УДК 621.791.754.6:620.193.28 DOI: https://doi.org/10.37434/as2021.10.03

# КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНА СТІЙКІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СПЛАВУ 2219 В УМОВАХ, МОДЕЛЮЮЧИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ*

**Л.І. Ниркова[1], Т.М. Лабур[1], Є.І. Шевцов[2], О.П. Назаренко[2], А.В. Дорофєєв[2]**

[1]ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
[2]ДП «КБ Південне». 49008, м. Дніпро, вул. Криворізька, 3

Досліджено корозійну тривкість, включаючи опір проти локальної корозії, зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 2219, виконаних однопрохідним зварюванням неплавким електродом вздовж (Д) та поперек (П) прокату, термообробленого до стану Т81. Показано, що стійкість зварних з'єднань сплаву 2219 проти загальної та локальної корозії в амілі та його парах не залежить від напрямку заготовки при зварюванні. Встановлено підвищення показників пластичності та міцності зразків зварних з'єднань після витримування в амілі та парах амілу. Коефіцієнт міцності зварних з'єднань після витримування в амілі у поздовжньому напрямку зростає від 0,65 до 0,67, у поперечному – від 0,64 до 0,66. Після витримування в парах амілу міцностні властивості зварного з'єднання майже не змінюються: коефіцієнт міцності в обох напрямках орієнтації був однаковий та дорівнював 0,64. Руйнування проходило вздовж лінії сплавлення шва з основним металом, де під час термічного циклу зварювання відбувається оплавлення границь зерен та їх потовщення при кристалізації, а також розпад пересиченого твердого розчину міді в алюмінії, який супроводжується виділенням і коагуляцією зміцнюючих фаз. Бібліогр. 23, табл. 2, рис. 6.

*Ключові слова: алюмінієвий сплав 2219, зварні з'єднання, термооброблення, корозійна тривкість, механічні властивості, мікроструктура, механічне руйнування при розтягуванні.*

Алюмінієвий конструкційний сплав 2219-Т31 (USA) відноситься до класу термічно зміцнюваних сплавів системи легування Al–Cu–Mn, які мають високу питому теплоємність. Тимчасовий опір деформованих термооброблених алюмінієвих сплавів може досягати 500 МПа і більше при густині менше 2850 кг/м$^3$ [1–3]. Він відноситься до найбільш використовуваних конструкційних матеріалів, зокрема, для виготовлення паливних баків в різних системах ракет-носіїв (Saturn V, Apollo, Space Shuttle тощо).

Питома міцність сплавів має високі значення та наближається до питомої міцності високоміцних сталей. При зниженні температури механічні властивості не погіршуються, тому використовуються в широкому температурному інтервалі від –250 до +200 °С (за умови короткострокового нагрівання при 250…300 °С). Тому часто сплав використовують в конструкціях балонів і баків, в яких зберігаються рідкі гази. Крім того, сплав також характеризується технологічною пластичністю в холодному та гарячому стані при високому рівні корозійної стійкості металу, що виділяє цей сплав серед інших конструкційних алюмінієвих сплавів [4]. Він має унікальну комбінацію фізико-механічних та технологічних властивостей [1–17]. Особливо цінується його зварюваність та висока міцність за умов кріогенних температур. Для таких конструкцій потрібна висока пластичність в холодному та гарячому станах при високому рівні корозійної стійкості.

Сплав 2219-Т31 входить до групи конструкційних матеріалів і відноситься до сплавів, що дисперсійно зміцнюються. Цей сплав утримує майже 6 % міді, а характеристики його зміцнення подібні двокомпонентному сплаву Al–Cu. Структура сплаву складається з твердого розчину і декількох фазових включень: Θ'($Al_2Cu$), Т($Al_{12}Mn_2Cu$), $Al_3Zr$, $Al_{11}V$ тощо, наявність яких у сплаві забезпечує хороше сполучення міцності та пластичності [18]. Чисельні наукові дослідження зазначають про вплив технологічних умов нагрівання, під дією яких відбуваються структурні перетворення, знижує показники механічних та корозійних властивостей [1–16]. На ступень їх зниження впливають розміри та форма кристалітів і зерен металу в зоні термічного впливу, морфологія розподілу структурних складових та їх кількість в об'ємі металу. Крім того, суттєво впливає попередня деформація, яка посилює дію механізму виділення метастабільної фази Θ'($Al_2Cu$) та викликає появу стабільної фази Θ, яка виступає ініціатором зародження тріщини при руйнуванні [14].

Зазвичай, конструкції з алюмінієвого сплаву 2219, які працюють під тиском, після зварювання піддають термічному обробленню або використовуються у стані постачання [1]. При термообробленні застосовують різні режими, в тому числі

* В роботі брали участь С.О. Осадчук, М.Р. Яворська, А.Г. Покляцький, В.Є. Федорчук.

Ниркова Л.І. – https://orcid.org/0000-0003-3917-9063, Лабур Т.М. – https://orcid.org/0000-0002-4064-2644

© Л.І. Ниркова, Т.М. Лабур, Є.І. Шевцов, О.П. Назаренко, А.В. Дорофєєв, 2021

Т81 (старіння при 177 °С впродовж 18 год заготовок у стані Т4), а також Т87 (старіння заготовок, термооброблених з наступною деформацією 8 % до стану Т37, при 163 °С впродовж 24 год).

Водночас, сплав дуже чутливий до температурного впливу при зварюванні, тому під час розплавлення та кристалізації швів відбувається значне розміцнення основного матеріалу в зоні термічного впливу [5, 6]. Морфологія мікроструктури шва визначається градієнтом температур на поверхні розподілу твердого розчину рідкого металу та фаз, значенням швидкості кристалізації, а також характером розподілу легуючих елементів по об'єму металу шва. Перегрівання металу викликає зниження його міцності в зоні термічного впливу, утворення неоднорідної структури в результаті сегрегації легуючих елементів і домішок вздовж границь кристалітів і зерен [7–12]. Крім того, між зернами з'являються крихкі прошарки з пересичених фаз, особливо на межі сплавлення з основним металом, де прошарки формують щільний каркас навколо зерен [14, 15].

**Методика експериментів.** В роботі досліджено алюмінієвий сплав системи легування Al–Cu 2219-Т31 товщиною 3 мм. Аналіз хімічного складу проводили спектральним методом на спектрометрі «Спектровак-1000» фірми «Baird». Отримані результати порівнювали з хімічним складом сплаву, наведеним в AMS-QQ-A-250/30A [17] (табл. 1). Встановлено, що за вмістом основних легуючих елементів та домішок (за виключенням ванадію, вміст якого не визначали) зразок досліджуваного напівфабрикату алюмінієвого сплаву відповідає вимогам стандарту AMS-QQ-A-250/30A.

