

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона

На правах рукопису

**СКРЯБІНСЬКИЙ**  
*Володимир Вікторович*

УДК 621.791.72:669.715

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ  
ЕЛЕКТРОННОПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ  
ВИСОКОМІЦНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ 1570 І 1460  
З РЕГУЛЮВАННЯМ РОЗПОДІЛУ ГУСТИНИ  
ПОТУЖНОСТІ ПРОМЕНЯ

05.03.06 —

технологія та машини зварювального виробництва

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ 1994

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в ІЕЗ ім.Є.О.Патона АН України.

Науковий керівник : доктор технічних наук Бондарев А.А.

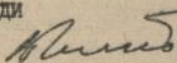
Офіційні опоненти : доктор технічних наук Нероденко М.М. ;  
кандидат технічних наук Аюп'янци К.С.

Провідне підприємство : НПО "Молния",  
м. Москва.

Захист відбудеться "20 КВІТНЯ" 1994 р. о     годині  
на засіданні спеціалізованої вченої ради КО16.08.01 в  
Інституті електрозварювання ім. Є.О.Патона АН України  
(252650, Київ 5, МПС, вул. Боженко, 11).

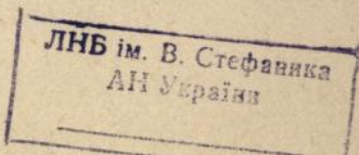
З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній  
бібліотеці інституту.

Автореферат розісланий "16" 03" 1994 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
канд. техн. наук  Нестеренков В.М.

Підп. до друку 18.02.94. Формат 60x84/16. Пап офс. № 2. Офс. друк.  
Ум. друк. арк. 0,93. Ум. фарбо-відб. 1,16. Обл.-вид. арк. 0,97. Ти-  
раж 120 прим. Зам. 58. Безкоштовно.

ІЕЗ ім. Є.О.Патона 252650, Київ 5, МСП, вул. Горького, 69.  
ПОД ІЕЗ ім. Є.О.Патона. 252650 Київ 5, МСП, вул. Горького, 69.



ЛНБ України ім. В. Стефаніка



00756712 (S)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Ефективним способом з'єднання нових конструкційних матеріалів є електроннопроменеве зварювання (ЕПЗ). Висока питомі концентрація енергії в плямі нагріву, надійний вакуумний захист розплавленого металу зварювальної ванни та низькі значення погонної енергії дозволяють підвищити якість і показники міцності з'єднань алюмінієвих сплавів, які виконані за допомогою цього способу. Незважаючи на наявність великого арсеналу засобів управління променем і різних способів ЕПЗ, іноді цього виявляється замало для вирішення складних технологічних задач, наприклад: одержання необхідної форми та розмірів зони проплавлення, усунення пористості і кореневих дефектів при неповному проплавленні, одержання однорідної міждисперсної структури шва і т.і.

На цей час розроблено нові д. формаційнодатні високоміцні сплави на алюмінієвій основі 1570 системи Al-Mg-Mn-Sc і 1460 системи Al-Cu-Li-Sc, що відрізняються від широко використовуваних в авіакосмічній промисловості сплавів AMg6 і 1201 більш високими механічними властивостями при кімнатній та криогенній температурах і призначені для їх заміни в високонавантажених зварних конструкціях. Однак, при їх зварюванні виникають додаткові труднощі із-за підвищеної схильності сплавів до утворення пористості і порожнин в металі шва. Для досягнення високої якості та надійності зварних конструкцій, що виготовляються із сплавів 1570 та 1460, виникла необхідність розробки принципово нових способів та прийомів зварювання, які забезпечували б одержання бездефектних з'єднань.

Метов дисертаційної роботи є розробка технології ЕПЗ дискретноскануючим променем з програмованим часом затримки променя в точках дискрету стосовно до великогабаритних конструкцій нової техніки із високоміцних алюмінієвих сплавів 1570 і 1460 товщиною до 100 мм, яка б забезпечувала високу якість та необхідний рівень характеристик міцності з'єднань в інтервалі температур 20...293 К.

Методи досліджень. В роботі використано методики ультразвукового і рентгенографічного контролю щільності зварних з'єднань, оптична металогія і емісійний спектральний аналіз, локальний масспектральний аналіз, випробування механічних властивостей з'єднань в інтервалі температур

20...293 К. При розрахунках параметрів режиму зварювання і геометрії зони проплавлення використано чисельні методи інтегрування і диференціювання. Розрахунки виконувались на персональному комп'ютері ІЕМ РС/АТ.

#### Наукова новизна.

1. Встановлено, що дискретне сканування променя дозволяє ефективно керувати розподілом тепловкладення в межах плями нагріву при ЕПЗ, що дає можливість регулювати форму зони проплавлення, впливати на структуру та властивості зварних з'єднань, а також інтенсифікувати процес дегазації рідкого металу і тим самим знизити в 2 - 2,5 рази кількість порожнин в металі шва.

2. Доведено, що прямокутна форма зони проплавлення сприяє зменшенню імовірності утворення кореневих дефектів при неповному проплавленні, а також грубої шаруватої структурної неоднорідності швів. Встановлено, що частота сканування променя також впливає на створення структурної неоднорідності металу шва. Для отримання швів з однорідною структурою необхідно використовувати розгортки променя з частотою більше 500 Гц.

