

СТРУКТУРА ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ З'ЄДНАНЬ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ 2219-T87, ОТРИМАНИХ КОНТАКТНИМ СТИКОВИМ ЗВАРЮВАННЯМ ОПЛАВЛЕННЯМ

С.І. Кучук-Яценко, К.В. Гуцин, І.В. Зяхор, С.М. Самотрясов, М.С. Завертанний, А.М. Левчук

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

При проектуванні і виготовленні конструкцій літальних апаратів з сучасних термічнозміцнених алюмінієвих сплавів існує проблема отримання зварних з'єднань з задовільними механічними властивостями без подальшої термічної обробки великогабаритних виробів. В роботі досліджували формування з'єднань термомеханічнозміцненого сплаву 2219-T87 при контактному стиковому зварюванні оплавленням. Встановлено, що низькотемпературний підігрів опором в поєднанні з короткочасним нагрівом оплавленням забезпечують формування бездефектних зварних з'єднань. Металографічними дослідженнями встановлено, що з'єднання формуються через тонкий шар розплаву, що є необхідною умовою якісного зварювання алюмінієвих сплавів. Досліджено вплив інтенсивної пластичної деформації при осадці з примусовим формуванням на морфологію часток θ -фази (CuAl_2). Встановлено зниження показників твердості в зоні з'єднання, що обумовлено розчиненням і коагуляцією зміцнюючої θ' -фази. Міцність зварних з'єднань як уздовж, так і впоперек ліній прокату становить 76 % міцності основного металу. Бібліогр. 20, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: алюмінієвий сплав 2219, контактне стикове зварювання оплавленням, зварне з'єднання, механічні властивості.

У конструкції виробів космічної та авіаційної техніки широко використовуються термічнозміцнені алюмінієві сплави системи Al-Cu [1]. Сплав 2219 та його аналог сплав 1201 успішно застосовано для елементів конструкцій, що працюють при низьких температурах, зокрема для виготовлення паливних баків і несучих елементів конструкції ракет Saturn V, Apollo, Space Shuttle, Ariane V, «Буран» [2].

Для досягнення максимального рівня міцності заготовки сплаву 2219 поставляються в термомеханічнозміцненому стані T87, який досягається термічною обробкою на твердий розчин, деформаційним зміцненням і подальшим штучним старінням [3-6].

При виготовленні виробів авіаційної і космічної техніки зі сплаву 2219 використовують різні способи зварювання (електронно-променево [7], аргонодугове плавким [8-10] і неплавким електродом [11, 12], тертям з перемішуванням (ЗТП) [12-18], контактне стикове оплавленням [19, 20]), які відрізняються термічним циклом і рівнем зниження показників механічних властивостей металу у зоні термічного впливу. Наприклад, з'єднання сплаву 2219-T87, виконані аргонодуговим зварюванням плавким і неплавким електродом і ЗТП, мають межу міцності 0,6...0,65 від рівня показників основного металу [8-18], що обумовлено повним розчиненням часток нанорозмірної зміцнюючої θ' -фази у шві і зоні термічного впливу.

Крім того, термічний цикл зварювання виробів із сплаву 2219 може знижувати корозійну стійкість з'єднань внаслідок коагуляції (укрупнення) часток θ -фази (CuAl_2) у навколошовній зоні. Проблема зниження показників механічних властивостей і характеристик корозійної стійкості зварних швів внаслідок ліквідації у зоні сплавлення при способах зварювання плавленням досліджувалась в роботах [7-12], а при ЗТП – в роботах [13-18].

Зокрема, у роботах [8-12] встановлено, що при аргонодуговому зварюванні плавким електродом сплаву 2219 у навколошовній зоні має місце евтектична реакція між частками θ -фази (CuAl_2) і α -матрицею сплаву: $\alpha + \theta \rightarrow L_E$ з утворенням рідкої фази L_E при евтектичній температурі $T_E = 548^\circ\text{C}$ і вище. Ліквідація навколо великих θ -частинок призводить до збільшення їх розмірів і утворення з боку α -матриці сплаву ділянок із зниженою концентрацією міді. Ліквідація міді на границях зерен призводить до появи розділеної евтектики, яка складається із смуг з високою концентрацією Cu (до 33% ат.) і суміжних ділянок α -фази з низьким вмістом Cu, що обумовлює зниження характеристик корозійної стійкості та показників механічних властивостей зварних швів [8-10]. Аналогічні проблеми мають місце і при ЗТП сплаву 2219 [13-15].