Зварювали пластини сплаву 2219-Т31 розміром 300×150×3мм, вирізані вздовж і поперек відносно напрямку прокату. Перед зварюванням заготовки зі сплаву обробляли у 10 %-му розчині NaOH та освітляли у 30 %-му розчині $HNO_3$. Зварювання заготовок проводили в горизонтальному положенні неплавким вольфрамовим електродом з лантановим покриттям з використанням присадного дроту марки 2319 діаметром 1,6 мм за режимом: $I_{зв}$ = 280 А, $v_{зв}$ = 20 м/год, швидкість подачі присадного дроту 117 м/год. Джерело живлення MW-450 фірми «Fronius», використовували змінний струм з прямокутною формою хвилі частотою 200 Гц. Зону сплавлення захищали аргоном. Повне проплавлення зварюваних кромок за один прохід і формування проплаву (кореня) досягалося за наявності змінної підкладки з нержавіючої сталі з прямокутною формою канавки шириною 4 мм та глибиною 1 мм, що дозволило отримати якісне формування стикових з'єднань з відповідним технологічним посиленням.

Якість формування швів стикових з'єднань сплаву 2219-Т31 оцінювали візуально та методом рентгенографії (ГОСТ 7512 [18]) на установці РАП-150/300. Щільність металу шва контролювали на приладі Денситометр ДП-30.

Для вимірювання геометричних параметрів швів використовували електронний штангенциркуль марки АРТ–34460-150 з ціною поділки 0,01 мм.

Із зварних заготовок виготовляли зразки для механічних та корозійних випробувань згідно з відповідними нормативними документами. Зразки зварних з'єднань термооброблювали до стану Т81 (штучне старіння) за режимом: $T = 180 \pm 5$ °С впродовж 18 год.

Корозійні випробування проводили в амілі та парах амілу при температурі 50 °С безперервно впродовж 45 діб на базі випробувальної лабораторії КБ «Південне», після чого оцінювали корозійну тривкість (швидкість загальної корозії, тривкість проти МКК, розшаровуючої корозії та корозійного розтріскування), а також механічні властивості. Оцінювання стійкості зразків основного металу проти суцільної корозії проводили методом масометрії згідно з ГОСТ 9.908 [19]. Швидкість втрати маси зразків визначали за зміною їх маси та тривалості корозійних досліджень за формулою:

$$K = \frac{\Delta m}{ST}, \qquad (1)$$

де $\Delta m = m_1 - m_2$ – корозійні втрати зразка, г; $m_1$ – маса зразка до випробувань, г; $m_2$ – маса зразка після корозійних випробувань; $S$ – площа поверхні зразка, м$^2$; $T$ – тривалість досліджень, год.

Швидкість корозії обчислювали за формулою:

$$П = \frac{8760K}{d}, \qquad (2)$$

де $K$ – швидкість корозії, г/(м$^2$·год); $d$ – густина металу, г/см$^3$; 8760 – кількість годин у році.

Густина алюмінієвих сплавів становить 2,7 г/см$^3$, що враховували при обчисленні.

**Таблиця 1. Результати аналізу хімічного складу зразка сплаву 2219-Т31 товщиною 3 мм**

| Зразок, що контролюється, або вимоги стандарту | Масова частка елементів, % | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Cu | Mn | Zr | V | Ti | Fe | Si | Zn | Mg | Інші елементи: кожен/в цілому |
| Зразок | 6,7 | 0,34 | 0,18 | - | 0,05 | 0,16 | 0,09 | 0,03 | 0,02 | 0,01 (Ni) |
| AMS-QQ-A-250/30A | 5,8…6,8 | 0,20…0,40 | 0,10…0,25 | 0,05…0,15 | 0,02…0,10 | ≤0,30 | ≤0,20 | ≤0,10 | ≤0,02 | ≤0,05/≤0,15 |

Оцінювання стійкості проти розшаровуючої корозії проводили згідно з ГОСТ 9.904 [20] на зразках основного металу та зварних з'єднань. Під час оцінювання стану дослідних зразків відмічали зміну кольору, наявність виразок та відшарувань на робочих поверхнях зразків, тріщин на торцях. Прийняті наступні умовні позначення. Літерою «А» позначена поверхня, на якій нанесено маркування, а для зварних з'єднань – поверхня з лицьовим швом, Б – зворотна поверхня, для зварних з'єднань – поверхня з проплавленням; *1*, *2* – торці сторін довжиною 60 мм (80 мм для зварних з'єднань), *3*, *4* – торці сторін довжиною 40 мм (25 мм – для зварних з'єднань).

Оцінювання стійкості сплаву проти МКК проводили металографічним методом при збільшенні ×(100…200) згідно з ГОСТ 9.021 [21] на зразках зварних з'єднань, оцінювали всі структурні зони зварного з'єднання, а саме: основний метал, зону термічного впливу та зварного шва.

Випробування стійкості проти корозійного розтріскування проводили на прямокутних зразках розміром 150,0×25,0×3,0 мм. Зразки навантажували за чотириточковою схемою вигину згідно з ГОСТ 9.901.2 (метод 4), рівень постійної деформації був узгоджений із ДП КБ «Південне» та становив 957 кгс/см$^2$. Наявність (відсутність) тріщин виявляли візуально за допомогою лупи.

Визначення та оцінювання механічних властивостей виконували на плоских зразках з технологічним посиленням на лицевій та зворотній поверхнях шва. Механічні випробування проводили згідно з ГОСТ 1497 [22] на машині Instron-1126 зі швидкістю переміщення траверси 6 мм/хв до руйнування. Для контролю показника відносного подовження зразків застосовували екстензометр № G-51-12-M-A. Під час випробувань за допомогою персонального комп'ютера безперервно реєстрували показники навантаження та деформації, за результатами яких розраховували межу плинності, тимчасовий опір розриву (межу міцності) та відносне подовження.

Металографічний аналіз основного металу та зварних з'єднань до та після корозійних випробувань виконували за допомогою мікроскопа ММТ-1600В. Дослідження проводилися на шліфах, вирізаних зі стикових з'єднань, зварених вздовж (Д) і поперек (П) прокату листового напівфабрикату. Мікроструктуру виявляли травленням у розчині складу: хлорна кислота – 1000 см$^3$ + крижана оцтова кислота – 75 см$^3$.

**Результати та їх обговорення.** *Геометричні параметри швів.* Після зварювання стиків визначали геометричні параметри отриманих 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). Згідно з результатами вимірювань ширина швів в з'єднаннях сплаву 2219-Т31, вирізаних вздовж прокату, становить від 9,56 до 9,72 мм, а поперек прокату – від 9,47 до 9,65 мм. Коефіцієнт форми шва відповідно до формули $K = B/(b+\delta)$ для з'єднань, зварених вздовж та поперек прокату неплавким електродом, дорівнює 2,13 та 2,03, відповідно.