3. Показано, що на просторовий розподіл густини потужності дискретносканувачого електронного променя впливає не тільки траєкторія і амплітуда, але й частота розгортки. Розроблені методики і комп'ютерні програми для розрахунку: розподілу густини потужності променя при дискретних розгортках, враховуючи частоту і амплітуду розгортки, ступінь фокусування і координати дискретних положень променя, а також відносний час його затримки в точках дискрету; параметрів режиму ЕПЗ, що дозволяє з високою точністю одержувати потрібну форму і розміри зони проплавлення.

4. Виявлено, що коефіцієнт міцності зварних з'єднань в інтервалі температур 20...293 К складає не менш як 0,85 для сплаву 1570 та лише 0,52 для сплаву 1460.

Показано, що використання присадкового матеріалу зі сплаву 1201 сприяє зміцненню металу шва при ЕПЗ сплаву 1460. Надійно реалізувати процес зварювання з присадковим матеріалом вдається при допомозі дискретного сканування променя, коли мінімальне тепловкладення припадає на присадку. В цьому випадку руйнування розривних зразків відбувається не по шву, а по зоні термічного впливу.

Встановлено, що штучне старіння при температурі 340...360 °С на протязі 1 години підвищує властивості з'єднань сплаву 1570 до рівня міцності основного металу штампованих напівфабрикатів за рахунок виділення з перенасиченого скандієм твердого розчину металу шва вторинних частинок  $ScAl_3$ , причому фіксація перенасиченого твердого розчину Sc в Al можлива тільки при високих швидкостях охолодження рідкого металу, властивих ЕПЗ.

Практична цінність. Розроблено технологію зварювання нових високоміцних алюмінієвих сплавів 1570 та 1460 дискретноскануючим променем, яка дозволяє цілеспрямовано керувати формою зони проплавлення, попереджувати появу таких дефектів швів як пористість і груба шарувата структурна неоднорідність, а також одержувати з'єднання з контрольованим складом металу шва при зварюванні різнорідних сплавів. Запропоновано методику розрахунку параметрів режиму зварювання дискретноскануючим променем.

На захист виносяться: закономірності впливу параметрів дискретного сканування променя та режиму ЕПЗ на утворення пористості і формування структури металу шва; методика розрахунку просторового розподілу густини потужності електронного променя і параметрів режиму зварювання дискретноскануючим променем, які дозволяють одержати задану форму та розміри зони проплавлення; технологічні прийоми і способи підвищення властивостей зварних з'єднань сплавів 1570 і 1460 за рахунок додаткового легування металу шва, а також проведення термічної і термомеханічної обробки; принципова технологія електроннопроменевого зварювання великогабаритних конструкцій нової техніки з застосуванням сплавів 1570 і 1460, включаючи технологію зварювання різнорідних сплавів 1460 + 1201.

Апробація роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на всесоюзній науково-технічній конференції "Актуальні проблеми зварювання кольорових металів" (м. Тольятті, 1986), 1-й конференції молодих вчених та спеціалістів (м. Київ, 1987), конференції "Сучасний стан, проблеми і перспективи енергетики та технології в енергобудуванні" (м. Іваново, 1989), Всесоюзних науково-технічних конференціях "Сталі і сплави в криогенній техніці" (м. Батумі, 1990), "Актуальні проблеми зварювання

кольорових металів" (м. Маріуполь, 1990), "Концентровані потоки енергії в обробці і з'єднанні матеріалів" (м. Пенза, 1991), міжнародній науково-технічній конференції "Кріогенні матеріали" (м. Київ, 1992), "Електронно-променево зварювання" (м. Москва, 1993). У загальному вигляді робота обговорювалася на спеціалізованому семінарі ІЕЗ ім. Є.О.Патона.

Публікації. Відповідно до теми дисертації опубліковано 15 робіт, одержано 2 авторських свідоцтва.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (149 найменувань) та додатків. Матеріал дисертації викладений на 186 сторінках машинописного тексту, а 24 таблицями та 57 ілюстраціями включно.

У вступу обґрунтована актуальність теми, сформульовано основні положення, що виносяться на захист.

У першому розділі на основі аналізу літературних даних розглянуто особливості структури і властивостей, а також зварюваність нових високсміцних алюмінієвих сплавів 1570 та 1460. Показано, що найбільш перспективним способом з'єднання напівфабрикатів сплавів 1570 та 1460 товщиною до 100 мм є електроннопроменево зварювання. Проведено порівняльний аналіз різних способів керування електронним променем, їх технологічних можливостей і визначено шляхи їх подальшого розвитку. Обґрунтовано мету і задачі досліджень.

У другому розділі розроблено методику розрахунку розподілу густини потужності електронного променя. Досліджено технологічні можливості способу ЕПЗ дискретноскануючим променем і розроблено наукові основи зварювання сплавів 1570 та 1460 з програмуванням тепловкладення в межах плями нагріву.

