

ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ 1570 ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЙОГО З'ЄДНАНЬ ПРИ КРІОГЕННИХ ТЕМПЕРАТУРАХ*

В.В. Скрябінський¹, В.М. Нестеренков¹, А.В. Микитчик²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
²ДП «Міжнародний центр електронно-променевої технології ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України». 03150, м. Київ, вул. Антоновича, 68

Вивчали особливості електронно-променевого зварювання сплаву 1570 та досліджували механічні властивості його зварних з'єднань в інтервалі температур 20...293 К. Встановлено, що при електронно-променевому зварюванні у сплав 1570 ширина зони термічного впливу не перевищує 4 мм від лінії плавлення, що у 4 рази менше ніж у сплав АМг6Н. У зварному шві, зоні плавлення та ЗТВ тріщини, скупчення евтектичних прошарків та інші дефекти не виявлені. Тимчасовий опір з'єднань сплаву 1570 при зниженні температури випробувань з 293 до 20 К збільшується з 325 до 525 МПа. Умовна межа плинності також підвищується з 210 до 270 МПа, а пластичність змінюється незначно. У той самий час ударна в'язкість знижується з 38 до 9 Дж/см². Коефіцієнт міцності зварних з'єднань при зниженні температури випробувань з 293 до 20 К збільшується з 0,85 до 0,95. В цілому сплав 1570 добре зварюється електронним променем і спосіб електронно-променевого зварювання можна рекомендувати при виготовленні з нього зварних конструкцій ракет та космічних апаратів. Бібліогр. 6, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: електронно-променеве зварювання, алюмінієвий сплав, механічні властивості, зварні з'єднання, криогенні температури

Вступ. Високоміцний сплав 1570 системи Al–Mg призначений для заміни сплаву АМг6 у зварних конструкціях ракет та космічних апаратів. Використання сплаву АМг6 пояснюється такими його перевагами як висока пластичність та корозійна стійкість при задовільній зварюваності. Основним недоліком цього сплаву є відносно низька міцність [1]. Відмінність сплаву 1570 від АМг6 полягає в тому, що він додатково легований елементом скандієм в кількості 0,17...0,27 % і має вищі механічні властивості. Для сплавів системи Al–Mg найефективнішим зміцнювачем є скандій [2]. Високі механічні властивості сплаву обумовлені утворенням дрібнодисперсних зміцнювальних частинок фази Al₃Sc, що виділяються при нагріванні та деформації з пересиченого твердого розчину. По межі плинності напівфабрикати зі сплаву 1570 перевершують аналогічні напівфабрикати зі сплаву АМг6 в 1,5...2,0 рази в залежності від виду напівфабрикату. Застосування сплаву 1570 замість сплаву АМг6 дає вигравш по масі до 20 % [1].

Добавка скандію до сплавів системи Al–Mg покращує їх зварюваність. Наприклад, суттєво збільшується їх стійкість до утворення гарячих тріщин при зварюванні плавленням [1, 3]. Коефіцієнт міцності зварних з'єднань сплаву 1570 становить 0,85...0,95 залежно від типу напівфабри-

кату. Встановлено, що короткочасні нагрівання навколошовної зони сплаву 1570 до 450 °С не супроводжуються зменшенням твердості [4]. Навіть при тривалих нагріваннях (2...10 год) рекристалізаційні процеси в сплав 1570 починаються при температурах вище 400...500 °С залежно від виду напівфабрикату [5]. Пояснюється це високою термічною стабільністю нерекристалізованої структури, обумовленої виділенням вторинних частинок фази Al₃Sc з пересиченого твердого розчину при термомеханічній обробці сплаву.

Одним з основних способів з'єднання елементів конструкцій ракетної техніки з алюмінієвих сплавів є електронно-променеве зварювання (ЕПЗ). Метою даної роботи є вивчення особливостей ЕПЗ сплаву 1570 та дослідження механічних властивостей його зварних з'єднань в інтервалі температур 20...293 К.

Методи дослідження та обладнання. Дослідження проводили на штампованих напівфабрикатах сплаву 1570 товщиною 30, 40 та 60 мм. Напівфабрикати зварювали на електронно-променевої зварювальній установці УЛ 209М з джерелом живлення ЕЛА 60/60 з прискорюючою напругою 60 кВ. Вимірюваннями твердості оцінювали зміни міцності металу шва і ширину зони термічного впливу (ЗТВ). Використовували прилад «Роквел»

* За матеріалами доповіді на X міжнародній конференції «Променеві технології в зварюванні та обробці матеріалів», Одеса, 6–10 вересня 2021 р.

