

ЗВАРЮВАННЯ ВИСОКОМІЦНОГО АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ 2219-T31 ПЛАВКИМ І НЕПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДАМИ

Т.М. Лабур, А.Г. Покляцький, 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 умов дугового зварювання неплавким (TIG) і плавким (MIG) електродами високоміцного алюмінієвого сплаву марки 2219-T31 (США) завтовшки 5 мм. Вибрані ефективні режими зварювання за основними показниками: відсутність грубих дефектів, коефіцієнт форми шва, стандартні механічні властивості, особливості рельєфу поверхні руйнування. Рівень міцності зварних з'єднань сплаву після зварювання нижче на 25...30 % порівняно з основним металом ($\sigma_b = 366...370$ МПа). Показники ударної в'язкості швів після TIG коливаються від 16,4 до 20,3 Дж/см² відповідно до напрямку прокату. Кут згину майже в 3 рази нижче за показник основного металу (180 і 177 град.). Руйнування з'єднань з технологічним посиленням та кореня шва відбувається вздовж границі сплавлення шва з основним металом, при їх усуненні з поверхні – вздовж осі шва. Рельєф утримує переважно чарункову структуру. За результатами аналізу встановлено технологічні умови отримання оптимальної якості швів та тип захисного газу для зварювання. Бібліогр. 8, табл. 4, рис. 10.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, режими зварювання неплавким і плавким електродами, інертні гази: аргон, гелій, зварні з'єднання, механічні властивості, дослідження

Вступ. Головною вимогою забезпечення надійності та працездатності зварної конструкції являється якість виготовлення швів. Аналіз стандартних технологій зварювання, поширених у виробництві легких конструкцій, показує, що окрім вибору способу зварювання, його вартості, враховують також ступінь опрацювання і виробничого освоєння нормативних документів, необхідних для відтворення технологій в заводських умовах. При цьому підвищену увагу приділяють технологічній зручності процесу в цеху. Але визначальним чинником підвищення ефективності застосування обраної технології дугового зварювання залишаються явища в дузі, величина швидкості наплавлення, а також можливість чіткого керування процесом. Безумовно, враховують економію витрат конструкційних матеріалів і споживання енергії, а також можливість роботизації процесу. Зазначені вимоги сьогодні розглядаються як ключові для підвищення продуктивності виробництва зварної конструкції, забезпечення умов стабільної якості швів, економії витрат і можливості роботи без участі людини [1–3].

Найбільш затребуваними для виготовлення легких конструкцій з алюмінієвих сплавів є зварювання неплавким (TIG) і плавким (MIG) електродами в різних захисних газах (аргоні та гелії), плазмово-дугові та гібридні способи з'єднання [4–6]. Перша технологія реалізується на невеликій швидкості, що зумовлено механізмом подачі дроту в металеву ванну, при цьому спостерігається хороше формування швів, оскільки дуга горить стабільно навіть за малою щільністю Лабур Т.М. – <https://orcid.org/0000-0002-4064-2644>, Покляцький А.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-4101-2206>, Коваль В.А. – <https://orcid.org/0000-0001-5154-1446>
© Т.М. Лабур, А.Г. Покляцький, В.А. Коваль, 2024

електричного струму [4, 5]. Пульсуючі режими забезпечують інтенсивне подрібнення оксидних включень при одночасній дегазації швів, сприяють широкому розповсюдженню їх у виробництві конструкцій [2]. Завдяки плазмово-дуговому способу зварювання можна отримати якісне з'єднання тонких листів, але даний процес залишається високовартісним та не виявляє виробничої гнучкості [1]. Незначне тепловкладення при MIG підвищує ефективність зварювання деталей та вузлів з алюмінієвих сплавів, процес легко автоматизувати та інтегрувати у виробничу лінію [1]. Головним недоліком даної технології залишається недостатньо стабільний у часі та просторі процес нагрівання електродного металу, оскільки довжина дуги та положення її плями на поверхні поперемінно змінюються. Це впливає на механізм утворення краплини розплавленого металу, її розмір і характер переходу в зварну ванну для заповнення зазору поміж деталями [3]. Крім того, на це впливає тип захисного середовища – аргон або гелій (рис. 1). Заміна газу підвищує здатність дуги проплавляти метал, знижується в 1,5...2,0 рази величина погонної енергії та кількість електродних крапель, зростає значення середньої температури ванни, тривалість її існування та ступінь її дегазації. З іншої сторони знижується випаровування легколетючих елементів та не утворюються пори на етапі рідкої краплі [4].

Алюмінієвий сплав марки 2219 системи легування Al–Cu–Mn (6,8%Cu–0,32%Mn–0,16Zr) відноситься до класу термічно зміцнюваних сплавів і має високу питому теплоємність [3]. Серед інших

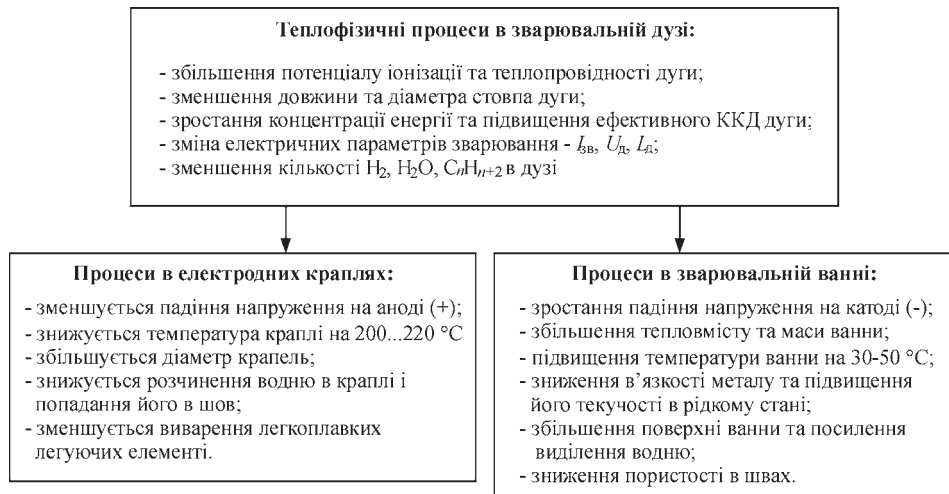


Рис. 1. Теплофізичні процеси, які виникають в дузі, в краплях електродного металу, в зварювальній ванні при заміні аргону на гелій

його виділяє висока спроможність до технологічної пластичності в холодному та гарячому станах, належна корозійна стійкість [4]. За умов наднизьких температур, включаючи температуру $-269\text{ }^\circ\text{C}$, міцність та пластичність сплаву зростають, що робить сплав 2219 унікальним для виробів, експлуатація яких відбувається в широкому температурному діапазоні [1]. Хороше сполучення технологічних та фізико-механічних властивостей (табл. 1) робить його затребуваним у ракетно-космічній галузі, а також в конструкціях балонів і баків для зберігання рідких газів.

