

ВПЛИВ РЕЖИМУ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ, ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ І ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ НА МІЦНІСТЬ З'ЄДНАНЬ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ 1570

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

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

Вивчали вплив швидкості гартування металу шва у процесі ЕПЗ і температури подальшої термічної обробки на міцність зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 1570. Швидкість «гарту» металу шва вимірювали, опускаючи термопару в рідкий метал зварювальної ванни. При збільшенні швидкості зварювання від 2,8 до 16,8 мм/с швидкість «гарту» зростає від $5 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^4$ °C/с і подальша термічна обробка зварних з'єднань збільшує їх міцність до рівня міцності основного металу штампованих напівфабрикатів сплаву 1570. Встановлено, що при електронно-променевому зварюванні швидкість зварювання a , отже, і швидкість «гарту» не впливають на рівень міцності термічно оброблених з'єднань. Оптимальним режимом термічної обробки є штучне старіння, при температурі 350 °C і тривалості 1 год. Підвищити міцність зварних з'єднань сплаву 1570 до рівня міцності прокатаних плит можливо за допомогою холодної пластичної деформації на 30 % або деформацією на 20 % з подальшим штучним старінням. Бібліогр. 10, табл. 3, рис. 9.

Ключові слова: електронно-променеве зварювання, алюмінієвий сплав, зварні з'єднання, швидкість зварювання, термообробка, міцність

Скандій є найбільш ефективним зміцнювачем та модифікатором алюмінієвих сплавів серед інших рідкоземельних металів. Основною перешкодою для широкого застосування скандію в металургії завжди була його висока вартість. Проте розвиток нових технологій вилучення скандію та виробництва лігатур Al–Sc уможливило створення промислових алюмінієвих сплавів системи Al–Mg, легованих скандієм [1].

Високоміцний алюмінієвий сплав 1570 розроблений на основі добре відомого сплаву AMg6. Основна відмінність сплаву 1570 від AMg6 полягає в тому, що він додатково легований елементом скандієм у кількості 0,15...0,35 %. Введення 0,5 % Sc у сплав Al-6,5 % Mg дає підвищення σ_b в 1,5 рази, $\sigma_{0,2}$ в два рази, досягаючи 430 та 260 МПа відповідно [2]. Основне підвищення міцності йде при введенні невеликих добавок скандію (0,2 %). Рівень властивостей міцності сплаву 1570 в значній мірі залежить від виду напівфабрикату і може коливатися в межах від 370 до 450 МПа для σ_b та від 240 до 340 МПа для $\sigma_{0,2}$. Чим вище ступінь деформації при обробці тиском і чим нижче температура обробки тиском, тим вище рівень властивостей міцності. Максимальну міцність мають сильно деформовані холоднокатані листи, а мінімальну – масивні гарячедеформовані напівфабрикати, отримані з малим ступенем деформації [3]. Одна з причин позитивного впливу скан-

дію на характеристики міцності сплавів системи Al–Mg – стабільність, отриману в результаті обробки тиском нерекристалізованої структури, яка обумовлена утворенням вторинних частинок фази Al_3Sc , що виділяються при нагріванні і деформації з пересиченого твердого розчину. Друга причина зміцнення – безпосередня зміцнююча дія частинок фази Al_3Sc [4]. Навіть невеликі добавки скандію (0,15 %) викликають різке підвищення температур початку та кінця рекристалізації [5]. Міцність сплавів Al-6,5 % Mg–Sc залишається практично однаковою до початку рекристалізації, а після її початку змінюється незначно.

Сплави систем Al–Mg–Sc відносять до групи термічно не зміцнюваних, тому що вони не піддаються термічній обробці у вигляді «гарту» і подальшого старіння. Однак, технологічні параметри виробництва напівфабрикатів сплаву 1570 вибирають таким чином, щоб вже при литті злитків забезпечити максимальний перехід скандію в пересичений твердий розчин (тобто гартування) і регламентований розпад цього розчину при наступних нагріваннях (тобто старіння) [6]. Переважний режим штучного старіння визначено в роботі [7], де вивчався вплив температури старіння на твердість та електроопір сплавів Al–Mg–Sc. Було встановлено, що штучне старіння при температурах 150...200 °C супроводжується незначним підвищенням твердості. У разі підвищення

*Під «гартом» автори розуміють надшвидку кристалізацію.