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

А.В. Микитчик – <https://orcid.org/0000-0002-9761-9429>

© В.В. Скрябінський, В.М. Нестеренков, А.В. Микитчик, 2022

Режими ЕПЗ для зварювання напівфабрикатів сплаву 1570 різної товщини

Товщина напівфабрикату, мм	Режими ЕПЗ сплаву 1570			
	$U_{\text{приск}}, \text{кВ}$	$v_{\text{зв}}, \text{мм/с}$	$I_{\text{променя}}, \text{мА}$	Амплітуда розгортки променя, мм
30	60	14...17	220...280	1,0...1,5
40	60	14...17	270...330	1,0...1,5
60	60	10...12	360...420	1,5...2,0

з навантаженням на сталеву кульку 600 Н за шкалою «В». Мікроструктури зварних з'єднань досліджували на поперечних шліфах за допомогою оптичного мікроскопа Neophot.

Механічні властивості штампованого напівфабрикату сплаву 1570 та його зварних з'єднань визначали при температурах 20, 77, 196 і 293 К. На розрив випробовували стандартні зразки ГОСТ 11150-84 тип 1 № 2 (для випробувань при знижених температурах) та зразки з надрізом із таким же діаметром робочої частини. Ударну в'язкість визначали при випробуваннях зразків із надрізом Шарпі.

Експериментальні дослідження та результати.

При зварюванні струм променя та струм фокуруючої лінзи вибирали з умови гарантованого проплавлення та формування зворотного валика шва.

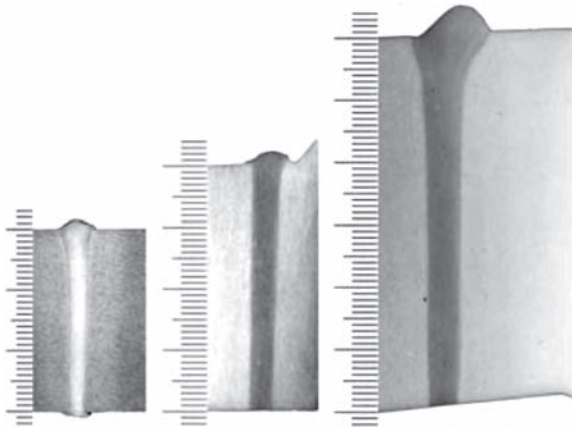


Рис. 1. Макрошліфи з'єднань напівфабрикатів сплаву 1570 товщиною 30, 40 та 60 мм

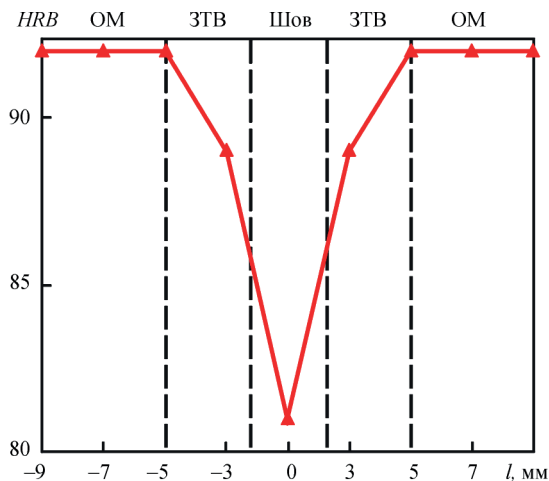


Рис. 2. Розподіл твердості у поперечному перерізі з'єднань штампованих напівфабрикатів сплаву 1570

Режими ЕПЗ для напівфабрикатів різної товщини наведені у таблиці.

Зварні шви мали ширину від 3 до 5 мм при практично паралельних межах зони проплавлення в центральній і нижній частині (рис. 1). Розбрикування, виплески та витікання рідкого металу під час процесу ЕПЗ не спостерігалися.



