

ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ З'ЄДНАНЬ ПРИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОМУ ЗВАРЮВАННІ СПЛАВУ 2219

В.В. Скрябінський, В.М. Нестеренков, М.О. Русиник

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: skriabinski.vv.555@gmail.com
Плити сплаву 2219 товщиною 40 мм зварювали засобом електронно-променевого зварювання. Вивчали вплив послідовності проведення операцій зварювання та термічної обробки на механічні властивості з'єднань та розподіл твердості у зоні термічного впливу (ЗТВ). Встановлено, що найбільшу міцність мають плити сплаву 2219, які перед зварюванням були загартовані, а після зварювання штучно зістарені. Старіння підвищує тимчасовий опір з'єднань з 300...315 до 385...395 МПа, а твердість металу шва і ЗТВ при цьому зростає на 5...10 одиниць *HRB*. При дослідженні мікроструктури з'єднань виявили, що на відстані близько 1,0 мм від лінії сплавлення в ЗТВ розташована ділянка високотемпературного повернення до загартованого стану. Вона характеризується збільшенням твердості після старіння до рівня твердості основного металу. Вимірюючи термічні цикли зварювання, встановили, що максимальна температура нагрівання цієї ділянки становить близько 590 °С. Далі розташована ділянка відпалу. На цій ділянці спостерігається зниження твердості металу на 2...3 од. *HRB*. Для швидкості зварювання 20 мм/с ширина ЗТВ складає близько 8 мм а штучне старіння, проведене після зварювання, зменшує її до 6 мм. Бібліогр. 8, табл. 3, рис. 6.

Ключові слова: електронно-променево зварювання, алюмінієвий сплав, зварні з'єднання, термічна обробка, механічні властивості, тимчасовий опір

Вступ. Сплав 2219 системи легування Al–6Cu є термічно зміцнюваним сплавом, максимальні механічні властивості якого досягаються після загартування та штучного старіння. Завдяки своїм чудовим механічним властивостям, корозійній стійкості та зварюваності він використовується для створення зварних конструкцій вже понад 50 років. Проте досі підвищення якості зварних з'єднань та стабільності їх механічних властивостей залишається актуальним завданням [1, 2]. Для з'єднання заготовок сплаву 2219 невеликої товщини зазвичай використовували аргонодугове зварювання електродом, що не плавиться, а в останні десятиліття велике поширення набуло зварювання тертям з перемішуванням. При зварюванні деталей великої товщини застосовують спосіб електронно-променевого зварювання.

Міцність зварних з'єднань при будь-якому способі зварювання плавленням буде нижчою за міцність основного металу. Це пов'язано з наявністю ділянки переплавленого металу і прилеглої до неї зони термічного впливу. Для того, щоб підвищити міцність з'єднань після зварювання проводять їх термічну обробку.

Механічні властивості зварних з'єднань сплаву 2219 залежать не тільки від температури та часу термічної обробки, а саме від послідовності проведення загартування, штучного старіння та зварювання. Максимальні механічні властивості зварних з'єднань досягаються шляхом проведення повної

термічної обробки (загартування і старіння) після зварювання. Такий ефект збільшення міцності спостерігається як для зварювання загартованих і штучно зістарених [3], так і відпалених напівфабрикатів [4]. У тих випадках, коли зварюються вироби великих габаритів та їх неможливо чи складно загартувати, після зварювання проводять лише штучне старіння. У роботі [5] показано, що штучне старіння після зварювання покращує структуру та підвищує механічні властивості зварних з'єднань.

При зварюванні алюмінієвих сплавів існує певна кореляція між міцністю та твердістю металу, які, у свою чергу, визначаються його структурою [6]. Характер структурних перетворень та стан твердого розчину в ЗТВ, у таких сплавах, допомагає виявити штучне старіння після зварювання. Ступінь зміцнення металу ЗТВ при штучному старінні дозволяє визначити області високотемпературного повернення до загартованого стану, ступінь відпалу та наявність низькотемпературного повернення [7]. На мікрошліфах буде видно зміни структури металу в цих областях, а вимірюючи термічні цикли зварювання можна визначити температури, за яких відбуваються ці зміни [8].

