

<https://doi.org/10.15407/knit2022.02.014>  
УДК 621.791.754.6.3:620.193.28

**Л. І. НИРКОВА**<sup>1</sup>, зав. відділу, д-р техн. наук  
ORCID <http://orcid.org/0000-0003-3917-9063>  
E-mail: lnyrkova@gmail.com, Nyrkova@paton.kiev.ua

**Т. М. ЛАБУР**<sup>1</sup>, голов. наук. співроб., старш. наук. співроб., д-р. техн. наук  
ORCID <http://orcid.org/0000-0002-4064-2644>  
E-mail: labur@paton.kiev.ua

**Є. І. ШЕВЦОВ**<sup>2</sup>, заст. Генерального конструктора — Головний конструктор  
E-mail: info@yuzhnoye.com

**О. П. НАЗАРЕНКО**<sup>2</sup>, нач. відділу

**А. В. ДОРОФЄЄВ**<sup>2</sup>, нач. групи

**С. О. ОСАДЧУК**<sup>1</sup>, наук. співроб., канд. техн. наук  
ORCID <http://orcid.org/0000-0001-9559-0151>

E-mail: svetlanaosadchuk@meta.ua

**М. Р. ЯВОРСЬКА**<sup>1</sup>, провід. інж.  
ORCID <http://orcid.org/0000-0003-2016-6289>

**А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ**<sup>1</sup>, старш. наук. співроб., канд. техн. наук  
ORCID <http://orcid.org/0000-0002-4101-2206>

E-mail: pokliatskyi@paton.kiev.ua

**В. Є. ФЕДОРЧУК**<sup>1</sup>, старш. наук. співроб., канд. техн. наук  
ORCID <http://orcid.org/0000-0002-9929-3231>

E-mail: fedorchuk@paton.kiev.ua

<sup>1</sup>Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України  
вул. К. Малевича 11, Київ, Україна, 03150

<sup>2</sup>Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»  
вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49008

## КОМПЛЕКС ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ СПЛАВУ 2219 У СТАНІ Т62 В УМОВАХ, ЩО МОДЕЛЮЮТЬ УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*Досліджено комплекс властивостей зварного з'єднання сплаву 2219, виконаного однопрохідним зварюванням неплавким електродом вздовж та поперек прокату, термообробленого до стану Т62 в рідкому амелі та його парах при температурі 50°C протягом 45 діб. Показники пластичності та міцності зразків зварних з'єднань сплаву 2219 у поздовжньому напрямку становлять: межа плинності зварного з'єднання — 301...317 МПа, основного металу — 295...297 МПа, межа міцності зварного з'єднання — 409...415 МПа, основного металу — 422...425 МПа, відносне видовження становить 4.0...5.8 % та 17.6...19.1 % відповідно; у поперечному напрямку: межа плинності зварного з'єднання — 309...331 МПа, основного металу — 304...307 МПа, межа міцності зварного з'єднання — 392...414 МПа, основного металу — 428...433 МПа, відносне видовження — 2.1...3.3 % та 12.6...15.0 % відповідно. Коефіцієнт міцності зварних з'єднань у поздовжньому напрямку дорівнює 0.96, у поперечному — 0.94. Зварні з'єднання в цьому середовищі є стійкими проти корозійного розтріскування*

Цитування: Ниркова Л., Лабури Т., Шевцов Є., Назаренко О., Дорофєєв А., Осадчук С., Яворська М., Покляцкий А., Федорчук В. Комплекс властивостей зварного з'єднання сплаву 2219 у стані Т62 в умовах, що моделюють умови експлуатації. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 2 (135). С. 14—29. <https://doi.org/10.15407/knit2022.02.014>

та міжкристалітної корозії, тривкість проти розшарувальної корозії оцінена балом 2. Сплав 2219 у стані T62 в амелі оцінено як «стійкий», в парах амелу — як «підвищено стійкий». Після витримування в амелі та парах амелу показники міцності зразків основного металу та зварних з'єднань в обох напрямках майже не змінюються, показники пластичності змінюються немономонно: межа плинності основного металу збільшується на 5...6 %, зварних з'єднань — зменшується на 6...7 %, відносне видовження основного металу зменшується на 5...16 %, зварних з'єднань — приблизно на 20 %. Незалежно від напрямку виконання зварювання відносно прокату металу злами переважно мають в'язкий характер руйнування. Після витримування в амелі коефіцієнт міцності зварних з'єднань у поздовжньому та поперечному напрямках однакові та дорівнюють 0,91, після витримування в парах амелу — 0,95 у поздовжньому напрямку і 0,96 поперечному.

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

## 1. ВСТУП

Алюмінієвий сплав 2219 є найбільш використуваним матеріалом для виготовлення паливних баків, має унікальну комбінацію властивостей: зварюваність, високу міцність при достатньо низькій вазі та криогенну стійкість. Сплав AA 2219 успішно застосовується в різних системах ракет-носіїв («Сатурн-5», «Аполлон», «Спейс Шаттл» тощо) [18].

Під час аргонодугового зварювання сплаву 2219 неплавким електродом часто спостерігається утворення пор у металі шва. Для запобігання цього в роботі [14] запропоновано технологію зварювання з використанням спеціальних активізаційних агентів ( $\text{AlF}_3$ ,  $\text{LiF}$ ,  $\text{KF-AlF}_3$ ,  $\text{K}_2\text{SiF}_6$ ) при умові використання на негативному електроді постійного струму, що сприяє усуненню зварювальної пористості завдяки суттєвому зменшенню впливу термічного циклу зварювання на основний метал та зону термічного впливу.

Вважається [22], що міцність і пластичність зварних з'єднань з алюмінієвого сплаву 2219, отриманих аргонодуговим зварюванням неплавким електродом, є суперечливими через ряд геометричних і металургійних чинників. Зміна ширини лицьового зварного шва, глибини проплавлення зварного шва та інших геометричних параметрів може по-різному впливати на механічні властивості з'єднань.

В роботі [23] показано, що оптимальні властивості з'єднання сплаву 2219-C10S під час розтягу можна отримати застосуваннями двопрхідного зварювання. Для покращення пластичних властивостей зварних з'єднань сплаву 2219-T8 при виробництві великих паливних баків у роботі [21] застосовувався новий технологічний при-

йом зварювання — багатопрхідне зварювання з поворотом, що дало змогу отримати з'єднання з коефіцієнтом міцності на розрив 70 % та видовженням понад 4 %. Механізм вдосконалення геометрії зварного шва обумовлений пониженою швидкістю зміни деформації та концентрацією напружень по осі шва. Зазвичай посудини з алюмінію 2219, як правило, піддають термічному обробленню після зварювання [25]. Для термооброблення застосовують різні режими, зокрема T81 (старіння заготовок, термооброблених до стану T4, при 177 °C протягом 18 год) і T87 (старіння заготовок, термооброблених з наступною деформацією 8 % до стану T37, при 163 °C протягом 24 год).

Термооброблення після зварювання зварних з'єднань сплаву 2219 у стані T62 (старіння протягом 36 год при 190 °C) підвищує як міцність, так і пластичність [18].

Найслабшою зоною стикових зварних з'єднань є зона термічного впливу. У стиковому зварному з'єднанні сплаву 2219-T87, отриманому аргонодуговим зварюванням неплавким електродом у два проходи [16], значення мікротвердості в цих зонах становить 76 та 78 НВ відповідно та збільшується по мірі віддалення від лінії сплавлення, за винятком зони на відстані 4.5 мм від лінії сплавлення. Середній розмір зерен в обох зонах становить приблизно 74.4 та 79.2 мкм, в зоні термічного впливу — 41.5, 44.9 мкм, в основному металі — 43.4 мкм. Отже, збільшення розміру зерен, зменшення вмісту легуючих елементів, їхня сегрегація та виділення другої фази розглядаються як основні причини розміщення зварного з'єднання, тоді як випадіння вторинних фаз є основним чинником роз-

міцнення зони термічного впливу. Термічне оброблення після зварювання зменшує кількість і розмір евтектичної структури або  $\theta$ -фаз [24, 25] та призводить до того, що структура зварного шва стає схожою зі структурою інших зон, а з'єднання має оптимальні розтягувальні властивості (зразки руйнуються в зоні зварного шва).

Циклічне термічне оброблення зварних з'єднань сплаву 2219, виконаних дуговим зварюванням неплавким електродом в інертному газі струмом змінної полярності [13], сприяє утворенню в зоні термічного впливу, що прилягає до лінії сплавлення, зон з максимальною та мінімальною твердістю. Максимальна твердість збільшується з температурними циклами циклічного термічного оброблення за рахунок утворення зон Гіньє — Престона, тоді як мікротвердість в інших зонах залишається незмінною. Експериментальні результати показують, що циклічне термічне оброблення призводить до збільшення межі текучості, але зменшення пластичності зварного з'єднання.