Зазначені технологічні та експлуатаційні характеристики отримують завдяки основним легуючим елементам сплаву 2219-Т31 – міді та марганцю. Мікроструктура сплаву складається з багатой алюмінієм α -фази (твердий розчин) і стабільної $\theta(\text{CuAl}_2)$ -фази (рис. 2). До числа проміжних фаз відносяться θ' - (CuAl_2) і $S'(\text{Al}_2\text{CuMg})$, а наявність фаз $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$, $T(\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu})$, Al_3Zr та Al_{11}V забезпечує відповідний рівень фізико-механічних властивостей як самого сплаву, так і його зварних з'єднань. Напівфабрикати до виробника поставляються у відпаленому (0), загартованому та природно зістареному (Т3) або загартованому та штучно зістареному стані (Т8), що визначається тактико-технічними і економічними параметрами відповідних зварних конструкцій та умов їх експлуатації.

Водночас, в умовах технологічних нагрівань, включаючи процеси зварювання, сплав 2219 (як і його російський аналог 1201), виявляє чутливість до рівня температури, що зумовлено механізмом розпаду твердого розчину та морфологією розташування фазових виділень, співвідношенням їх об'ємної долі в структурі [2–4]. Внаслідок сегрегації легуючих елементів і домішок вздовж границь кристалітів шва і зерен основного металу утворюється неоднорідна структура, що знижує на 30...40 % міцність з'єднань. Швидкість зварювання позначається на морфології мікроструктури шва, оскільки від цього залежать градієнт температур на поверхні розподілу твердого розчину рідкого металу та фаз, а також характер розподілу по об'єму шва легуючих елементів [3]. При перегріванні металу поміж зернами виникають утворення крихких прошарків з пересичених фаз, особливо на межі сплавлення з основним металом, де вони інколи формують щільний каркас навколо зерен. Для

ному (Т3) або загартованому та штучно зістареному стані (Т8), що визначається тактико-технічними і економічними параметрами відповідних зварних конструкцій та умов їх експлуатації.

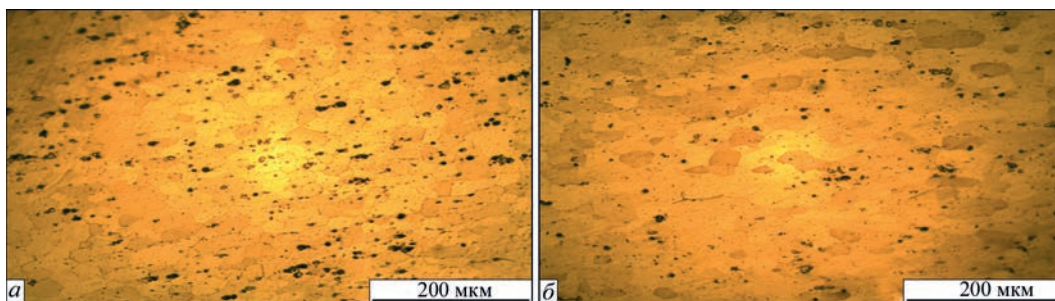


Рис. 2. Мікроструктура сплаву 2219-Т31 завтовшки 5 мм вздовж (а) та поперек (б) відносно напрямку прокату

Таблиця 1. Механічні властивості листів алюмінієвого сплаву 2219-Т31 завтовшки 5 мм

Орієнтація	$\sigma_{0,2}^{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2}^{0,2}$, МПа	δ , %	α , град	a_n , Дж/см ²
Вздовж прокату	368	259,4	24,4	180	30,0
Поперек прокату	369,6	270,4	22,0	177	23,1

зменшення теплового впливу рекомендують застосовувати концентровані джерела нагрівання та, по можливості, підвищені швидкості зварювання, що забезпечує мінімальний рівень тепловкладення в метал, пришвидчення його охолодження та меншу втрату міцності [6–8].

Метою даної роботи являється визначення оптимальних умов зварювання елементів силового набору корпусів ракетно-космічної техніки з високміцного алюмінієвого сплаву марки 2219-T31 методами TIG або MIG.

Методика проведення дослідження. Листові заготовки сплаву 2219-T31 перед зварюванням знежирювали з подальшим хімічним травленням в розчині їдкою натру з багаторазовою промивкою в гарячій та холодній воді. Освітлення заготовок виконували в розчині азотної кислоти з подальшою промивкою у проточній воді. Заготовки висушували природним шляхом, потім проводили механічну зачистку шабером торців і поверхонь зварюваних кромки (завширшки близько 15 мм) на глибину 0,1 мм з метою запобігання утворенню макровключень оксидної плівки і газових пор у швах.

Якість формування швів контролювали за їх зовнішнім виглядом. Внутрішню якість швів оцінювали за результатами виявлення дефектів типу тріщин, непроварів, пор за допомогою методу рентгенографії (ГОСТ 7512-89). Для цього залучали рентгенівську установку РАП-150/300, а на приладі «Денситометр» оцінювали щільність металу шва. Результати контролю дозволили обрати оптимальні режими процесу зварювання, за яких не утворюються грубі дефекти.

Після зварювання сплаву 2219-T31 отримані стики візуально обстежували та проводили вимірювання основних геометричних параметрів швів. Геометричні параметри швів (B – ширина шва з лицевої поверхні з’єднань, H – ширина шва зі зворотної поверхні з’єднань (кореня шва), δ – глибина проплавлення основного металу (в даному випадку вона дорівнює його товщині), b – висота опуклостей технологічного посилення, h – висота кореня шва) визначали за допомогою електронного штангенциркуля АРТ-34460-150, ціна поділки якого становила 0,01 мм, а точність вимірювання – 0,03 мм.

Кількісну оцінку зміни показників міцності, пластичності та в’язкості зварних з’єднань сплаву 2219-T31, в залежності від досліджуваних способів зварювання дугою, виконували за результатами механічних випробувань стандартних зразків (ГОСТ 1497-84) з використанням універсальної машини ЦД-4 зі шкалою 2т. Випробування проводили на зразках типу XIII ГОСТ 6996-66. Ескізи зразків з розмірами наведені на рис. 3. При випробуванні на розтяг та встановленні значень міцності з’єднань ($\sigma_{\text{в}}^{\text{зв.з}}$) були задіяні плоскі зразки

з технологічним посиленням на лицевій поверхні шва з усуненим коренем шва. Для оцінки міцності металу шва ($\sigma_{\text{в}}^{\text{мш}}$) були задіяні зразки без посилення та кореня шва, які механічним шляхом усували з поверхні дослідних зразків. Механічні випробування зазначених зразків проводили в статичних умовах та розраховували значення межі їх міцності ($\sigma_{\text{в}}^{\text{зв.з}}$ і $\sigma_{\text{в}}^{\text{мш}}$). Навантаження зразка при цьому було розподілено рівномірно по всій робочій частині у відповідності до вимог ГОСТ 1497-73.