*Дослідження стійкості проти загальної та локальної корозії.* Після випробувань в амілі спостерігалось нерівномірне потемніння поверхні зразків (рис. 1) та утворення корозійних плям різних розмірів площею від 20 до 40 %. Після контакту з парами амілу потемніння поверхні також було нерівномірним, площа корозійних плям становила від 10 до 20 %. Плями характеризуються зміною кольору поверхневого шару (потемнінням) і малою глибиною ураження.

Після видалення продуктів корозії поверхні блискучі, локального корозійного ураження поверхні не виявлено. За результатами візуального огляду після випробувань в середовищі амілу (рідкому та парах) корозію алюмінієвого сплаву 2219 ідентифіковано згідно з ГОСТ 9.908 як суцільно нерівномірну, вид уражень – корозійні плями. Швидкісні показники суцільної корозії зразків основного металу алюмінієвого сплаву 2219 у стані Т81, визначені згідно з ГОСТ 9.908, становлять: швидкість втрати маси в амілі – 0,00111 г/(м$^2$·год), в парах амілу – 0,00346 г/(м$^2$·год); лінійна швидкість корозії в амілі – 0,00362 мм/рік, – в парах амілу – 0,01120 мм/рік.

Рис. 1. Зовнішній вигляд поверхні основного металу алюмінієвого сплаву 2219, термообробленої до стану Т81, до (*а*) та після випробувань в амілі (*б*) та парах амілу (*в*)

Таким чином, пари амілу деякою мірою є більш корозійно-агресивними відносно алюмінієвого сплаву 2219 порівняно з рідким амілом: швидкість корозії в парах амілу зростає в 3,1 рази порівняно з амілом. За десятибальною шкалою корозійної стійкості згідно з ГОСТ 9.502 [23] стійкість алюмінієвого сплаву 2219, термооброблено до стану Т81, в амілі оцінена балом 2, в парах амілу – балом 4, що відповідає групі стійкості металу «підвищено стійкий» та «стійкий», відповідно.

За результатами оцінювання встановлено (табл. 2), що стійкість основного металу сплаву 2219 проти розшаровуючої корозії після випробувань в амілі та його парах та зварних з'єднань вздовж (Д) та поперек (П) прокату, термооброблених до стану Т81, відповідає балу 2 згідно з ГОСТ 9.904.

Таким чином, на стійкість зварних з'єднань основного металу проти розшаровуючої корозії в амілі та його парах не впливає напрямок прокату напівфабрикату та термічний цикл зварювання.

Після корозійних випробувань в амілі та його парах руйнування зварних з'єднань сплаву 2219 по границях зерен не виявлено, і ці з'єднання є стійкими проти міжкристалітної корозії згідно з ГОСТ 9.021. На їх стійкість не впливає напрямок прокату та термічний цикл зварювання. Зразки зварних з'єднань сплаву 2219 вздовж (Д) та поперек (П) прокату у стані Т81 стійки й проти корозійного розтріскування в амілі та його парах.

Зварні з'єднання сплаву 2219 вздовж (Д) та поперек (П) прокату у стані Т81 є стійкими до міжкристалітної корозії та корозійного розтріскування в амілі та його парах. Стійкість проти розшаровуючої корозії оцінено балом 2, швидкість корозії основного металу в амілі дорівнює 0,00362 мм/рік, в парах – 0,01120 мм/рік. На їх стійкість не впливає напрямок прокату напівфабрикату та термічний цикл зварювання.

*Дослідження мікроструктури.* Металографічний аналіз мікроструктури основного металу сплаву 2219-Т31 показав, що її морфологія складається зі збагаченої алюмінієм α-фази (твердий розчин) і стабільної θ($CuAl_2$)-фази. До числа проміжних фаз відносяться θ′($CuAl_2$) і S′($Al_2CuMg$). Основними легуючими елементами сплаву є мідь і марганець. Наявність в структурі сплаву фаз θ($Al_2Cu$), Т($Al_{12}Mn_2Cu$), $Al_3Zr$, $Al_{11}V$ забезпечує належний рівень фізико-механічних властивостей як самого сплаву, так і його зварних з'єднань. Це зумовлено характерним особливим механізмом розпаду твердого розчину та морфологією розташування фазових виділень при нагріванні, а також співвідношенням їх об'ємної долі в структурі. Кількість фазових складових визначається загальною сумою легуючих елементів для конкретного сплаву.

Структура основного металу сплаву 2219 у стані Т81 до корозійних випробувань характеризується наявністю зерен твердого розчину основних легуючих елементів в алюмінії. Зерна мають витягнуту вздовж напрямку прокату форму. В об'ємі сплаву спостерігаються виділення насичених фаз, які містять основний легуючий елемент сплаву – мідь. Неметалеві включення рівномірно розташовані по всьому перерізу металу (рис. 2). Ознаки макро- та мікрохімічної неоднорідності

**Таблиця 2. Результати оцінювання стійкості проти розшаровуючої корозії зразків основного металу сплаву 2219-Т31 та зварних з'єднань, отриманих вздовж (Д) та поперек (П) прокату, а також термооброблених до стану Т81, після перебування в амілі та його парах**

| Маркування | Напрямок прокату | Умови корозійних випробувань | Назва показника | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Характер зміни зовнішнього виду зразків | | Найбільший діаметр відшарування, мм | | Площа відшаровування на кожній поверхні, % | | Сумарна довжина торців з тріщинами, мм | | | | Стійкість проти РСК згідно з ГОСТ 9.904, бал |
| | | | А | Б | А | Б | А | Б | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| Основний метал | Д | Аміл | Легке потемніння | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| | | Пари амілу | Зміна кольору плямами, Легке потемніння, плями з кольорами мінливості | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| | | Контр. | Без змін | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Зварне з'єднання | Д | Аміл | Легке потемніння, плями з кольорами мінливості | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| | | Пари амілу | Легке потемніння | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| | | Контр. | Без змін | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Основний метал | П | Аміл | Легке потемніння, плями з кольорами мінливості | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| | | Пари амілу | «-» | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| | | Контр. | Без змін | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| РСК.11.81 | П | Аміл | Легке потемніння | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| РСК.13.81 | | Пари амілу | «-» | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| РСК.15.81 | | Контр. | Без змін | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

в структурних складових не спостерігаються, що свідчить про високу якість досліджуваного сплаву.

У зразках, вирізаних у поздовжньому напрямку (рис. 2), вздовж прокату напівфабрикату, довжина зерен становить в середньому 60 мкм, а ширина – 35 мкм (перпендикулярно до товщини листів). В поперечному напрямку розмір зерен дорівнює 60×35 мкм, що вказує на відсутність анізотропії металу не тільки відносно напрямку напівфабрикату, але й по товщині (рис. 3).

Більш ретельне дослідження особливостей структури методом оптичної мікроскопії в темному полі показало, що темні включення неправильної форми, які розташовані рівномірно в об'ємі сплаву, є інтерметалідними фазами. Частина включень має сферичну форму з максимальним розміром близько12 мкм. Зважаючи на їх розмір, ці інтерметаліди виділилися з твердого розчину при термічному обробленні зразків. Інші фазові включення мають більш витягнуту овальну форму з максимальним розміром 35×12 мкм. Вони не розчиняються при зварюванні дугою та утворилися на металургійному етапі виготовлення напівфабрикатів та набули витягнутої форми в процесі їх пластичного деформування в листи.