Різна попередня деформація впливає на мікроструктуру та корозійну тривкість алюмінієвого сплаву 2219 [15]. У процесі старіння розмір зерен поступово зменшується, а розподіл фаз ефективно покращується, що призводить до підвищення міцності на розрив та корозійної стійкості. Наявність великої кількості дислокацій, індукованих процесами попередньої деформації, забезпечує умови для переважного осадження  $\theta'$ -фаз. Дрібнодисперсна і дисперсна  $\theta$ -фази для цього сплаву, підданого попередній деформації на 20 %, ускладнюють рух дислокацій, що підвищує міцність на розрив. Через нерівномірний розподіл  $\theta'$ -фази межа міцності при розтягуванні незначно зменшується, якщо попередня деформація досягає 30 %. Рівень корозійної стійкості різних попередніх деформацій після процесу старіння від найвищого до найнижчого становить: 20 % > 30 % > 10 % > 5 %, що пов'язано зі зміною розподілу  $\theta'$ -фаз та ширини зони без таких фаз. Механічні властивості та локальна корозійна тривкість крупнозернистих та ультрадисперсних сплавів 2219, термостабілізованих після старіння, відрізняються [12]. Твердість і міцність ультрадисперсного сплаву значно вищі,

а сприйнятливість до міжкристалітної корозії — нижча порівняно з крупнозернистим сплавом. Однак стійкість проти розшарувальної корозії та електрохімічної корозії ультрадисперсного сплаву нижче, ніж крупнозернистого. Крім того, ультрадисперсний сплав менш чутливий до локальної корозії залежно від умов старіння порівняно з крупнозернистим сплавом. Відмінності механічних властивостей та схильності до локальної корозії цих сплавів залежно від термічного оброблення після старіння в основному зумовлені складною взаємодією зерен різних розмірів, дислокації та випадіння фаз старіння.

З'єднання алюмінієвого сплаву 2219, отримане аргонодуговим зварюванням неплавким електродом в інертному газі на струмі змінної полярності, піддавали термообробленню при 535 °C протягом 30 хв, загартуванню у воді та штучному старінню при 175 °C протягом 12 год [26]. Виявилось, що завдяки термообробленню вдалося досягти формування більш однорідної мікроструктури, збільшення міцності на розрив на 44 %, при цьому коефіцієнт міцності з'єднання становив 76 %. Корозійна стійкість з'єднання після термооброблення була вищою, ніж у стані після зварювання. Зона термічного впливу залишилася найбільш нестійкою до корозії, її сприйнятливість до корозії пояснювалась розчиненням та сегрегацією фази  $Al_2Cu$  вздовж границь зерен.

Проаналізовано вплив різних параметрів зварювання на механічні властивості та поведінку при розтягуванні аргонодугових зварних з'єднань [20]. Було обрано чотири різні кути розділки крайок: 60°, 70°, 80° та 90°, щоб з'ясувати тенденцію формування мікроструктури та її вплив на якість зварного шва. Механічні властивості оцінювали за показником твердості за Віккерсом  $HV_1$ . Мікроаналіз досліджуваних зразків, отриманих з використанням різних струмів 165, 180, 200 А з однаковим кутом розділки крайок 90°, проводили у зоні сплавлення, зоні переходу та ЗТВ; всі зображення продемонстрували добре проплавлення та чіткий перехід від попередньої до наступної зони. Випробовування розтягом зварних з'єднань поперек прокату проводили для оцінки впливу параметрів зварю-

вання та геометрії розділки крайок на міцність з'єднання та його поведінку під час експлуатації. Міцність зварних швів на розрив пов'язана з параметрами зварювання. Обраний зварювальний струм 180 А забезпечив найвищу міцність на розрив досліджуваних зразків; так само, як правильний вибір кута розділки кромки (90°) забезпечує задовільне проплавлення і високу якість основних зварних швів. Результати показали, що формування зварного шва залежить від зварювального струму.

Використання адитивної технології зварювання неплавким вольфрамовим електродом в інертному газі тонколистового сплаву 2219 [11] показало, що середня твердість становить 77.5 HV<sub>0,2</sub>, а матеріали нечутливі до нагрівання під час зварювання. Жодної суттєвої різниці твердості не встановлено між наплавленими та внутрішніми шарами. Випробування на розтяг проводили на зразках вздовж зварного шва та напрямку прокату. Середня межа міцності дорівнює 237 МПа, що становить 57 % від значення межі міцності сплаву у стані постачання 2219-Т6. Аналіз показує, що низьке значення міцності на розрив можна пояснити відсутністю ефекту зміцнення фаз під час зварювання. Матеріал має ізотропні властивості при розтягуванні. Фрактографічні дослідження показали, що  $\theta$ -фази є ініціаторами тріщин. Ефект зменшення площин навантаження через смугоподібну розподілену пористість є незначним у напрямку зварювання. Однак у напрямку прокату це впливає на шлях поширення тріщини. Зварні з'єднання, отримані електронно-променевим зварюванням алюмінієвого сплаву 2219, забезпечують набагато більшу міцність та вищу корозійну тривкість, ніж з'єднання, отримані неплавким електродом [19]. Це зумовлено, крім тонкої рівномірної зеренної структури, наявніс-

тю частково розкладених фаз у металі шва, більш дрібною мікропористістю та рівномірним розподілом міді у матриці. Зварні шви, виконані зварюванням тертям, мають кращі показники, ніж аргонодугові шви, виконані аргонодуговим зварюванням неплавким електродом струмом змінної полярності, хоча зварювальні процеси сприяли зниженню механічних властивостей зварних з'єднань порівняно з основним металом сплаву 2219 [17]. Згідно з фрактографічним та мікροструктурним аналізом, в зоні термічного впливу, що містила рафіновану та рівновісну структуру, відбувалась динамічна перекристалізація, та зразки під час розтягу розірвались по зоні перегріву. Застосування змінної полярності при зварюванні може призвести до утворення дефектів, таких як висока концентрація газових пор, і зона сплавлення стає слабшою.

Мета роботи — дослідити комплекс властивостей зварних з'єднань, виконаних ручним аргонодуговим зварюванням вздовж та поперек напрямку прокату, та термооброблених до стану Т62, від яких залежить працездатність зварного виробу в умовах експлуатації.

## 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТІВ

В роботі досліджено алюмінієвий сплав системи легування Al-Cu 2219-Т31 товщиною 3 мм. Аналіз хімічного складу проводили спектральним методом на спектрометрі «Спектровка-1000» фірми «Baird». Отримані результати порівнювали з хімічним складом сплаву, наведеним в AMS-QQ-A-250/30A [1], в табл. 1.

Перед зварюванням зразки обробляли у 10 % розчині NaOH та освітляли у 30 % розчині HNO<sub>3</sub>. Зварювання заготовок проводили в горизонтальному положенні неплавким вольфрамовим електродом з лантановим покриттям з

Таблиця 1. Хімічний склад зразка сплаву 2219-Т31 товщиною 3 мм

Сплав	Масова частка елементів, %									
	Cu	Mn	Zr	V	Ti	Fe	Si	Zn	Mg	Інші: 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

використанням присадного дроту марки Св 2319 діаметром 1.6 мм ( $I_{зв} = 280$  А,  $V_{зв} = 20$  м/год, швидкість подачі присадного дроту 117 м/год). Джерело живлення MW-450 фірми «Fronius». Використовувався 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 швів з технологічним посиленням.

Якість формування швів стикових з'єднань сплаву 2219-T31 оцінювали візуально та методом рентгенографії (ГОСТ 7512 [2]) на рентгенівській 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.

Зі зварних заготовок виготовляли зразки для механічних та корозійних випробувань згідно з відповідними нормативними документами. Зразки термооброблювали до стану Т62 (повний цикл термічного оброблення) — гартування за режимом  $T = 535 \pm 5$  °С,  $\tau = 50$  хв (охолодження у воді) з подальшим штучним старінням за режимом  $T = 190 \pm 5$  °С,  $\tau = 36$  год.

Корозійні випробування проводили в амлі та парах амлі при температурі 50 °С безперервно протягом 45 діб на базі випробувальної лабораторії КБ «Південне», після чого оцінювали корозійну тривкість (швидкість суцільної корозії, стійкість проти міжкристалітної корозії (МКК), розшарувальної корозії та корозійного розтріскування) та механічні властивості.

Оцінювання стійкості зразків основного металу проти суцільної корозії проводили методом масометрії за стандартною методикою. Швидкість втрати маси зразків визначали за зміною маси зразка та тривалості досліджень за формулою

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

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<sup>2</sup>;  $T$  — тривалість досліджень, год.

