

## ВПЛИВ ФОРМИ ІМПУЛЬСІВ ЗВАРЮВАЛЬНОГО СТРУМУ НА ВЛАСТИВОСТІ З'ЄДНАНЬ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

А. М. ЖЕРНОСЕКОВ<sup>1</sup>, В. Є. ФЕДОРЧУК<sup>1</sup>, Г. П. КИСЛА<sup>2</sup>,  
В. А. КОВАЛЬ<sup>1</sup>, Ю. В. ФАЛЬЧЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ;

<sup>2</sup> ПрАТ "ПлазмаТек", Київ

Досліджено вплив параметрів імпульсних джерел живлення під час зварювання плавким електродом на особливості формування структури і властивостей зварних з'єднань різних алюмінієвих сплавів. Здійснено порівняльні дослідження вибраних джерел живлення та отримано зварні з'єднання алюмінієвих сплавів за оптимальних режимів зварювання. Виконано металографічні дослідження та встановлено особливості знеміцнення алюмінієвих сплавів у зоні термічного впливу під дією тепла зварювальної дуги. Виявлено переваги використання джерел з регульованою формою струму для формування зварного шва, його структури та механічних властивостей зварних з'єднань.

**Ключові слова:** імпульсно-дугове зварювання, плавкий електрод, форма імпульсів струму, алюмінієві сплави, зварні з'єднання, зона термічного впливу, мікроструктура, розподіл твердості, механічні властивості.

The influence of the parameters of pulsed-arc power sources in fusible electrode welding on the specific features of formation of the structure and properties of welded joints of various aluminium alloys is studied. Comparative tests of selected power sources were carried out and welded joints of aluminium alloys were produced using optimum welding modes. Metallographic investigations were performed and peculiarities of aluminium alloy softening in the heat-affected zone under the impact of welding arc heat were studied. Advantages of application of power sources with a controlled current shape for a weld formation, its structure and mechanical properties of welded joints, are shown.

**Keywords:** pulse-arc welding, fusible electrode, current pulse shape, aluminum alloys, welded joints, thermal impact zone, microstructure, hardness distribution, mechanical properties.

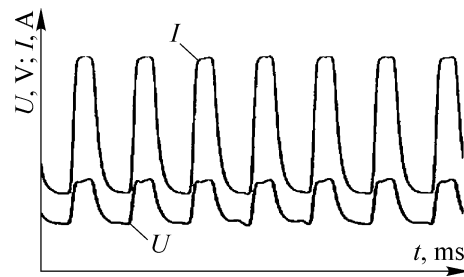
**Вступ.** Імпульсно-дугове зварювання плавким електродом займає передові позиції серед дугових способів зварювання за об'ємами виробництва зварних конструкцій у машино-, ракето- та суднобудуванні [1–4]. Його застосовують як самостійно, так і в комплексі з іншими способами зварювання [5–7].

Існує декілька основних варіантів імпульсно-дугових джерел живлення, один з них – це плавлення металу електрода під час проходження базового струму і переносу краплі, що утворилася в момент подачі імпульсу. Розповсюдженіший варіант, коли базовий струм тільки підтримує горіння дуги, а імпульсний – розплавляє і переносить електродний метал.

Параметри імпульсів зварювального струму і їх форма зазвичай не оприлюднюються розробниками джерел живлення дуги з міркувань “ноу-хау”. Тільки іноді така інформація з'являється в рекламних цілях. Наприклад, показана (рис. 1) форма зміни струму та напруги за імпульсно-дугового зварювання джерела живлення фірми “Fronius” [8].

Рис. 1. Форма імпульсів зварювального струму і напруги в джерелах живлення дуги фірми "Fronius" [8], де  $t$  – час, ms;  $U$  – напруга, V;  $I$  – зварювальний струм, A.

Fig. 1. Shape of pulses of welding current and voltage in arc power sources of "Fronius" company [8], where  $t$  – time, ms;  $U$  – voltage, V;  $I$  – current, A.



Доступнішою є інформація щодо розробки технології і джерел живлення для імпульсно-дугового зварювання в науково-дослідних центрах. Так, наприклад, японські дослідники [9] оприлюднили осцилограми зварювального струму і напруги на дузі під час імпульсно-дугового зварювання алюмінієвих сплавів (рис. 2). Показали, що за прямокутної форми імпульсів зварювального струму відрив краплі призводить до утворення дрібних бризок, і пропонують поліпшену форму імпульсу, яка усуватиме налипання бризок на виріб та покращить зовнішній вигляд зварних швів.