В.В. Скрябінський – <https://orcid.org/0000-0003-4470-3421>, В.М. Нестеренков – <https://orcid.org/0000-0002-7973-1986>, М.О. Русиник – <https://orcid.org/0000-0002-7591-7169>, В.Р. Страшко – <https://orcid.org/0000-0001-6852-3551>

© В.В. Скрябінський, В.М. Нестеренков, М.О. Русиник, В.Р. Страшко, 2020

температури старіння до 250...350 °С спостерігається ефективно зміцнення сплавів. Максимальні значення твердості досягаються після штучного старіння при 350 °С протягом 0,5...1 год. Розпад аномально пересиченого скандієм твердого розчину характеризується високою температурою, коротким інкубаційним періодом та високою стабільністю властивостей при нагріванні до 300 °С. Дані про режими термічної обробки, що зміцнює зварні з'єднання, отримані за допомогою ЕПЗ, в літературі відсутні.

При зварюванні метал шва не піддається обробці тиском і єдиним фактором, що впливає на фіксацію скандію в пересиченому твердому розчині а, отже, і здатність переплавленого металу зміцнюватися при штучному старінні, є швидкість «гарту», тобто в нашому випадку, швидкість охолодження металу зварювальної ванни безпосередньо перед кристалізацією. На дослідних сплавах Al–Mg–Sc, при утриманні скандію 0,4...1,0 % встановлено, що при швидкості «гарту» 10² °С/с скандій частково переходить в пересичений твердий розчин, а частково кристалізується у вигляді інтерметалідів. При швидкості «гарту» 10⁵ °С/с в пересичений твердий розчин переходить значно більше скандію, що сприяє зростанню щільності виділень зміцнюючої фази Al₃Sc, утвореної в процесі старіння, в 10² разів [8, 9]. Використовуючи для зварювання таке висококонцентроване джерело нагріву як електронний промінь, можна в широких межах змінювати швидкість зварювання, змінюючи при цьому швидкість охолодження металу зварювальної ванни, тобто швидкість «гарту». Таким чином, ми, ймовірно, зможемо змінювати кількість скандію, що фіксується в твердому розчині, що дозволить впливати на міцність зварних з'єднань після подальшого штучного старіння.

Метою даної роботи є визначення швидкості «гарту» металу шва при ЕПЗ алюмінієвого сплаву 1570, а також температури штучного старіння і ступеня пластичної деформації зварних з'єднань, що забезпечують максимальне підвищення їх міцності.

Представляло інтерес визначити залежність реальної швидкості охолодження металу зварювальної ванни перед кристалізацією (яка для сплаву 1570 буде швидкістю «гарту» металу шва) від швидкості зварювання. Експерименти проводили при ЕПЗ плит алюмінієвого сплаву АМг6 (найбільш близького за хімічним складом до сплаву 1570), товщиною 15 мм. Режими зварювання були підібрані таким чином, щоб забезпечити гарантоване проплавлення з формуванням рівномірного посилення шва. У хвостову частину зварювальної ванни занурювали спай хромель-алюмелевої

термопар і записували її показники самописним приладом. Записували безпосередньо температуру зварювальної ванни, а миттєву швидкість охолодження визначали як тангенс кута нахилу дотичної до графіка функції температури в точці, що нас цікавить. З метою зменшення інерційності вимірювань діаметр дроту для виготовлення термопар вибирали мінімально можливий (0,1 мм). Показання термопар записували самописним приладом типу НЗ38. Швидкість протягання стрічки становила 100 мм/с. Схема проведення експерименту показана на рис. 1.

Електронним променем 1 зварювали плити сплаву АМг6 з формуванням зварного шва 2. Термопару 3 закріплювали на кінці коромисла 4, розташованого таким чином, що в нижньому положенні кінця коромисла спай термопар опинявся зануреним в рідкий метал ванни на осі зварного шва. Коромисло знаходилося в рівновазі під дією пружини 6 з одного боку і сталевого дроту 5, що утримує, з іншого. Термопару 3 під'єднували до самописного приладу 7. Перед проведенням експерименту термопару 3 піднімали, повертаючи коромисло 4 на кут близько 45° по відношенню до площини плит, що зварюються, розтягуючи пружину 6 і фіксуючи це положення закріпленням кінця дроту 5, що тримає. У цьому положенні схема вимірювання температури зварювальної ванни була готова до роботи. При зварюванні електронний промінь в момент перетину дроту, що тримає, перерізав його, і коромисло під дією пружини опускало спай термопар в хвостову частину зварювальної ванни. Точність опускання регулювали положенням дроту, що тримає, щодо спаяної термопар, виходячи з реальних розмірів зварювальної ванни, виміряних експериментально для різних режимів зварювання. Незважаючи на деяку примітивність схеми вимірювань, вдалося не тільки записати криві охолодження металу шва, а й зафіксувати на них горизонтальні площини, які свідчать про виділення прихованої теплоти кристалізації. Криві охолодження металу зварю-