Швидкість корозії обчислювали за формулою

$$\Pi = \frac{8760 \cdot K}{d}, \quad (2)$$

де  $K$  — швидкість корозії, г · м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup>;  $d$  — щільність металу, г/см<sup>3</sup>; 8760 — кількість годин у році.

При обчисленнях враховувалось значення щільності алюмінієвих сплавів 2.7 г/см<sup>3</sup>.

Оцінювання стійкості проти розшарувальної корозії проводили згідно з ГОСТ 9.904 [3] на зразках основного металу та зварних з'єднань. Під час оцінювання відмічали зміну кольору, наявність виразок та відшарувань на робочих поверхнях зразків, тріщин на торцях. Прийняті такі умовні позначення. Літерою «А» позначено поверхню, на якій нанесено маркування, а для зварних з'єднань — поверхню 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 проти міжкристалітної корозії проводили металографічним методом при збільшенні 100<sup>×</sup> згідно з ГОСТ 9.021 [4]. Випробування проводили на зразках зварних з'єднань, оцінювали всі зони зварного з'єднання — основний метал, зону термічного впливу та зварний шов.

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<sup>2</sup>. Після випробувань зразки оглядали 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 [5] на машині Instron-1126 зі швидкістю переміщення траверси 6 мм/хв до руйнування. Для контролю показни-

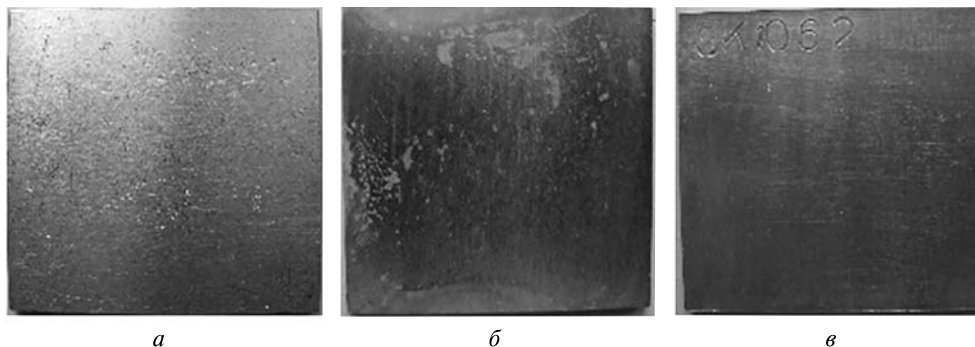


Рис. 1. Зовнішній вигляд поверхні основного металу алюмінієвого сплаву 2219, термооброблених до стану Т62, до (а) та після випробувань в амлі (б) та парах амлі (в)

ка 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 провадились на шліфах вирізаних із зразків зварних з'єднань, зварених вздовж (Д) і поперек (П) прокату листів. Мікроструктуру виявляли травленням у розчині поверхні зразка, потім електролітичним поліруванням в розчині: 1000 см<sup>3</sup> хлоридної кислоти + 75 см<sup>3</sup> крижаної оцтової кислоти.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХНЄ ОБГОВОРЕННЯ

**3.1. Геометричні параметри швів.** Геометричні параметри швів вимірювали після зварювання заготовок:  $B$  — ширина шва з лицевої поверхні з'єднань,  $H$  — ширина шва зі зворотної поверхні з'єднань (кореня шва),  $\delta$  — глибина проплавлення основного металу,  $b$  — висота опуклостей технологічного посилення,  $h$  — висота кореня шва. Розміри швів становлять: ширина швів у зварних з'єднаннях, зварених вздовж прокату, становить від 9.56 до 9.72 мм, 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, дорівнює 2.13 та 2.03 відповідно.

**3.2. Дослідження стійкості проти загальної та локальної корозії.** Після випробувань в амлі спостерігалось нерівномірне потемніння поверхні зразків (див. рис. 1 та табл. 2), та утворення корозійних плям різних розмірів, які вкривали площу від 10 до 20 %. Після контакту з парами амлі потемніння поверхні також було нерівномірним, ступінь ураження поверхні корозією становив від 10 до 30 %. Плями характеризуються зміною кольору поверхневого шару (потемнінням) і малою глибиною ураження.

Після видалення продуктів корозії поверхні залишилися блискучими, без видимих локальних уражень. За результатами візуального огляду після випробувань в амлі (рідкому та парах) корозію алюмінієвого сплаву 2219 ідентифіковано згідно з ГОСТ 9.908 як суцільну нерівномірну, вид уражень — корозійні плями.

Швидкісні показники суцільної корозії зразків основного металу алюмінієвого сплаву 2219 у стані Т62, визначені згідно з ГОСТ 9.908, становлять: швидкість втрати маси в амлі — 0.00130 г/(м<sup>2</sup>·год), в парах амлі — 0.00289 г/(м<sup>2</sup>·год); лінійна швидкість корозії в амлі — 0.00429 мм/рік, в парах амлі — 0.0095 мм/рік.

За десятибальною шкалою корозійної стійкості згідно з ГОСТ 9.502 [6] стійкість алюмінієвого сплаву 2219, термообробленого до стану Т62 в амлі, оцінена балом 2, в парах амлі — балом 3, що відповідає групі стійкості «стійкий» та «підвищено стійкий» відповідно.

Стійкість основного металу сплаву 2219 проти розшарувальної корозії після випробувань в

Таблиця 2. Результати оцінювання стійкості проти розшарувальної корозії зразків основного металу сплаву 2219 та зварних з'єднань вздовж (Д) та поперек (П) прокату, термооброблених до стану Т62, після випробувань в амелі та його парах

Маркування	На-прямок прокату	Умови випробувань	Назва показника										
			Характер зміни зовнішнього виду зразків		Найбільший діаметр відшарування, мм		Площа відшарування 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	амел пари амелу	Легке потемніння	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
			Зміна кольору плямами, Легке потемніння, плями з кольорами мінливості	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
			Без змін	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Зварне з'єднання	Д	амел пари амелу	Легке потемніння, плями з кольорами мінливості	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
			Легке потемніння	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
			Без змін	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Основний метал	П	амел пари амелу	Легке потемніння, плями з кольорами мінливості	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
			Легке потемніння, плями з кольорами мінливості	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
			Без змін	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
РСК.11.81	П	амел пари амелу	Легке потемніння	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
РСК.13.81			Легке потемніння	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
РСК.15.81			Без змін	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

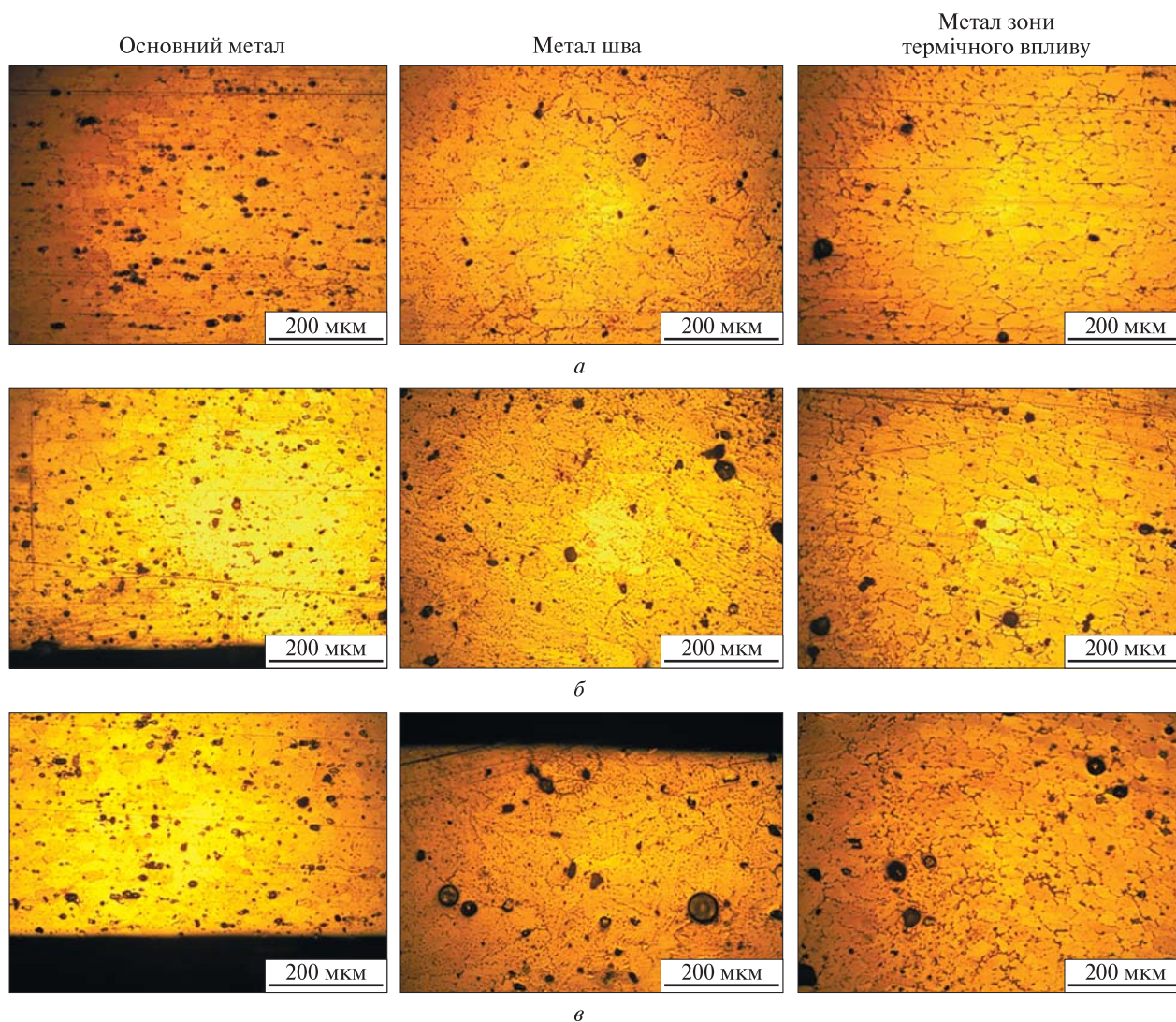
амелі та його парах та зварних з'єднань вздовж та поперек прокату, термооброблених до стану Т62, відповідає балу 2 згідно з ГОСТ 9.904.