В Інституті електрозварювання (ІЕЗ) ім. Є. О. Патона НАН України розроблено джерело імпульсного струму дуги [10, 11], яке реалізує концепцію багаторівневого імпульсу струму (рис. 3). При цьому базовий струм підтримує горіння дуги і регулюється залежно від діаметра зварювального дроту та його теплофізичних властивостей, а імпульсний – розділено на два: перший розплавляє заданий об'єм металу на торці електрода, а другий тільки відриває і переносить краплю електродного металу.

Застосування імпульсу спеціальної форми, в якому розділені тепловий і силовий вплив на метал електрода, дає змогу зварювати з мінімальним його випаровуванням для широкого класу конструкційних матеріалів. Така концепція багаторівневого імпульсу зварювального струму є перспективною, оскільки дозволяє підібрати параметри імпульсів для матеріалів з різними теплофізичними властивостями. Їх плавне регулювання дає можливість використовувати системи зворотних зв'язків для автоматизації зварювання плавким електродом.

Мета роботи – визначити особливості формування мікроструктури та механічних властивостей зварних з'єднань алюмінієвих сплавів під час імпульсно-дугового зварювання плавким електродом зі застосуванням джерел живлення з керованою формою струму.

**Матеріали і методи досліджень.** Для досліджень стикових зварних з'єднань використовували листи стандартних алюмінієвих сплавів АМг6, АМг5, Д16, 1915 завтовшки від 2 до 6 mm. Для зварювання застосовували дріт марки ЗвАМг6  $\varnothing$  1,2 mm, а для захисту зони зварювання – аргон вищого гатунку відповідно до

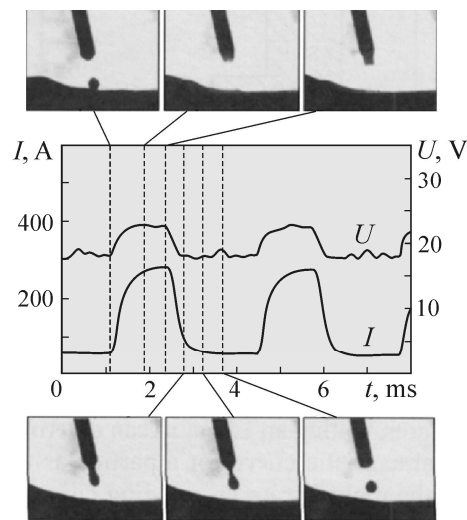


Рис. 2. Форми імпульсів струму і напруги під час імпульсно-дугового зварювання алюмінієвих сплавів [7].

Fig. 2. Shapes of pulses of current and voltage in pulsed-arc welding of aluminium alloys [7].

ТУ У 20.1-21543199-004:2019. Підготовку основного і електродного матеріалів здійснювали хімічним травленням у 10%-му водному розчині NaOH з подальшим освітленням в 30%-му водному розчині HNO<sub>3</sub>. Автоматичне імпульсно-дугове зварювання плавким електродом виконували в нижньому положенні від джерела живлення фірми “Fronius” TPS-450 та джерела, розробленого в ІЕЗ ім. Є. О. Патона, з керованою формою зварювального струму (рис. 3).

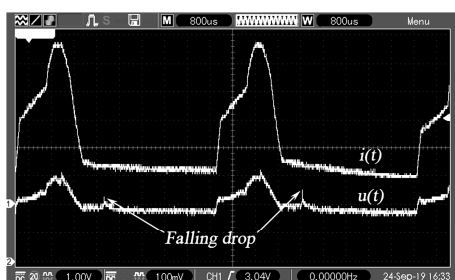


Рис. 3. Форма імпульсів зварювального струму і напруги на дузі від джерела живлення, розробленого в ІЕЗ ім. Є. О. Патона, де  $u(t)$  – напруга в даний момент часу, V;  $i(t)$  – зварювальний струм, A.

Fig. 3. Shape of pulses of welding current and arc voltage from the power source developed at the Paton Electric Welding Institute, where  $u(t)$  – voltage at a given time, V;  $i(t)$  – current, A.