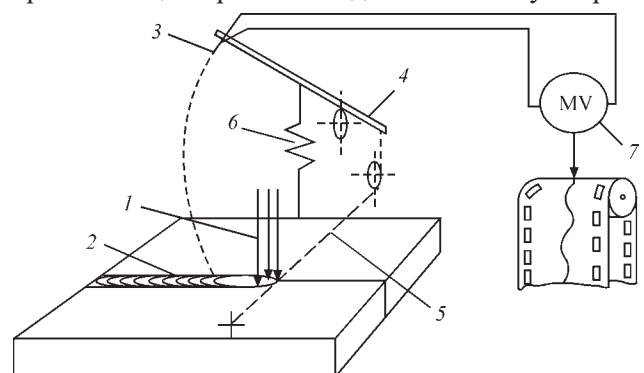


Рис. 1. Схема вимірювання температури металу зварювальної ванни: 1 – електронний промінь; 2 – зварний шов; 3 – термопара; 4 – коромисло; 5 – дріт, що тримає; 6 – пружина; 7 – самописний прилад

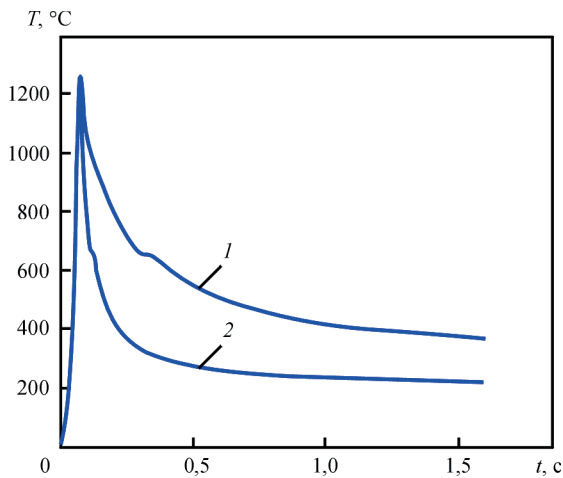


Рис. 2. Приклади експериментально виміряних кривих охолодження металу зварювальної ванни при ЕПЗ сплаву АМг6 з різними швидкостями: 1 – 5,6; 2 – 16,8 мм/с

вальної ванни і зварного шва для різних швидкостей ЕПЗ зображено на рис. 2.

Як видно з рис. 2, на початку кривої спостерігається різкий стрибок температури від 20 до 1200 °С. Далі температура знижується за експоненціальним законом. За отриманими кривими розраховували швидкості охолодження металу зварювальної ванни перед кристалізацією (рис. 3). При підвищенні швидкості зварювання від 2,8 до 16,8 мм/с (від 10 до 60 м/год) швидкість охолодження збільшується з $5 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^4$ °С/с. Необхідно врахувати, що похибка, обумовлена інерційністю схеми вимірювання температури, могла вплинути лише в бік заниження реальних швидкостей охолодження. У зв'язку з цим будемо вважати ці швидкості охолодження мінімальними та при ЕПЗ сплаву 1570 називати їх швидкостями «гарту» металу шва.

Дослідження впливу швидкості «гарту» металу шва на міцність зварних з'єднань проводили на штампованих плитах сплаву 1570 товщиною 30 мм. Експерименти проводили на електронно-променевої зварювальної установці УЛ-209М з джерелом живлення ЕЛА 60/60 з напругою

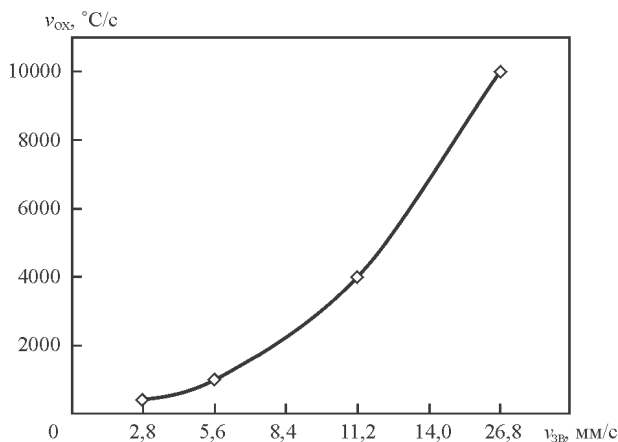


Рис. 3. Залежність швидкості охолодження металу зварювальної ванни перед кристалізацією від швидкості зварювання при ЕПЗ сплаву АМг6