Рис. 3. Мікроструктура ($\times 200$) металу зварного шва штампованого напівфабрикату сплаву 1570: а – центральна частина шва; б – лінія сплавлення

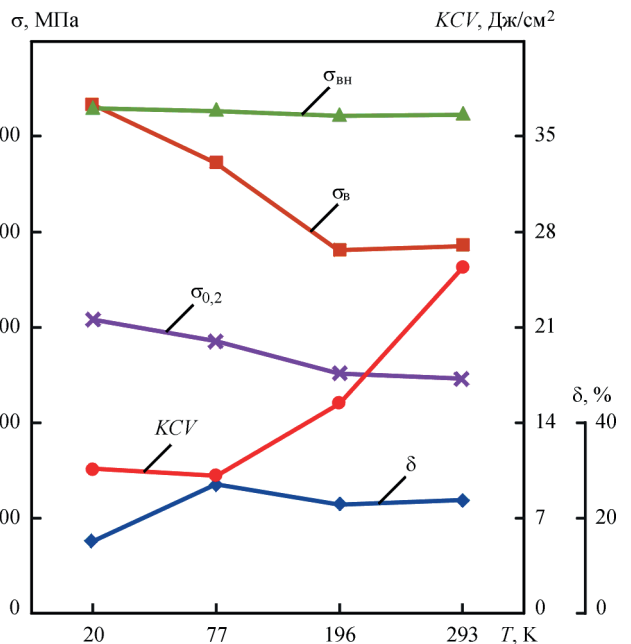


Рис. 4. Залежність механічних властивостей штампованого напівфабрикату сплаву 1570 товщиною 60 мм від температури випробувань.

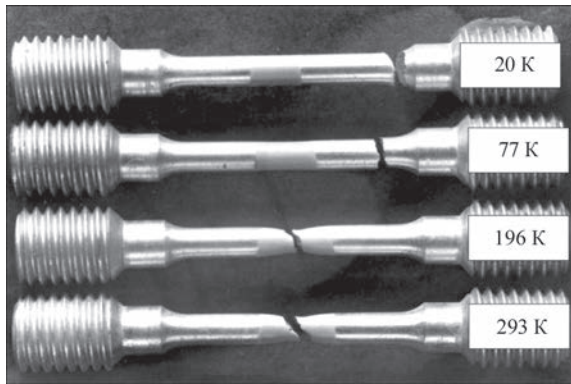


Рис. 5. Характер руйнування зразків, вирізаних зі зварних з'єднань штампованого напівфабрикату сплаву 1570 при різних температурах випробувань

При ЕПЗ сплаву 1570 ширина зони термічного впливу не перевищує 4 мм від лінії сплавлення (рис. 2) незалежно від товщини зварених напівфабрикатів (див. таблицю). Це у 4 рази менше, ніж при ЕПЗ сплаву АМг6Н [6].

Метал шва має однорідну високодисперсну комірчасто-дендритну структуру (рис. 3). У зварному шві, зоні сплавлення та ЗТВ тріщини, скупчення евтектичних прошарків та інші дефекти не виявлені.

Тимчасовий опір основного металу сплаву 1570 при зниженні температури випробувань з 293 до 20 К збільшується з 385 до 535 МПа (рис. 4). Умовна межа плинності також підвищується з 245 до 310 МПа. Відносне подовження зменшується з 24 до 15 %, а ударна в'язкість знижується з 25 до 10 Дж/см². Тимчасовий опір зразків із надрізом становить близько 525 МПа і практично не залежить від температури випробувань.

Особливістю випробувань зварних з'єднань сплаву 1570 є те, що при температурах випробу-

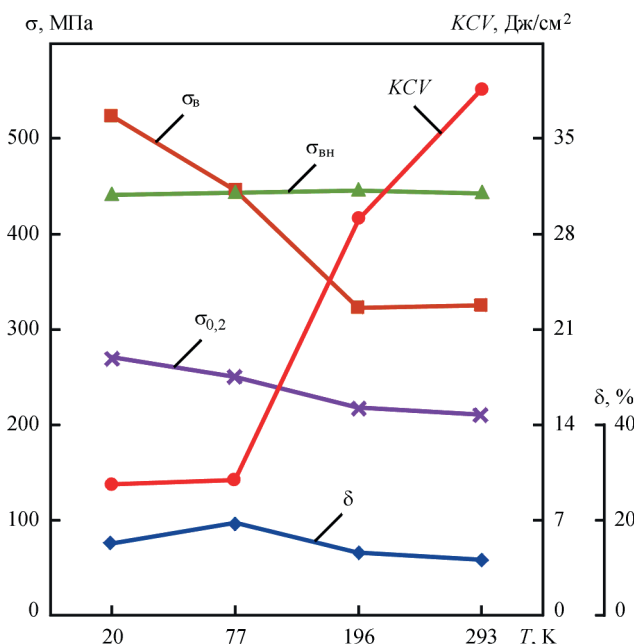


Рис. 6. Залежність механічних властивостей зварних з'єднань сплаву 1570, виконаних способом ЕПЗ, від температури випробувань