В структурі зварних з'єднань можна виділити зони, які відрізняються одна від іншої. Литий метал спостерігається у швах. Він має дендритну структуру. В центрі шва дендрити розташовані вздовж напрямку зварювання. Безпосередньо біля границі сплавлення шва з основним металом дендрити мають стовпчасту будову та спрямовані від лінії сплавлення до центру кристалізації шва. По границях дендритів присутні виділення евтектичного походження (рис. 2, 3) розміром не більше 15 мкм. Спостерігається характерна для сплавів цієї системи легування рівномірна пористість. Розмір пор не перевищує 50 мкм. Їх щільність становить 7…12 шт. на 1 мм$^2$. На окремих ділянках зварного шва виявлено одиничні пори розміром до 0,4 мм, що, відповідно до ДСТУ EN ISO 10042 [14], є допустимим.

Лінія сплавлення відділяє метал шва, який був повністю розплавлений при зварюванні, від основного металу, який повністю або частково залишається в твердому стані. Її не завжди мож-

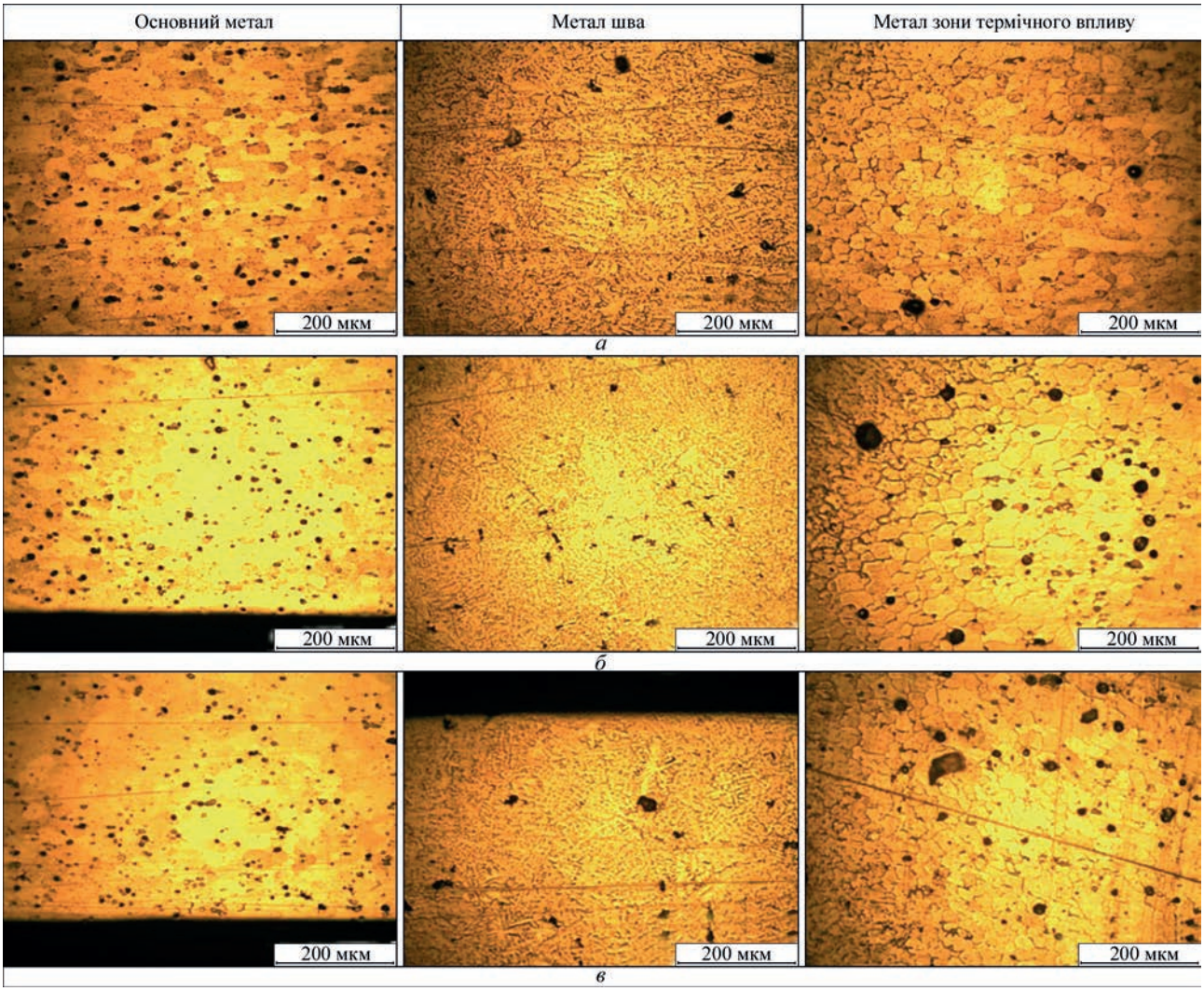


Рис. 2. Мікроструктура зон зварного з'єднання алюмінієвого сплаву 2219, термооброблених до стану Т81, уздовж (Д) прокату до корозійних випробувань (*а*), після випробувань в середовищі амілу (*б*) та його в парах (*в*)

на чітко визначити, але вона розділяє дендритну структуру литого метала шва та зеренну структуру деформованого металу ЗТВ (рис. 2, 3).

В ЗТВ інтенсивних процесів рекристалізації не виявлено. Розмір зерен в цій зоні суттєво не відрізняється від зерен основного металу. Водночас, спостерігається виділення легкоплавких евтектик вздовж границь зерен, що пов'язано з перерозподілом легуючих елементів між структурними складовими сплаву під дією нагрівання металу ЗТВ до температур, вищих за температуру солідусу (рис. 2, *в* та 3, *в*). Це призводить до утворення в ЗТВ біля лінії сплавлення структури, характерної для стану термічного оброблення сплавів під назвою «перепал» та супроводжується зниженням твердості (рис. 4).