Мета роботи. Визначити послідовність проведення операцій загартування, штучного старіння та зварювання при якому досягаються максимальні механічні властивості зварних з'єднань великогабаритних виробів із плит алюмінієвого сплаву 2219.

Скрябінський В.В. – <https://orcid.org/0000-0003-4470-3421>, Нестеренков В.М. – <https://orcid.org/0000-0002-7973-1986>,

Русиник М.О. – <https://orcid.org/0000-0002-7591-7169>

© В.В. Скрябінський, В.М. Нестеренков, М.О. Русиник

Таблиця 1. Хімічний склад сплаву 2219

Масова частка хімічних елементів, %								
Al	Cu	Mn	Mg	Fe	Si	Zn	Zr	Ti
Основа	5,8...6,8	0,2...0,4	0,02	0,3	0,2	0,1	0,1...0,25	0,02...0,1

Таблиця 2. Параметри режиму ЕПЗ

Швидкість зварювання, мм/с	Напруга прискорення, кВ	Струм зварювання, мА	Фокус	Траєкторія розгортки	Амплітуда розгортки променя, мм	Частота розгортки променя, Гц
20	60	440	гострий	коло	0,5	630

Матеріал та методики досліджень. Досліджували характер формування зварних швів, розподіл твердості у поперечному перерізі зварних з'єднань, макро- та мікроструктуру металу шва та зони термічного впливу, а також механічні властивості з'єднань. Дослідження проводили на плитах сплаву 2219 завтовшки 40 мм. Стан постачання Т-351 (загартування + механічна деформація + природне старіння). Хімічний склад сплаву наведено у табл. 1.

Зварювання проводили на установці УЛ-209М від джерела живлення ЕЛА 60/60 з напругою прискорення 60 кВ. Параметри режимів зварювання (табл. 2) підбирали таким чином, щоб забезпечити повне проплавлення стику за один прохід з формуванням посилення та зворотного валика шва.

Твердість металу шва та зони термічного впливу вимірювали приладом «Роквелл» з навантаженням на сталеву кульку $P = 600$ Н. Виміри твердості металу шва та ЗТВ проводили на поперечних шліфах для чотирьох варіантів послідовності проведення операцій зварювання та термічної обробки: 1 – загартування – штучне старіння – зварювання; 2 – загартування – штучне старіння – зварювання – повторне штучне старіння; 3 – відпал – зварювання; 4 – відпал – зварювання – штучне старіння.

Електронний промінь є лінійним джерелом нагрівання і, отже, температуру по товщині пластики (або плити) при зварюванні вважають стабільною. У цьому випадку термічні цикли при ЕПЗ плит завтовшки 40 і 10 мм будуть збігатися. З метою спрощення експериментів термічні цикли записували при ЕПЗ плит сплаву 2219 завтовшки 10 мм. Було підібрано режим ЕПЗ, який при швидкості зварювання 20 мм/с, забезпечував отримання зварного шва шириною 2 мм та з паралельними границями сплавлення.

Температуру на поверхні плит вимірювали хромель-алюмелієвими термопарами, виготовленими із дротів діаметром 0,1 мм. Спаї термопар зачеканювали в поглиблення на поверхні плит на відстані 2, 4 та 6 мм від осі зварного шва, що при ширині шва 2 мм становило 1, 3 та 5 мм від лінії сплавлення. Показання термопар записували високошвидкісним самописним вольтметром зі швидкістю протяжки стрічки 100 мм/с.

Виявлення структури зварного з'єднання проводили шляхом електролітичного полірування та

додаткового хімічного травлення у 25%-ому водному розчині плавикової кислоти. Мікроструктуру досліджували на оптичному металографічному мікроскопі «Neophot-32», оснащеному цифровою камерою «Olympus C-500».