Показник міцності, визначений експериментально, дозволив вирахувати значення коефіцієнта міцності з’єднань та встановити рівень їх чутливості до термічного циклу зварювання в умовах TIG і MIG. Їх ступінь впливу на стан металу швів з технологічним посиленням і без нього характеризує коефіцієнт міцності з’єднань, був розрахований як $K_{\text{св}} = \sigma_{\text{в}}^{\text{зв.з}} / \sigma_{\text{в}}^{\text{ом}}$ або $K_{\text{св}} = \sigma_{\text{в}}^{\text{мш}} / \sigma_{\text{в}}^{\text{ом}}$.

Загальний стан металу та його деформаційну здатність після термічного циклу зварювання оцінювали, використовуючи технологічний метод випробування – кут загину (a). Цей показник пластичності визначали на зразках основного металу та зварних з’єднань в умовах триточкового згину

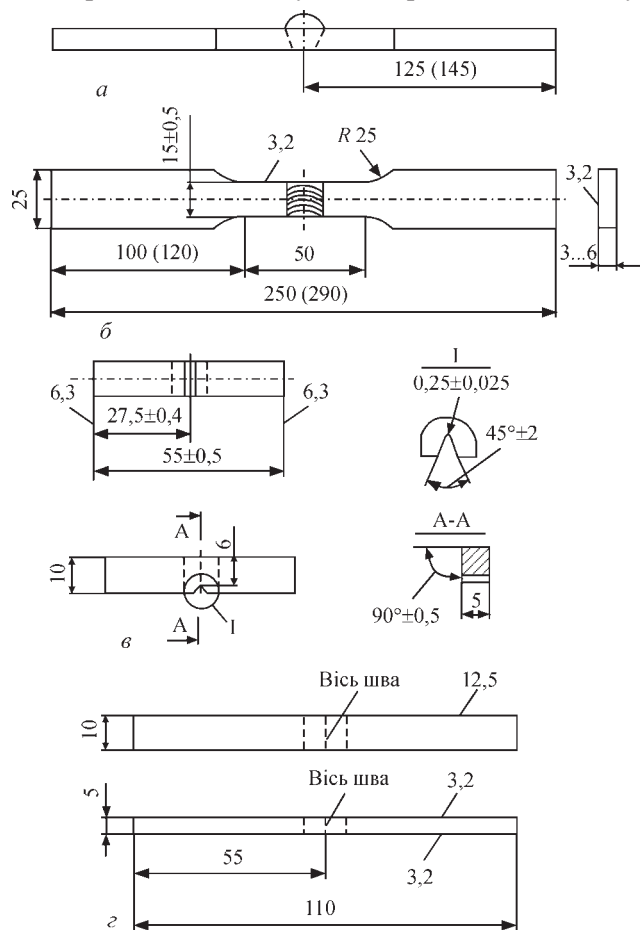


Рис. 3. Ескізи зразків, які були залучені для визначення механічних властивостей зварних з’єднань: a – межі міцності зварного з’єднання ($\sigma_{\text{в}}^{\text{зв.з}}$); b – межі міцності металу шва ($\sigma_{\text{в}}^{\text{мш}}$); c – ударної в’язкості металу шва; d – кута згину зварного з’єднання

з прикладанням навантаження зі сторони кореня шва. Технологічне посилення та корінь шва при цьому були усунуті механічним шляхом до відповідних розмірів (рис. 3).

Показник ударної в'язкості (a_n) дозволив встановити схильність металу з'єднань до крихкого руйнування. Для його експериментального визначення була задіяна відповідна схема навантаження зразків з гострим надрізом радіусом $R = 0,25$ мм (по Шарпі) вздовж осі шва відповідно до вимог ГОСТ 9454-76. Середнє значення показника визначали за результатами випробування трьох зразків.

Для обґрунтування отриманих експериментальних результатів комплексного дослідження механічних властивостей зварних з'єднань сплаву 2219-T31 були використані сучасні методики аналізу. Їх систематизацію та побудову графічних залежностей здійснювали з використанням сучасних комп'ютерних технологій, включаючи програми Smage Pro 30 і Statistica 5.0.

Результати дослідження та їх обговорення. Для формування належного технологічного посилення швів з використанням зварювального присадного дроту марки 2319 діаметром 1,6 мм було встановлено, що при швидкості зварювання 12 м/год сплаву 2219-T31 можна отримати більш якісні з'єднання способом TIG. Величина зварювального струму при цьому дорівнювала 290 А. Враховуючи ризики виникнення дефектів у швах (вольфрамові включення), особливо при виконанні протяжних швів), для зварювання використовували вольфрамовий електрод діаметром 6мм (ГОСТ 23949) з оксидом лантану або з оксидом ітрію. Відстань від торця неплавкого електрода до поверхні зварюва-

них кромок повинна складати 4 мм.

Стикові шви отримували на заготовках розміром 300×150×5 мм, які були вирізані з листових напівфабрикатів вздовж і поперек відносно напрямку прокату без розчищення кромок на підкладці. Швидкість подачі присадного дроту становила 128...130 м/год. Одностороннє зварювання металу виконували без розробки кромок. Кут нахилу пальника відносно осі шва складав 10...15°, відстань між соплом пальника та зварювальним металом становила 8...12 мм. Довжина дуги (відстань між металом та кінцем дроту) дорівнювала 3...5 мм.

Автоматичне аргонодугове зварювання TIG здійснювали від джерела живлення MW-450 австрійської фірми «Fronius», яке забезпечує максимальну величину зварювального струму 450 А та дозволяє виконувати шви великої протяжності на необхідному рівні струму. Для цього використовували симетричний змінний струм з прямокутною формою хвилі частотою 200 Гц, що забезпечило високу ступінь катодного очищення зварюваних кромок і стабільність виконання процесу з'єднання сплаву 2219-T31. Орієнтовні режими зварювання сплаву 2219-T31 завтовшки 5 мм наведені в табл. 2.