Термічна обробка (загартування і старіння) виробів із сплаву 2219 після зварювання дозволяє в значній мірі відновити структуру і механічні власти-

вості швів, однак при виробництві великогабаритних конструкцій її виконання є важкоздійсненним завданням. Тому актуальною проблемою є розробка технологій зварювання сплаву 2219, що забезпечують без подальшої термічної обробки більш високий рівень міцності з'єднань, який задовольнить технічні вимоги розробників космічної техніки.

Ефективною технологією виготовлення силових елементів літальних апаратів (стрингери, обичайки, шпангоути) з пресованих профілів розвиненого і компактного перерізу є контактне стикове зварювання оплавленням (КСЗО). Цей спосіб забезпечує високу стабільну якість з'єднань, об'єднує в єдиному циклі складальні та зварювальні операції, не вимагає застосування допоміжних витратних матеріалів [19, 20]. При зварюванні заготовок товщиною до 12 мм технологія КСЗО забезпечує високі показники міцності алюмінієвих сплавів при незначній ширині зони термічного впливу (ЗТВ).

При КСЗО профілів більшої товщини необхідно виконувати попередній підігрів заготовок опором, що обумовлює збільшення ширини ЗТВ та, імовірно, виникнення проблем, характерних для способів зварювання плавленням і ЗТП.

Мета роботи полягала у встановленні особливостей формування з'єднань при КСЗО товстостінних пресованих профілів із сплаву 2219-T87, дослідженні їх мікроструктури і визначенні показників механічних властивостей.

Методика проведення робіт.

Дослідження проводилися на зразках сплаву 2219-T87 прямокутного перерізу товщиною 15 мм, шириною 60 мм. Довжина зразків становила не менше 200 мм. Хімічний склад досліджуваного сплаву наведено в табл. 1.

Оскільки для пресованих профілів із алюмінієвих сплавів характерною є анізотропія структури і механічних властивостей, то експерименти по КСЗО зразків сплаву 2219-T87 проводилися при різному напрямку ліній прокату (рис. 1), які є скупченнями часток θ -фази. При зварюванні заготовок з поздовжнім розташуванням волокон прокату з'єднання формується в площині, перпендикулярній напрямку волокон прокату (далі шов впоперек прокату). При зварюванні заготовок з поперечним розташуванням волокон прокату з'єднання формуються в площині, паралельній напрямку волокон прокату (далі шов уздовж прокату).

Дослідні зварювання проводили на лабораторній стиковозварювальній машині К607, обладнаній зварювальним трансформатором потужністю 75 кВ·А і приводом осадки з зусиллям до 1000 кН. Процес КСЗО включав кілька стадій: попередній підігрів

опором, оплавлення, осадку. Деформація при осадці відбувається в умовах об'ємного стиснення за рахунок застосування формуючих пристроїв (рис. 2).

Параметри процесу КСЗО встановлювали в межах: напруга оплавлення $U_{\text{опл}} = 5 \dots 6$ В, швидкість оплавлення $V_{\text{опл}} = 2 \dots 18$ мм/с, швидкість осадки $V_{\text{ос}} \geq 200$ мм/с. Загальний припуск на оплавлення і осадку $l_{\text{зв}} = 60$ мм.

Макроструктуру зварних з'єднань оцінювали візуальним оглядом з використанням лупи Levenhuk Zeno Multi ML7 при збільшенні $\times 3 \dots 10$. Металографічні дослідження проводили з використанням оптичного мікроскопа Neophot-32 при збільшенні $\times 25$, $\times 100$, $\times 400$. Підготовку поверхні шліфів проводили на шліфувально-полірувальному верстаті Struers LaboPol-5. Для виявлення структури використовували реактив Келлера ($0,5\text{HF}-1,8\text{HCl}-2,7\text{HNO}_3-95\text{H}_2\text{O}$ (об.%) та 0,5 %-ий водний розчин плавикової кислоти. Дослідження розподілу твердості HRB в зоні з'єднань проводили за допомогою стаціонарного твердоміра NOVOTEST ТС-БПР при навантажен-

