл. 4).

Висновки

1. Вперше досліджено ефект впливу просторового положення стику плавким електродом сплаву АМг5М товщиною 4 мм з використанням присадного дроту ЗвАМ6 при різних швидкостях (23, 40,

57 м/год) імпульсно-дугового зварювання плавким електродом. Експериментально підтверджено, що стабільність процесу зварювання «у вільному стані» забезпечується шляхом модуляції параметрів зварювального струму, напруги на дузі та швидкості зварювання. Це дозволяє керувати величиною теплового вкладення в зварювальний метал і швидкістю кристалізації металу ванни, а також здійснювати процес зварювання без використання підкладних формуючих елементів.

2. Встановлено, що швидкість зварювання визначає характер формування швів у різних просторових положеннях – від горизонтального положення стику до вертикального. Показано, що короткочасне перебування металу при високій температурі в умовах зварювання на швидкості 40 м/год забезпечує оптимальні теплофізичні умови, за яких відбувається утворення дрібнокристалічної структури швів, що зміцнює їх на 10...15 % без втрати належного рівня пластичності з'єднань. Цьому сприяють формування в швах більшої кількості пересиченого твердого розчину та зростання щільності дрібних виділень часток зміцнюючої фази під час кристалізації.

3. Дослідження особливостей мікроструктури швів сплаву АМг5М, отриманих у різних просторових положеннях з присадним дротом ЗвАМг6, дозволило визначити характерні особливості та морфологію розташування кристалітів та часток зміцнюючих фаз, які зазнали відповідних структурних перетворень в умовах зварювання плавким електродом. Відмінною особливістю структури швів є наявність фазових включень у міжкристалітному просторі, їх дисперсний розмір та кругла

форма. У швах, які були отримані під кутом 30°, такі фазові включення мають найменші розміри порівняно зі структурою швів, зварених в інших просторових положеннях.

Список літератури

1. Жерносеков А.М., Андреев В.В. (2007) Імпульсно-дугова сварка плавящимся електродом. *Автоматическая сварка*, **10**, 48–51.
2. Лабур Т.М., Жерносеков А.М., Яворская М.Р., Пашуля М.П. (2013) Імпульсно-дугова сварка плавящимся електродом алюмінієвих сплавів з регулюємою формою імпульсів. *Сварочное производство*, **11**, 3–7.
3. Рабкин Д.М. (1986) *Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов*. Киев, Наукова думка.
4. Рабкин Д.М., Лозовская А.В., Склабинская И.Е. (1992) *Металловедение сварки алюминия и его сплавов*. Киев, Наукова думка.
5. Ищенко А.Я., Лабур Т.М. (2013) *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Наукова думка.
6. Лебедев В.А. (2007) Некоторые особенности дуговой механизированной сварки алюминия с управляемой импульсной подачей электродной проволоки. *Сварочное производство*, **11**, 26–30.

References

1. Zhernosekov, A.M., Andreev, V.V. (2007) Pulsed metal arc welding (Review). *The Paton Welding J.*, **10**, 40-43.
2. Labur, T.M., Zhernosekov, A.M., Yavorskaya, M.R., Pashulya, M.P. (2013) Pulsed metal arc welding of aluminium alloys with controllable shape of pulses. *Svarochn. Proizvodstvo*, **11**, 3–7 [in Russian].
3. Rabkin, D.M. (1986) *Metallurgy of fusion welding of aluminium and its alloys*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Rabkin, D.M., Lozovskaya, A.V., Sklabinskaya, I.E. (1992) *Metals science of aluminium and its alloys*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
5. Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M. (2013) *Welding of modern structures of aluminium alloys*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Lebedev, V.A. (2007) Some peculiarities of mechanized welding of aluminium with controllable pulsed feed of electrode wire. *Svarochn. Proizvodstvo*, **11**, 26-30 [in Russian].

INFLUENCE OF PULSE-ARC WELDING SPEED ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF JOINTS OF AMg5M ALUMINUM ALLOY PRODUCED IN DIFFERENT SPATIAL POSITIONS OF BUTTS

T.M. Labur, M.R. Javorska, V.A. Koval

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

E-mail: office@paton.kyiv.ua

The influence of welding speed (23, 40 and 57 m/h) under the conditions of the action of a consumable electrode on the nature of free penetration and crystallization of welds of AMg5M alloy in different spatial positions of butts was investigated. It was established that the optimal thermophysical conditions for the formation of a fine-grained structure of the joints occur when the welding speed is 40 m/h. At the same time, the strength of the welds increases by 10...15% without reducing the level of ductility. A distinctive feature in the structure of welds produced at different welding speeds is the size and shape of dendrites and phase inclusions in the intercrystalline space. 6 Ref., 5 Tabl., 1 Fig.

Keywords: aluminum alloy, pulse-arc welding using consumable electrode, welding speed, physical and mechanical properties of welded joints, structure, investigations

Надійшла до редакції 11.06.2021

Науково-технічна конференція, присвячена 100-річчю з дня народження академіка НАН України

ДАНИЛА АНДРІЙОВИЧА ДУДКА

(28.07.1921–02.02.2009)

РОЗВИТОК ІННОВАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ ТА ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

24 вересня 2021 р., м. Київ,

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України