Повне проплавлення зварюваних кромок без їх розчищення досягалося за один прохід. Формування проплаву, тобто кореню шва, відбувалося при використанні змінної підкладки з нержавіючої сталі з еліптичною формою канавки глибиною 1 мм та шириною 6 мм. Якісний захист зони зварювання забезпечувався аргонем високої чистоти (ГОСТ 10157), витрати якого становили 15...17 л/хв. Технологія зварювання TIG здійснювалася в горизонтальному положенні шляхом пов-

Таблиця 2. Орієнтовні режими автоматичного зварювання неплавким електродом алюмінієвого сплаву 2219-T31 завтовшки 5 мм

Діаметр вольфрамового електрода, мм	Діаметр присадного дроту, мм	Величина зварювального струму, А	Швидкість зварювання, м/год	Витрати аргону, л/хв
6,0	1,6	290	12,0	15...17

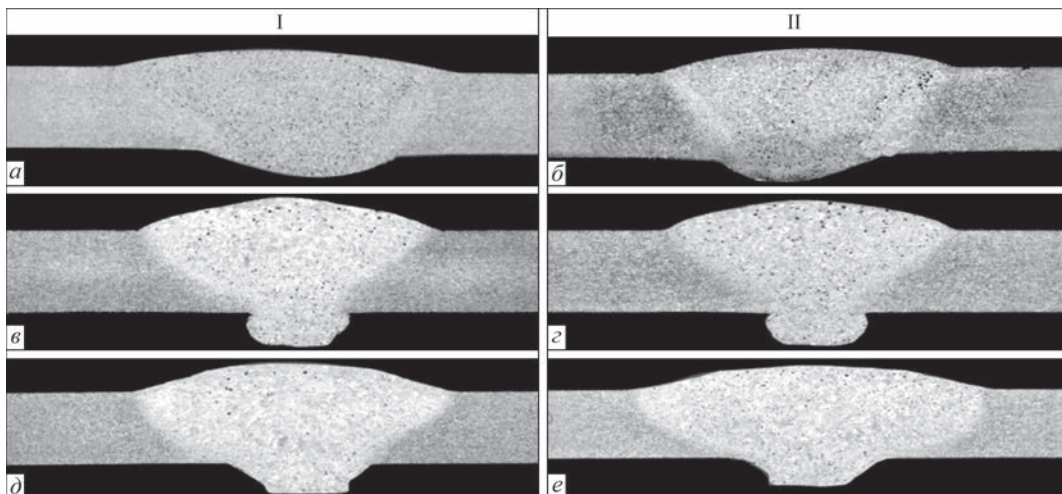


Рис. 4. Макроструктура (б) зварних з'єднань сплаву 2219-T31 завтовшки 5 мм, отриманих TIG (а, б) і MIG (в, г) в середовищах аргону (в, г) і гелію (д, е) вздовж (I) та поперек (II) прокату

ного розплавлення кромки основного матеріалу і присадного дроту при нагріванні дугою від вольфрамового електрода. Всі параметри зварювання ретельно регулювалися та вимірялися для визначення оптимального режиму зварювання сплаву 2219-T31 завтовшки 5 мм. Встановлений режим дозволив отримати гладку поверхню шва з плавним переходом до основного металу (рис. 4).

Аналіз зовнішнього вигляду стиків та оцінювання якості швів рентгенографічним методом не виявив грубих дефектів типу тріщин, непроварів і пористості у зварних швах, отриманих ТІГ (рис. 5, а). Це свідчить про реалізацію належних теплофізичних умов при зварюванні, а саме –

кристалізацію рідкого металу та добре формування швів. Використання різнополярного струму з прямокутною формою хвилі на режимах, коли зворотна полярність переважає, забезпечує при такому способі зварювання ефективну дегазацію швів.

Також були відпрацьовані режими зварювання дослідного сплаву за технологією MIG (табл. 3), сутність яких полягає в нагріванні дугою електродного (присадного) дроту марки 2319 діаметром 1,6 мм до розплавлення його кінцівки та заповнення рідким металом проміжку між торцями зварюваних заготовок. Наявність змінної підкладки з нержавіючої сталі з еліптичною формою канавки глибиною 1 мм та шириною 6 мм дозволила

Захисне середовище	Орієнтація прокату					Коефіцієнт форми шва $K = \frac{B}{b + \delta}$	Зовнішній вигляд зразків
		B	b	H	h		
Зварювання ТІГ							
Аргон	Вздовж	16,04...16,55	0,91...0,95	8,56...9,03	1,27...1,32	2,75	
	Поперек	15,35...16,43	0,96...1,3	8,22...8,9	1,38...1,56	2,19	
Зварювання MIG							
Аргон	Вздовж	13,3...14,15	1,61...1,70	5,45...5,72	1,85...1,92	2,09	
	Поперек	14,5...16,41	1,51...1,60	5,49...5,75	1,86...2,06	2,22	
Гелій	Вздовж	13,9...15,10	1,44...1,67	6,38...7,21	1,84...1,95	2,21	
	Поперек	16,6...17,18	0,67...0,73	6,08...6,28	1,75...1,89	2,90	

Примітки: 1. Коефіцієнт форми шва (K) – відношення ширини шва (B , мм) до його товщини ($b + \delta$), де B – ширина зварного шва, b – висота підсилення, δ – глибина розплавленого основного металу, H – ширина кореня шва, h – висота підсилення зі сторони кореня шва; 2. Значення K допускається в діапазоні від 0,5 до 4. Оптимальними вважаються значення від 1,2 до 2.



Рис. 5. Рентгенограми швів сплаву 2219-T31, отриманих зварюванням ТІГ в аргоні вздовж (а) і поперек прокату (б)

Таблиця 3. Орієнтовні режими автоматичного дугового зварювання плавким електродом алюмінієвого сплаву 2219-T31 завтовшки 5 мм в середовищі захисних газів

Захисне середовище	Діаметр електродного дроту, мм	Величина зварювального струму, А	Швидкість зварювання, м/год	Напруга на дузі, В	Витрати газу, л/хв
Аргон	1,6	165...170	28...29	24...25	25
Гелій	1,6	120...135	25...27	34...36	20

отримати за один прохід повне проплавлення зварюваних кромок і сформувати корінь шва (рис. 4) в залежності від марки захисного газу – аргону (ГОСТ 10157) або гелію (ГОСТ 20461, ДСТУ ISO 14175:2004). Витрати аргону при цьому склали 25 л/хв, а гелію – 20 л/хв.

Стикові шви отримували у середовищі аргону та гелію дугою від джерел живлення ІУП-1 на заготовках розміром 300×150×5 мм, які були вирізані з листових напівфабрикатів вздовж і поперек відносно напрямку прокату. Візуальний контроль якості формування швів показав відсутність у стиках дослідного сплаву грубих дефектів типу тріщин і непроварів у зварних з'єднаннях, отриманих плавким електродом, але після рентгеновського контролю були зафіксовані дефекти у вигляді пор. Як свідчать рентгенограми з стиків (рис. 6), отриманих MIG в аргоні, в зоні технологічного посилення при кристалізації рідкого металу утворюються пори діаметром від 1 до 2 мм, тобто умови зварювання не забезпечили належної його дегазації. Джерелом утворення можуть бути різні фактори, включаючи температурні умови навколишнього середовища, підвищену вологість захисного газу тощо. Також появу пор може викликати сегрегація елементів, які входять до складу сплаву 2219-T31, в результаті структурних перетворень при кристалізації рідкого металу швів. Для попередження пористості слід ретельно очищати основний метал і присадний дріт від оксидів і забруднень.