У третьому розділі досліджено механічні властивості та чутливість до концентраторів напружень в інтервалі температур 20...293 К основного металу та аварних з'єднань сплавів 1570 і 1460, одержаних методом ЕПЗ. Розроблено способи підвищення міцності зварних з'єднань цих сплавів шляхом проведення термічної та термомеханічної обробки, а також за допомогою додаткового легування металу шва.

Четвертий розділ присвячено розробці технології електроннопроменевого зварювання оболонкових конструкцій і шпангоутів великої товщини зі сплавів 1570 і 1460, а технологією зварювання різнорідних сплавів 1460 + 1201.

### СТИСЛИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Легування скандієм і літійем алюмінієвих сплавів підвищує їх міцність та зменшує питому вагу, а також зменшує чутливість до термічного циклу зварювання. Ці властивості роблять сплави 1570 та 1460 перспективними для використання в аварних конструкціях літальних апаратів. Однак, легування літійем значно підвищує схильність сплавів до утворення пор та несучільностей в металі шва, що утруднює одержання якісних з'єднань традиційними способами ЕПЗ.

В роботах Рижкова, Постнікова, Ланкіна, Арати та др. показано, що застосування сканування променя в процесі ЕПЗ суттєво розширює технологічні можливості процесу і дозволяє вирішувати цілу низку задач, які неможливо було б вирішити, використовуючи статичний промінь. Основний ефект сканування виявляється в зміні розподілу густини потужності електронного променя. При цьому змінюється конфігурація зварювальної ванни та динаміка рідкого металу. Найбільш перспективним в цьому напрямі видається розвиток зварювання з програмуванням тепловкладення в межах плями нагріву. Цей принцип здійснюється шляхом дискретного сканування променя, коли в межах обраної траєкторії сканування промінь зупиняють в точках дискрету і регулюють час його затримки в кожній конкретній точці, створюючи, тим самим, практично будь-який просторовий розподіл густини потужності електронного променя, необхідний для вирішення конкретних технологічних задач.

#### Розрахунок розподілу густини потужності променя.

Виявлено, що результуючий розподіл густини потужності променя при дискретній розгортці визначається такими параметрами:

- а) амплітудов відхилення променя;
- б) ефективним радіусом променя ( $r_2$ );
- в) частотою розгортки;
- г) координатами  $N$  дискретних положень променя;
- д) відносним часом затримки променя у точках дискрету.

Густина потужності електронного променя в кожній точці розгортки пропорційна часові перебування останнього в ній. З урахуванням впливу сусідніх точок, зумовленого скінченними розмірами електронного променя, а також впливом променя в момент переходу його із однієї точки дискрету до другої,

відносна густина його потужності в  $i$ -й точці розраховується за формулою:

$$q(x_i, y_i) = \sum_{j=1}^N \exp\left(-\frac{r_{ij}^2}{2r_e^2}\right) t_j + A \sum_{j=1}^N \exp\left(-\frac{r_{ik}^2}{2r_e^2}\right) t_{j(j-1)}, \quad (1)$$

де  $r_{ij}$  - відстань між розрахунковою точкою  $i$  та  $j$ -ю точкою дискрету розгортки;

$t_j$  - відносна тривалість перебування променя в  $j$ -й точці дискрету;

$A$  - коефіцієнт, який враховує співвідношення між максимальними інтенсивностями точкових і лінійних джерел;

$r_{ik}$  - відстань між розрахунковою точкою  $i$  та лінійним джерелом;

$t_{j(j-1)}$  - час, за який промінь переходить з точки дискрету  $j-1$  в точку  $j$ .

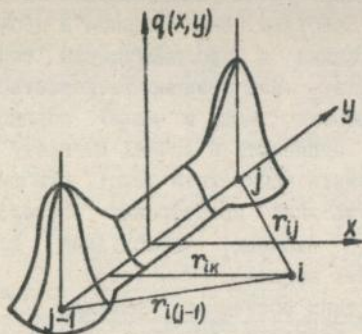


Рис. 1. Схема розрахунку розподілу густини потужності електронного променя при дискретній розгортці.

Розрахункова схема з урахуванням як часу аупинки променя в точках дискрету, так і часу його переходу із одної точки в другу показана на рисунку 1. Як видно з рівняння 1, результуючий розподіл густини потужності електронного променя визначається як сума впливів  $N$  нормальних точкових та  $N$  нормальних лінійних джерел нагріву.

Розрахунок розподілу густини потужності електронного променя є досить складною задачею навіть при використанні найпростіших траєкторій розгортки.

А оскільки в сучасних цифрових системах використовуються растри на 32, 64, 128 і більше точок, дану задачу з достатньою точністю можна розв'язати тільки з допомогою комп'ютера. В зв'язку з цим було розроблено програму для розрахунку на ЕОМ розподілу густини потужності променя при дискретній розгортці. Результати розрахунків розподілів густини потужності променя для двоточкової та колової розгортки показані на рисунку 2.