Фірма “Fronius” є однією з передових у світі за випуском сучасного електрозварювального обладнання для дугових та гібридних зварювань [12, 13]. Її обладнання широко використовують для різних технологій, в тому числі і тих, які розробляють в ІЕЗ ім. Є. О. Патона [11, 14, 15]. Тому порівняльні випробовування створеного обладнання з обладнанням такої фірми є коректні. Параметри зварювання обирали з урахуванням того, що необхідно забезпечити повне проварювання стиків.

Аналізували мікроструктуру за допомогою оптичного мікроскопа ММТ-1600В. Вимірювали твердість за перерізом зварних з’єднань за шкалою HRB на приладі Rockwell з кульковим індентором  $\varnothing$  1/16 дюйма за навантаження 600 N. Механічні дослідження границі міцності здійснювали відповідно до ГОСТ 1497-84 (ІСО 6892-84).

**Результати досліджень та їх обговорення.** Під час досліджень використали чотири алюмінієві сплави, два з яких належать до класу сплавів, які не зміцнюються термічною обробкою (АМг6, АМг5), а два інші (Д16, 1915) можуть зміцнюватись під час термічної обробки гартуванням та старінням. Наведені (рис. 4, 5) найхарактерніші мікроструктури зварних з’єднань для цих груп сплавів.

На рис. 4 подано мікроструктуру основних зон зварних з’єднань сплаву АМг5, отриманих зварюванням методом Pulse MIG з використанням дроту ЗВАМг6 за застосування різних джерел зварювального струму.

Аналіз мікроструктури зварних з’єднань сплавів, що термічно не зміцнюються, показав, що, незалежно від використаного джерела живлення, структура металу швів дендритна. Суттєвих відмінностей у структурі швів не спостерігали. В центральній частині швів дендрити розташовані хаотично і не мають переважної орієнтації. Дендритний параметр для швів (характеристика мікроструктури, що є аналогом розміру зерна, але для дендритної структури литого металу), отриманих за використання різних джерел зварювального нагріву, практично однаковий і становить 29...32  $\mu\text{m}$ . Структура металу швів однорідна, без грубих евтектичних включень. Безпосередньо біля лінії сплавлення розташована область стовпчастих дендритів, спрямованих від лінії сплавлення до центру шва. В зоні сплавлення і зоні термічного впливу (ЗТВ) відмінностей у структурі зварних з’єднань, отриманих з використанням різних джерел, не спостерігаємо.