Повне проплавлення з'єднань, зварених за технологією MIG в аргоні, було отримано на режимі, коли величина зварювального струму становила 165...170 А, а напруга на дузі – 24...25 В. Швидкість зварювання при цьому складала 28...29 м/год. Більша щільність зварювального струму забезпечила зростання здатності проплавлення металу дугою. Величина заглиблення дуги у рідкий метал зварювальної ванни збільшується та позитивно

впливає на формування швів менших розмірів. Це відбулося завдяки дії високої питомої потужності дуги та рівня температури на ділянці металу, де діє активна пляма нагрівання, що дозволило підвищити швидкість процесу порівняно зі зварюванням TIG [1, 2].

При використанні гелію в якості захисного середовища при зварюванні MIG сплаву 2219-T31 спостерігається утворення більш якісних швів. Це пов'язано з тим, що гелій порівняно з аргонем дозволяє отримати теплофізичні умови стабільної реалізації дугового процесу, сприяє зростанню глибини проплавлення металу. Високу концентрацію теплової енергії при гелієво-дуговому зварюванні забезпечує надійне збудження дуги та стабільність її горіння, яка визначає якість «катодного» очищення поверхонь шва та зони біля нього. Завдяки високому потенціалу іонізації та теплопровідності зменшуються об'єми розбризкування електродного металу. При застосуванні гелію значення електричного струму становило 120...135 А, а напруги – 34...36 В. Швидкість зварювання при цьому була 25...27 м/год (табл. 3).

Вимірювання геометричних розмірів швів зварних з'єднань, отриманих MIG в середовищі аргону, показало, що їх ширина коливається в діапазонах 13,3...14,15 мм та 14,45...16,11, а в гелії – 13,90...15,10 мм відповідно. Розміри кореня шва (проплавлення) на 10...15 % більше, ніж у зварних з'єднань, отриманих TIG. В зразках з технологічним посиленням спостерігається зворотна залежність його висоти від захисного газу. Значення вище на 30...45 % у з'єднань, отриманих MIG в аргоні. Висота кореня шва як в першому, так і в другому варіантах захисного середовища відрізняється в 1,5 рази. Коефіцієнт форми шва відповідно до формули $K = B/(b+\delta)$ для з'єднань, зварених вздовж та поперек прокату TIG, дорівнює 2,75 та 2,19 відповідно, а для з'єднань, зварених MIG – 2,1 і 2,2 в аргоні, 2,2 і 2,9 в гелії. Порівнюючи

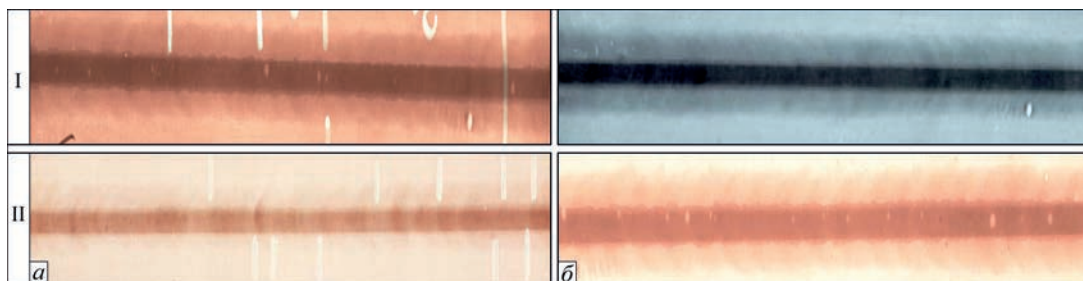


Рис. 6. Рентгенограми швів сплаву 2219-T31, отриманих зварюванням MIG в аргоні (I) та гелії (II) вздовж (а) і поперек (б) прокату

результати вимірювання геометричних розмірів швів зварних з'єднань, отриманих ТІГ, вирізаних вздовж прокату та поперек прокату та МІГ в аргоні або гелії, видно, що їх значення відрізняються на 2...3 мм, відповідно. Розміри кореня шва на 10...15 % більше у зварних з'єднань, отриманих ТІГ, ніж у з'єднань, отриманих в умовах МІГ.

Для оцінки механічних властивостей з'єднань, отриманих ТІГ з використанням зварювального дроту 2319 діаметром 1,6 мм, виготовляли стандартні зразки з бездефектних ділянок швів за результатами рентгенівського контролю. Аналіз результатів їх експериментального випробування показав (табл. 4), що незалежно від напрямку прокату з'єднання з посиленням шва, отримані за технологією ТІГ, при статичному розтягуванні ($\sigma_B^{зв.з}$) руйнуються вздовж зони сплавлення шва з основним металом (рис. 7). Зразки без технологічного посилення та кореня – вздовж металу шва. На рис. 8 представлено злами зразків зварних з'єднань сплаву 2219-Т31, отриманих ТІГ в обох напрямках

відносно орієнтації прокату. На всіх зламах спостерігається в'язкий характер рельєфу. Ямкова структура поверхні зламів свідчить про механізм зародження, зростання та злиття мікропустот внаслідок руйнування перемичок поміж кристалітами.

На рис. 9 і 10 представлено характерні руйнування та особливості поверхні зламів зварних з'єднань сплаву 2219-Т31, отриманих в аргоні та гелії за технологією МІГ. Картина рельєфу зразка залежить від його типу та характеру навантаження при випробуванні. В зразках, в яких відсутнє технологічне посилення, руйнування відбувається вздовж осі шва. Їх рельєф більш в'язкий порівняно з рельєфом зразків з технологічним посиленням. Вони руйнуються вздовж зони сплавлення шва з основним металом. При цьому після зварювання ТІГ межа міцності зварних з'єднань, у яких шов розміщувався вздовж напрямку прокату зварювальних листів, знаходиться на рівні 247...262 МПа, а поперек напрямку прокату – в діапазоні 253...261 МПа, тобто знижувалася порівняно з

Таблиця 4. Механічні властивості зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 2219-31 завтовшки 5 мм, отриманих аргонодуговим зварюванням за методами ТІГ та МІГ