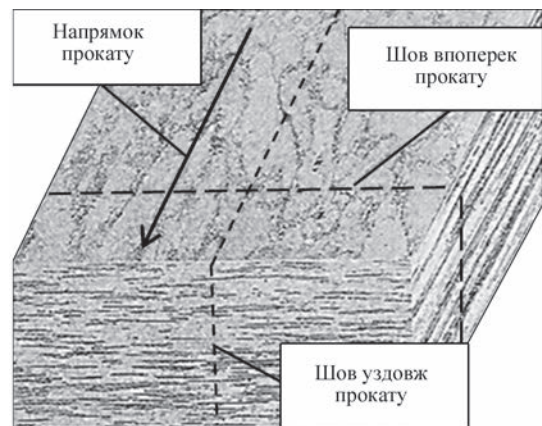


Рис. 1. Схема розташування ліній прокату у зразках сплаву 2219-T87 при КСЗО

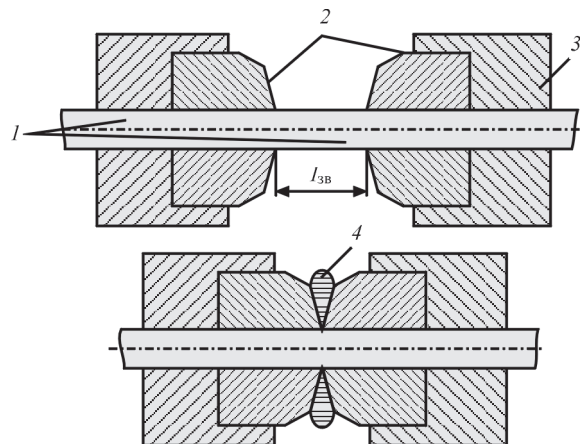


Рис. 2. Схема КСЗО з формуванням з'єднання: 1 – деталі; 2 – формуючі пристрої; 3 – струмопідвід; 4 – екструдований метал, $l_{\text{зв}}$ – припуск на зварювання.

Таблиця 1. Хімічний склад (мас. %) сплаву 2219 [4,5]

Al	Cu	Mn	Mg	Si	Zr	V	Zn	Fe	Ti
Основа	5,8...6,8	0,2...0,4	<0,2	<0,2	0,1...0,25	0,05...0,15	<0,1	<0,3	0,02...0,1

ні 600 Н (діаметр кульки 1/16") з кроком 1...2 мм. Механічні випробування зразків зварних з'єднань на розтяг проводили на машині ЦДМ-10 з максимальним зусиллям 100 кН.

Результати досліджень.

При зварюванні застосовували попередній підігрів опором до 200 °С, струм попереднього підігріву $I_{2\text{мід}} = 20$ кА. Нагрів до даної температури не призводить до втрати міцності сплаву 2219-T87. Подальше підвищення температури попереднього підігріву призводить до збільшення ширини зони, в якій спостерігається повне розчинення і коагуляція часток нанорозмірної зміцнюючої θ' -фази у процесі КСЗО, що обумовлює зниження показників міцності сплаву.

В процесі відпрацювання режимів зварювання проводився «експрес-аналіз» якості зварних з'єднань – загин зразків з надрізом по лінії з'єднання до руйнування. Якість з'єднань оцінювали за наявністю (відсутністю) дефектів типу оксидних плівок

при візуальному огляді зламів зруйнованого зразка (рис. 3, а). При відпрацюванні режимів КСЗО прагнули мінімізувати час зварювання з метою зменшення ширини ЗТВ з'єднань сплаву 2219-T87.

За такою методикою визначені режими КСЗО, які забезпечують відсутність дефектів (рис. 3, б) по лінії з'єднання. Встановлено, що низькотемпературний нагрів опором до 200 °С з подальшим оплавленням протягом 15 с і деформація при значенні тиску осадки не нижче 500 МПа забезпечують формування якісних з'єднань. Після отримання позитивних результатів були зварені партії зразків для металографічних досліджень і механічних випробувань.

Результати дослідження мікроструктури основного металу (ОМ) і зварних з'єднань (ЗЗ), виконаних КСЗО, наведені на рис. 4–6. Основний метал сплаву 2219-T87 (рис. 4) характеризується вираженою текстурою з деформованими в напрямку прокату зернами і великою кількістю розташованих у вигляді