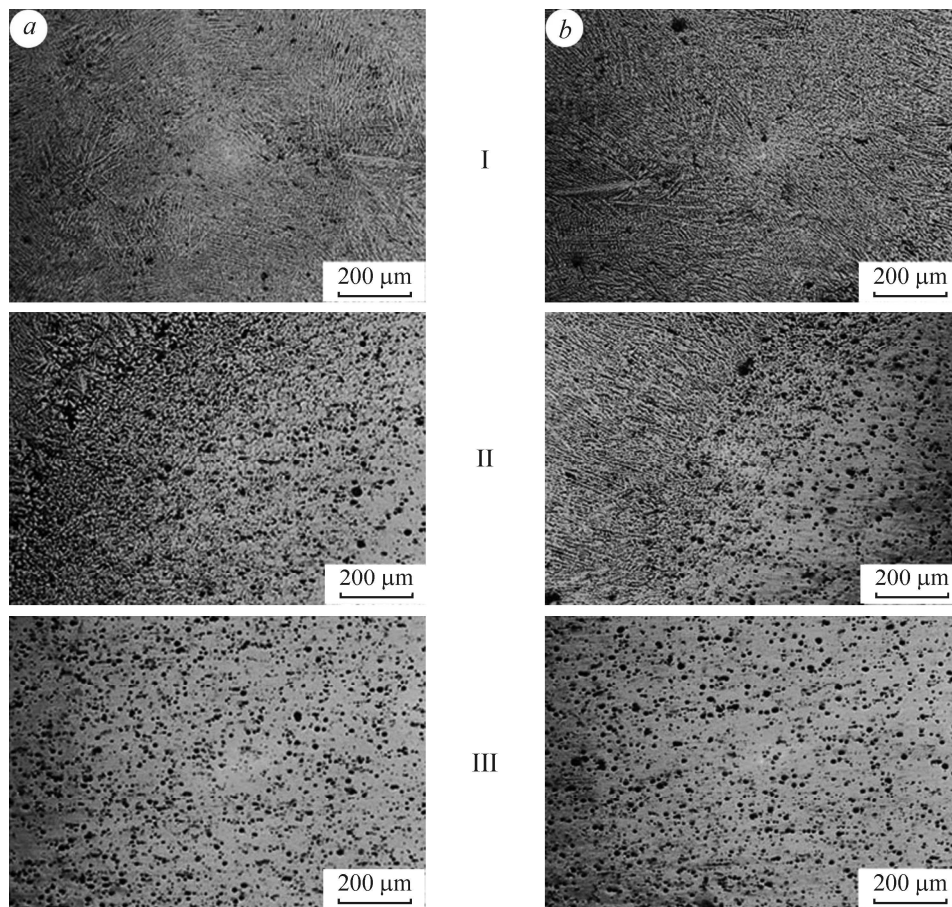


Рис. 4. Мікροструктура зварних з'єднань алюмінієвого сплаву AMr5 завтовшки 2 mm, отриманих зварюванням методом Pulse MIG зі застосуванням різних джерел живлення: *a* – фірми “Fronius”; *b* – розроблене в ІЕЗ ім. Є. О. Патона.  
I – метал шва; II – зона сплавлення; III – основний метал.

Fig. 4. Microstructure of welded joints of 2 mm thick AMr5 aluminium alloy produced by Pulse MIG welding method, when different power sources are used: *a* – Fronius company; *b* – developed at the Paton Electric Welding Institute.  
I – weld metal; II – fusion zone; III – base metal.

На рис. 5 наведені фрагменти мікροструктури зварних з'єднань термозміцненого сплаву 1915, отриманих зварюванням методом Pulse MIG з використанням дроту ЗвАМг6 зі застосуванням різних джерел живлення зварювальної дуги. Як бачимо, незалежно від використаного джерела живлення, структура металу швів дендритна. Однак за зварювання термічно зміцнених сплавів спостерігаємо деякі відмінності в дисперсності структури металу швів. Так, дендритний параметр для швів, отриманих за використання джерела зварювальної дуги, створеного в ІЕЗ ім. Є. О. Патона, становить 11...13 µm, водночас для швів, отриманих за використання джерела зварювального нагріву фірми “Fronius”, він дорівнює 16...18 µm. При цьому структура металу швів, отриманих за використання джерела зварювальної дуги, створеного в ІЕЗ ім. Є. О. Патона, однорідніша. Безпосередньо біля лінії сплавлення, незалежно від використаного джерела живлення, розташована область стовпчастих дендритів, спрямованих від лінії сплавлення до центру шва. В зоні сплавлення і ЗТВ відмінностей в структурі зварних з'єднань між різними джерелами не спостерігаємо.