Механічні властивості зразків досліджували для трьох варіантів послідовності проведення операцій зварювання та термічної обробки: 1 – загартування – штучне старіння – зварювання; 2 – загартування – штучне старіння – зварювання – повторне штучне старіння; 3 – загартування – зварювання – штучне старіння. Штучне старіння проводили при температурі 175 ± 5 °С протягом 19 год із охолодженням на повітрі.

Тимчасовий опір визначали випробуванням на розтяг стандартних круглих зразків з діаметром робочої частини 4 мм. Випробування на ударний вигин проводили на зразках із надрізом Шарпі по металу шва. Зразки для випробувань вирізали поперек шва, розміщуючи шов по центру зразка.

Результати досліджень та їх обговорення. Поперечний шліф з'єднання плит сплаву 2219 показаний на рис. 1. При зварюванні проходило гарантоване формування посилення і зворотного валика шва (рис. 2). Процес ЕПЗ проходив без виплесків рідкого металу. Незначне розбризкування спостерігали з боку кореня шва.

Режим зварювання забезпечував отримання вузьких швів завширшки близько 2,0 мм з паралельними границями сплавлення. Така форма



Рис. 1. Поперечний шліф з'єднання плит сплаву 2219, завтовшки 40 мм

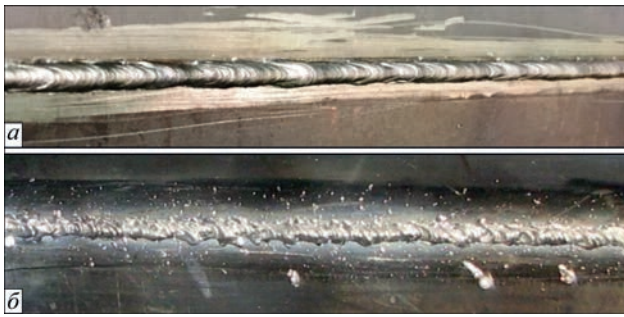


Рис. 2. Зовнішній вигляд зварного шва з'єднання плит сплаву 2219, завтовшки 40 мм зі сторони входу (а) та виходу (б) електронного променя

шва сприяє зменшенню залишкових зварювальних деформацій конструкції. Результати вимірів твердості зварних з'єднань представлені на рис. 3. Твердість основного металу в загартованому та зістареному станах становить 96 од. *HRB*, а твердість металу шва 73 од. *HRB*. Видно, що твердість металу на відстані 1,0 мм від лінії сплавлення на 1...2 од. *HRB* вище, ніж твердість металу на відстані 2,0...3,0 мм від шва. Штучне старіння з'єднань після зварювання збільшує твердість металу шва на 10 од. *HRB*, а твердість металу у ЗТВ збільшується на 3...5 од. *HRB*. Ширина ЗТВ після зварювання складає близько 8 мм, а штучне старіння зменшує її до 6 мм.

При зварюванні відпалених плит твердість металу шва (рис. 4) знаходиться на рівні твердості основного металу (72...73 од. *HRB*), а найбільшу твердість (85 од. *HRB*) набуває метал ЗТВ, розташований на відстані 1,0 мм від лінії сплавлення. При віддаленні лінії сплавлення твердість металу зменшується. Штучне старіння зварних з'єднань зміцнює метал шва та ЗТВ, а їх твердість при цьому зростає на 5...10 од. *HRB*.