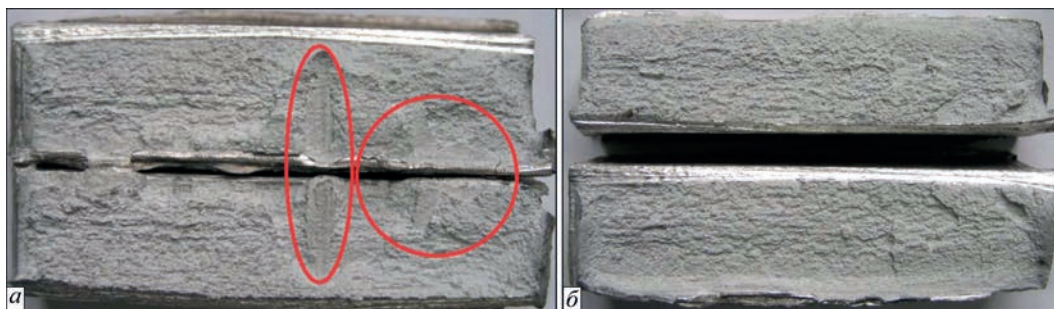


Рис. 3. Злами зварних з'єднань: а - з дефектами (оксидні плівки); б - без видимих дефектів

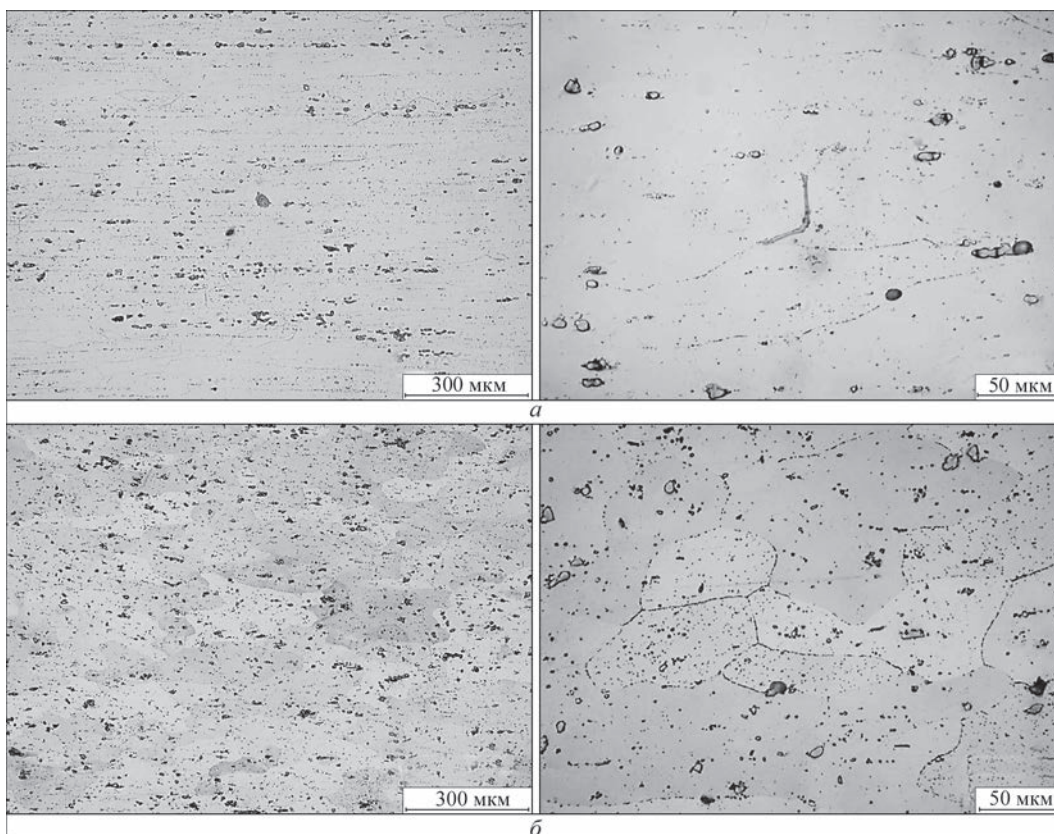


Рис. 4. Мікроструктура основного металу сплаву 2219-T87 уздовж (а) і впоперек (б) прокату