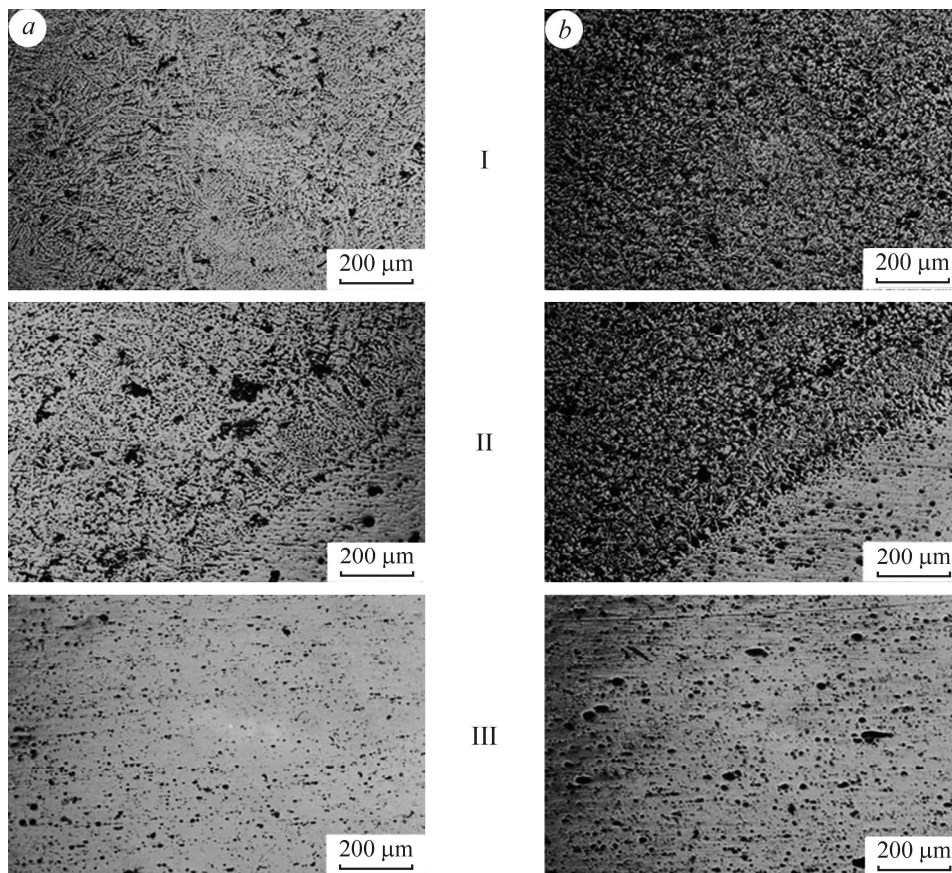


Рис. 5. Мікроструктура зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 1915 завтовшки 3 mm, отриманих зварюванням методом Pulse MIG зі застосуванням різних джерел живлення: *a* – фірми “Fronius”; *b* – розроблене в ІЕЗ ім. Є. О. Патона.  
I – метал шва; II – зона сплавлення; III – основний метал.

Fig. 5. Microstructure of welded joints of 3 mm thick 1915 aluminium alloy produced by Pulse MIG welding method, when different power sources are used: *a* – Fronius company; *b* – developed at the Paton Electric Welding Institute.  
I – weld metal; II – fusion zone; III – base metal.

Вимірявши твердість у поперечному перерізі зварного з'єднання, визначили вплив енергії зварювального процесу на механічні властивості зварних з'єднань. Аналіз твердості за перерізом зварних з'єднань показав, що для сплавів, які термічно не зміцнюються (АМг6, АМг5), зварювання від джерела, розробленого в ІЕЗ ім. Є. О. Патона, виглядає привабливішим. Так, твердість металу шва сплаву АМг6, хоча і несуттєво (на 1...2 HRB), але вища. Твердість ЗТВ також вища (рис. 6*a*), хоча ширина ЗТВ і не зменшується за використання джерела ІЕЗ ім. Є. О. Патона.

Зварні з'єднання сплаву АМг5 мають суттєвіші відмінності в твердості. Так, твердість металу шва зварного з'єднання, отриманого за використання джерела, розробленого в ІЕЗ ім. Є. О. Патона, вища на 13 HRB (рис. 6*b*). Це, найімовірніше, пов'язано з дисперснішою структурою зварюваного матеріалу та застосуванням дроту з вищим вмістом магнію порівняно з основним матеріалом. Розподіл твердості металу в ЗТВ зварних з'єднань сплаву АМг5 подібний до розподілу твердості у зварних з'єднаннях сплаву АМг6.