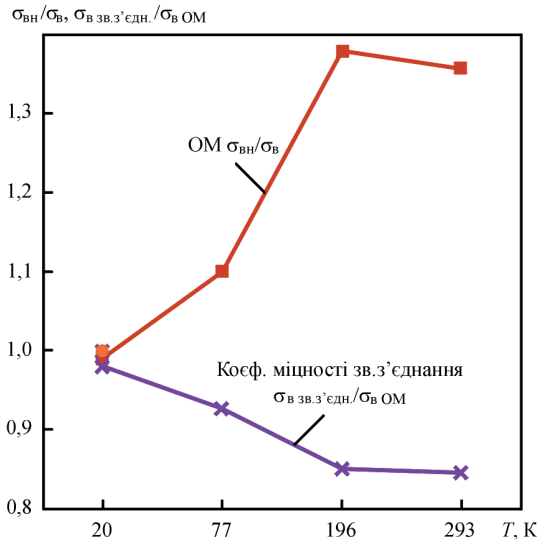


Рис. 7. Вплив температури випробувань на коефіцієнт міцності з'єднань та чутливість до концентраторів напружень штампованого напівфабрикату сплаву 1570

вань 20 і 77 К зразки руйнуються по основному металу за межами ЗТВ (рис. 5). Тимчасовий опір гладких зразків при цьому стає вищим, ніж тимчасовий опір зразків з надрізом і при 20 К досягає 525 МПа (рис. 6). У той самий час ударна в'язкість металу шва знижується з 38 до 9 Дж/см². Тимчасовий опір розривних зразків з надрізом металу шва становить близько 443 МПа при всіх температурах випробувань.

Коефіцієнт міцності зварних з'єднань при зниженні температури випробувань з 293 До 20 К збільшується з 0,85 до 0,95 (рис. 7). Оцінкою чутливості металу до концентраторів напружень служить відношення тимчасового опору зразка з надрізом до тимчасового опору гладкого зразка (σ_{BN}/σ_B). Чутливість до надрізу основного металу та металу шва невисока. Відношення σ_{BN}/σ_B при температурах 293 і 196 К становить не менше 1,3. Зі зниженням температури чутливість основного металу до надрізу збільшується, але навіть при температурі 20 К відношення σ_{BN}/σ_B становить близько одиниці.

Висновки

Проведені дослідження мікроструктури та механічних властивостей з'єднань штампованих напівфабрикатів сплаву 1570, виконаних способом ЕПЗ. Дефектів у зварних з'єднаннях не виявлено. Ширина зони термічного впливу становить до 4 мм від лінії сплавлення і практично не залежить від товщини напівфабрикату, що зварюється. Коефіцієнт міцності зварних з'єднань при зниженні температури випробувань від 293 до 20 К підвищується з 0,85 до 0,95.

Таким чином встановлено, що сплав 1570 добре зварюється електронним променем і спосіб ЕПЗ можна рекомендувати при виготовленні з нього зварних конструкцій ракет та космічних апаратів.

Список літератури

1. Овчинников В.В. (2017) Перспективы развития высокотехнологических деформируемых алюминиевых сплавов для сварных конструкций. Часть 3. *Машиностроение и инженерное образование*, 4, 44–60. https://old.mospolytech.ru/mio/rus_1547816839.pdf
2. Филатов Ю.А. (2014) Сплавы системы Al–Mg–Sc как особая группа деформируемых алюминиевых сплавов. *Технология легких сплавов*, 2, 34–41.
3. Пантелеев М.Д., Бакрадце М.М., Скупов А.А. и др. (2018) Технологические особенности сварки плавлением алюминиевого сплава В-1579. *Авиационные материалы и технологии*, 3, 52, 11–17. https://journal.viam.ru/en/system/files/uploads/pdf/2018/2018_3_2_1.pdf
4. Nesterenkov, V.M., Skryabinsky, V.V., Rusynuk, M.O. (2021) Effect of thermal cycles in electron beam welding of aluminum 1570 alloy on mechanical properties of welded joints. *The Paton Welding J.*, 5, 40–45. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.05.06>
5. Корягин Ю.Д., Ильин С.И. (2017) Особенности рекристаллизации деформируемых алюминий-магниевого сплавов со скандием. *Вестник ЮУрГУ, Металлургия*, 17, 1, 65–72. <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-rekristallizatsii-deformiruemyh-alyuminiy-magnievyyh-splavov-so-skandiem/viewer>
6. Бондарев А.А., Скрябинский В.В. (1985) Влияние технологических факторов на зону разупрочнения сплава АМг6НН при электронно-лучевой сварке. *Автоматическая сварка*, 3, 40–42.