Зміни твердості металу ЗТВ є наслідком металургійних процесів, які є у металі під впливом термічного циклу зварювання. Щоб визначити, при яких температурах відбуваються ці зміни, записували термічні цикли зварювання. Експериментально отримані характерні криві зміни

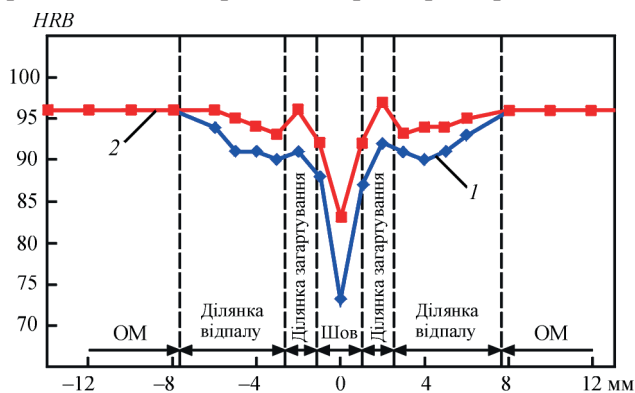


Рис. 3. Розподіл твердості в поперечному перерізі з'єднань загартованих та штучно зістарених плит сплаву 2219 завтовшки 40 мм; 1 – зварні з'єднання; 2 – зварні з'єднання повторно штучно зістарені після зварювання

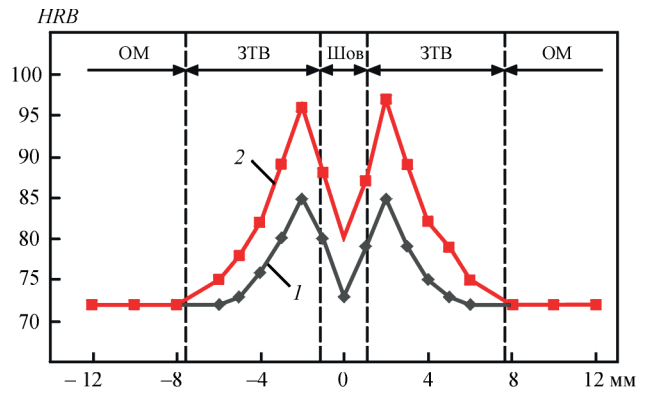


Рис. 4. Розподіл твердості в поперечному перерізі з'єднань відпалених плит сплаву 2219 завтовшки 40 мм; 1 – зварні з'єднання; 2 – зварні з'єднання штучно зістарені після зварювання

температури під час нагрівання та охолодження під впливом термічного циклу зварювання показані на рис. 5. Максимальні температури нагріву для точок, що знаходяться на відстані 2,0, 4,0 та 6,0 мм від осі шва (або 1,0, 3,0 та 5,0 мм від лінії сплавлення) становили 590, 440 та 300 °С відповідно.

Мікроструктура металу шва (рис. 6, а) дисперсна, складається з матриці α -твердого розчину на основі алюмінію і фази CuAl_2 (θ -фаза), яка виділяється вздовж границь та хаотично в тілі зерен. Фаза CuAl_2 (θ -фаза) є основною зміцнюючою фазою в сплавах цієї системи. Лінія сплавлення (рис. 6, б) добре сформована, дефектів на лінії сплавлення не виявлено. Ширина ЗТВ становить до 10 мм від лінії сплавлення. У ділянці ЗТВ, що прилягає до лінії сплавлення, утворюються прошарки легкоплавкої евтектики. На відстані 0,5...3,0 мм від лінії сплавлення розташована ділянка високо-температурного повернення до загартованого стану (рис. 3). Вона характеризується збільшенням твердості після старіння до рівня твердості основного металу. Далі розташована ділянка відпалу.

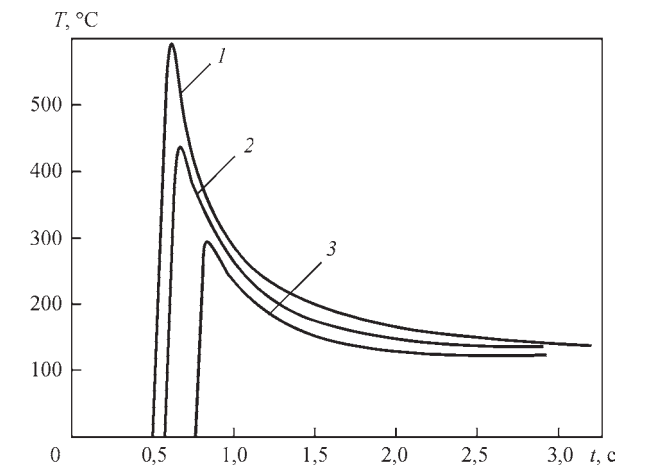


Рис. 5. Термічні цикли точок на поверхні плити сплаву 2219 при ЕПЗ зі швидкістю 20 мм/с (*L* – відстань від середини зварного шва; 1 – 2 мм; 2 – 4; 3 – 6)

