



УДК 621.791.75.042

## ИМПУЛЬСНО-ДУГОВАЯ СВАРКА ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В АРГОНЕ ТОНКОЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**В. С. МАШИН**, канд. техн. наук, **М. П. ПАШУЛЯ**, инж., **В. А. ШОНИН**, канд. техн. наук,  
**И. Н. КЛОЧКОВ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы технологические особенности импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в аргоне стыковых соединений тонколистовых алюминиевых сплавов АМц, АМг2, АМг6, 1915Т1 и АД33Т1 толщиной от 1 до 2,8 мм. Показано влияние режимов сварки на геометрические параметры швов, их макроструктуру и механические свойства соединений. Даны рекомендации по технологии сварки.

*Ключевые слова:* сварка плавящимся электродом, тонколистовые алюминиевые сплавы, импульсная дуга, режимы сварки, сварные соединения, геометрия швов, механические свойства

При изготовлении листовых конструкций из алюминиевых сплавов низкой и средней прочности наиболее широко применяют два способа дуговой сварки — плавящимся и неплавящимся электродами в инертных газах. Они позволяют получать соединения со сравнительно высокими уровнями прочности и пластичности швов и обеспечивают необходимые эксплуатационные характеристики сварных соединений [1].

Сварка плавящимся электродом в отличие от сварки неплавящимся вольфрамовым электродом обеспечивает более концентрированное введение тепловой энергии дуги в свариваемый металл, глубокое проплавление алюминиевых сплавов, высокие скорости сварки, узкую ЗТВ и меньшие деформации изделий. Такой процесс незаменим при изготовлении тонколистовых соединений, особенно тавровых, где процесс сварки плавящимся электродом не обеспечивает качественного формирования шва и полного проплавления стенок тавра из-за нестабильности расплавления присадочной проволоки и блуждания дуги по двум листам [2].

Недостатками процесса сварки плавящимся электродом являются «грубочешуйчатое» формирование поверхности шва, малый радиус и повышенный угол перехода шва к поверхности основного металла, а также значительные потери легкоиспаряемых легирующих элементов с электродного металла [3]. При этом в швах и зоне сплавления часто образуются поры, которые возникают вследствие относительно высокого содержания водорода в основном и присадочном материале, перегрева электродного металла [4] и значительного нарушения технологического про-

цесса сварки. Поэтому в соответствии с ГОСТом 14806–80, разработанным в начале 1970-х годов и действующим до настоящего времени, процесса сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов может применяться только для металла толщиной не менее 3 мм для стыковых и тавровых соединений и не менее 4 мм для угловых и нахлесточных.

Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом (ИДСПЭ) по сравнению со сваркой постоянным током позволяет стабилизировать процесс переноса капель электродного металла, улучшить формирование швов, уменьшить выгорание (испарение) легкокипящих легирующих элементов с электродной проволоки и повысить механические свойства сварных соединений [5, 6].

В последнее время в Европе, США и Японии выпускают сварочные установки, которые включают импульсные источники питания с синергетическим управлением процессом переноса капель электродного металла для поддержания синхронного процесса «один импульс — одна капля» [7] и подающие механизмы толкающе-тянущего типа для сварочных проволок диаметром 0,8...1,6 мм. Такими наиболее эффективными установками являются аппараты типа TransPulsSynergic (TPS), которые предназначены для автоматизированных и роботизированных линий по изготовлению изделий различного назначения. Применение этого оборудования для ИДСПЭ позволяет расширить диапазон свариваемых толщин металла в сторону их снижения.

Цель данных исследований — получение качественных соединений из тонколистовых алюминиевых сплавов различных систем легирования толщиной до 3 мм при использовании ИДСПЭ.

**Методика исследований.** При отработке методики основывались на известных положениях о необходимости уменьшения термического воз-



действия процесса сварки плавлением на термоупрочненные алюминиевые сплавы путем применения высококонцентрированных источников нагрева. Это достигается, например, при сварке лазерным лучом [8] или при гибридной лазерно-дуговой сварке плавящимся электродом [9] с использованием в качестве защитного газа гелия или гелий-аргоновых смесей ( $He \geq 70\%$ ) [10, 11]. Поэтому при ИДСПЭ соединений тонколистовых алюминиевых сплавов в качестве эффективной меры снижения погонной энергии сварки применяли относительно высокие сварочные токи и повышенные скорости сварки. Для получения качественных соединений придерживались следующего положения — чем выше сварочный ток (соответственно выше напряжение дуги и скорость сварки), тем меньше ширина швов и высота их выпуклости (при неизменной глубине проплавления металла) и, как следствие, меньше остаточные деформации соединений.

В исследованиях применяли алюминиевые сплавы АМц толщиной 1 мм, АМг2 толщиной 1 мм, АМг6 толщиной 1,5 и 1,8 мм, АД33Т1 и 1915Т1 толщиной 2,8 мм и сварочную проволоку СВАМг6 (ГОСТ 7871–75) диаметром 1,2 мм. В качестве защитного газа использовали аргон высшего сорта. Автоматическую ИДСПЭ стыковых соединений выполняли на сварочной установке «Fronius TPS-450». Перед сваркой поверхность металла зачищали шабером. Угол наклона сварочной горелки составлял  $10...15^\circ$ , расстояние от сопла горелки до сва-

риваемого металла 8...12 мм, расход аргона 20 л/мин.