60 кВ. При ЕПЗ струм променя і струм фокусування вибирали з умови гарантованого проплавлення і формування зворотного валика шва. Використовували кругову розгортку променя діаметром 1,5 мм та частотою 600 Гц. Вибрали дві швидкості зварювання: 2,8 та 16,8 мм/с, що відповідають мінімальній та максимальній швидкостям, які використовуються в промисловості при ЕПЗ високоміцних алюмінієвих сплавів [10]. Зовнішній вигляд зварних швів показано на рис. 4.

Поперечні шліфи зварних з'єднань показано на рис. 5.

Зварні шви мають ширину близько 3 мм при практично паралельних межах зони проплавлення в центральній та нижній частинах. З боку входу променя спостерігається збільшення ширини зони проплавлення до 4,5 мм для швидкості зварювання 16,8 та до 6 мм для швидкості 2,8 мм/с. При швидкості зварювання 16,8 мм/с шов має рівномірне посилення з лицьового боку і з боку кореня, а при зварюванні зі швидкістю 2,8 мм/с з

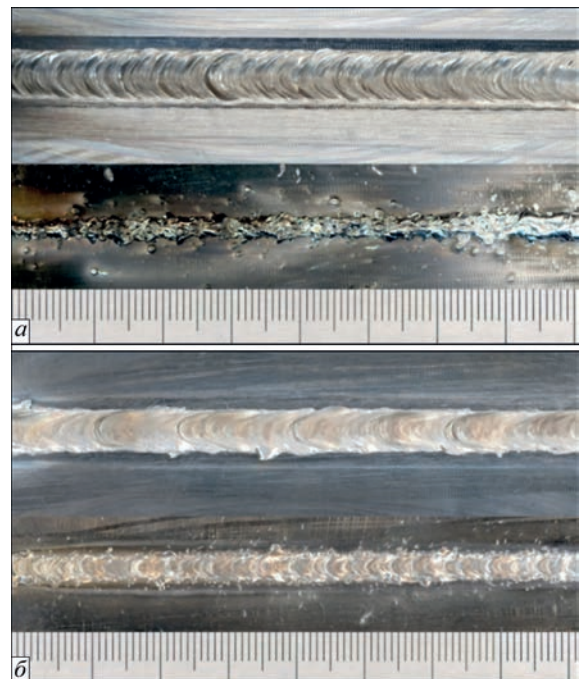


Рис. 4. Лицьова сторона та корінь шва зразків зі штамповок сплаву 1570 товщиною 30 мм, зварених зі швидкостями 2,8 (а) та 16,8 мм/с (б)



Рис. 5. Поперечні шліфи з'єднань плит сплаву 1570, зварених зі швидкістю 2,8 (а) та 16,8 мм/с (б)

Таблиця 1. Хімічний склад основного металу та металу шва штампованого напівфабрикату сплаву 1570, мас. %

Місце визначення	Al	Mg	Mn	Sc	Zr	Si	Fe	Cu	Zn
Основний метал	Основа	6,45	0,32	0,16	0,025	0,041	0,07	0,014	0,02
Зварний шов	-/-	6,35	0,31	0,16	0,025	0,040	0,06	0,015	0,02

боку входу променя шов формувався з заниженням близько 1 мм.

Хімічний склад металу шва і основного металу штампованих плит сплаву 1570 визначали за допомогою устаткування для спектрального аналізу ДФС-36. Результати аналізу наведено в табл. 1. Як видно з таблиці, випаровування легуючих елементів при ЕПЗ сплаву 1570 незначне. Можна відзначити лише невелике зниження вмісту магнію, втрати якого становлять близько 0,1 %.

Вимірами твердості оцінювали ступінь зменшення міцності і зміни властивостей металу шва та зони термічного впливу. Використовували прилад «Роквел» з навантаженням на сталеву кульку 600 Н за шкалою В при діаметрі кульки 1,0 мм. Результати вимірювань показано на рис. 6.

Твердість металу шва після зварювання становить *HRB* 81...82. Штучне старіння при температурі 350 °С підвищує твердість металу шва до *HRB* 92...94 і навіть робить її на 2...3 од. вище твердості основного металу. У доколошовній зоні до і після термообробки спостерігається деяке зниження твердості (на 1...3 од.). Ширина ЗТВ становить близько 3 мм для швидкості зварювання 2,8 мм/с та, відповідно, зменшується при збільшенні швидкості до 16,8 мм/с.