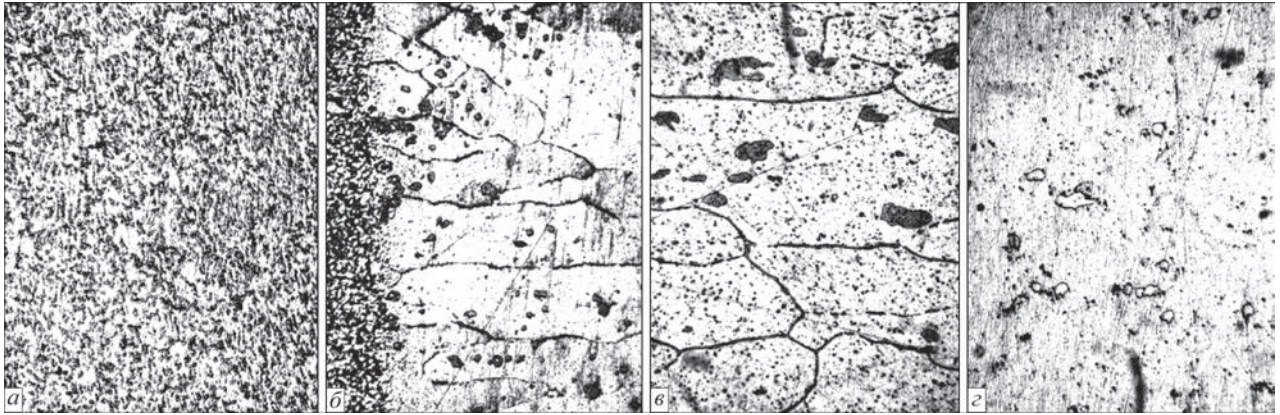


Рис. 6. Мікроструктура металу шва (а) і ЗТВ (б-з) при ЕПЗ плит сплаву 2219 (а – метал шва; б – лінія сплавлення; в – ділянка високотемпературного повернення; з – ділянка відпалу), ($\times 500$, зменшено у 2 рази)

Таблиця 3. Механічні властивості з'єднань плит сплаву 2219 завтовшки 40 мм при різних вихідних станах основного металу та подальшій термічній обробці

Вид обробки		Тимчасовий опір, σ_b , МПа	Відносне подовження, δ , %	Ударна в'язкість, KCV , кгс м/см ²
До зварювання	Після зварювання			
Загартування та штучне старіння	Без термообробки	300,0...315,0	3,0...4,0	4,2...4,7
		308,7	3,3	4,5
Загартування та штучне старіння	Штучне старіння	357,0...367,5	2,6...5,7	1,4...1,7
		361,7	3,6	1,5
Загартування	Штучне старіння	385,0...395,0	3,0...3,0	2,9...3,2
		388,7	3,0	3,0

Примітка: У чисельнику дані мінімальні та максимальні значення 3-х вимірювань; у знаменнику – середнє значення.

На цій ділянці спостерігається зниження твердості металу на 2...3 од. *HRB*.

Досліджували вплив послідовності операцій зварювання та термічної обробки на механічні властивості зварних з'єднань сплаву 2219. Зварювали загартовані плити та плити, які пройшли повну термообробку (загартування та штучне старіння). Загартовані плити і частину плит, що пройшли повну термообробку, штучно зістарили після зварювання.