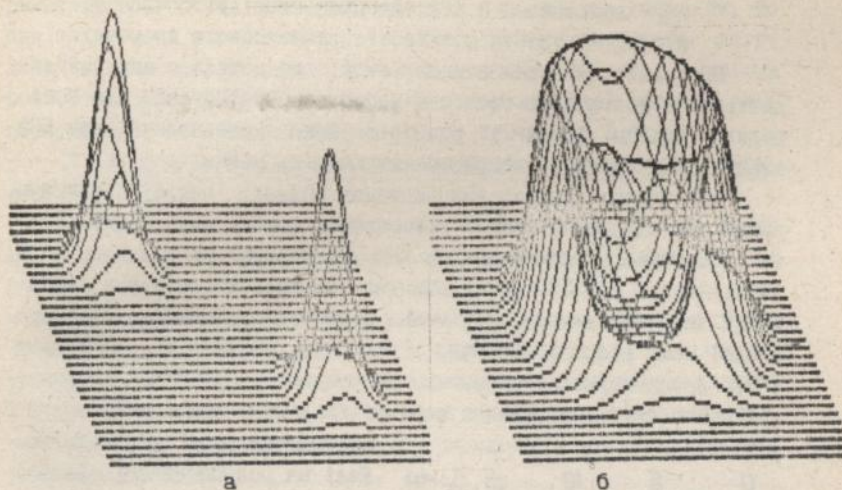


Рис. 2. Об'ємне зображення розподілу густини потужності променя при двухточковій (а) та коловій (б) розгортці, одержане розрахунковим шляхом на комп'ютері. (Амплітуда розгортки = 5 мм; ефект. радіус променя = 0,5 мм).

Регулювання розподілу густини потужності променя дозволяє ефективно вирішувати такі технологічні завдання:

1. Керування формою зони проплавлення.

Більшість існуючих моделей процесу ЕПЗ дозволяють з різним ступенем точності оцінити ширину і глибину зони проплавлення. Найбільш повне уявлення про вплив параметрів ЕПЗ на геометрію зони проплавлення дає модель, запропонована в роботах Лескова та Селодта. В цій моделі шляхом розв'язання рівняння закону збереження енергії для елемента поверхні каналу виводиться рівняння, яке описує форму передньої стінки каналу проплавлення:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\gamma \cdot v_{\text{св}} : G}{\eta_{\text{п}} q'(x, y)}, \quad (2)$$

де  $\alpha$  - кут нахилу передньої стінки каналу проплавлення по відношенню до напрямку променя;

$v_{\text{св}}$  - швидкість зварювання;

$\gamma$  - питома вага металу, що зварюється;

$G$  - тепловкладення 1 грама розплавленого металу;

$\eta_{\text{м}}$  - ефективний к.к.д. джерела нагріву;

$q(x, y)$  - густина потужності електронного променя.

Проведені експерименти показали, що модель, яка розглядається, з достатньою точністю можна використовувати для попередньої оцінки форми і розмірів зони проплавлення при ЕПЗ алюмінієвих сплавів дискретноскануючим променем.

Розглянемо приклад використання моделі, яку було описано вище, для одержання швів з прямокутною формою зони проплавлення. Ця форма є найкращою при ЕПЗ з неповним проплавленням з точки зору зменшення кутових залишкових зварювальних деформацій та попередження виникнення кореневих дефектів. За допомогою комп'ютерної програми, яку було складено за рівняннями 1-2, розраховуються параметри дискретної розгортки променя, які забезпечують одержання заданої (в даному випадку прямокутної) форми зони проплавлення.

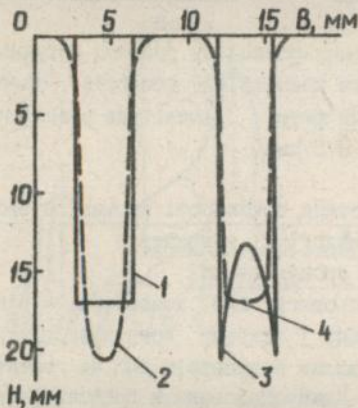


Рис. 3. Розрахунковий розподіл густини потужності електронного променя в площині, перпендикулярній до напрямку зварювання (1,3) та форма зони проплавлення (2,4);

1,2 - підбір режиму ЕПЗ;

3,4 - робочий режим ЕПЗ.

Далі на розрахованому режимі проводять зварювання дослідного зразка металу та порівняння розрахункової і експериментальної форми зони проплавлення. На рисунку 3 показано розрахункову - 1 та експериментальну - 2 форми зони проплавлення, одержані на зразку алюмінієвого сплаву 1570. За допомогою графічного порівняння кривих 1 і 2 будеться крива 3, яка показує, наскільки треба перерозподілити густину потужності електронного променя для того, щоб реальний поперечний переріз шва відповідав заданому. Після цього розрахунок параметрів розгортки променя повторюють з тією ж міною, що за потрібну форму зони проплавлення приймають криву 3. Крива 4 показує поперечний

переріз шва, який було реально отримано після коректування параметрів розгортки. Експериментальні дослідження показали, що при зварюванні алюмінієвих сплавів з різними системами легування в діапазоні швидкостей зварювання 40...80 м/г і амплітуд розгортки 1,5...5,0 мм відхилення розрахункової форми зони проплавлення від експериментальної не перевищує 5 %.