Міцність зварних з'єднань до і після штучного старіння визначали випробуванням на розрив стан-

дартних крутих зразків з діаметром робочої частини 9,0 мм. Результати випробувань наведено в табл. 2.

З табл. 2 видно, що міцність зварних з'єднань як до, так і після термічної обробки мало залежить від швидкості «гарту» металу шва. Руйнування розривних зразків відбувається по ділянці з найменшою міцністю. До проведення штучного старіння такою ділянкою є зварний шов. Після старіння всі зразки зруйнувалися по основному металу за межами ЗТВ, тобто старіння при 350 °С зміцнює метал шва до рівня вище міцності основного металу. Про це також свідчать вимірювання твердості зварних з'єднань. Пояснити це можна тільки тим, що при ЕПЗ сплаву 1570 у твердому розчині металу шва фіксується більша кількість скандію, ніж в самому сплаві при виробництві штампованих напівфабрикатів. Відповідно при подальшій термічній обробці щільність виділення зміцнюючих часток Al_3Sc в зварному шві буде вище, ніж в основному металі. Тобто в діапазоні швидкостей зварювання від 2,8 до 16,8 мм/с міцність металу зварних швів буде вищою міцності основного металу. Таким чином, в тих випадках, коли після зварювання передбачена термічна обробка з'єднань, швидкість ЕПЗ сплаву 1570 можна регулювати в широких межах, не боячись зниження їх міцності.

Дослідження впливу температури штучного старіння на міцність зварних з'єднань сплаву 1570 проводили на прокатаних плитах і штампо-

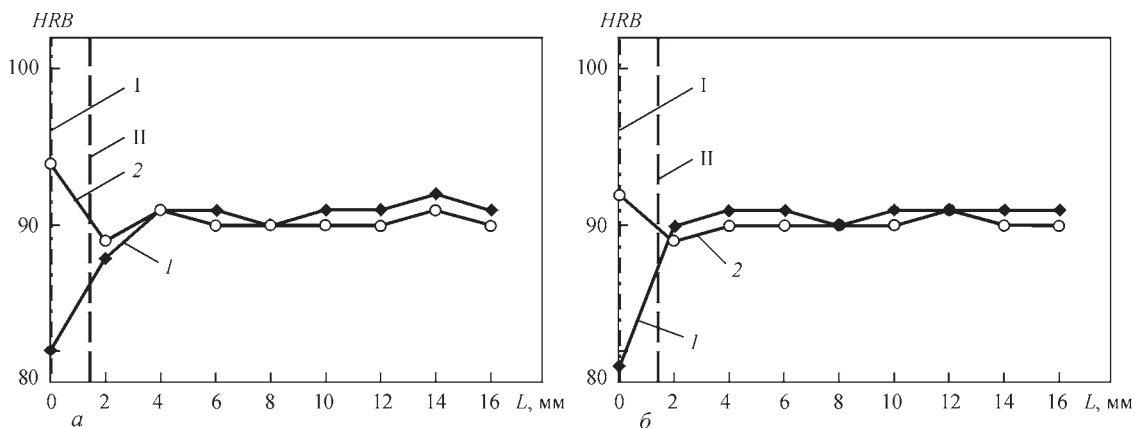


Рис. 6. Розподіл твердості у поперечному перерізі з'єднань, зварених зі швидкістю 2,8 (а) та 16,8 мм/с (б): криві 1 – зварні з'єднання без термообробки; 2 – те саме після штучного старіння при 350 °С; лінії I – вісь шва; II – лінія сплавлення

Таблиця 2. Тимчасовий опір σ_b зварних з'єднань штампованого напівфабрикату сплаву 1570 товщиною 30 мм без термообробки та після штучного старіння для різних швидкостей зварювання

Швидкість зварювання, мм/с	Швидкість «гарту» металу шва, °С/с	σ_b зварного з'єднання, МПа	σ_b зварного з'єднання після штучного старіння при 350 °С, МПа
2,8	$>5 \cdot 10^2$	$\frac{326 \dots 332}{328}$	$\frac{383 \dots 386}{384}$ (*)
16,8	$>1 \cdot 10^4$	$\frac{329 \dots 332}{331}$	$\frac{385 \dots 387}{386}$ (*)

* У чисельнику наведено мінімальне і максимальне значення, в знаменнику – середнє значення трьох вимірів; (*) – руйнування 100 % зразків сталося по основному металу за межами ЗТВ.