Спосіб зварювання	Захисне середовище	Орієнтація шва відносно прокату	$\sigma_B^{зв.з}, *$ МПа	$\sigma_B^{м.ш.}, **$ МПа	α , град	a_n , Дж/см ²	Коефіцієнт міцності K	
							$\frac{\sigma_B^{зв.з.}}{\sigma_B^{о.м.}}$	$\frac{\sigma_B^{м.ш.}}{\sigma_B^{о.м.}}$
Неплавким електродом	Аргон	Вздовж	255,2	241,9	60	16,3	0,69	0,66
		Поперек	258,0	240,9	58	19,4	0,70	0,65
Плавким електродом	Аргон	Вздовж	258,6	231,7	45	16,2	0,70	0,63
		Поперек	261,5	234,8 д	45	17,0	0,71	0,64
	Гелій	Вздовж	238,2	252,0	52	18,5	0,64	0,68
		Поперек	243,0	239,1	54	18,0	0,66	0,65

Примітки: 1. *руйнування зразків відбувалося по зоні сплавлення шва з основним металом; 2. **руйнування зразків відбувалося по металу шва; 3. Коефіцієнт міцності вказаний відносно міцності основного металу у вихідному стані (2219-Т31): $K = \frac{\sigma_B^{зв.з.}}{\sigma_B^{о.м.}}$ – зварного з'єднання; $K = \frac{\sigma_A^{м.ш.}}{\sigma_B^{о.м.}}$ – металу шва.

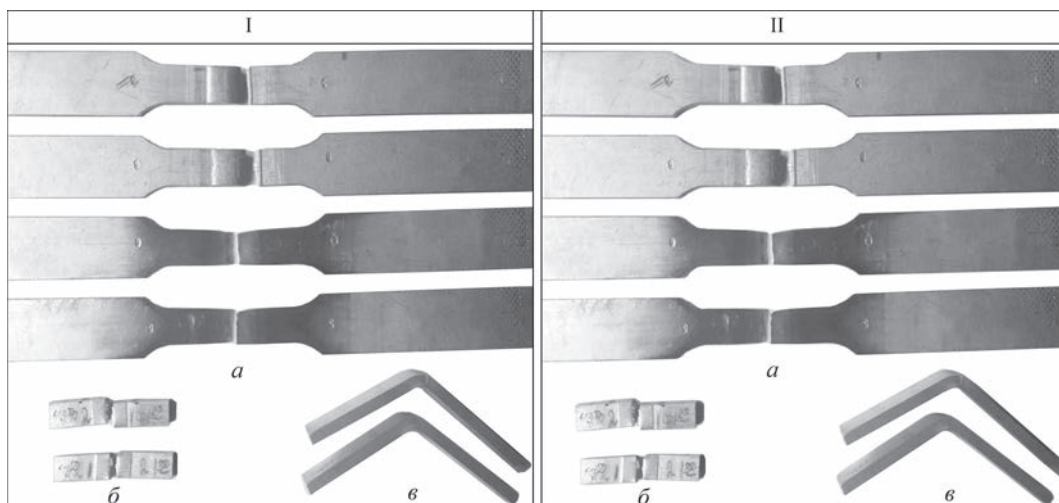


Рис. 7. Характер руйнування зразків зварних з'єднань сплаву 2219-Т31 завтовшки 5 мм, отриманих неплавким електродом в аргоні вздовж (I) і поперек (II) напрямку прокату, в умовах механічних випробувань: а – одновісного розтягу; б – ударної в'язкості; в – триточкового згину

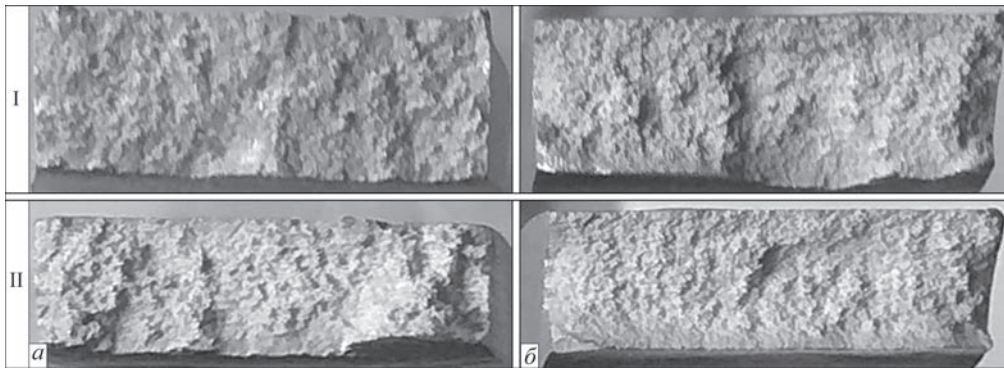


Рис. 8. Злами зразків зварних з'єднань сплаву 2219-T31 завтовшки 5 мм, отриманих неплавким електродом в аргоні вздовж (I) і поперек (II) напрямку прокату, після механічних випробувань на розтяг: *a* – зразки без посилення, *б* – зразки з посиленням

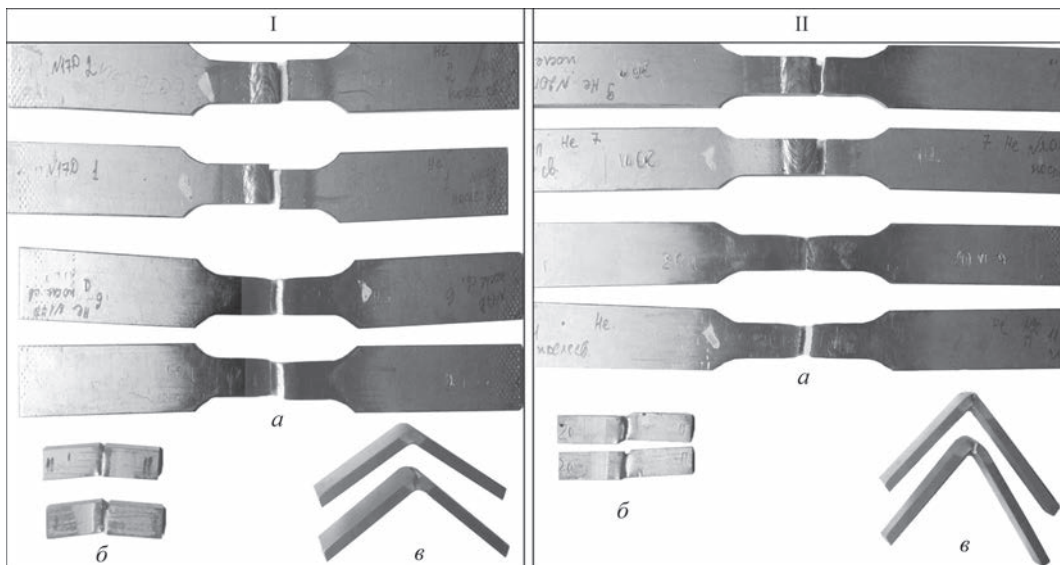


Рис. 9. Характер руйнування зразків зварних з'єднань сплаву 2219-T31 завтовшки 5 мм, отриманих плавким електродом в гелії вздовж (I) та поперек (II) напрямку прокату, в умовах механічних випробувань: *a*) одновісного розтягу; *б*) ударної в'язкості; *в*) трьохточкового згину