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

Після корозійних випробувань в амелі та парах амелу міжкристалітного розтріскування по границях зерен зварних з'єднань сплаву 2219 не виявлено, тобто ці з'єднання є стійкими проти МКК згідно з ГОСТ 9.021. Тому можна зробити висновок, що на стійкість проти МКК не впливає напрямок прокату та термічний цикл зварювання.

Зразки зварних з'єднань сплаву 2219 вздовж та поперек прокату у стані Т62 є стійкими і проти корозійного розтріскування в амелі та його парах, оскільки корозійних тріщин не виявлено.

**3.3. Дослідження мікроструктури.** Мікроструктура основного металу сплаву 2219-Т31 [2, 7–9] складається з багатого алюмінієм  $\alpha$ -фази (твердий розчин) і стабільної  $\theta(\text{CuAl}_2)$ -фази. До числа проміжних фаз відносяться  $\theta'(\text{CuAl}_2)$  і  $S'(\text{Al}_2\text{CuMg})$ . Основними легуючими елементами сплаву є мідь і марганець. Наявність в структурі сплаву фаз  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ ,  $T(\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu})$ ,  $\text{Al}_3\text{Zr}$   $\text{Al}_{11}\text{V}$  забезпечує належний рівень фізико-механічних властивостей як самого сплаву, так і його



**Рис. 2.** Мікроструктура зон зварного з'єднання алюмінієвого сплаву 2219, термооброблених до стану Т62, уздовж (Д) прокату до корозійних випробувань (а), після випробувань в амелі (б); після випробувань в парах амелу (в)

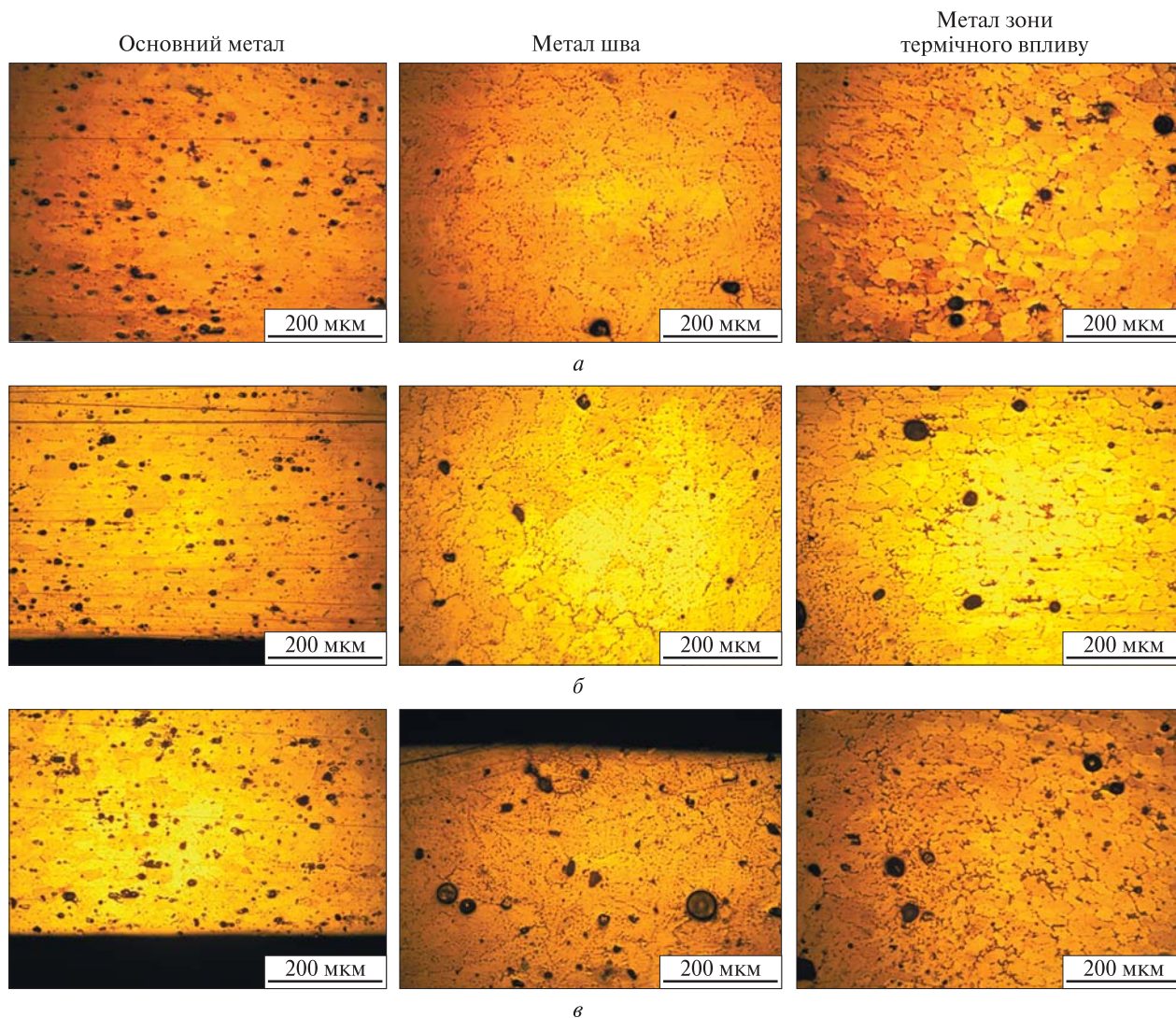
зварних з'єднань. Це зумовлено характерним особливим механізмом розпаду твердого розчину та морфологією розташування фазових виділень при нагріванні, а також співвідношенням їхньої об'ємної долі у структурі. Кількість фазових складових визначається сумою легуючих елементів для конкретного сплаву.

Металографічні дослідження структури основного металу сплаву 2219 у стані Т62 до корозійних випробувань (рис. 2, а) показали, що метал також має характерні ознаки розташування

структурних складових (зерен, фазових включень тощо), притаманних металу у стані Т81: зерна твердого розчину мають витягнуту вздовж напрямку прокату форму, а неметалеві включення розташовані рівномірно по перерізу листів.

Вимірювання геометричних розмірів зерен у структурі не виявило анізотропію основного металу, оскільки як у поздовжньому, так і в поперечному напрямку їхні розміри та характер розташування збігаються. У поздовжньому напрямку (рис. 2, а) розмір зерен в середньому становить 60





**Рис. 3.** Мікроструктура зон зварного з'єднання алюмінієвого сплаву 2219, термооброблених до стану Т62 поперек прокату до корозійних випробувань (а), після випробувань в амілі (б); після випробувань в парах амілу (в)

мкм вздовж прокату та 25 мкм перпендикулярно до товщини листів, у поперечному (рис. 3, а) — 60 і 30 мкм відповідно. Металографічні дослідження структури методом оптичної мікроскопії в темному полі дозволило встановити, що темні включення неправильної форми, розташовані рівномірно, є інтерметалідами. Частина включень має сферичну форму з максимальним розміром не більше 12 мкм. Виходячи з їхнього розміру можна припустити, що вони виділилися з твердого розчину при термічному обробленні зразків. Інші

включення овальної форми з максимальним розміром  $35 \times 12$  мкм є наслідком формування литої структури, тобто утворилися на етапі лиття злитків та набули витягнутої форми в процесі їхнього пластичного деформування при прокаті листа (рис. 2). Видимих методом оптичної мікроскопії змін мікроструктури та розміру зерен після корозійних випробувань в амілі (рис. 2, б) та парах амілу (рис. 2, в) не виявлено.