## 2. Запобігання утворенню шарової структурної неоднорідності швів.

Одним із дефектів металургійного характеру, який важко визначити, є груба структурна шарова неоднорідність металу шва, що може стати причиною зниження механічних властивостей з'єднань алюмінієвих сплавів до 40 %. Мікроструктура таких швів являє собою шари крупних і мідких дендритів, які чергуються, що свідчить про суттєві відмінності умов кристалізації цих зон. На межах шарів утворюються значні скупчення евтектики, мікропор та мікрокрихкот, які визначають місце і характер руйнування з'єднань.

На кристалізацію металу шва значною мірою впливає як динаміка ванни рідкого металу, так і градієнт температури на межі твердої і рідкої фази. Експериментальними дослідженнями доведено, що найбільша структурна неоднорідність при ЕІЗ сплавів 1570 та 1460 спостерігається на ділянках з'єднання з підвищеними градієнтами температур, що має місце в кореневій частині шва при кіндзальній формі зони проплавлення. Найбільш однорідну структуру мають шви прямокутної форми (з паралельними боковими стінками).

Динамічні збурення рідкого металу ванни можуть бути викликані електронним променем, що коливається з невеликою частотою - 10...30 Гц, а також у випадку співпадіння частоти розгортки з частотою пульсацій прискорюючої напруги і струму променя. При порівняно великих частотах розгортки (500 Гц і більше) потужність променя розподіляється вдовж траєкторії розгортки практично рівномірно і не впливає на динаміку рідкого металу. Таким чином, для запобігання утворення грубої структурної неоднорідності швів рекомендується використовувати частоту сканування променя вище 500 Гц, а решту параметрів розгортки вибирати із того розрахунку, щоб форма зони проплавлення наближалась до прямокутної.

### 3. Інтенсифікація процесу дегазації металу зварювальної ванни.

Змінюючи розподіл густини потужності променя вдовж позадочної осі зварювальної ванни, можна регулювати час існування рідкої фази, а, отже, впливати на дегазацію металу. При ЕПЗ схильного до виникнення пор сплаву 1460 вдалося досягти зниження пористості з'єднань більш ніж у 2 рази, збільшивши час існування рідкої фази в 1,5 рази за рахунок використання розгортки променя з більшим тепловкладенням на фронті плавлення по відношенню до хвостової частини ванни. Вплив регулювання тепловкладення на дегазацію металу ванни підтверджується локальним маспектральним аналізом розчиненого в металі шва водню.

### 4. Зварювання різномірних сплавів.

Розрахунок параметрів розгортки променя в даному випадку ґрунтується на тому, що співвідношення потужностей променя  $q_1/q_2$ , що припадають на зварювані кромки сплавів, повинно бути пропорційним співвідношенню кількостей тепла, необхідного для розплавлення одиниці об'єму кожного сплаву  $Q_1/Q_2$ . Причому:

$$Q = \gamma \eta_r \text{Сср.} (T_{пл.} - T_{поч.}) + W, \quad (3)$$

де  $\gamma$  - густина сплаву;

$\eta_r$  - термічний к.к.д. процесу;

Сср. - середня теплоємність сплаву;

$T_{пл.}$  - температура плавлення сплаву;

$T_{поч.}$  - температура сплаву до початку нагріву;

$W$  - прихована теплота плавлення.

Частина потужності променя, що витрачається на нагрів одної зварювальної кромки, можна розрахувати за формулою:

$$q_1 = \iint_{D_1} q(x,y) dx dy, \quad (4)$$

де  $q(x,y)$  - розподіл густини потужності променя;

$D_1$  - область впливу променя, що припадає на 1 - шу зварювану кромку.

Зварні шви різномірних сплавів 1460 + 1201, зварені за допомогою цього способу мали практично паралельні бокові стінки, а вміст в них легуючих елементів являв собою середнє арифметичне від їх кількості в сплавах. Характеристики міцності з'єднань різноіменних сплавів в інтервалі температур 20..293 К знаходяться на рівні властивостей з'єднань сплаву 1201.

Дослідження характеристик міцності зварних з'єднань сплавів 1570 і 1460, одержаних методом ЕПЗ дискретноскануючим променем.

Тимчасовий опір різноманітних напівфабрикатів і зварних з'єднань сплавів 1570 та 1460 підвищується із зниженням температури випробувань. Тимчасовий опір основного металу сплаву 1570 збільшується з 380...400 МПа при 293 К до 500...550 МПа при 20 К, а для сплаву 1460 з 510...525 МПа при 293 К до 610...650 МПа при 20 К. У зварних з'єднань міцність збільшується для сплаву 1570 з 320...340 МПа при 293 К до 450...550 МПа при 20 К, а для сплаву 1460 з 280...295 МПа при 293 К до 320...340 МПа при 20 К. Коефіцієнт міцності зварних з'єднань при 20 К складає не менш як 0,85 для сплаву 1570 і 0,52 для сплаву 1460.

Чутливість до концентраторів напружень у основного металу і зварних з'єднань сплаву 1570 із зниженням температури підвищується, і хоча величина відношення  $\sigma_s^H/\sigma_{0,2}$  завжди більша за одиницю, відношення  $\sigma_s^H/\sigma_s$  при температурах 20 і 77 К складає для основного металу 0,9...1,1 і 0,8...1,0 для зварних з'єднань. Зварні з'єднання сплаву 1460 менш чутливі до концентраторів напружень, ніж основний метал у всьому температурному діапазоні.