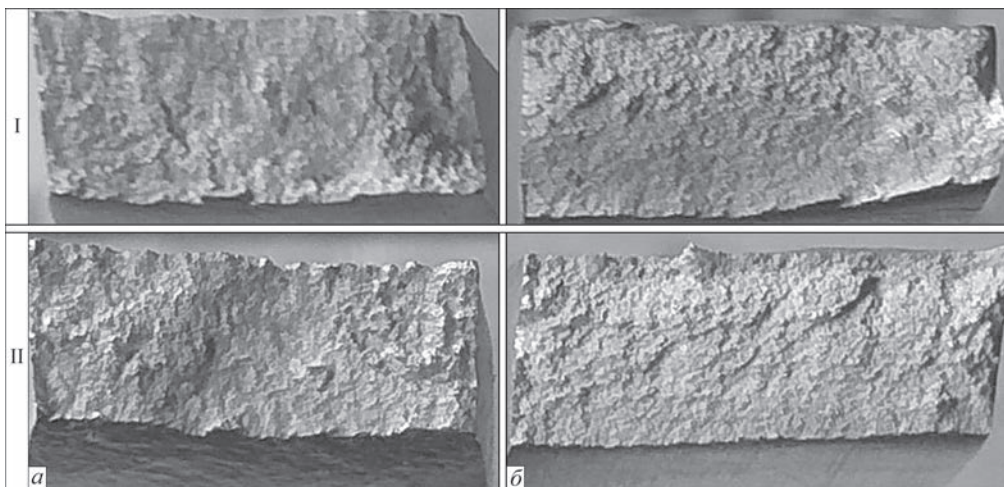


Рис. 10. Злами зразків зварних з'єднань сплаву 2219-T31 завтовшки 5 мм, отриманих плавким електродом в гелії вздовж (I) і поперек (II) напрямку прокату, після механічних випробувань на розтяг: *a* – зразки без посилення, *б* – зразки з посиленням

рівнем міцності основного металу майже на 30 %.

Зразки без технологічного підсилення шва руйнуються по металу шва, межа міцності ($\sigma_{\text{в}}^{\text{м.ш}}$) якого при статичному розтягуванні після зварювання становить 237...245 МПа в умовах розташування шва вздовж прокату і 234...247 МПа при його роз-

ташуванні поперек прокату. Ударна в'язкість металу швів, отриманих при зварюванні ТІГ вздовж прокату, коливається від 15,9 до 16,9 Дж/см², а поперек прокату – 17,5...22,4 Дж/см². Кут згину зазначених зварних з'єднань становить близько 60 град. (табл. 4). У випадку, коли зразки мають

технологічне посилення, межа міцності зварних з'єднань, отриманих плавким електродом в гелії при орієнтації шва вздовж напрямку прокату, становить 231...252 МПа, а при орієнтації шва поперек прокату – на рівні 227...265 МПа. При зварюванні в аргоні межа міцності зварних з'єднань дорівнює 255...260 і 256...266 МПа відповідно при орієнтації шва вздовж і поперек прокату.

З використанням гелію при зварюванні MIG спостерігається аналогічна залежність характеру руйнування дослідних зразків зварних з'єднань (рис. 10). Поверхня зламів має переважно в'язкий рельєф, який відображає дрібнодендритну структуру швів. Рельєф на поверхні руйнування більш крихкий у зразках з технологічним посиленням, що свідчить про вищу ступінь локальної деформації металу саме в зоні сплавлення шва з основним металом. Шви, зварені вздовж прокату, мають межу міцності металу на рівні 254...259 МПа, а поперек – 257...261 МПа. Значення кута згину з'єднань, зварених в гелії, з розташуванням шва вздовж прокату знизилось до 27...31 град., а поперек прокату вище в 1,5 рази (39...45 град.). Показник ударної в'язкості металу швів знизився до 12,9...13,5 і 12,3...12,9 Дж/см², відповідно.

Аналіз морфології поверхні зламів зварних з'єднань, отриманих як вздовж, так й поперек прокату, показав, що їх рельєф має переважно чарункову структуру. Вона утворюється внаслідок зародження мікротріщин на грубих фазових частках або інтерметалідних включень. Довжина тріщин визначається величиною об'ємної частки в основному металі та залежить від зварювального циклу TIG або MIG. Оптимальні режими зварювання сплаву 2219-T31 сприяють формуванню однорідної структури, що забезпечує в'язкий характер руйнування з'єднань в умовах випробування.

Висновки

1. Досліджено технологічні умови отримання якісних швів при з'єднанні високоміцного алюмінієвого сплаву марки 2219-T31 завтовшки 5 мм при дугових технологіях зварювання TIG і MIG. Встановлено, що в умовах TIG при величині електричного струму 290 А та швидкості зварювання 12 м/год досягається оптимальне формування якісних швів без грубих дефектів. При MIG в середовищі аргону такі шви можна отримати, використовуючи струм $I_{зв} = 165...170$ А та швидкість зварювання 28 м/год, а у разі застосування гелію – 120...135 А зі швидкістю – 25...27 м/год, тобто в умовах, коли енергетичні витрати на 20...30 % менші. Коефіцієнт b форми швів у з'єднаннях, зварених TIG вздовж та поперек прокату, відповідно, становить 2,75 та 2,19, а, зварених MIG в аргоні – 2,1 і 2,2, гелії 2,2 і 2,9.

2. Рівень міцності зварних з'єднань сплаву після TIG становить 255...258 МПа, що нижче на 30 % порівняно з основним металом ($\sigma_b = 366...370$ МПа). В умовах MIG в середовищі аргону показник міцності з'єднань складає 258...261 МПа, а в гелії знижується (238...243 МПа). Зазначене відбувається як результат структурних перетворень металу в теплофізичних умовах зварювання, а також пов'язано з появою евтектичних прошарків і надлишкових фаз біля границь кристалітів швів. Висока ймовірність утворення дефектів при застосуванні аргону в умовах MIG обмежує його застосування для відповідальних деталей та вузлів.

3. Показник ударної в'язкості швів після TIG вздовж прокату становить 15,9...16,9, а поперек – 17,5...22,4 Дж/см². Технологічна пластичність (кут згину) з'єднань дорівнює 50 і 60 град., відповідно. Після MIG в аргоні даний показник майже однаковий незалежно від напрямку прокату (43...46 і 44...47 град.), в гелії – 50...55 та 53...57 град., що майже в 3...4 рази нижче за показник основного металу (180 і 177 град.). Ударна в'язкість швів після MIG в гелії вздовж прокату становить 18,3...18,6 Дж/см², а поперек – 17,5...18,4. У разі застосування аргону в швах спостерігається зниження показника відносно напрямку прокату, 16,0...16,5 та 16,9...17,1 Дж/см².