Після корозійних випробувань в амілі (рис. 2, 3, б) та парах амілу (рис. 2, 3, в) будь-яких змін

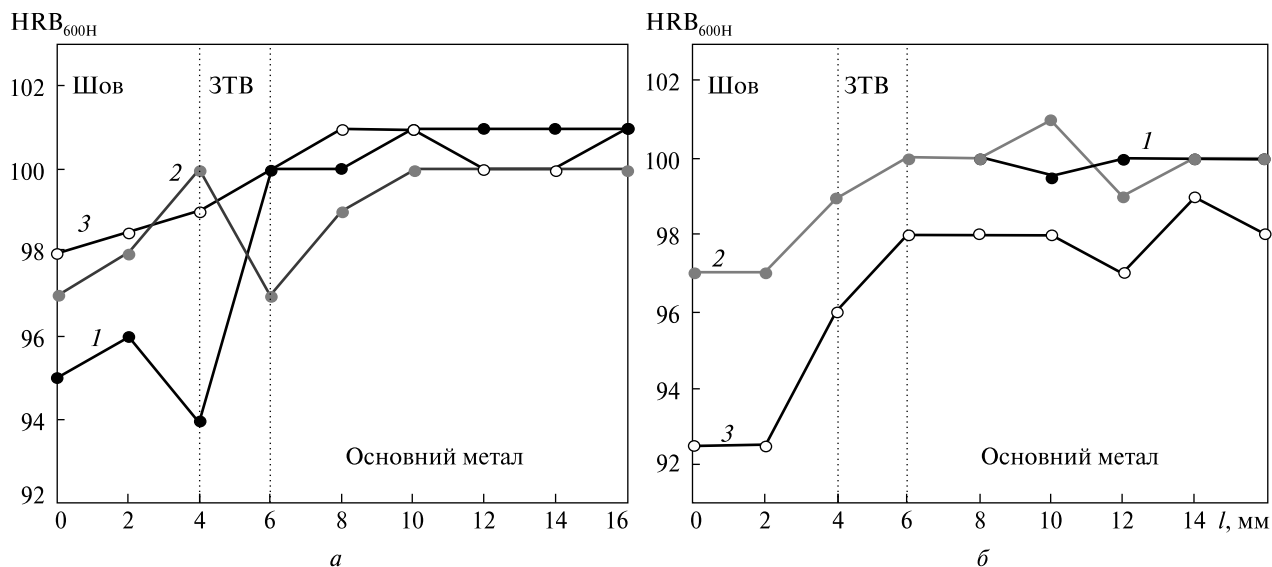


Рис. 4. Розподіл твердості по різних зонах зварного з'єднання сплаву 2219 у стані Т62 вздовж (а) та поперек (б) прокату до корозійних випробувань (1), після корозійних випробувань в амлі (2), після корозійних випробувань в парах амлі (3)

мікроструктури та розміру зерен в основному металі, металі шва та ЗТВ не спостерігається. Зміна мікротвердості також незначна рис. 4.

#### 3.4. Дослідження механічних властивостей.

Результати випробувань зразків основного металу сплаву 2219 у стані Т62 (рис. 5, а) показали, що межа плинності контрольних зразків, вирізаних вздовж напрямку прокату, становить від 295 до 297 МПа, межа міцності ( $\sigma_B$ ) — від 422 до 425 МПа (рис. 5, б). У зразках, вирізаних у поперечному напрямку, обидва показники вищі:  $\sigma_{0,2} = 304...307$  МПа,  $\sigma_B = 428...433$  МПа (рис. 5, в, г). Відносне подовження також відрізняється і дорівнює 18.4 % для зразків у поздовжньому напрямку та 13.8 % — у поперечному.

Після випробувань в амлі значення межі плинності основного металу сплаву 2219-Т62 поздовжніх зразків збільшується на 2...3 % та становить від 303 до 330 МПа, межа міцності майже не змінюється і дорівнює 421...424 МПа (рис. 5, а, б). Показники пластичності і міцності поперечних зразків дорівнюють 313...317 МПа та 425...429 МПа відповідно (рис. 5, в, г). Відмічено зниження відносного видовження поздовжніх зразків на 15 % (до 15.6 %), поперечних — на 9 % (до 12.5 %).

Витримування поздовжніх зразків основного металу сплаву 2219-Т62 у парах амлі майже не змінює показника  $\sigma_{0,2}$ , значення якого дорівнюють 286...300 МПа. Значення межі міцності при цьому становить 422...426 МПа (рис. 5, а, б). Тобто, під дією парів амлі спостерігається деяке зниження пластичності основного металу сплаву 2219 у стані Т62, на що також вказує зменшення відносного звуження до 15.5 % (майже на 15 %). Для зразків основного металу, вирізаних поперек прокату, спостерігали збільшення межі плинності 3 % до 307...337 МПа, межа міцності після випробувань за таких умов не змінилася і дорівнювала 428 МПа. На втрату пластичних властивостей вказує відносне видовження, яке збільшилось на 5 % (до 14.5 %).

Аналіз результатів випробувань поздовжніх зразків зварних з'єднань до корозійних випробувань показав, що їхня межа плинності становила 301...317 МПа, що дещо вище, ніж для основного металу — 295...297 МПа, (рис. 5, а), а межа міцності становила 409...415 МПа, тобто, навпаки, менше, ніж для основного металу — 422...425 МПа (рис. 5, б). Коефіцієнт міцності контрольних зразків зварних з'єднань дорівнює 0.96.