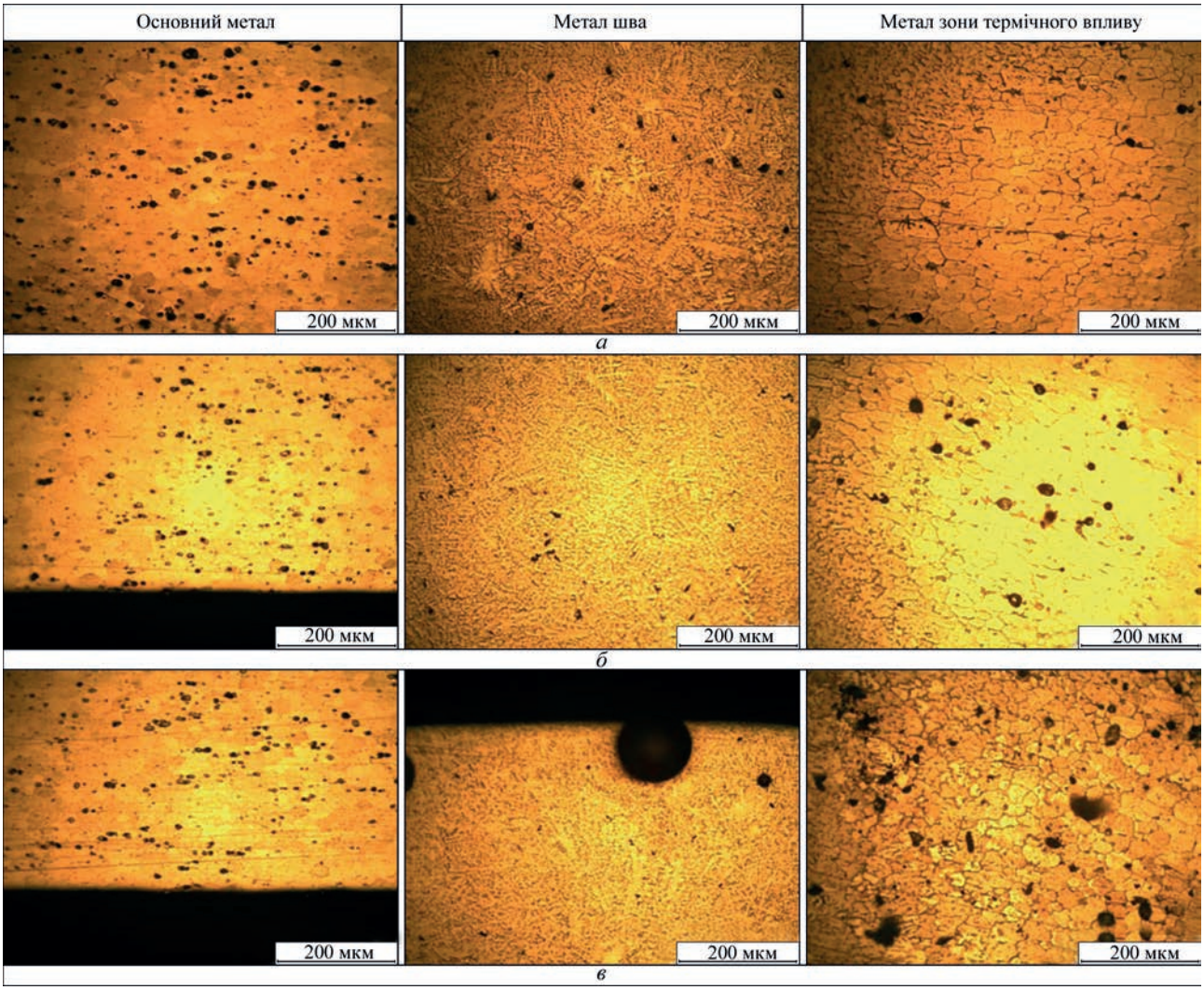


Рис. 3. Мікроструктура зон зварного з'єднання алюмінієвого сплаву 2219, термооброблених до стану Т81 поперек (П) прокату до корозійних випробувань (*а*), після випробувань в середовищі амілу (*б*) та його парах (*в*)

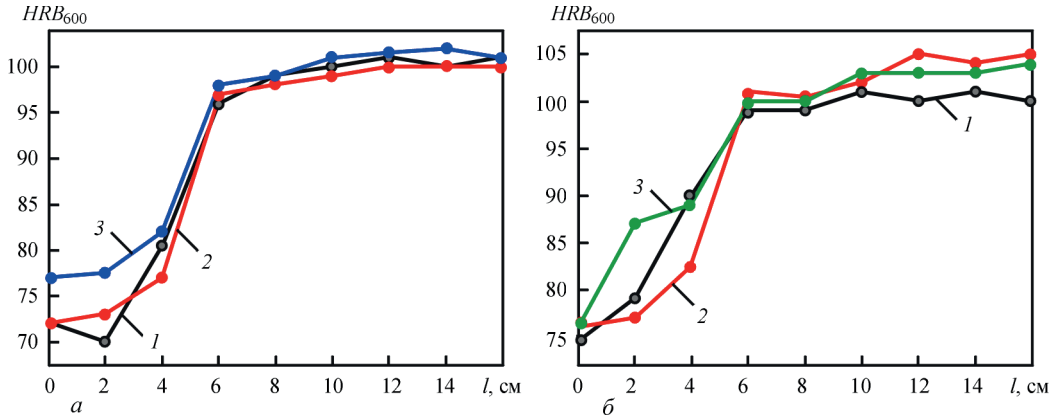


Рис. 4. Характер розподілу твердості по різних зонах зварного з'єднання сплаву 2219 у стані Т81 вздовж (*а*) та поперек (*б*) прокату до корозійних випробувань (*1*), після корозійних випробувань в середовищі амілу (*2*) та його парах (*3*)

Ця структурна ділянка є невід'ємною складовою любого зварного з'єднання алюмінієвих сплавів, отриманого зварюванням плавленням. При віддаленні від лінії сплавлення в основний метал також присутні зони відпалу та перестарювання, які утворилися під дією тепла зварювальної дуги. В цих ділянках внаслідок процесів коагуляції спостерігаються збільшені до 25 мкм інтерметалідні фазові виділення. Загальна ширина зони термічного впливу зразків зварних з'єднань в стані Т81 становить 6 мм. В зразках, зварених вздовж та поперек прокату суттєвих відмінностей в ширині зони ЗТВ не виявлено.

Після корозійних випробувань в амілі (рис. 2, 3, *б*) та парах амілу (рис. 2, 3, *в*) будь-яких змін мікроструктури та розміру зерен в основному металу, металі шва та ЗТВ не спостерігається.

*Дослідження механічних властивостей*. На рис. 5 наведено усереднені значення показників механічних властивостей: межі міцності, межі плинності та відносного видовження (рис. 5). Значення межі плинності ($\sigma_{0,2}$) контрольних зразків основного металу, вирізаних вздовж напрямку прокату (рис. 5, *а*), становить від 365 до 367 МПа, а рівень міцності $\sigma_в$ – від 462 до 463 МПа (рис. 5, *б*). У зразках, вирізаних в поперечному напрямку, $\sigma_{0,2}$ дорівнює 362…365 МПа (рис. 5, *в*), $\sigma_в$ – 468…469 МПа (рис. 5, *г*), що дещо вище ніж для зразків, вирізаних у поздовжньому напрямку.