ваних напівфабрикатах. Плити товщиною 26 мм зварювали зі швидкістю 14 мм/с, штампування товщиною 60 мм – 1 мм/с. Зварні з’єднання плит штучно зістарили при температурах від 280 до 450 °С протягом 1 год. Залежність міцності з’єднань плит сплаву 1570 від температури старіння показана на рис. 7. Наведені дані показують, що в інтервалі температур 280...340 °С відбувається ефективне зміцнення зварних з’єднань. При температурах 340...360 °С тимчасовий опір з’єднань максимальний, а при подальшому збільшенні температури починає знижуватися. Зниження міцності при температурі старіння вище 360 °С ймовірно обумовлено початком рекристалізаційних процесів. Всі зразки, піддані старінню при температурі 340 °С і вище, зруйнувалися по основному металу за межами ЗТВ (див. рис. 8). Таким чином, оптимальним режимом термообробки з’єднань сплаву 1570, отриманих за допомогою ЕПЗ, є штучне старіння при 350±10 °С протягом 1 год.

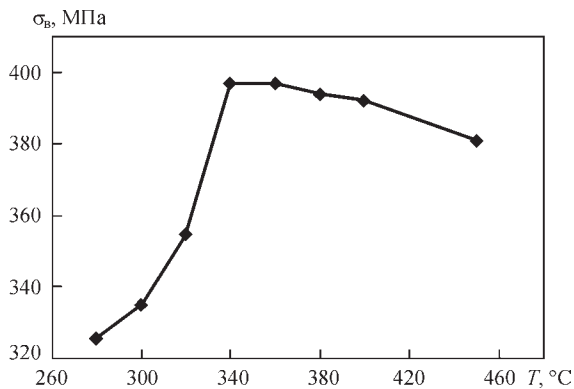


Рис. 7. Залежність тимчасового опору з’єднань плит сплаву 1570 товщиною 26 мм від температури штучного старіння

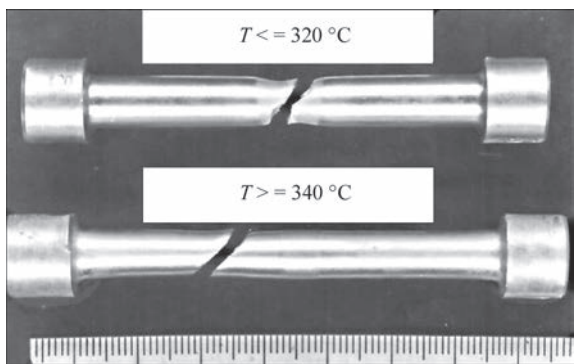


Рис. 8. Характер руйнувань зразків після випробувань на розрив з’єднань сплаву 1570, штучно зістарених при різних температурах

Таблиця 3. Тимчасовий опір σ_b (МПа) основного металу і зварних з’єднань різних напівфабрикатів сплаву 1570 без термообробки і після штучного старіння

Вид напівфабрикату	Основний метал	Зварне з’єднання	Зварне з’єднання після штучного старіння при 320 °С	Зварне з’єднання після штучного старіння при 350 °С
Плита товщиною 26 мм	402...415 410	320...332 (*) 325	347...385 (*) 367	392...402 (**) 396
Штамповка товщиною 60 мм	377...395 385	318...336 (*) 325	372...383 (*) 379	380...390 (**) 384

У чисельнику наведено мінімальне та максимальне значення, в знаменнику – середнє значення п’яти вимірів; () – руйнування зразків сталося по металу шва; (**) – руйнування зразків сталося по основному металу за межами ЗТВ.

У табл. 3 наведено результати випробувань на розрив зразків, вирізаних з основного металу і зварних з’єднань різних напівфабрикатів сплаву 1570 без термообробки і після штучного старіння. З таблиці видно, що старіння зварних з’єднань при температурі 350 °С дає можливість підвищити їх міцність на 50...70 МПа, і досягти рівня міцності основного металу штампованого напівфабрикату сплаву 1570 до зварювання.

З метою досягнення рівномірної міцності зварних з’єднань прокатаних плит сплаву 1570 із основним металом, провели їх холодну пластичну деформацію прокаткою. Перед прокаткою посилення і корінь шва видаляли до рівня поверхні плит. Напрям прокатки збігався з напрямом зварювання. Міцність зварних з’єднань в залежності від ступеня пластичної деформації показано на рис. 9.