Результати випробувань зварних з'єднань на статичне розтягування та ударний згин представлені у табл. 3.

Електронно-променеве зварювання характеризується високими швидкостями нагріву та охолодження металу шва та ЗТВ. Такі швидкості охолодження при ЕПЗ сплаву 2219 сприятимуть утворенню твердого розчину міді в металі шва. При подальшому штучному старінні відбувається виділення зміцнюючих фаз і, відповідно, збільшення твердості металу шва.

Підвищення твердості на відстані 1 мм від лінії сплавлення обумовлено короткочасним нагріванням металу до температури загартування та швидким охолодженням. Максимальна температура нагрівання металу становить близько 590 °С. Цю зону прийнято називати зоною високотемпературного повернення до загартованого стану. Після проведення штучного старіння твердість металу тут підвищується до рівня твердості основного металу у стані після загартування і штучного старіння. Рані-

ше цю зону виявляли лише у зварних з'єднаннях, виконаних дуговими способами зварювання [7, 8].

Далі від лінії сплавлення знаходиться зона відпалу, яку називають зоною низькотемпературного повернення. На початку цієї зони максимальна температура складала 440 °С, а в середній частині близько 300 °С. Твердість металу шва та зони високотемпературного повернення при ЕПЗ термооброблених та відпалених плит однакова і не залежить від вихідного стану металу. Як видно з рис. 3 і 4 при зварюванні термічно зміцнених плит сплаву 2219 метал у ЗТВ знеміцнюється, а при зварюванні відпалених плит міцність металу в ЗТВ навпаки збільшується.

У разі зварювання плит, що пройшли повний цикл термічної обробки, тимчасовий опір з'єднань становив 300,0...315,0 МПа. Тимчасовий опір вдалося підвищити до рівня 357,0...367,5 МПа, провівши штучне старіння з'єднань. При цьому ударна в'язкість зменшилася з 4,2...4,7 до 1,4...1,7 кгс м/см². Операція штучного старіння, що проводиться після зварювання, є кращою порівняно зі старінням до зварювання. У цьому випадку тимчасовий опір з'єднань зростає до 385...395 МПа, а ударна в'язкість знижується незначно до рівня 2,9...3,2 кгс м/см². Відносне подовження при цьому змінюється незначно.

Висновки

1. При ЕПЗ загартованих плит сплаву 2219 максимальні механічні властивості з'єднань до-

сягаються шляхом проведення штучного старіння після зварювання.

2. Штучне старіння зварних з'єднань плит сплаву 2219 збільшує твердість металу шва та ЗТВ на 5...10 од. *HRB*.

3. При вимірюваннях твердості ЗТВ з'єднань сплаву 2219, отриманих за допомогою ЕПЗ на відстані близько 1 мм від лінії сплавлення виявлено ділянку високотемпературного повернення до загартованого стану зі збільшенням твердості. Після проведення штучного старіння твердість цієї ділянки збільшується до рівня твердості основного металу в термічно зміцненому стані.