Аналіз результатів випробувань контрольних зразків зварних з'єднань, зварених вздовж прокату, показав, що межа плинності знизилась близько на 34…36 % порівняно з основним металом – до 234…241 МПа (рис. 5, *а*). Межа міцності зварних з'єднань складає 293…308 МПа (рис. 5, *б*), що на 33…37 % нижче міцності основного металу. Коефіцієнт міцності контрольних зразків зварних з'єднань дорівнює 0,65.

Аналогічна закономірність спостерігалась для зразків зварних з'єднань, які були зварені поперек напрямку прокату. Значення межі плинності контрольних зразків зварних з'єднань становило 229…234 МПа (рис. 5, *в*), що приблизно на 36…37 % менше ніж основного металу. Межа міцності зварних з'єднань складала від 271 до 323 МПа, що нижче міцності основного металу приблизно на 31…45 %. Коефіцієнт міцності контрольних зразків зварних з'єднань, зварених поперек напрямку прокату, дорівнював 0,64.

Після випробувань зразків в амілі значення межі плинності основного металу сплаву 2219-Т81 в поздовжньому напрямку зросло майже на 3 % та складало від 355 до 373 МПа. Рівень міцності при цьому підвищився на 1 % – 464…466 МПа. Витримка зразків у парах амілу також викликала підвищення на 4…5 % межі плинності – до 371…374 МПа і міцності на 1 % – до 465…467 МПа.

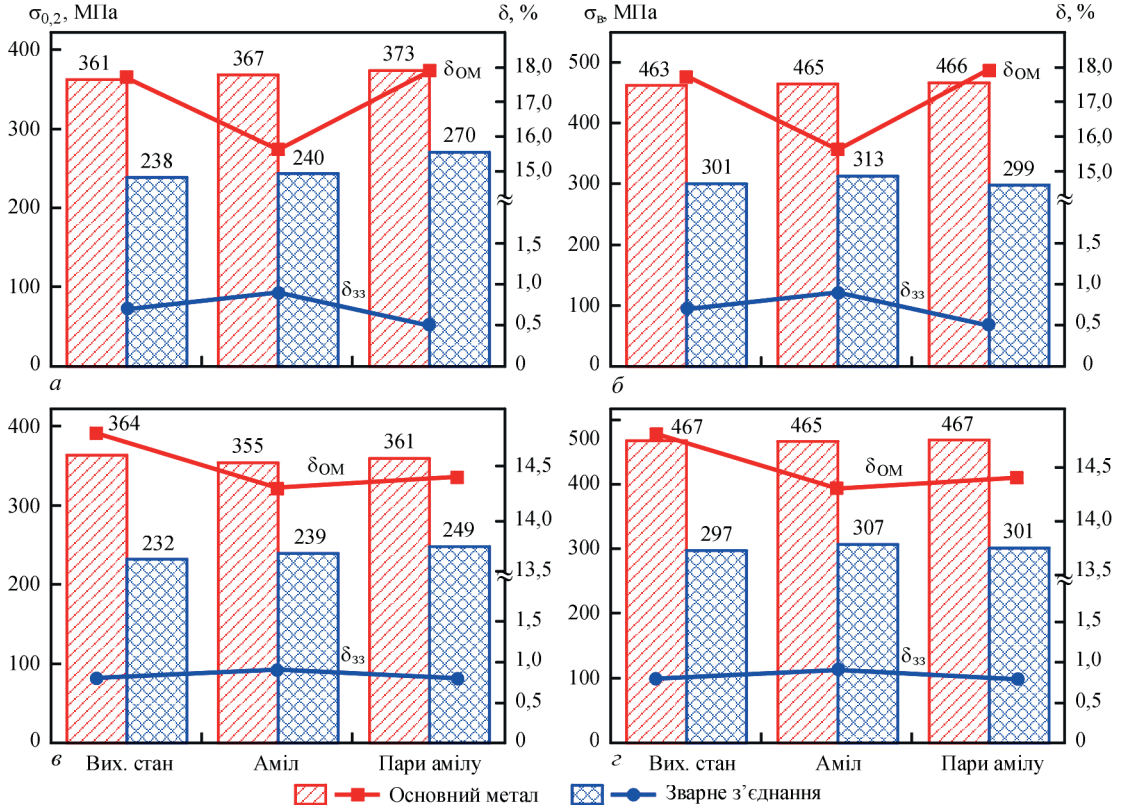


Рис. 5. Механічні властивості основного металу та зварного з'єднання сплаву 2219 у стані Т81 вздовж (*а*, *б*) та поперек (*в*, *г*) прокату до корозійних випробувань та після корозійних випробувань в амілі та його парах. Стовпчики – межа міцності та межа пластичності, лінія – відносне подовження

Після корозійних випробувань зразків з'єднань, зварених вздовж напрямку прокату, в амілі спостерігали зростання на ~1 % значення межі плинності до 230…257 МПа (рис. 5, *а*). Межа міцності з'єднань при цьому зросла на ~4 %, до 309…315 МПа (рис. 5, *б*), що свідчить про зміцнення фазових складових структури металу після контакту з амілом. Випробування поздовжніх зразків зварних з'єднань в парах амілу сприяло підвищенню межі плинності на ~13 % (до 261…271 МПа), але незначному зниженню межі міцності на ~1 % (до 290…308 МПа) (рис. 5, *а*, *б*).

Зразки основного металу, вирізані в поперечному напрямку відносно прокату, після витримки в амілі мають такі властивості: межа плинності – 352…357 МПа, межа міцності – 465…467 МПа, тобто обидва показника незначно знизились порівняно із показниками для зразків у вихідному стані. Після випробувань в парах амілу межа плинності знизилась незначно (до 353…370 МПа), межа міцності не змінилась і становила 466…468 МПа.

У зразках, зварених поперек напрямку прокату, після дії амілу показник межі плинності становив 226…251 МПа (рис. 5, *в*), що мало відрізнялося від межі плинності зварних з'єднань, зварених вздовж прокату, але було нижче, ніж у основного металу. Аналогічна закономірність спостерігалась і для межі міцності цих зварних з'єднань – 301…313 МПа (рис. 5, *г*).

Експонування зразків з'єднань, зварених у поперечному напрямку, в парах амілу сприяло зниженню межі плинності до 254…261 МПа, і майже не вплинуло на значення межі міцності, яка дорівнювала 298…305 МПа.

Коефіцієнт міцності зварних з'єднань після випробувань в амілі дещо збільшився порівняно із основним металом та становив 0,67 для зразків, зварених вздовж прокату, та 0,66 для поперечних зразків.

Для зразків, зварених у поздовжньому напрямку, після впливу парів амілу відмічене зниження відносного видовження від 0,7 до 0,5 %, для поперечних зразків цей показник не змінився та становив 0,8 %. Коефіцієнт міцності зварних з'єднань як для поздовжніх зразків, так і для поперечних зразків після дії парів амілу був однаковий та становив 0,64.