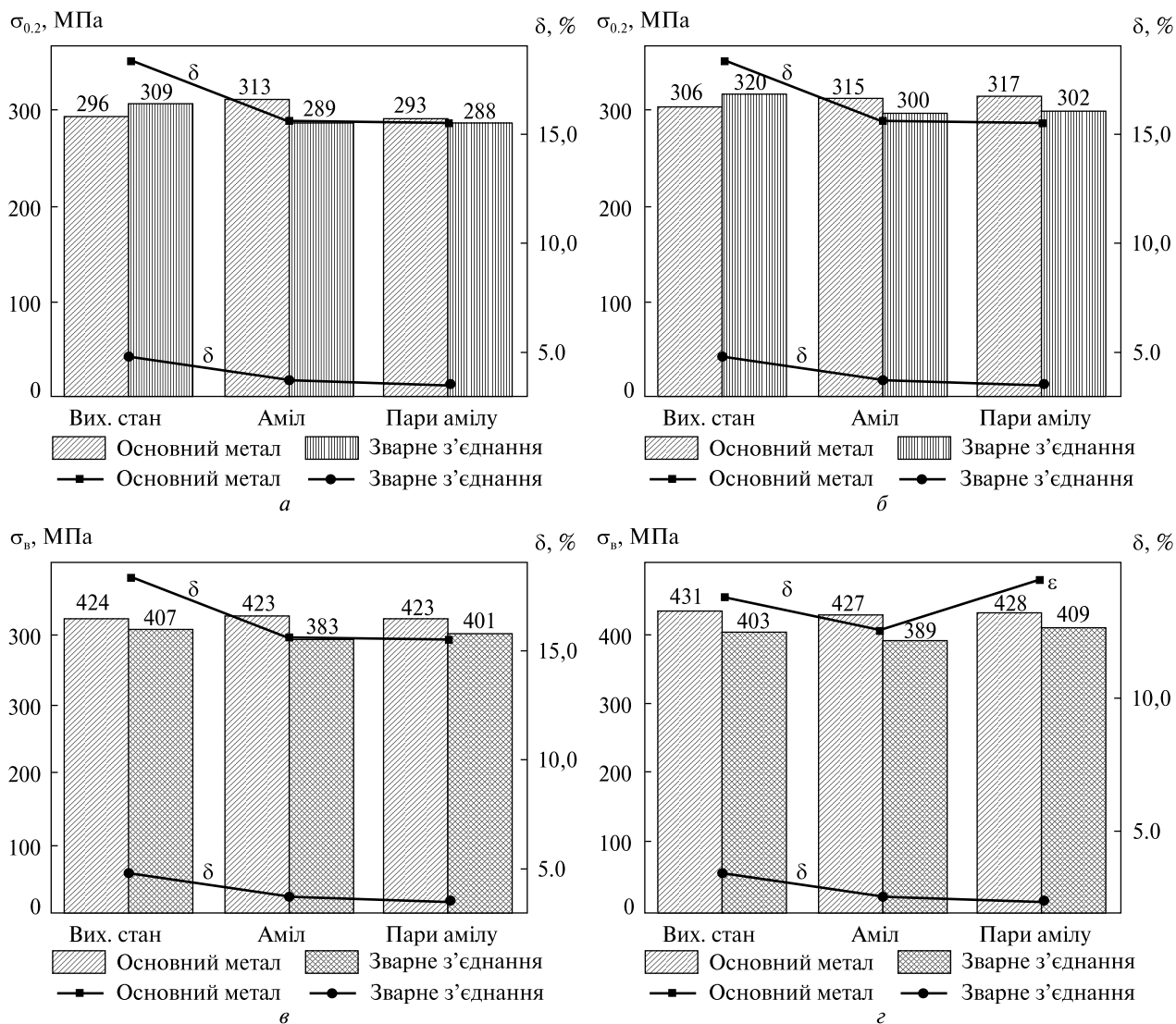
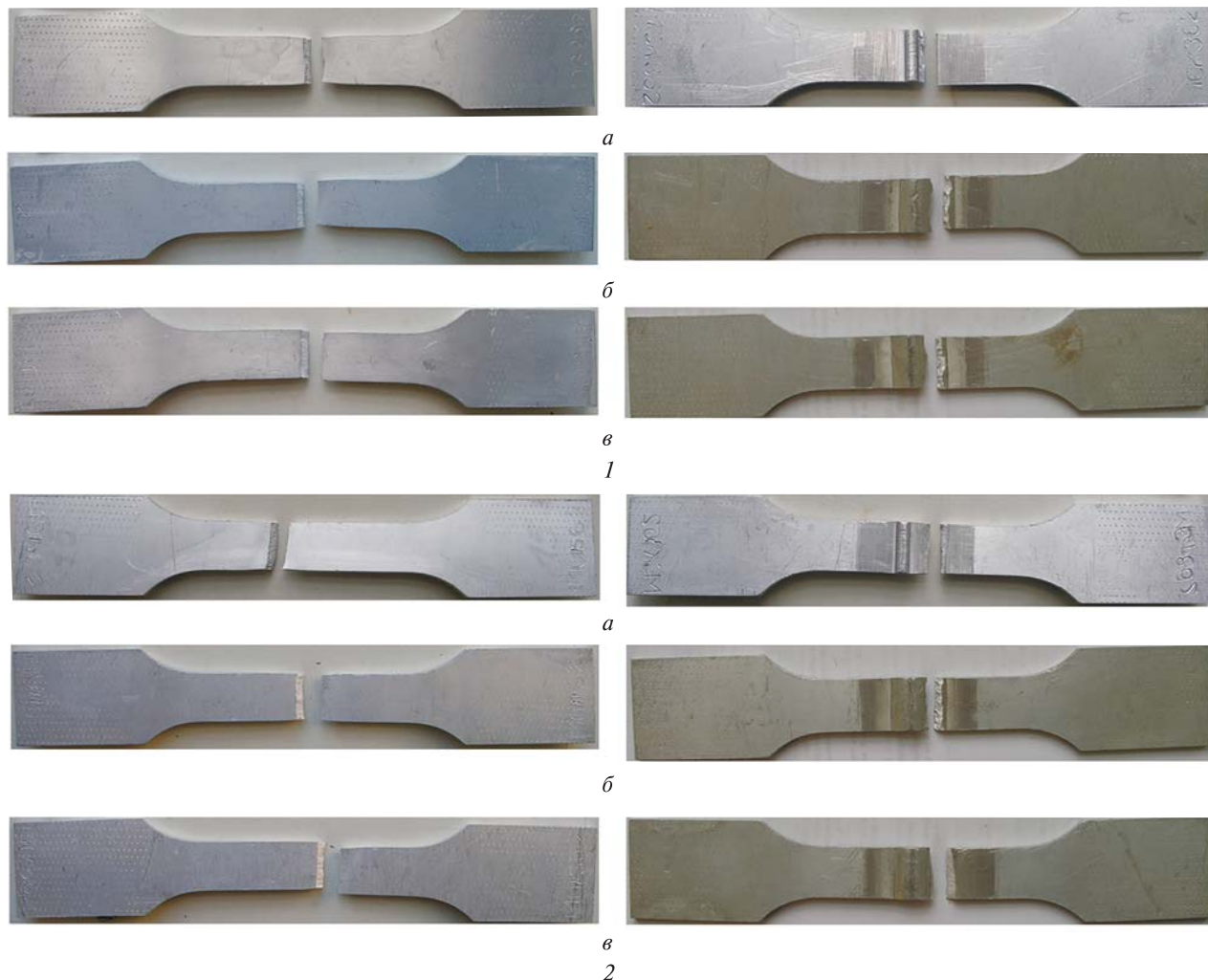


Рис. 5. Механічні властивості основного металу та зварного з'єднання сплаву 2219 у стані Т62 вздовж (а, в) та поперек (б, г) прокату до корозійних випробувань, після корозійних випробувань в амїлі та його парак

Аналогічна закономірність спостерігалась для зразків зварних з'єднань, які були зварені поперек напрямку прокату: межа плинності контрольних зразків становила 309...331 МПа, що майже на 5 % вище, ніж для основного металу — 304...337 МПа (рис. 5, в), межа міцності — 392...414 МПа, що на 6 % менше від міцності основного металу (рис. 5, г). Відносне видовження поздовжніх зразків становило 4.9 %, поперечних — 3.6 %. Коефіцієнт міцності контрольних

зразків зварних з'єднань, зварених поперек напрямку прокату, дорівнював 0.94.

Після корозійних випробувань зразків з'єднань, зварених вздовж прокату, в амїлі спостерігали зниження на 8 % межі плинності сплаву 2219-Т81 — до 284...297 МПа. Міцність з'єднань при цьому також зменшилась на 10 %, до 347...411 МПа (рис. 5, а, б). У зразках, зварених поперек напрямку прокату, показник межі плинності становив 275...321 МПа, що



**Рис. 6.** Зовнішній вигляд зразків основного металу та зварного з'єднання сплаву 2219 у стані Т62 вздовж (1) та поперек (2) прокату до корозійних випробувань (а), після корозійних випробувань в амлі (б) та його парах (в)

нижче, ніж для основного металу приблизно на 5 %. Аналогічна закономірність відмічається й для показника міцності, який зменшується на 9 % — до 380...403 МПа (рис. 5 в, г). Спостерігається зменшення відносного видовження зразків після дії амлі до 3.8 % для поздовжніх, 2.8 % — для поперечних. Коефіцієнт міцності зразків зварних з'єднань після дії амлі становив 0.95 для поздовжніх зразків та 0.91 для поперечних.

Після випробувань зразків зварних з'єднань, зварених вздовж напрямку прокату, в парах амлі відмічено зниження значень межі плинності

на 1.7 % — до 286...311 МПа та межі міцності на 5 % — до 392...414 МПа (рис. 5, а, б). Для поперечних зразків ці показники також зменшились приблизно на 5 % та на 4 % і становили 289...315 МПа та 408...410 МПа відповідно (рис. 5, в, г). Це може свідчити про зміцнення окремих фаз та окрихчення, на що вказує зниження показника відносного видовження після впливу корозійного середовища, який зменшується (від 4.9 % до 3.8 % для поздовжніх зразків). Для зразків, зварених у поперечному напрямку, відносно видовження незначно збільшується від 3.6 до 3.8 %. Коефіцієнт міцності зразків зварних з'єд-

нань після дії амілу становив 0.95 для поздовжніх зразків та 0.96 для поперечних.

Руйнування усіх досліджених зразків відбувалось в їхній робочій частині (рис. 6). Незалежно від напрямку прокату на зламах переважав в'язкий характер руйнування. Ці результати свідчать про те, що корозійно-агресивне середовище викликає повільне окрихчення металу.

## ВИСНОВКИ

1. Алюмінієвий сплав за вмістом основних легуючих елементів та домішок (за виключенням ванадію, вміст якого не визначали) відповідає вимогам AMS-QQ-A-250/30A.