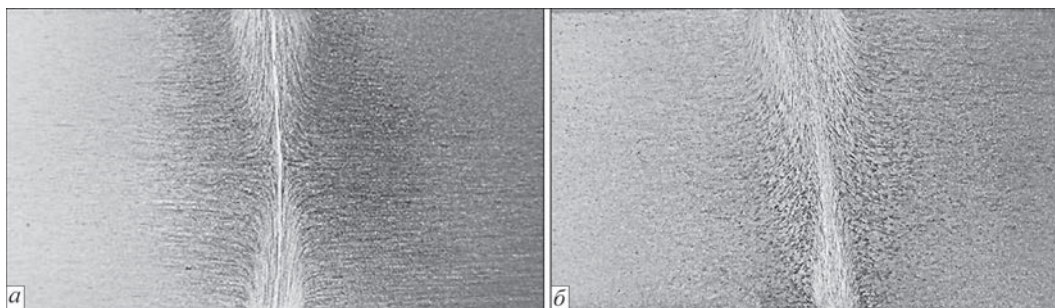


Рис. 5. Структура зварного з'єднання зразків зі сплаву 2219-T87: товщиною $\delta = 15$ мм: *a* – шов впоперек прокату, *b* – шов уздовж прокату

Таблиця 2. Механічні властивості основного металу і зварних з'єднань сплаву 2219-T87 в залежності від напрямку прокату

Зразок	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	Кут загину α°	KCV, Дж/см ² ($T = 20$ °C)	Коефіцієнт міцності $\sigma_{B33} / \sigma_{BOM}$
Шов впоперек прокату						
OM	486	413	10,9	37	13,9	–
33	372	263	4,3	33	16,6	0,76
Шов уздовж прокату						
OM	486	410	8,0	21	6,9	–
33	372	249	5,0	31	20,5	0,76