Руйнування всіх досліджених зразків зварних з'єднань сплаву 2219 відбувалось вздовж лінії сплавлення шва з основним металом (рис. 6), де під час термічного циклу зварювання оплавляються границі зерен та відбувається розпад пересиченого твердого розчину міді в алюмінії. Такі структурні зміни супроводжуються виділенням і коагуляцією фаз, що зміцнюють, що спричиняє потовщення границь зерен.

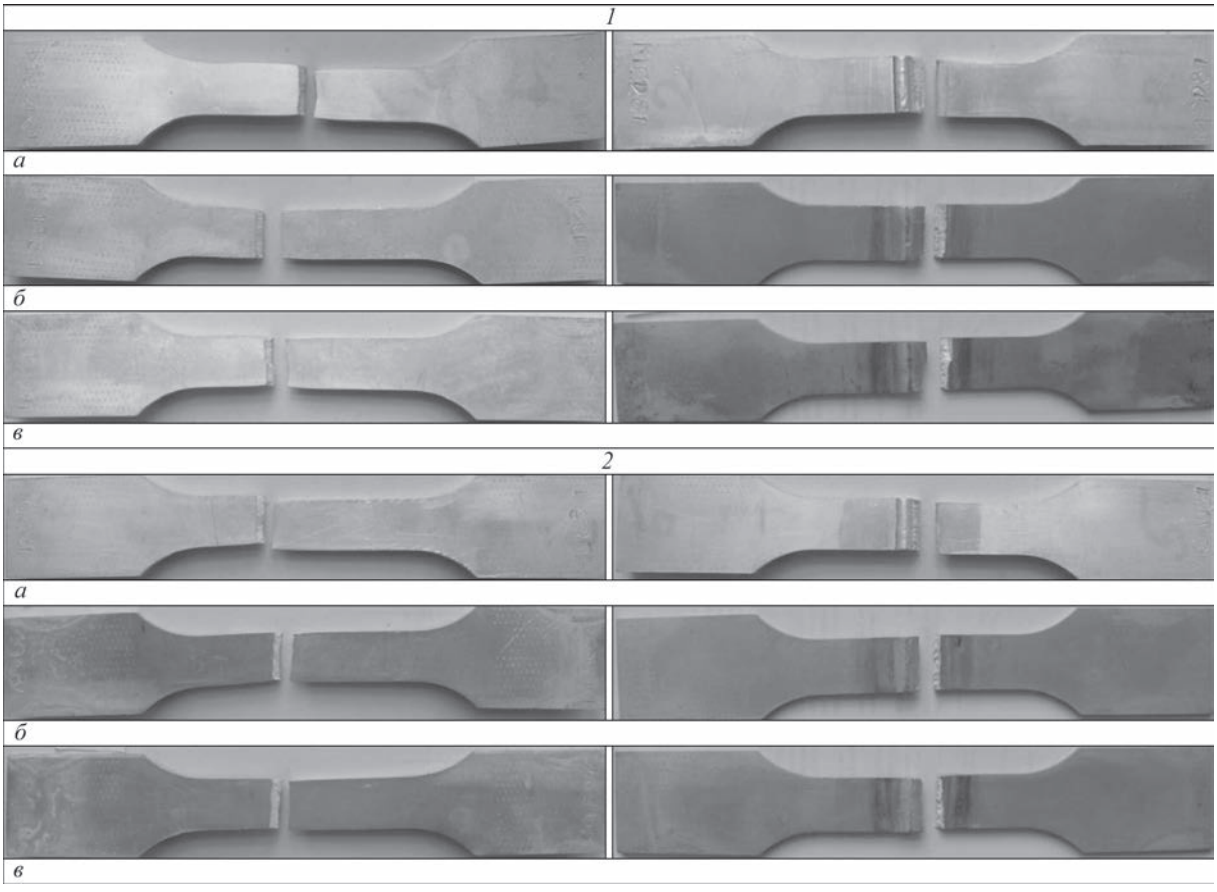


Рис. 6. Зовнішній вигляд зразків основного металу та зварного з'єднання сплаву 2219 у стані Т81 вздовж (*1*) та поперек (*2*) прокату до корозійних випробувань (*а*), після корозійних випробувань в амілі (*б*) та його парах (*в*)

Як свідчить аналіз поверхні зламів зруйнованих зразків зварних з'єднань сплаву, незалежно від напрямку прокату напівфабрикатів, їх рельєфи мають переважно навскісний характер з в'язкою чарунковою структурою, утворення якої супроводжується суттєвими пластичними деформаціями матеріалу зразків. Осередком виникнення мікротріщини є включення інтерметалідних фаз, що залишаються в металі в процесі виготовлення напівфабрикатів та не розчиняються в умовах дугового зварювання.

**Висновки**

1. Зварні з'єднання алюмінієвого сплаву 2219, виконані однопрохідним зварюванням неплавким електродом вздовж (Д) та поперек (П) прокату, термооброблені до стану Т81, є стійкими проти корозійного розтріскування та міжкристалітної корозії. Тривкість проти розшаровуючої корозії в амілі та його парах оцінена балом 2. За десятибальною шкалою згідно з ГОСТ 9.502 корозійну стійкість основного металу алюмінієвого сплаву 2219, у стані Т81 в амілі оцінено балом 2, що відповідає групі стійкості «підвищено стійкий»; в парах амілу – балом 4, що відповідає групам стійкості «стійкий».

2. На стійкість зварних з'єднань сплаву 2219 проти загальної та локальної корозії в амілі та його парах не впливає напрямок виконання процесу зварювання напівфабрикатів відносно прокату та термічні умови зварювання.

3. Після витримування в амілі та парах амілу показники пластичності та міцності зразків зварних з'єднань підвищуються, порівняно з аналогічними показниками до корозійних випробувань. Коефіцієнт міцності зварних з'єднань в поздовжньому напрямку після витримування в амілі дорівнює 0,67, у поперечному – 0,66, а після дії парів амілу для з'єднань, зварених у поздовжному та поперечному напрямках, однакові та становлять 0,64. Всі дослідні зразки зварних з'єднань сплаву руйнуються вздовж лінії сплавлення шва з основним металом, де під час термічного циклу зварювання відбувається розпад пересиченого твердого розчину міді в алюмінії та оплавлення границь зерен і коагуляцією фаз, що зміцнюють. Це супроводжується потовщенням границь зерен в результаті виділення фаз при кристалізації. Незалежно від напрямку виконання зварювання відносно прокату металу його злами дослідних зразків при руйнуванні мають в'язкий характер рельєфу.