Оптимальним режимом термообробки з'єднань сплаву 1570 є штучне старіння при температурі 340...360°C на протязі 1 години з наступним охолодженням на повітрі. За цей час із аномально перенасиченого скандієм твердого розчину металу шва встигають виділитись вторинні частинки  $ScAl_3$ , які зумовлюють зміцнення сплаву. В результаті досягається однакова міцність з'єднань і основного металу штамповки сплаву 1570. Однакова міцність з'єднань і основного металу в нагартваному стані досягається пластичною деформацією металу шва і ЗТВ на 20 % з наступним штучним старінням за вказаним режимом. Вплив термічної обробки і пластичної деформації на тимчасовий опір з'єднань сплаву 1570 показано на рисунку 4.

Підвищення характеристик міцності з'єднань сплаву 1460 досягнуто за рахунок оптимізації хімічного складу шва в бік зменшення вмісту літію та збільшення вмісту міді. В наших дослідженнях використовувався присадочний матеріал, аналогічний за складом сплаву 1201 у вигляді плавких вставок між кромками стика. Час затримки променя в точках траєкторії роз-



Рис. 4. Вплив термічної обробки та пластичної деформації на міцність з'єднань сплаву 1570.

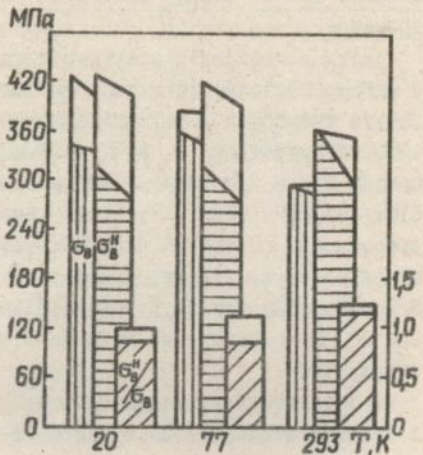


Рис. 5. Вплив температури випробувань на міцність та чутливість до концентраторів напружень з'єднань сплаву 1460, виконаних з застосуванням присадкового матеріалу 1201 та без нього. - 30штр.

гортки регулювали таким чином, що на зварювані кромки припадало більше 95 % всієї потужності променя. При цьому не спостерігалось витікання та розбрикування матеріалу присадки, а формування шва відбувалося при участі 65 % основного металу та 35 % присадочного. В результаті було досягнуто зміцнення металу шва. Внаслідок чого розривні зразки почали руйнуватися не по металу шва, а по ЗТВ і їх тимчасовий опір при 20 К зріс з 320...340 МПа до 390...420 МПа. Залежність тимчасового опору і чутливості до концентраторів напруг від температури показана на рисунку 5.

Технологічні рекомендації по ЕПЗ сплавів 1570 і 1460.

Результати досліджень процесу ЕПЗ дискретносканувчим променем реалізовано у вигляді комп'ютерної програми, яка розраховує як енергетичні параметри процесу, так і параметри розгортки променя в залежності від технологічної задачі, що

вирішується, та вимог, які поставлено до зварних з'єднань.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що при ЕПЗ сплавів 1570 і 1460 найбільш прийнятними траєкторіями сканування променя є криві другого порядку (коло, еліпс, напівеліпс і т.п.). Інші параметри процесу вибираються відповідно до таблиці 1 в залежності від товщини напівфабрикату, що зварюється.

Таблиця 1.

Режими, що рекомендуються при ЕПЗ напівфабрикатів сплавів 1570 і 1460.

Товщина напівфабри- кату, мм	Режим ЕПЗ					Просторове положення стика
	Уус; кВ	Ісв; МА	Ісв; м/ч	Амплітуда розгортки мм	Частота Гц	
25	60	250...270	50	1,0...1,5		1,2,3 *
40	60	390...420	50	1,0...1,5	500...	2,3
60	60	440...470	40	1,5...2,0	...1000	2,3
70	60	560...600	40	1,5...2,0		3
100	60	530...570	20	2,0...2,5		3

\* Примітки: 1 - Зварювання в нижньому положенні. 2 - Зварювання на боці. 3 - Зварювання на підйом.

Розроблена технологія ЕПЗ дискретноскануючим променем дозволила одержати шви практично позбавлені від пор при з'єднанні напівфабрикатів сплавів 1570 та 1460 товщиною 20...100 мм. Зварні шви мали паралельні межі сплавлення як при повному, так і неповному проплавленні. Тріщини, несплавлення, кореневі та другі дефекти були відсутні. Метал швів мав однорідну мілку рівновісну комірчасту структуру, оточену сіткою евтектичних фаз.