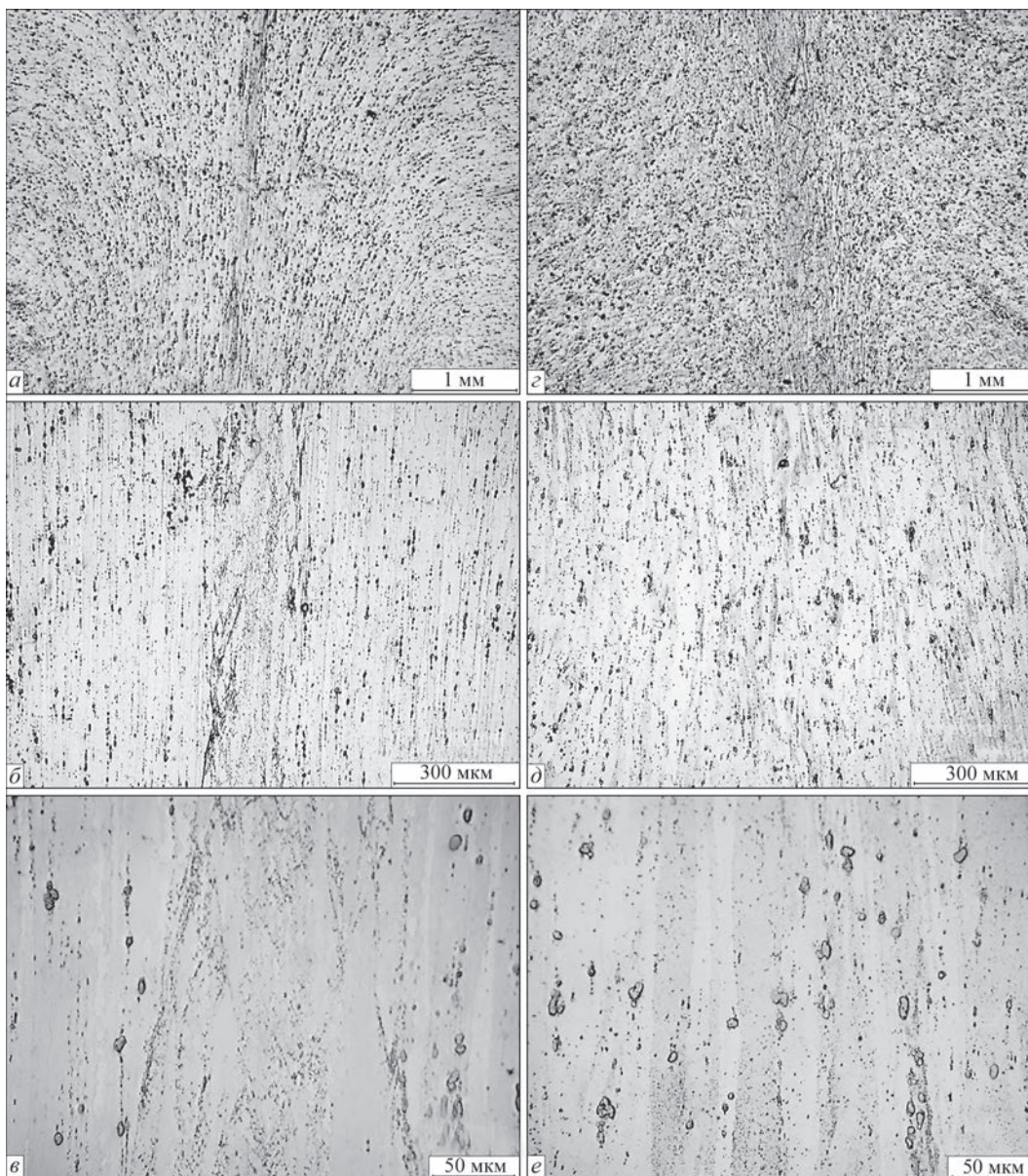


Рис. 6. Мікроструктура зварного з'єднання сплаву 2219-T87 шов впоперек прокату (*a*–*b*) та уздовж прокату (*c*–*e*)

«ланцюжків» часток θ' -фази (CuAl_2) різної величини, найбільші частки мають розмір 10...15 мкм.

З наближенням до лінії з'єднання спостерігається зміна орієнтації зерен, причому напрямок волокон прокату в зоні термомеханічного впливу (ЗТМВ) поступово змінюється до 90° в порівнянні з вихідним напрямком зерен ОМ і збігається з напрямком екструзії металу в процесі деформації при осадці (рис. 6). Внаслідок екструзії металу в зазор між формуючими пристроями відбувається часткове розчинення виділень θ -фази в ЗТМВ – їх розмір зменшується, скупчення у вигляді «ланцюжків» частково руйнуються, частки стають відокремленими. Така структура свідчить про істотний вплив інтенсивної пластичної деформації при осадці з примусовим формуванням (екструзії) на морфологію виділень вторинних фаз.

У зварному з'єднанні як впоперек (рис. 6, а–в), так і уздовж прокату (рис. 6, з–е) відсутні дефекти типу оксидних плівок, розшарувань та евтектичних утворень. В ЗТВ не спостерігається укрупнення часток θ -фази (CuAl_2) і виникнення розділеної евтектики, що є характерним для способів зварювання плавленням [7-12] і ЗТП [13-18] сплаву 2219.

Розмір часток θ -фази в центрі стику (зона з'єднання шириною 150...200 мкм) становить 1...2 мкм, що значно менше такого для ОМ сплаву, і свідчить про повне розчинення часток при зварюванні та повторне їх виділення у більш дисперсному вигляді при охолодженні. Аналіз мікроструктури (рис. 6) свідчить про формування з'єднання через тонкий шар розплаву, що є необхідною умовою якісного зварювання алюмінієвих сплавів.

Аналіз розподілу твердості в зоні з'єднання сплаву 2219-T87 (рис. 7) показує, що ширина зони термічного впливу становить близько 28 мм. Зниження показників твердості обумовлено структурними перетвореннями в зоні з'єднання сплаву 2219-T87 під впливом термічного циклу КСЗО, а саме розчиненням і коагуляцією нанорозмірної зміцнюючої θ' -фази.

Результати випробувань на розтяг ОМ сплаву 2219-T87 і зварних з'єднань наведені в табл. 2. Отже, межа міцності σ_B зварних з'єднань пластин товщиною 15 мм із сплаву 2219-T87, отриманих КСЗО,

$HRB (P = 600 \text{ Н}, \varnothing 1/16")$

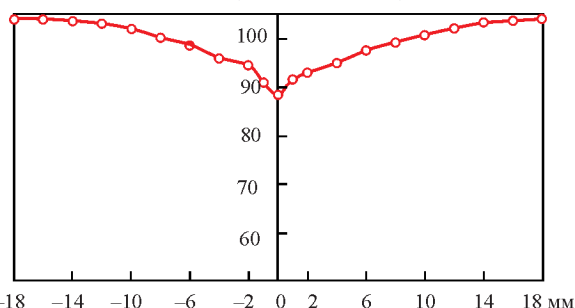


Рис. 7. Розподіл твердості в зоні зварного з'єднання зразків товщиною 15 мм зі сплаву 2219-T87

становить 76 % показників міцності ОМ сплаву, як з розташуванням шва уздовж, так і впоперек прокату.