*Робота виконана за підтримки ДП «КБ Південне» (номер держреєстрації 0118U006291c) у 2018 р.*

**Список літератури/References**


1. Rao, P.S., Sivadasan, K.G., Balasubramanian, P.K. (1996) Structure-property correlation on AA 2219 aluminium alloy weldments. *Bulletin of Materials Science*, 19 (**3**), 549–557.
2. Li, H., Zou, J., Yao, J., Peng, H. (2017) The effect of TIG welding techniques on microstructure, properties and porosity of the welded joint of 2219 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 727, 531–539.
3. Zhang, D., Wang, G., Wu, A. et al. (2019) Study on the inconsistency in mechanical properties of 2219 aluminium alloy TIG-welded joints. J*ournal of Alloys and Compounds*, 777, 1044–1053.
4. Grilli, R., Baker, M.A., Castle, J.E. et al. (2010) Localized corrosion of a 2219 aluminium alloy exposed to a 3.5% NaCl solution. *Corrosion Science*, 52 (**9**), 2855–2866.
5. Zhang, D., Wu, A., Zhao, Y. et al. (2021). Effects of the Number of Welding Passes on Microstructure and Properties of 2219-C10S Aluminum Alloy TIG-Welded Joints. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **5**, 3537–3546.
6. Wan, Z., Meng, D., Zhao, Y. et al. (2021) Improvement on the tensile properties of 2219-T8 aluminum alloy TIG welding joint with weld geometry optimization. *Journal of Manufacturing Processes*, 67, 275–285.
7. Niu, L.Q., Li, X.Y., Zhang, L. et al. (2017) Correlation between microstructure and mechanical properties of 2219-T8 aluminum alloy joints by VPTIG welding. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 30 (**5**) 438–446.
8. Zhang, D.K., Wang, G.Q., Wu, A.P. et al. (2019) Effects of Post-weld Heat Treatment on Microstructure, Mechanical Properties and the Role of Weld Reinforcement in 2219 Aluminum Alloy TIG-Welded Joints. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 32 (**6**), 684–694.
9. Gupta, R.K., Panda, R., Mukhopadhyay, A.K. et al. (2015) Study of aluminum alloy AA2219 after heat treatment. *Metal Science and Heat Treatment*, 57 (**5**), 350–353.
10. Lu, Y., Wang, J., Li, X. et al. (2018) Effects of pre-deformation on the microstructures and corrosion behavior of 2219 aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*, **723**, 204–211.
11. Chen, S., Li, F., Liu, Q. et al. (2020) Effect of Post-aging Heat Treatment on Strength and Local Corrosion Behavior of Ultrafine-Grained 2219 Al Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29 (**5**), 3420–3431.
12. Zhang, D., Li, Q., Zhao, Y. et al. (2018) Microstructure and mechanical properties of three-layer TIG-welded 2219 aluminum alloys with dissimilar heat treatments. *Ibid*, 27 (**6**), 2938–2948.
13. Zhu, Z.Y., Deng, C.Y., Wang, Y. et al. (2015) Effect of post weld heat treatment on the microstructure and corrosion behavior of AA2219 aluminum alloy joints welded by variable polarity tungsten inert gas welding. *Materials & Design (1980–2015)*, 65, 1075–1082.
14. Peng, X.N., Qu, W.Q., Zhang, G.H. (2009) Influence of Welding Processes on Mechanical Properties of Aluminum Alloy 2219 [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, **2**, 57–60
15. Bai, J.Y., Yang, C.L., Lin, S.B. et al. (2016) Mechanical properties of 2219-Al components produced by additive manufacturing with TIG. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86 (**1**), 479–485.
16. Rao, S.K., Reddy, G.M., Rao, K.S. et al. (2005) Reasons for superior mechanical and corrosion properties of 2219 aluminum alloy electron beam welds. *Materials characterization*, 55 (**4-5**), 345–354.
17. AMS-QQ-A-250/30A. *Технічні вимоги. Алюмінієвий сплав 2219. Лист і пластина.*
    AMS-QQ-A-250/30A. *Specifications. Aluminium alloy 2219. Sheet and plate* [in Ukrainian].
18. ГОСТ 7512-82 *Контроль неруйнуючий. З`єднання зварні. Радіографічний метод.*
    GOST 7512-82: *Nondestructive testing. Welded joints. Radiography method* [in Ukrainian].
19. ГОСТ 9.908-85 *Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости.*
    GOST 9.908-85: *Unified system of corrosion and ageing protection. Metals and alloys. Methods for determination of corrosion and corrosion resistance indices* [in Russian].

20. ГОСТ 9.904-82 *Единая система защиты от коррозии и старения. Сплавы алюминиевые. Метод ускоренных испытаний на расслаивающую коррозию.*
*GOST 9.904-82: Unified system of corrosion and ageing protection. Aluminium alloys. Accelerated test method for exfoliating corrosion* [in Russian].
21. ГОСТ 9.021-74 *Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию.*
GOST 9.021-74: *Unified system of corrosion and ageing protection. Aluminium and aluminium alloys. Accelerated test method for intercrystalline corrosion* [in Russian].
22. ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88) *Металлы. Методы испытаний на растяжение.*
*GOST* 1497-84 (ISO 6892-84, СТ СМЕА 471-88) *Metals. Methods of tension test* [in Russian].
23. ГОСТ 9.502-82 (СТ СЭВ 6194-88) *Единая система защиты от коррозии и старения. Ингибиторы коррозии металлов для водных систем. Методы коррозионных испытаний (с изменениями № 1, 2).*
GOST 9.502-82 *(СТ СМЕА 6194-88) Unified system of corrosion and ageing protection. Inhibitors of metals corrosion for aqueous systems. Methods of corrosion tests (with modifications Nos 1, 2)* [in Russian].

# CORROSION-MECHANICAL RESISTANCE OF 2219 ALLOY WELDED JOINTS, UNDER SIMULATED SERVICE CONITIONS*

L.I. Nyrkova[1], T.M. Labur[1], Ye.I. Shevtsov[2], O.P. Nazarenko[2], A.V. Dorofeev[2]

[1]E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kyiv.ua
[2]SC «DB Pivdenne». 3 Kryvorizhska Str., 49008, Dnipro

We studied the corrosion resistance, including local corrosion resistance, of welded joints of aluminium alloy 2219, made by nonconsumable electrode single-pass welding along (L) and across (Acr) the rolling stock heat-treated to T81 condition. It is shown that resistance of welded joints of 2219 alloy to general and local corrosion in amyl and its vapours does not depend on the direction of billet rolling in welding. An increase of ductility and strength of welded joint samples was found after soaking them in amyl and amyl vapours. The coefficient of welded joint strength after soaking in amyl rises from 0.65 up to 0.67 in the longitudinal direction, and from 0.64 to 0.66 in the transverse direction. After soaking in amyl vapours, the strength properties of the welded joint almost do not change: strength coefficient was the same in both the orientation directions and it was equal to 0.64. Fracture ran along the line of fusion of the weld with the base metal, where melting of grain boundaries and their thickening take place during the thermal cycle of welding at solidification, as well as decomposition of copper solid solution in aluminium, which is accompanied by precipitation and coagulation of the strengthening phases. 23 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

*Keywords: 2219 aluminium alloy, welded joints, heat treatment, corrosion resistance, mechanical properties, microstructure, mechanical fracture at tension*

Надійшла до редакції 27.08.2021