2. Структура металу зварних швів — дендритна. Біля границі сплавлення дендрити мають стовбчасту будову та орієнтовані від лінії сплавлення до центра шва, в центрі шва — вздовж напрямку зварювання. У зоні термічного впливу зварних з'єднань спостерігається незначна рекристалізація зерен. Після корозійних випробувань в амілі та його парах мікроструктура поверхневих шарів основного металу, швів та зоні термічного впливу не змінюється, структурні параметри зварних з'єднань також лишаються незмінними та дорівнюють 60 мкм вздовж прокату та 25 мкм перпендикулярно до товщини листів для зразків в повздовжньому напрямку, 60 і 30 мкм — для зразків у поперечному напрямку.

3. Показники пластичності та міцності зразків зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 2219, виконані однопрохідним зварюванням неплавким електродом, термооброблені до стану T62, становлять:

- у поздовжньому напрямку: межа плинності зварного з'єднання — 301...317 МПа, основного металу — 295...297 МПа, межа міцності зварного з'єднання — 409...415 МПа, основного металу —

422...425 МПа, відносно подовження становить 4.0...5.8 % та 17.6...19.1 % відповідно;

- у поперечному напрямку: межа плинності зварного з'єднання — 309...331 МПа, основного металу — 304...317 МПа, границя міцності зварного з'єднання — 392...414 МПа, основного металу — 428...433 МПа, відносно подовження становить 2.0...3.3 % та 12.6...15.0 % відповідно. Коефіцієнт міцності зварних з'єднань у поздовжньому напрямку дорівнює 0.96, у поперечному — 0.94.

4. Після витримування в амілі та парах амілу показники міцності зразків основного металу та зварних з'єднань в обох напрямках майже не змінюються. Показники пластичності змінюються неоднозначно: межа плинності основного металу збільшується на 5...6 %, зварних з'єднань — знижується на 6...7 %, відносно видовження основного металу знижується на 5...16 %, зварних з'єднань — близько на 20 %. Після витримування в амілі коефіцієнт міцності зварних з'єднань у поздовжньому та поперечному напрямках однакові та дорівнюють 0.91, після витримування в парах амілу — 0.95 у поздовжньому напрямку і 0.96 поперечному.

5. Після дії амілу та його парів досліджені зварні з'єднання сплаву 2219 у стані T62 є стійкими проти корозійного розтріскування та міжкристалітної корозії. Тривкість проти розшарувальної корозії в амілі та його парах оцінена балом 2. Корозійну стійкість основного металу сплаву 2219 у стані T62 в амілі оцінено балом 2, що відповідає групі стійкості «підвищено стійкий»; у парах амілу — балом 3, що відповідає групі стійкості «стійкий».

*Роботу виконано за підтримки ДП «КБ Південне» (номер держреєстрації 0118U006291с) в 2018 р.*

ЛІТЕРАТУРА

1. AMS-QQ-A-250/30A. Технічні вимоги. Алюмінієвий сплав 2219. Лист і пластина.
2. ГОСТ 7512-82 Контроль неразрушающий. Сварные соединения. Радиографический метод.
3. ГОСТ 9.904-82 Единая система защиты от коррозии и старения. Сплавы алюминиевые. Метод ускоренных испытаний на расслаивающую коррозию.
4. ГОСТ 9.021-74 Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию.
5. ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88) Металлы. Методы испытаний на растяжение.
6. 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).
7. Ищенко А. Я. *Алюминиевые высокопрочные сплавы для сварных конструкций. Прогресивні матеріали і технології*. Киев: Академперіодика, 2003.
8. Ищенко А. Я., Лабур Т. М. *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Киев: Наук. думка, 2013.
9. Мильман Ю. Е., Коржова Н. П., Сирко А. И. *Алюминий и его сплавы. Неорганические материаловедение. Металлы и технологии*. Киев: Наук. думка, 2008.
10. Хэтч Е. (Ред.). *Алюминий: Свойства и физическое материаловедение: Справочник*. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1989. 422 с.
11. Bai J. Y., Yang C. L., Lin S. B., Dong B. L., Fan C. L. Mechanical properties of 2219-Al components produced by additive manufacturing with TIG. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*. 2016. **86** (1). P. 479–485.
12. Chen S., Li F., Liu Q., Chen K., Huang, L. Effect of Post-aging Heat Treatment on Strength and Local Corrosion Behavior of Ultrafine-Grained 2219 Al Alloy. *J. Materials Engineering and Performance*. 2020. **29** (5). P. 3420–3431.
13. Gupta R. K., Panda R., Mukhopadhyay A. K., Kumar V. A., Sankaravelayutham P., George K. M., Study of aluminum alloy AA2219 after heat treatment. *Metal Science and Heat Treatment*. 2015. **57** (5). P. 350–353.
14. Li H., Zou J., Yao J., Peng, H. The effect of TIG welding techniques on microstructure, properties and porosity of the welded joint of 2219 aluminum alloy. *J. Alloys and Compounds*. 2017. No. 727. P. 531–539.
15. Lu Y., Wang J., Li X., Li W., Li, R., Zhou D. Effects of pre-deformation on the microstructures and corrosion behavior of 2219 aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2018. No. 723. P. 204–211.
16. Niu L. Q., Li X. Y., Zhang L., Liang X. B., Li M. Correlation between microstructure and mechanical properties of 2219-T8 aluminum alloy joints by VPTIG welding. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2017. **30** (5). P. 438–446.
17. Peng X. N., Qu W. Q., Zhang G. H. Influence of Welding Processes on Mechanical Properties of Aluminum Alloy 2219. *J. Aeronautical Materials*. 2009. **29** (2). P. 57–60
18. Rao P. S., Sivadasan K. G., Balasubramanian P. K. Structure-property correlation on AA 2219 aluminium alloy weldments. *Bull. Materials Sci*. 1996. **19** (3). P. 549–557.
19. Rao S. K., Reddy G. M., Rao K. S., Kamaraj M., Rao K. P. Reasons for superior mechanical and corrosion properties of 2219 aluminum alloy electron beam welds. *Materials characterization*. 2005. **55**(4-5). P. 345–354.
20. Baskutis S., Bendikiene R., Ciuplys A. Effect of weld parameters on mechanical properties and tensile behavior of tungsten inert gas welded AW6082-T6 aluminium alloy. *J. Mechanical Sci. & Technology*. 2019. **33** (2). P. 765–772.
21. Wan Z., Meng D., Zhao Y., Zhang D., Wang Q., Shan J., Song J., Wang G., Wu, A. Improvement on the tensile properties of 2219-T8 aluminum alloy TIG welding joint with weld geometry optimization. *J. Manufacturing Processes*. 2021. No. 67. P. 275–285.
22. Zhang D., Wang G., Wu A., Zhao Y., Li Q., Liu X., Meng D., Song J., Zhang Z. Study on the inconsistency in mechanical properties of 2219 aluminium alloy TIG-welded joints. *J. Alloys and Compounds*. 2019. No. 777. P. 1044–1053.
23. Zhang D., Wu A., Zhao Y., Shan J., Wan Z., Wang G., Song J., Zhang Z., Liu X. Effects of the Number of Welding Passes on Microstructure and Properties of 2219-C10S Aluminum Alloy TIG-Welded Joints. *J. Materials Engineering and Performance*. 2021. P. 1–10.
24. Zhang D. K., Wang G. Q., Wu A. P., Shan J. G., Zhao Y., Zhao T. Y., Meng D. Y., Song J. L., Zhang Z. P. 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)*. 2019. **32** (6). P. 684–694.
25. Zhang D., Li Q., Zhao Y., Liu X., Song J., Wang G., Wu A. Microstructure and mechanical properties of three-layer TIG-welded 2219 aluminum alloys with dissimilar heat treatments. *J. Materials Engineering and Performance*. 2018. **27** (6). P. 2938–2948.
26. Zhu Z. Y., Deng C. Y., Wang Y., Yang Z. W., Ding J. K., Wang D. P. 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*. 2015 (1980–2015). No. 65. P. 1075–1082.