Досліджена можливість усунення дефектів зварних швів сплавів 1570 і 1460 шляхом проведення ремонтних підварювань. Результати досліджень показали, що в разі необхідності для усунення дефектів з'єднань сплавів 1570 і 1460 допускається виконання двох додаткових проходів без суттєвого зниження міцності і втрати легуючих елементів в металі шва.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Теоретичними та експериментальними дослідженнями встановлено, що дискретне сканування променя дозволяє ефективно керувати розподілом тепловкладення в межах плями нагріву при ЕПЗ, що дає можливість регулювати форму зони проплавлення, а також впливати на структуру та властивості зварних з'єднань, а також інтенсифікувати процес дегазації рідкого металу і тим самим знизити в 2 - 2,5 рази кількість порожнин в металі шва. На основі проведених досліджень створена принципово нова технологія ЕПЗ конструкцій відповідального призначення з високоміцних алюмінієвих сплавів 1570 та 1460.

2. Доведено, що прямокутна форма зони проплавлення сприяє зменшенню імовірності утворення кореневих дефектів при неповному проплавленні, а також грубої шаруваті структурної неоднорідності швів. Встановлено, що частота сканування променя також впливає на створення структурної неоднорідності металу шва. Для отримання швів з однорідною структурою необхідно використовувати розгортки променя з частотою більше 500 Гц.

3. Показано, що на просторовий розподіл густини потужності дискретноскануючого електронного променя впливає не тільки траєкторія і амплітуда, але й частота розгортки. Розроблено методики і комп'ютерні програми для розрахунку: розподілу густини потужності променя при дискретних розгортках, враховуючи частоту і амплітуду розгортки, ступінь фокусування і координати дискретних положень променя, а також відносний час його затримки в точках дискрету; параметрів режиму ЕПЗ, що дозволяє з високою точністю одержувати потрібну форму і розміри зони проплавлення. Порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними показує, що відхилення від розрахункової форми зони проплавлення не перевищує 20 %, а в разі виконання попереднього експериментального проплаву, максимальна помилка не перевищує 5 %.

4. Розроблена технологія зварювання дискретноскануючим променем різнорідних сплавів 1201 + 1460, при якій високі механічні властивості з'єднань досягаються за рахунок контролювання долі участі у формуванні шва зварюваних кромок, шляхом керування тепловкладанням в межах плями нагріву. Тимчасовий опір з'єднань складає 280...290 МПа при 293 К і 420...470 МПа при 20 К, що відповідає аналогічним характеристикам з'єднань сплаву 1201.

5. Тимчасовий опір основного металу при температурі 20 К збільшується на 20...40 % для сплаву 1570 і на 15...25 % для сплаву 1460 у порівнянні з кімнатною температурою. У зварних з'єднаннях це збільшення складає 25...60 % для сплаву 1570 та 8...20 % для сплаву 1460. Коефіцієнт міцності зварних з'єднань при 20 К складає не менш як 0,85 для сплаву 1570 і тільки 0,52 для сплаву 1460.

6. Показано, що використання присадкового матеріалу зі сплаву 1201 сприяє зміцненню металу шва при ЕПЗ сплаву 1460. Надійно реалізувати процес зварювання з присадковим матеріалом вдається при допомозі дискретного сканування променя, коли мінімальне тепловкладення припадає на присадку. В цьому випадку руйнування розривних зразків відбувається не по шву, а по зоні термічного впливу. Найбільше підвищення характеристик міцності з'єднань спостерігається при криогенних температурах. При цьому тимчасовий опір при 20 К зростає з 320...340 МПа до 390...420 МПа, а чутливість до концентраторів напружень знижується на 8...15 %.

Встановлено, що штучне старіння при температурі 340...360 °С на протязі 1 години підвищує властивості з'єднань сплаву 1570 до рівня міцності основного металу штампованих напівфабрикатів за рахунок виділення з перенасиченого скандієм твердого розчину металу шва вторинних частинок  $ScAl_3$ , причому фіксація перенасиченого твердого розчину Sc в Al можлива тільки при високих швидкостях охолодження рідкого металу, властивих ЕПЗ.

7. Дослідно-промислова перевірка технології електронно-променевого зварювання дискретноскануючим пучком при ЕПЗ відповідального призначення із алюмінієвих сплавів 1570 і 1460 підтвердила його техніко - економічну ефективність.

Основний зміст дисертаційної роботи відбито у таких публікаціях:

1. Бондарев А.А., Скрябинский В.В. Влияние технологических факторов на зону рауупрочнения сплава АМГ6НН при электроннолучевой сварке. // Автомат. сварка. -1985.-№3.-С. 40-42.
2. Управление распределением плотности мощности электронного пучка по его сечению/ Ю.Н.Ланкин, А.А.Бондарев, Е.Н.Вайштрук В.В.Скрябинский// Там же. -1985.-№6.-С. 12-15.
3. Влияние сканирования электронным пучком на проплавление и механические свойства соединений сплава АМГ6ННП. / А.А.Бонда-

рев, В.В.Скрябинский, Ю.Н.Ланкин, и др. // 3 Всесоюзная конференция по сварке цветных металлов: Тез. докл. (8-10 сентября 1986 г., Тольятти). -Тольятти: ТПИ, 1986. С. 15-16.

4. Бондарев А.А., Скрябинский В.В. Сварка алюминиевых сплавов с программированием распределения плотности мощности электронного пучка по пятну нагрева. // Автоматическое управление технологическим процессом электроннолучевой сварки: Сб. науч. тр. -Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 1987. -С. 52-58.