References

1. Ovchinnikov, V.V. (2017) Prospects of development of high-technological wrought aluminium alloys for welded structures. Pt 3. *Mashinostroenie i Inzhenernoe Obrazovanie*, 4, 44–60 [in Russian]. https://old.mospolytech.ru/mio/rus_1547816839.pdf
2. Filatov, Yu.A. (2014) Alloys of Al–Mg–Sc system as a special group of wrought aluminium alloys. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, 2, 34–41 [in Russian].
3. Panteleev, M.D., Bakradze, M.M., Skupov, A.A. et al. (2018) Technological peculiarities of fusion welding of aluminium alloy V-1579. *Aviats. Materialy i Tekhnologii*, 3(52), 11–17 [in Russian]. https://journal.viam.ru/en/system/files/uploads/pdf/2018/2018_3_2_1.pdf
4. Nesterenkov, V.M., Skryabinsky, V.V., Rusynuk, M.O. (2021) Effect of thermal cycles in electron beam welding of aluminum 1570 alloy on mechanical properties of welded joints. *The Paton Welding J.*, 5, 35–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.05.06>
5. Koryagin, Yu.D., Iliin, S.I. (2017) Peculiarities of recrystallization of wrought aluminium-magnesium alloys with scandium. *Vestnik YuUrGU, Metallurgiya*, 17(1), 65–72 [in Russian]. <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-rekristallizatsii-deformiruemyh-alyuminiy-magnievyyh-splavov-so-skandiem/viewer>
6. Bondarev, A.A., Skryabinsky, V.V. (1985) Influence of technological factors on softening zone of AMg6NN alloy in electron beam welding. *Avtomatich. Svarka*, 3, 40–42 [in Russian].

ELECTRON BEAM WELDING OF ALUMINUM 1570 ALLOY AND MECHANICAL PROPERTIES OF ITS JOINTS AT CRYOGENIC TEMPERATURES

V.V. Skryabinsky¹, V.M. Nesterenkov¹, A.V. Mikitchik²¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²SE «International Center for Electron Beam Technologies of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine». 03150, Kyiv, 68 Antonovych Str.

The features of electron beam welding of 1570 alloy were studied and mechanical properties of its welded joints in the temperature range of 20...293 K were investigated. It was found that during electron beam welding in the 1570 alloy, the width of the heat-affected-zone does not exceed 4 mm from the fusion line, which is 4 times lower than in the AMg6N alloy. In the weld, fusion zone and crack HAZ, accumulation of eutectic layers and other defects were not detected. The ultimate strength of the joints of the 1570 alloy at a decrease in the test temperature from 293 to 20 K increases from 325 to 525 MPa. The conditional yield strength is also increased from 210 to 270 MPa, and the ductility changes slightly. At the same time, the impact toughness decreases from 38 to 9 J/cm². The coefficient of strength of welded joints with a decrease in the test temperature from 293 to 20 K increases from 0.85 to 0.95. In general, the 1570 alloy is well welded by electron beam and the method of electron beam welding can be recommended in the manufacture of welded structures of rockets and spacecrafts. 6 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Key words: electron beam welding, aluminum alloy, mechanical properties, welded joints, cryogenic temperatures

Надійшла до редакції 04.11.2021

ЖУРНАЛИ для професіоналів



Видається з 1948 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0005-111X
doi.org/10.37434/as
Передплатний індекс 70031

Видається з 2000 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0957-798X
doi.org/10.37434/trwj
Передплатний індекс 21791



Видається з 1989 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 0235-3474
doi.org/10.37434/tdnk
Передплатний індекс 74475



Видається з 1985 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 2415-8445
doi.org/10.37434/sem
Передплатний індекс 70693