Висновки:

1. Встановлено, що попередній підігрів опором зразків сплаву 2219-T87 до температури 200°C і проведення КСЗО з примусовим формуванням при значенні тиску при осадці не нижче 500 МПа, забезпечують формування якісних (бездефектних) з'єднань.

2. Мікроструктура металу в ЗТМВ з'єднання сплаву 2219-T87 свідчить про істотний вплив інтенсивної пластичної деформації при осадці з примусовим формуванням на морфологію часток θ -фази (CuAl_2). В результаті екструзії металу в зазор між формуючими пристроями відбувається часткове розчинення часток θ -фази – їх розмір зменшується, скупчення у вигляді «ланцюжків» частково руйнуються.

3. Розмір часток θ -фази в центрі зони з'єднання шириною 150...200 мкм становить 1...2 мкм, що пов'язано з повним розчиненням θ -фази при зварюванні та повторним виділенням у більш дисперсному вигляді при охолодженні. Така трансформація часток CuAl_2 свідчить про формування з'єднання через тонкий шар розплаву, що є необхідною умовою якісного зварювання алюмінієвих сплавів.

4. Межа міцності з'єднань пластин товщиною 15 мм із сплаву 2219-T87, отриманих за розробленою технологією КСЗО, становить 76 % від показників основного металу сплаву, як з розташуванням шва уздовж, так і впоперек прокату. Зниження показників твердості в зоні з'єднання обумовлене розчиненням і коагуляцією нанорозмірної зміцнюючої θ' -фази.

Література/References

- Гуреева М.А., Грушко О.Е. (2009) Алюминиевые сплавы в сварных конструкциях современных транспортных средств. *Машиностроение и инженерное образование*, 3, 27–41.
- Gureeva, M.A., Grushko, O.E. (2009) Aluminium alloys in welded structures of modern transport vehicles. *Mashinostroenie i Inzhenernoe Obrazovanie*, 3, 27–41 [in Russian].
- Сетюков О.А. (2013) Алюминиевый сплав 1201 в конструкции космического корабля «Буран». *Авиационные материалы и технологии. Спецвыпуск*, 15–18.
- Setyukov, O.A. (2013) 1201 aluminium alloy in structure of spacecraft «Buran». *Aviats. Materialy i Tekhnologii, Special Issue*, 15–18 [in Russian].
- Federal Aviation Administration Flight Standards Service (2018) *Aviation Maintenance Technician Handbook*. [online] Available at: <https://www.faa.gov/regulations/policies/handbooks_manuals/aircraft/> [Accessed 01 July 2021].
- ASTM International – Standards Worldwide, (2014) *ASTM B209M - 14 Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate (Metric)*. [online] Available at: <<https://www.astm.org/Standards/B209M.htm>> [Accessed 02 July 2021].
- George, E., Totten, G.E. (2003) *Handbook of Aluminum. Volume 1: Physical Metallurgy and Processes*, Marcel Dekker Inc. New York, NY, USA.
- An, L.H., Cai, Y., Liu, W. et al. (2012) Effect of pre-deformation on microstructure and mechanical properties of 2219 aluminum alloy sheet by thermomechanical treatment. *Trans. Nonferr. Met. Soc. China.*, 22, 370–375. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61733-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61733-6).
- Lu, Y., Wang, J., Li, X. et al. (2018) Effects of pre-deformation on the microstructures and corrosion behavior of 2219 aluminum alloys. *Mater. Sci. Eng. A*, 723, 204–211. doi: 10.1016/j.msea.2018.03.041.