5. Скрябинский В.В., Пещерина С.В., Назаренко С.В. Влияние параметров сканирования пучка на качество сварного соединения при ЭЛС сплава АМг6НПП. // 1 конференция молодых ученых и специалистов: Тез. докл. (15-17 апреля 1987 г., Киев). -Киев: ИЭС, 1987. -С. 59.

6. Бондарев А.А., Скрябинский В.В. Влияние параметров развертки электронного пучка на характеристики сварных соединений алюминиевых сплавов // Автомат. сварка. -1987. -№12. -С. 57-62.

7. Бондарев А.А., Скрябинский В.В. Экспериментальное определение температуры металла в зоне воздействия пучка и средней температуры сварочной ванны при ЭЛС. // Современное состояние, проблемы и перспективы энергетики и технологии в энергостроении; Тез. докл. (31 мая - 2 июня 1989 г., Иваново). -Иваново: ЭИ, 1989. - С. 12-14.

8. Бондарев А.А., Скрябинский В.В., Антропов Н.П. Механические свойства сплава 1570 и его сварных соединений при криогенных температурах. // Стали и сплавы в криогенной технике; Тез. докл. (19-21 октября 1990 г., Батуми). - Батуми: ИМ, 1990. - С. 86-87.

9. Бондарев А.А., Скрябинский В.В., Пещерина С.В. Исследование свариваемости электронным пучком сплава 1460. // Актуальные проблемы сварки цветных металлов. (12-14 сентября 1990 г., Мариуполь). - Мариуполь: МИ, 1990. - С. 35-36.

10. Бондарев А.А., Скрябинский В.В. Об оценке влияния параметров развертки на приведенное распределение плотности мощности сканирующего пучка с помощью ЗЕМ. // Концентрированные потоки энергии в обработке и соединении материалов; Тез. докл. (27-28 мая 1991 г., Пенза). - Пенза: ППИ, 1991, -С. 86.

11. Особенности электроннолучевой сварки высокопрочного алюминиевого сплава системы Al-Cu-Li. / А.А.Бондарев, В.В.Скрябинский, С.В.Пещерина, и др. // Автомат. сварка. 1991. -№7. -С. 37-40.

12. Bondarev A.A., Skriabinskiy V.V., Peshcherina S.V. Effect of welding technology on mechanical properties and density of joints in aluminium alloy Al-Cu-Li-Sc. // 14-International cryogenic materials conference, Abstract, Kiev, Ukraine, 1992, June 8-12, p.80.

13. Bondarev A.A., Skriabinskiy V.V. Effect of cryogenic temperatures on mechanical properties of alloy Al-Mg-Mn-Sc and its joints made by electron beam welding. // Там же. - P. 80-81.

14. Бондарев А.А., Скрябинский В.В. Особенности электроннолучевой сварки высокопрочных алюминиевых сплавов с программированием тепловложения. // Электронно-лучевая сварка; Сборник материалов конференции. (12-13 октября 1993 г., Москва). - Москва: Центр. Росс. дом знаний, 1993. - Том 2. - С. 77-81.

15. Скрябинский В.В., Бондарев А.А. Расчетная оценка пространственного распределения плотности мощности дискретносцизирующего электронного пучка и управление формой зоны проплавления при сварке с программированием тепловложения. // Там же. -1993. -Том 1. - С. 72-79.

16. А.с. 1329039 СССР, МКИ В 23 К 15/00. Способ электроннолучевой сварки. / Ю.Н.Ланкин, А.А.Бондарев, Е.Н.Байштрук, В.В.Скрябинский и др. - Оpubл. 8 апреля 1987 г.

17. А.с. 1745467 СССР, МКИ В 23 К 15/00. Способ электроннолучевой сварки изделий переменного сечения. / А.А.Бондарев, В.В.Скрябинский, А.А.Бондарев и др. - Оpubл. 8 марта 1992 г.

Особистий внесок автора. В роботах [10,15] автором розроблено методики та комп'ютерні програми для розрахунків: розподілу густини потужності променя при дискретному скануванні; форми та розмірів зони проплавлення при ЕПЗ; параметрів режиму ЕПЗ які забезпечують отримання зони проплавлення заданої форми та розмірів. В роботах [1,3,5,6] проведені досліді та виконано аналіз впливу параметрів розгортки променя на характеристики зварних з'єднань алюмінієвих сплавів. В [2,4,16] виконано розрахунки розподілу густини потужності променя та проведені досліді по зварюванню. В роботі [7] виконано експериментальну частину, розрахунок швидкостей охолодження металу зваривальної ванни та середньої температури ванни при ЕПЗ. В [8,13] експериментальна частина та аналіз результатів досліджень. В [9,11,12,14] участь у розробці технології ЕПЗ сплаву 1460, включаючи технологію зварювання рівнояємних сплавів 1460 + 1201 з програмуванням тепловкладення. В [17] розробка конструкції набірної підкладки та експериментальні роботи по зварюванню.

*В.С.П.*

Безкоштовно

АВ 29.439