Зі збільшенням ступеня деформації від 0 до 40 % міцність з’єднань зростає з 320 до 420 МПа. При пластичній деформації 30 % зварні з’єднання стають рівні за міцністю з основним металом прокатаних плит. Частина зразків після прокатки була термооброблена по режиму, що забезпечує максимальне підвищення міцності з’єднань сплаву 1570 (штучне старіння про 350 °С протягом 1 год). Термообробка збільшує міцність всіх зразків, а для досягнення рівної міцності з’єднань катаних плит з основним металом досить проведення пластичної деформації на 20 %.

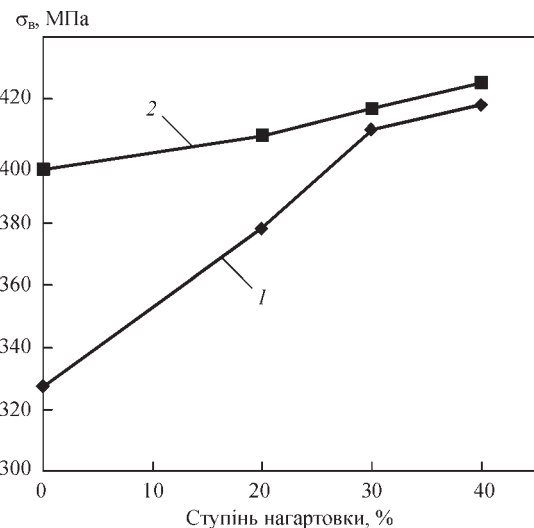


Рис. 9. Тимчасовий опір з’єднань плит сплаву 1570 товщиною 26 мм в залежності від ступеня нагартівки: 1 – зварювання+нагартівка; 2 – зварювання+нагартівка+термообробка

Висновки

1. Проведено вимірювання швидкості «гарту» металу шва при ЕПЗ сплаву Al+6 % Mg та дослідження його впливу на здатність зварних з'єднань сплаву 1570 зміцнюватися при термічній обробці. При збільшенні швидкості зварювання від 2,8 до 16,8 мм/с швидкість «гарту» зростає від $5 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^4$ °C/с. У цьому діапазоні швидкостей «гарту» штучне старіння зварних з'єднань сплаву 1570 збільшує міцність металу шва вище міцності основного металу штамповок. Даний ефект можна пояснити тим, що при ЕПЗ в твердий розчин металу шва переходить більше скандію, ніж це має місце при виробництві напівфабрикатів сплаву 1570. При штучному старінні зварних з'єднань з твердого розчину в металі шва виділяється більша кількість зміцнюючих часток Al₃Sc, ніж в основному металі. Таким чином, в тих випадках, коли після зварювання застосовується штучне старіння з'єднань, їх міцність не залежить від швидкості ЕПЗ.

2. Штучне старіння зварних з'єднань сплаву 1570 тривалістю 1 год дає найбільше підвищення міцності при температурі старіння 350 °C. При цьому зварні з'єднання, отримані за допомогою ЕПЗ, стають рівні за міцністю з основним металом штампованих напівфабрикатів.

3. Отримати зварні з'єднання сплаву 1570 рівними за міцністю з прокатаними плитами можливо за допомогою холодної пластичної деформації на 30 % або деформацією на 20 % з подальшим штучним старінням.

Список літератури

1. Мухачев А.П., Харитоновна Е.А., Скипочка Д.Г. (2016) Скандій і його сплави з алюмінієм. *Вопросы атомной науки и техники*, **1**, 45–50.
2. Дриц М.Е., Торопова Л.С., Быков Ю.Г. (1980) Влияние РЗМ на механические свойства сплава Al-6,5 % Mg. *Металловедение и терм. обработка металлов*, **10**, 35–37.
3. Елагин В.И., Захаров В.В., Ростова Т.Д. и др. (1991) Структура и свойства деформируемых полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, легированных скандием. *Технология легких сплавов*, **12**, 21–28.
4. Дриц М.Е., Павленко С.Г., Торопова Л.С. и др. (1981) О механизме влияния скандия на повышение прочности

и термической стабильности сплавов системы Al–Mg. *ДАН СССР*, **257**, 2, 353–356.