8. Sobih, M., Elseddig, Z., Almazy, K., Sallam, M. (2016) Experimental Evaluation and Characterization of Electron Beam Welding of 2219 Al-Alloy. *Indian Journal of Materials Science*, Article ID 5671532, DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/5671532>
9. Huang, C., Kou, S. (2000) Partially melted zone in aluminum welds – Liquation mechanism and directional solidification. *Weld J.*, 79 (5), 113–120.
10. Huang, C., Kou, S. (2001) Partially melted zone in aluminum welds: solute segregation and mechanical behavior. *Ibid*, 80 (1), 9–17.
11. Huang, C., Kou, S. (2001) Partially melted zone in aluminum welds planar and cellular solidification. *Ibid*, 80 (2), 46–53.
12. Srinivasa, Rao P., Sivadasan, K.G., Balasubramanian, P.K. (1996) Structure-property correlation on AA 2219 aluminium alloy weldments. *Bull Mater Sci*, 19 (3), 549–557.
13. Poklyatsky, A.G., Chajka, A.A., Klochkov, I.N., Yavorskaya, M.R. (2009) Strength and structure of aluminium alloy welded joints made by friction stir and non-consumable electrode welding. *The Paton Welding J.*, 9, 9–12.
14. Venkateswarlu, D. (2017) Analysing the friction stir welded joints of AA2219 Al–Cu alloy in different heat-treated-state. *IOP Conf. Series: Mater Sci and Eng*. Hyderabad, India, 1–2 June 2017. IOP Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012074>.
15. Kang, J., Feng, Z.C., Frankel, G.S. et al. (2016) Friction stir welding of Al alloy 2219-T8: Part I – Evolution of precipitates and formation of abnormal Al₂Cu agglomerates. *Metall Mater Trans A*, 47 (9), 4553–4565. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3648-7>.
16. Kang, J., Feng, Z.C., Li, J.C. et al. (2016) Friction stir welding of Al alloy 2219-T8: Part II – mechanical and corrosion. *Ibid*, 47 (9), 4566–4577. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3646-9>.
17. Kang, J., Liang, S., Wu, A. et al. (2017) Local liquation phenomenon and its effect on mechanical properties of joint in friction stir welded 2219 Al alloy. *Acta Metall. Sin.*, 53(3), 358–368. DOI: <https://doi.org/10.11900/0412.1961.2016.00311>.
18. Rivera, O.G., Allison, P.G., Brewer, L.N. et al. (2018) Influence of texture and grain refinement on the mechanical behavior of AA2219 fabricated by high shear solid state material deposition. *Mater. Sci. Eng. A*, 724, 547–558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.03.088>.
19. Кучук-Яценко С.И. (1992) Контактная стыковая сварка оплавлением. Киев, Наукова думка.
20. Кучук-Яценко С.И. (1992) Flash butt welding. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
20. Кучук-Яценко С.И., Чвертко П.Н., Семенов Л.А. и др. (2010) Особенности контактной стыковой сварки высокопрочного алюминиевого сплава 2219. *Автоматическая сварка*, 3, 9–12.
- Кучук-Яценко, С.И., Чвертко, П.Н., Семенов, Л.А. et al. (2010) Peculiarities of flash butt welding of high-strength aluminium alloy 2219. *The Paton Welding J.*, 3, 9–12.

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF 2219-T87 ALUMINUM ALLOY JOINTS PRODUCED BY FLASH BUTT WELDING

S.I. Kuchuk-Yatsenko, K.V. Hushchyn, I.V. Ziakhor, S.M. Samotryasov, M.S. Zavertannyi, A.M. Levchuk

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

E-mail: office@paton.kyiv.ua

During designing and manufacture of aircraft structures from modern thermomechanically strengthened aluminium alloys, there is a problem of producing welded joints with satisfactory mechanical properties without further heat treatment of large-sized products. In the work the formation of joints of thermomechanically strengthened 2219-T87 alloy during flash butt welding was investigated. It was found that a low-temperature resistance heating in combination with a short-term heating by flashing provide the formation of defect-free welded joints. Metallographic examinations showed that the joints are formed through a thin layer of melt, which is a necessary condition for a high-quality welding of aluminium alloys. The influence of intense plastic deformation during upsetting with a forced formation on the morphology of θ -phase (CuAl₂) particles was studied. A decrease in the values of hardness in the joint area as a result of dissolution and coagulation of a strengthening θ' -phase was established. The strength of welded joints both along and across the rolled metal lines amounts to 76 % of the strength of the base metal. 20 Ref., 2 Tabl., 7 Fig.

Key words: aluminium 2219 alloy, flash butt welding, welded joint, mechanical properties.

Надійшла до редакції 05.07.2021

Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

II МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ та МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

6–10 вересня 2021

Одеса, Аркадія, готель «Аркадія»

Генеральний спонсор
ПрАТ «УкрНДІНК»



Офіційний спонсор
ТОВ «НВФ «Діагностичні
прилади»



ОРГАНІЗАТОР КОНФЕРЕНЦІЇ

Міжнародна Асоціація «Зварювання»
вул. Казимира Малевича 11, м. Київ, 03150
тел. +38 (044) 200-82-77, (050) 352-73-50
journal@paton.kiev.ua
posypaiko.yurii@gmail.com
<http://pwi-scientists.com/ukr/nktd2021>