Література/References

1. D.K. Zhang, G.Q. Wang, A.P. Wu, Y. Zhao, Q. Li, X.L. Liu, et al. (2019) Study on the inconsistency in mechanical properties of 2219 aluminium alloy TIG-welded joints. *J. of Alloys and Compounds*, 777, 10, 1044-1053. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838818338568>
2. Tianyi Zhao, Yue Zhao, Zhandong Wan, Pengcheng Shang, Aiping Wu, Quan Li, Dongyang Yan (2023). «Anneal» softening effect of 2219-T8 aluminum alloy joint during welding and its influence on prediction of welding residual stresses. *J. Materials Research Technology*, 24, 5202-5214. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785423007871>
3. Deng-Kui Zhang, Guo-Qing Wang, Ai-Ping Wu, Ji-Guo Shan, Yue Zhao, Tian-Yi Zhao, Dan-Yang Meng, Jian-Ling Song, Zhong-Ping Zhang. (2019) Effects of Post-weld Heat Treatment on Microstructure, Mechanical Properties and the Role of Weld Reinforcement in 2219 Aluminum Alloy TIG-Welded joints. <https://www.amse.org.cn/article/2019/1006-7191/1006-7191-32-6-684.shtml>
4. Y. C. Chen, H. J. Liu, J. C. Feng. (2005) Effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties of 2219-O friction stir welded joints. *J. of Materials Science*, 41 (1), 297–299. <https://www.researchgate.net/publication/227050248>
5. S. Malarvizhi, K. Raghukandan & N. Viswanathan (2008) Effect of post weld aging treatment on tensile properties of electron beam welded AA2219 aluminum alloy. *The International J. of Advanced Manufacturing Technology*, 37, 294–301. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-007-0970-7>
6. Рабкин Д.М., Лозовская А.В., Склабинская И.Е. (1992) *Металловедение сварки алюминия и его сплавов*. Киев, Наукова думка.
Rabkin, D.M., Lozovskaya, A.V., Sklabinskaya, I.E. (1992) *Metals science of aluminium and its alloys*. Kyiv, Naukova Dumka.
7. Лозовская А.В., Чайка А.А., Бондарев А.А., Покляцкий А.Г., Бондарев Андр.А. (2001) Разупрочнение высокопрочных алюминиевых сплавов при различных способах сварки плавлением. *Автоматическая сварка*, 3, 15–19. <https://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2001/as200103all.pdf>
Lozovskaya, A. V., Chaika, A. A., Bondarev, A. A. et al. (2001) Softening of high-strength aluminium alloys in different methods of fusion welding processes. *The Paton Welding J.*, 3, 13-17. <https://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2001/as200103all.pdf>
Lozovskaya A. V., Chaika A. A., Bondarev A. A., Poklyatsky A. G., Bondarev Andr. A. (2001) Softening of high-strength aluminium alloys in different methods of fusion welding *The Paton Welding J.*, 3, 15–19. <https://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2001/as200103all.pdf>
8. Lan-Qiang Niu, Xiao-Yan Li, Liang Zhang, Xiao-Bo Liang, Mian Li (2017) Correlation Between Microstructure and Mechanical Properties of 2219-T8 Aluminum Alloy Joints by VP-TIG Welding. *J. Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 30, (5), 438-446. <https://doi.org/10.1007/s40195-016-0516-9>

IMPACT OF HEAT TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF JOINTS DURING ELECTRON BEAM WELDING OF 2219 ALLOY

V.V. Skryabinsky, V.M. Nesterenkov, M.O. Rusynyk

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

E-mail: skriabinski.vv.555@gmail.com

The plates of 2219 alloy of 40 mm thickness were welded by electron beam welding. The effect of sequence of welding operations and heat treatment on the mechanical properties of joints and distribution of hardness in the heat-affected-zone (HAZ) were studied. It was established that the plates of 2219 alloy, that were hardened before welding and artificially aged after welding, have highest strength. The aging improves the ultimate strength of the joints from 300...315 to 385...395 MPa, and the hardness of the weld and HAZ metal increases by 5...10 *HRB* units. In the study of joints microstructure, it was found that at a distance of about 1.0 mm from the fusion line in HAZ, a region of high-temperature return to the hardened state is located. It is characterized by an increase in hardness after aging to the level of hardness of the base metal. Measuring thermal welding cycles, it was found that the maximum heating temperature of this region is about 590 °C. Next, an annealing region is located. In this region, a decrease in the hardness of metal by 2...3 units *HRB* is observed. For welding speed of 20 mm/s, the width of HAZ is about 8 mm and artificial aging, carried out after welding, reduces it to 6 mm. Ref. 8, Tabl. 3, Fig. 6.

Keywords: electron beam welding, aluminium alloy, welded joints, heat treatment, mechanical properties, ultimate strength

Надійшла до редакції 12.10.2023



join the best: 15 - 19 April 2024
Düsseldorf, Germany