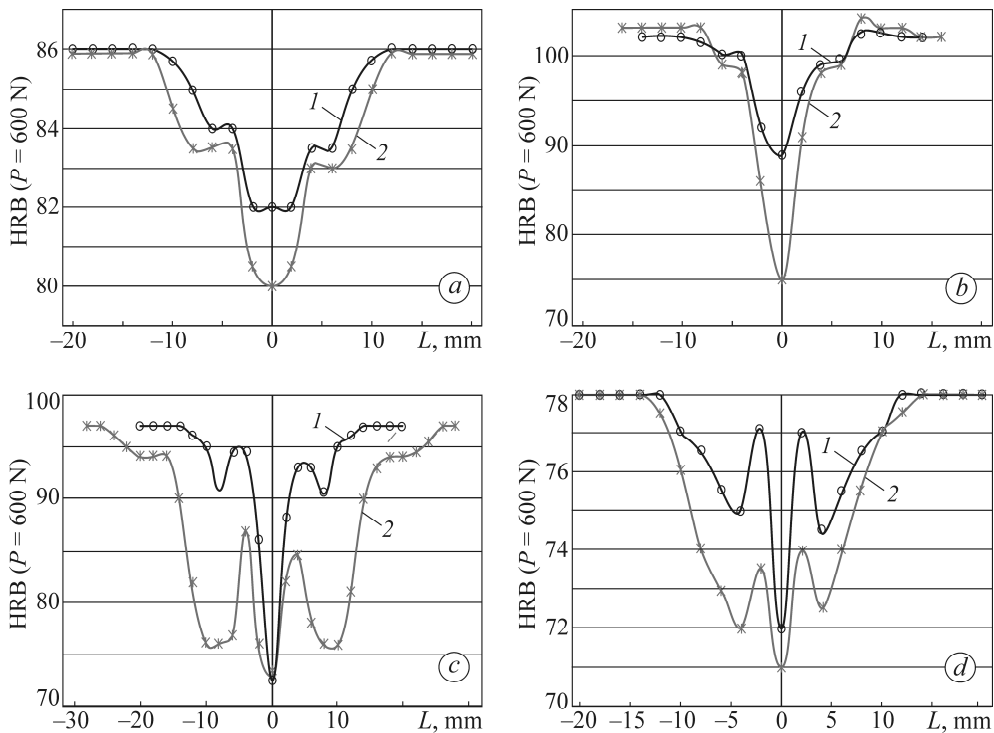


Рис. 6. Характер розподілу твердості в зварному з'єднанні сплавів АМг6 завтовшки 6 мм (а), АМг5 завтовшки 2 мм (b), 1915 завтовшки 3 мм (c) та Д16 завтовшки 2 мм (d) за зварювання плавким електродом:  
 1 – джерело, розроблене в ІЕЗ ім. Є. О. Патона,  
 2 – джерело фірми “Fronius”.

Fig. 6. Hardness distribution in the welded joint of 6 mm thick АМг6 (a), 2 mm thick АМг5 (b), 3 mm thick 1925 (c), and 2 mm thick Д16 (d) alloys in fusible electrode welding:  
 1 – power source developed at the Paton Electric Welding Institute;  
 2 – power source of “Fronius” company.

Під час зварювання сплавів, які зміцнюються термічною обробкою, спостерігаємо такі особливості. Для сплаву 1915 твердість металу швів однакова, водночас твердість у ЗТВ за використання джерела, розробленого в ІЕЗ ім. Є. О. Патона, вища (рис. 6c), а її ширина менша. У ЗТВ спостерігаємо провали і піки за твердістю, що пов'язано зі складними процесами, які відбуваються в термічно зміцнених сплавах під час зварювання. Під впливом зварювальної дуги окремі ділянки металу ЗТВ нагріваються до різних температур. У результаті у ЗТВ формуються ділянки зі структурою, характерною для металу в стані гартування, зістарювання, штучного старіння. Як наслідок, під час зварювання від джерела живлення, розробленого в ІЕЗ ім. Є. О. Патона, забезпечуються ліпші механічні властивості зварного з'єднання.

Для сплаву Д16 спостерігаємо подібний розподіл твердості в металі ЗТВ (рис. 6d). Зварювання від джерела, розробленого в ІЕЗ ім. Є. О. Патона, забезпечує вищі показники твердості в металі шва і ЗТВ.

Механічні випробовування зварних зразків також підтвердили переваги джерела живлення, розробленого в ІЕЗ ім. Є. О. Патона. Такі зварні з'єднання мають ліпші характеристики: підвищується не тільки міцність на розрив за розтягу, але і пластичні властивості зварного з'єднання (див. таблицю).

### Механічні властивості зварних з'єднань дослідних алюмінієвих сплавів

Сплав	Товщина, mm	Джерело живлення					
		розроблене в ІЕЗ			фірми "Fronius"		
		$\sigma_{t,j}$	$\sigma_{t,w}$	$\alpha$ , degree	$\sigma_{t,j}$	$\sigma_{t,w}$	$\alpha$ , degree
		МПа			МПа		
АМг6	6	332,4	296	88	326	285	60
АМг5	2	311	302,7	180	305	280	76
Д16	2	333,4	296,9	51	318	290	48
1915	3	360	308,4	–	346	297	69

**Примітка:**  $\sigma_{t,j}$  – границя міцності зварного з'єднання;  $\sigma_{t,w}$  – границя міцності металу шва зварного з'єднання;  $\alpha$  – кут гину зварного з'єднання.

Такі результати, насамперед, пов'язані зі забезпеченням у спеціалізованому імпульсі зменшення часу формування краплі рідкого металу, її об'єму, а значить і поверхні, з якої вигорають легувальні елементи, та тривалості її перебування на торці електрода внаслідок імпульсу відриву, який відповідає тільки за силовий вплив на відривання краплі та перенесення її через дугу.