4. Руйнування з'єднань сплаву 2219-T31 з технологічним посиленням та кореня шва відбувається вздовж границі сплавлення шва з основним металом, при їх усуненні з поверхні – вздовж осі шва. Рельєф утримує переважно чарункову структуру, зародження мікротріщин, ймовірно, відбувається на грубих фазових частках або інтерметалідних включеннях, розташованих вздовж границь кристалітів та зерен металу, значно крихких, ніж алюмінієва матриця. Довжина первинної тріщини залежить від величини об'ємної долі зазначених часток у сплаві й теплофізичних умов зварювання (TIG або MIG). Встановлено, що утворення більш однорідної структури рельєфу швів, за яких отримується належна міцність з'єднань і в'язкий характер їх руйнування, можна досягти за оптимальними режимами обох технологій.

Список літератури

1. Белецкий В.М., Кривов Г.А. (2005) *Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение)*. Справочник. Фридляндер И.Н. (ред.). Киев, Коминтех.
2. Albert, D. (1993) Aluminium alloys in arc welded constructions. *Welding World Magazine*, 32, 3, 97–114.
3. Ищенко А.Я., Лабур Т.М. (2013) *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Киев, Наукова думка, 2013.
4. Лабур Т.М. (2022) Тенденции технологического развития процессов дуговой сварки для соединения современных алюминиевых сплавов. *Сварщик*, 1, 6–17.
5. Лобанов Л.М., Кушнарев О.П., Мазур О.А. та ін. (2022) Економічна оптимізація методів зварювання конструкцій

паливних баків ракетно-космічної техніки. *Автоматичне зварювання*, **3**, 42–52. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2022.03.06>

6. Nyrkova, L.I., Labur, T.M., Shevtsov, E.I. et al. (2022) Complex of properties of 2219 alloy weld joint in T62 state under modeling operating conditions. *Space Sci. & Technol.*, **28** (2), 14–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2022.02.014>
7. Машин В.С., Покляцкий А.Г., Федорчук В.Е. (2005) Механические свойства соединений алюминиевых сплавов при сварке плавящимся и неплавящимся электродом. *Автоматическая сварка*, **9**, 43–49.
8. Kiyoto, S. (1993) Materials and joining technologies for rocket structures. *Journal of the Japan welding society*, **62**, 46–52. DOI: <https://doi.org/10.2207/qjwjs1943.62.630>

References

1. Beletsky, V.M., Krivov, G.A. (2005) *Aluminium alloys (Composition, properties, technology, application)*. Refer. Book. Ed. by I.N. Fridlyander. Kyiv, Komintekh [in Russian].

2. Albert, D. (1993) Aluminium alloys in arc welded constructions. *Welding World Magazine*, **32**(3), 97–114.
3. Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M. (2013) *Welding of modern aluminium alloy structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
4. Labur, T.M. (2022) Tendencies of technological development of arc welding processes for joining modern aluminium alloys. *Svarshchik*, **1**, 6–17 [in Russian].
5. Lobanov, L.M., Labur, O.P., Mazur, O.A. et al. (2022) Cost optimization of the methods of welding structures of fuel tanks for aerospace vehicles. *Avtomatych. Zvar.*, **3**, 42–52 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2022.03.06>
6. Nyrkova, L.I., Labur, T.M., Shevtsov, E.I. et al. (2022) Complex of properties of 2219 alloy weld joint in T62 state under modeling operating conditions. *Space Sci. & Technol.*, **28** (2), 14–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2022.02.014>
7. Mashin, V.S., Poklyatsky, A.G., Fedorchuk, V.E. (2005) Mechanical properties of aluminium alloys in consumable and nonconsumable electrode arc welding. *The Paton Welding J.*, **9**, 39–45.
8. Kiyoto, S. (1993) Materials and joining technologies for rocket structures. *J. of the Japan Welding Society*, **62**(8), 46–52. DOI: <https://doi.org/10.2207/qjwjs1943.62.630>

CONSUMABLE AND NONCONSUMABLE ELECTRODE WELDING OF HIGH-STRENGTH 2219-T31 ALUMINIUM ALLOY

Labur T.M., Poklyatskyi A.G., Koval V.A.

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The influence of the conditions of consumable (TIG) and nonconsumable (MIG) electrode arc welding of high-strength aluminium alloy of 2219-T31 grade (USA) 5 mm thick was studied. Effective welding modes were selected by the main characteristics: absence of coarse defects, weld form factor, standard mechanical properties, and features of fracture surface relief. The strength level of welded joints after welding is 25-30% lower compared to base metal ($\sigma_t=366...370$ MPa). The impact toughness values of the welds after TIG welding vary from 16.4 to 20.3 J/cm², according to the rolling direction. Bend angle is almost 3 times lower than the base metal value (180 and 177 degr.). Fracture of joints with technological reinforcement and of the weld root occurs along the boundary of weld fusion with the base metal, at a distance from the surface along the weld axis. The relief retains a predominantly cellular structure. Analysis results were used to establish the technological conditions of achieving an optimal quality of welds and the type of shielding gas for welding.

Keywords: aluminium alloy, nonconsumable and consumable electrode welding modes, inert gases: argon, helium, welded joints, mechanical properties, investigations

Надійшла до редакції 08.02.2024

Отримано у переглянутому вигляді 11.03.2024

Прийнято 23.05.2024

Вперше в історії людства супутник передав на Землю сонячну енергію з космосу

Команда дослідників використовувала пристрій, який представляє невеликий супутник, здатний збирати сонячну енергію за допомогою фотоелектричних елементів і перетворювати її в радіочастотну енергію за допомогою антенних решіток.

Потім супутник синтезував промінь радіочастотної енергії і передав його на Землю, де приймач і перетворювач, розташований на даху лабораторії в Каліфорнійському технологічному інституті, вловив і перетворив сигнал на постійний струм.

Кінцева мета розробників – створення мережі супутників, які зможуть передавати на Землю енергію, достатню для забезпечення 10000 домогосподарств. Однак до цього ще далеко, оскільки поточний експеримент зафіксував лише частину енергії, що генерується супутником.

Космічна сонячна енергетика – це багатообіцяюча концепція, яка має на меті використати неосяжну і безперебійну сонячну енергію, доступну в космосі, і доставити її на Землю, де вона може бути використана для промисловості, домогосподарств та інших цілей.

На відміну від наземних сонячних панелей, на роботу яких впливають погода, пори року та нічний час доби, орбітальні сонячні панелі можуть генерувати енергію безперервно, якщо вони орієнтовані на сонце.