5. Елагин В.И. (1970) О легировании деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами. *Металловедение сплавов легких металлов*. Москва, Наука, сс. 51–59.
6. Филатов Ю.А. (2014) Сплавы системы Al–Mg–Sc как особая группа деформируемых алюминиевых сплавов. *Технология легких сплавов*, **2**, 34–41.
7. Дриц М.Е., Торопова Л.С., Анастасьева Г.К. и др. (1984) Влияние гомогенизирующих нагревов на свойства сплавов систем Al–Sc и Al–Mg–Sc. *Изв. АН СССР. Металлы*, **3**, 196–201.
8. Березина А.Л., Сегида Е.А., Монастырская Т.А., Котко А.В. (2008) Влияние скорости кристаллизации на аномальное пересыщение Al–Mg–Sc сплавов. *Металлофизика и новейшие технологии*, **30**, **6**, 849–857.
9. Федорчук В.Е., Кушнарева О.С., Алексеенко Т.А., Фальченко Ю.В. (2014) Особенности легирования скандием металла швов сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*, **5**, 30–34.
10. Терновой Е.Г., Бондарев А.А. (2012) Электронно-лучевая сварка толстостенных обечаек из алюминиевых сплавов AMg6 и M40. *Там же*, **4**, 8–14.

References

1. Mukhachev, A.P., Kharitonova, E.A., Skipochka, D.G. (2016) Scandium and its alloys with aluminium. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*, **1**, 45–50 [in Russian].
2. Drits, M.E., Toropova, L.S., Bykov, Yu.G. (1980) Influence of REM on mechanical properties of alloy Al-6,5 % Mg. *Metall-ovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **10**, 35–37 [in Russian].
3. Elagin, V.I., Zakharov, V.V., Rostova, T.D. et al. (1991) Structure and properties of wrought semi-finished products from aluminium alloys with scandium. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, **12**, 21–28 [in Russian].
4. Drits, M.E., Pavlenko, S.G., Toropova, L.S. et al. (1981) On mechanism of scandium effect on improvement of strength and thermal stability of alloys of Al–Mg system. *DAN SSSR*, **227**(2), 353–356 [in Russian].
5. Elagin, V.I. (1970) About alloying of wrought aluminium alloys with transition metals. *In book: Physical metallurgy of alloys of light metals*. Moscow, Nauka, 51–59 [in Russian].
6. 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].
7. Drits, M.E., Toropova, L.S., Anastasieva, G.K. et al. (1984) Influence of homogenizing heating on properties of alloys of Al–Sc and Al–Mg–Sc system. *Izv. AN SSSR, Metall*, **3**, 196–201 [in Russian].
8. Berezina, A.L., Segida, E.A., Monastyrskaya, T.A., Kotko, A.V. (2008) Influence of crystallization rate on abnormal oversaturation of Al–Mg–Sc alloys. *Metallofizika i Novejshie Tekhnologii*, **30**(6), 849–857 [in Russian].
9. Fedorchuk, V.E., Kushnaryova, O.S., Alekseenko, T.A., Falchenko, Yu.V. (2014) Peculiarities of alloying of weld metal of high-strength aluminium alloy welded joints with scandium. *The Paton Welding J.*, **5**, 30–34.
10. Ternovoj, E.G., Bondarev, A.A. (2012) Electron beam welding of thick-wall shells of aluminium AMg6 and M40 alloys. *Ibid.*, **4**, 8–14.

EFFECT OF MODE OF ELECTRON BEAM WELDING, HEAT TREATMENT AND PLASTIC DEFORMATION ON STRENGTH OF JOINTS OF ALUMINUM 1570 ALLOY

V.V. Skryabinsky, V.M. Nesterenkov, M.O. Rusnyk, V.R. Strashko

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The effect of the rate of hardening the weld metal during EBW process and the temperature of the subsequent heat treatment on the strength of welded joints of aluminum 1570 alloy was studied. The rate of “hardening” the weld metal was measured by submerging thermocouple into the molten metal of weld pool. At the increase in welding speed from 2.8 to 16.8 mm/s, the rate of “hardening” grows from $5 \cdot 10^2$ to $1 \cdot 10^4$ °C/s and the subsequent heat treatment of welded joints increases their strength to the level of strength of the base metal of stamped semi-finished products of 1570 alloy. It was established that during electron beam welding, the welding speed and, consequently, the rate of «hardening» do not affect the strength level of heat treated joints. The optimal mode of heat treatment is artificial aging at a temperature of 350 °C and 1 hour duration. It is possible to increase the strength of welded joints of 1570 alloy to the level of strength of rolled plates by 30% applying a cold plastic deformation or by 20% applying deformation with a subsequent artificial aging. 10 Ref., 3 Tabl., 9 Fig.

Keywords: electron beam welding, aluminum alloy, welded joints, welding speed, heat treatment, strength

Надійшла до редакції 14.04.2020