## REFERENCES

1. John E. Hatch. (1989). Aluminum: Properties and Physical Metallurgy: A Handbook. Per. from English. Publisher: Metallurgy [in Russian].
2. AMS-QQ-A-250/30A. Technical requirements. Aluminum alloy 2219. Sheet and plate.
3. GOST 7512-82 Nondestructive testing. Welded joints. Radiography method, Moscow, Izd-vo standartov [in Russian].
4. GOST 9.904-82 Unified system of corrosion and ageing protection. Alluminium alloys. Accelerated test method for exfoliating corrosion, Moscow, Izd-vo standartov [in Russian].
5. GOST 9.021-74 Unified system of corrosion and ageing protection. Aluminium and aluminium alloys. Accelerated test methods for intercrystalline corrosion, Moscow, Izd-vo standartov [in Russian].
6. GOST 1497-84 Metals. Methods of tension test, Moscow, Izd-vo standartov [in Russian].
7. GOST 9.502-82 Unified system of corrosion and ageing protection. Inhibitors of metals corrosion for aqueous systems. Methods of corrosion tests (with changes № 1, 2) Izd-vo standartov [in Russian].
8. Ishchenko A. Ya. (2003). *Aluminum high-strength alloys for weld structures. Progressive materials and technologies*. Kiev: Academic periodica.
9. Ishchenko A. Ya., Labur T. M. (2013). *Welding of modern structures from aluminum alloys*. Kiev: Nauk. dumka.
10. Milman Yu. E., Korzhova N. P., Sirko A. I. (2008). *Aluminum and its alloys. Inorganic materials science. Metals and technologies*. Kiev: Nauk. dumka.
11. Bai J. Y., Yang C. L., Lin S. B., Dong B. L., Fan C. L. (2016). Mechanical properties of 2219-Al components produced by additive manufacturing with TIG. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*, **86** (1), 479–485.
12. Chen S., Li F., Liu Q., Chen K., Huang, L. (2020). Effect of Post-aging Heat Treatment on Strength and Local Corrosion Behavior of Ultrafine-Grained 2219 Al Alloy. *J. Materials Engineering and Performance*, **29** (5), 3420–3431.
13. Gupta R. K., Panda R., Mukhopadhyay A. K., Kumar V. A., Sankaravelayutham P., George K. M. (2015). Study of aluminum alloy AA2219 after heat treatment. *Metal Sci. and Heat Treatment*, **57** (5), 350–353.
14. 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. *J. Alloys and Compounds*, No. 727, 531–539.
15. Lu Y., Wang J., Li X., Li W., Li, R., Zhou D. (2018). Effects of pre-deformation on the microstructures and corrosion behavior of 2219 aluminum alloys. *Materials Sci. and Engineering: A*, **723**, 204–211.
16. Niu L.Q., Li, X.Y., Zhang L., Liang X.B., Li M. (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.
17. Peng X. N., Qu W. Q., Zhang G. H. (2009). Influence of Welding Processes on Mechanical Properties of Aluminum Alloy 2219. *J. Aeronautical Materials*, **29** (2), 57–60.
18. Rao P. S., Sivadasan K. G., Balasubramanian P. K. (1996). Structure-property correlation on AA 2219 aluminium alloy weldments. *Bull. Materials Sci.*, **19** (3), 549–557.
19. Rao S. K., Reddy G. M., Rao K. S., Kamaraj M., Rao K. P. (2005). Reasons for superior mechanical and corrosion properties of 2219 aluminum alloy electron beam welds. *Materials characterization*, **55**(4-5), 345–354.
20. Baskutis S., Bendikiene R., Ciuplys A. (2019). Effect of weld parameters on mechanical properties and tensile behavior of tungsten inert gas welded AW6082-T6 aluminium alloy. *J. Mechanical Sci. and Technol.*, **33** (2), 765–772.
21. Wan Z., Meng D., Zhao Y., Zhang D., Wang Q., Shan J., Song J., Wang G., Wu A. (2021). Improvement on the tensile properties of 2219-T8 aluminum alloy TIG welding joint with weld geometry optimization. *J. Manufacturing Processes*, **67**, 275–285.
22. Zhang D., Wang G., Wu A., Zhao Y., Li Q., Liu X., Meng D., Song J., Zhang Z. (2019). Study on the inconsistency in mechanical properties of 2219 aluminium alloy TIG-welded joints. *J. Alloys and Compounds*, **777**, 1044–1053.
23. Zhang D., Wu A., Zhao Y., Shan J., Wan Z., Wang G., Song J., Zhang Z., Liu X. (2021) Effects of the Number of Welding Passes on Microstructure and Properties of 2219-C10S Aluminum Alloy TIG-Welded Joints. *J. Materials Engineering and Performance*, 1–10.
24. Zhang D. K., Wang G. Q., Wu A. P., Shan J. G., Zhao Y., Zhao T. Y., Meng D. Y., Song J. L., Zhang Z. P. (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.
25. Zhang D., Li Q., Zhao Y., Liu X., Song J., Wang G., Wu A. (2018). Microstructure and mechanical properties of three-layer TIG-welded 2219 aluminum alloys with dissimilar heat treatments. *J. Materials Engineering and Performance*, **27** (6), 2938–2948.
26. Zhu Z. Y., Deng C. Y., Wang Y., Yang Z. W., Ding J. K., Wang D. P. (2015 (1980-2015)). 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*, No. 65, 1075–1082.

Стаття надійшла до редакції 24.09.2021

Після доопрацювання 20.04.2022

Прийнято до друку 20.04.2022

Received 24.09.2021

Revised 20.04.2022

Accepted 20.04.2022

L. I. Nyrkova<sup>1</sup>, Head of Department, Dr. Sci. in Tech.

ORCID <http://orcid.org/0000-0003-3917-9063>

E-mail: lnyrkova@gmail.com, Nyrkova@paton.kiev.ua

T. M. Labur<sup>1</sup>, Chief Researcher, Associate Senior Researcher, Dr. Sci. in Tech.

ORCID <http://orcid.org/0000-0002-4064-2644>

E-mail: labur@paton.kiev.ua

E. I. Shevtsov<sup>2</sup>, Deputy General Designer – Chief Designer

E-mail: info@yuzhnoye.com

O. P. Nazarenko<sup>2</sup>, Head of Department

A. V. Dorofeev<sup>2</sup>, Team Leader

S. O. Osadchuk<sup>1</sup>, Researcher, Ph.D. in Tech.

ORCID <http://orcid.org/0000-0001-9559-0151>

E-mail: svetlanaosadchuk@meta.ua

M. R. Yavorska<sup>1</sup>, Leading Engineer,

ORCID <http://orcid.org/0000-0003-2016-6289>

A. G. Poklyatsky<sup>1</sup>, Senior Researcher, Ph.D. in Tech.

ORCID <http://orcid.org/0000-0002-4101-2206>

E-mail: pokliatskyi@paton.kiev.ua

V. E. Fedorchuk<sup>1</sup>, Senior Researcher, Ph.D. in Tech.

ORCID <http://orcid.org/0000-0002-9929-3231>

E-mail: fedorchuk@paton.kiev.ua

<sup>1</sup> E. O. Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine

11, K. Malevicha Str., Kyiv, 03150 Ukraine

<sup>2</sup> Yangel Yuzhnoye State Design Office

3, Krryvorizka Str, Dnipro, 49008 Ukraine

#### COMPLEX OF PROPERTIES OF 2219 ALLOY WELDED JOINT IN T62 STATE UNDER CONDITIONS MODELING OPERATING CONDITIONS

A complex of properties of aluminium alloy 2219 welded joint, made by single-pass welding with a non-fusible electrode along and across the rolled product, and heat-treated to the state T62, in liquid amyl and its vapors at a temperature of 50 °C for 45 days was investigated. Characteristics of plasticity and strength of 2219 alloy welded joints are as follows: in the longitudinal (D) direction – yield strength of the welded joint is (301–317) MPa, of the base metal (295–297) MPa, strength limit of the welded joint (409–415) MPa, of the base metal (422–425) MPa, elongation is (4.0–5.8)% and (17.6–19.1)%, respectively; in the transverse (P) direction – the yield strength of the welded joint is (309–331) MPa, of the base metal (304–307) MPa, the yield strength of the welded joint (392–414) MPa, of the base metal (428–433) MPa, elongation is (2.1–3.3)% and (12.6–15.0)%, respectively. The strength coefficient of welded joints in the longitudinal direction is 0.96, in the transverse – 0.94.

Welded joints in the above environment are resistant to corrosion cracking and intergranular corrosion, resistance against exfoliating corrosion is evaluated by grade 2. Resistance of 2219 alloy in T62 state in amyl corresponds to the resistance group «stable», in amyl vapors – the group “highly resistant”. After aging in amyl and amyl vapors, the strength grades of the base metal samples and welded joints in both directions are almost unchanged, the plasticity parameters change ambiguously: the yield strength of the base metal increases by ~ (5–6)%, of welded joints decreases by ~ (6–7)%, the relative elongation of the base metal is reduced by ~ (5–16)%, of welded joints by about ~ 20 %. Independently of the direction of welding relative to metal's rolling, samples' fractures are mostly viscous. After the exposing in amyl, the coefficient of the strength of welded joints in the longitudinal and transverse directions is the same and equal to 0.91, after the influence of amyl vapors, it is 0.95 in the longitudinal direction and 0.96 in the transverse direction.

**Keywords:** aluminum alloy 2219, welded joints, heat treatment, corrosion resistance, mechanical properties, microstructure, mechanical tensile fracture.