#### ВИСНОВКИ

Досліджено вплив параметрів імпульсних джерел живлення під час зварювання плавким електродом на особливості формування структури і властивостей зварних з'єднань різних алюмінієвих сплавів. Показано, що джерела живлення імпульсної дуги з керованою формою струму з розділенням процесів плавлення і переносу крапель електродного металу є ефективним засобом підвищення якості зварних з'єднань; під час зварювання алюмінієвих сплавів дають змогу зменшити дендритний параметр металу швів, ширину зони термічного впливу та підвищити твердість у зоні з'єднання порівняно з традиційними джерелами живлення. Встановлено, що використання таких джерел живлення забезпечує для термічно зміцнених алюмінієвих сплавів Д16 і 1915 підвищення міцності на 14...15 МПа, а для термічно незміцнених АМг5 і АМг6 – на 6 МПа.

1. *Development of high efficiency arc welding methods / N. Kiji, K. Kobayashi, J. Ishii, and H. Yamaoka // The Paton Welding J. – 2003. – № 10. – P. 56–60.*
2. *Influence of alloying and thermal treatment on the strength and cyclic crack resistance of welded joints of alloys of the Al–Cu–Mg system. Part 1 / T. M. Labur, O. P. Ostash, Yu. V. Holovatyuk, V. A. Koval', and V. S. Shynkarenko // Materials Science. – 2017. – 53, № 2. – P. 131–140.*
3. *Influence of alloying and thermal treatment on the strength and cyclic crack resistance of welded joints of alloys of the Al–Cu–Mg system. Part 2 / T. M. Labur, O. P. Ostash, Yu. V. Holovatyuk, V. A. Koval', and V. S. Shynkarenko // Materials Science. – 2018. – 53, № 4. – P. 453–459.*
4. *Сидорец В. Н., Жерносеков А. М., Рымар С. В. Импульсно-дуговая сварка как основа современных технологий сварки плавящимся электродом // Вісник Донбаської Державної Машинобудівної Академії. – 2016. – № 2 (38). – С. 221–225.*
5. *Tandem MIG/MAG Welding / S. Goecke, J. Xedegard, M. Lundin, and H. Kaufmann // Svetsaren. – 2001. – 5. – P. 24–28.*
6. *Keitel S. and Neubert J. Hybrid laser-GMA girth welding technologies for transmission pipelines // The Paton Welding J. – 2014. – № 4. – P. 30–36.*

7. *Гибридная лазерно-дуговая сварка сталей с импульсной модуляцией дуги плавящегося электрода* / В. Ю. Хаскин, В. Н. Коржик, А. М. Жерносеков, С. И. Пелешенко, Бой Ву // *Первый независимый научный вестник*. – 2016. – № 5. – С. 54–59.
8. *Paul Jones*. What is pulsed MIG welding? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.basicwelding.co.uk/blogs/news/what-is-pulsed-welding>
9. *Ueyama T*. Trends in developments in gas shielded arc welding equipment in Japan // *The Paton Welding J*. – 2013. – № 10/11. – P. 53–60.
10. *Pulsed-arc consumable electrode welding of aluminium alloys with a regulated pulse shape* / T. M. Labur, A. M. Zhernosekov, M. R. Yavorskaya, and M. P. Pashulya // *Welding International*. – 2014. – **28**. – P. 881–884.
11. *Influence of impulsive electric current on the fine structure of amgб aluminum alloy subjected to electrodynamic treatment* / L. I. Markashova, N. A. Pashchin, E. N. Berdnikova, O. L. Mikhodui, and Yu. M. Sidorenko // *Materials Science*. – 2018. – **54**, № 1. – P. 82–87.
12. *Рекламная информация фирмы Fronius: Зарубежный опыт. Новые высокопроизводительные технологии сварки фирмы “Фрониус”* // *Автоматическая сварка*. – 2004. – № 7. – С. 39–46.
13. *Рекламная информация фирмы Fronius: CMT ADVANCE: специалист по сварке тонкого металла* // *Автоматическая сварка*. – 2010. – № 10. – С. 67–68.
14. *Ishchenko A. Ya., Mashin V. S., and Pashulya M. P*. Technological features of twin-arc consumable electrode pulsed welding of aluminium alloys // *The Paton Welding J*. – 2005. – № 1. – P. 10–14.
15. *Consumable electrode pulsed argon-arc welding of sheet aluminium alloys* / V. S. Mashin, M. P. Pashulya, V. A. Shonin, and I. N. Klochkov // *The Paton Welding J*. – 2010. – № 5. – P. 38–41.

*Одержано 02.09.2021*