Сварку стыковых соединений выполняли на съемных подкладках из нержавеющей стали с канавками шириной 2 мм и глубиной 0,8 мм для сплавов толщиной 1...2 мм, а также шириной 3,8 мм и глубиной 1 мм для сплавов толщиной 2,8 мм. Геометрические параметры швов — ширину  $B$  и высоту  $H$  лицевой выпуклости определяли на поперечных макрошлифах. Значения погонной энергии процесса ИДСПЭ рассчитывали по формуле  $q_{\text{п}} = K_{\text{эф}} I_{\text{св}} U_{\text{д}} / v_{\text{св}}$ , кДж/см, где  $K_{\text{эф}}$  — эффективный КПД дуги (0,72 для аргона). Механические свойства основного металла и сварных соединений определяли на стандартных образцах ГОСТ 6996–66.

На рис. 1, 2 представлены микроструктуры соединений сплавов АМц, АМг2 и АМг6 в зависимости от режима сварки. Определено, что оптимальная ширина швов и их плавный переход к основному металлу наблюдается при  $I_{\text{св}} \geq 55$  А и  $v_{\text{св}} \geq 50$  м/ч ( $q_{\text{п}} \leq 0,5$  кДж/см) при скорости сварки 30 м/ч оптимальное формирование выпуклости швов наблюдается при  $I_{\text{св}} \leq 40$  А. Следует отметить, что такая скорость ( $v_{\text{св}} \leq 30$  м/ч) наиболее приемлема при полуавтоматическом процессе, когда сварщик еще может надежно поддерживать вылет сварочной горелки и ее равномерное перемещение.

Расчеты показали, что при поддержании одинаковой глубины проплавления металла толщиной 1...3 мм повышение скорости сварки в 3 раза

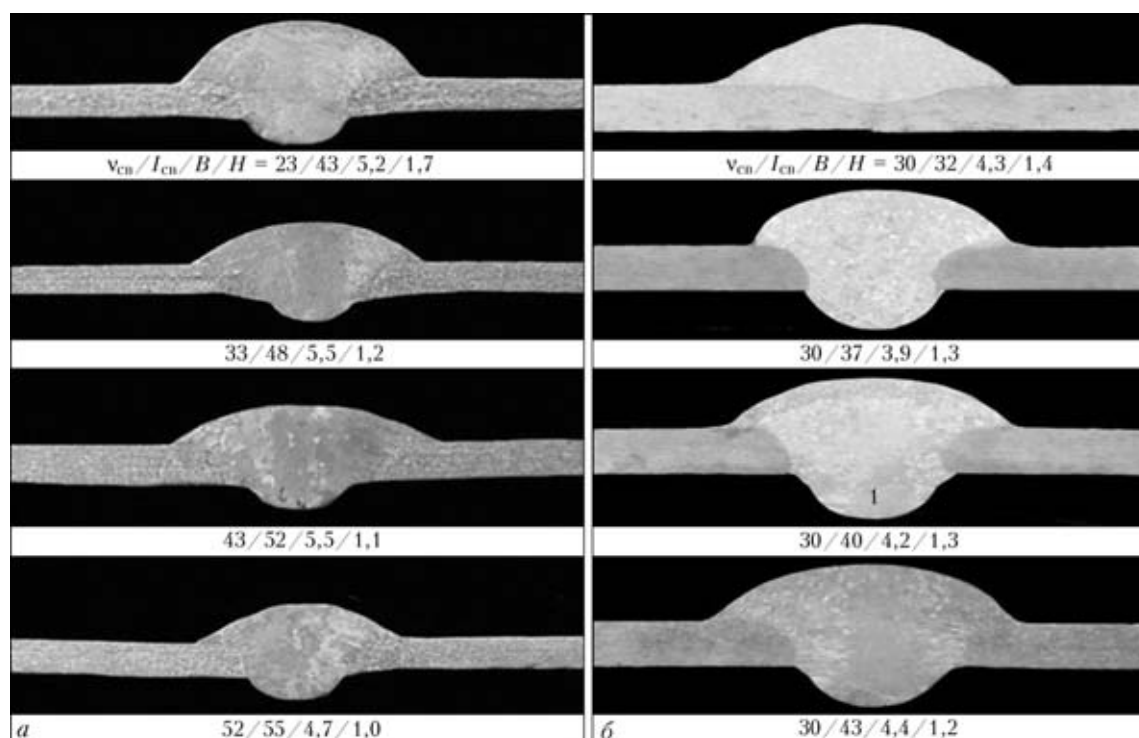


Рис. 1. Влияние режима сварки на геометрию соединений сплава АМц (а) и АМг2 (б) толщиной 1 мм. Здесь и далее номер в области металла шва соответствует номеру опытной сварки с погонной энергией согласно рис. 3

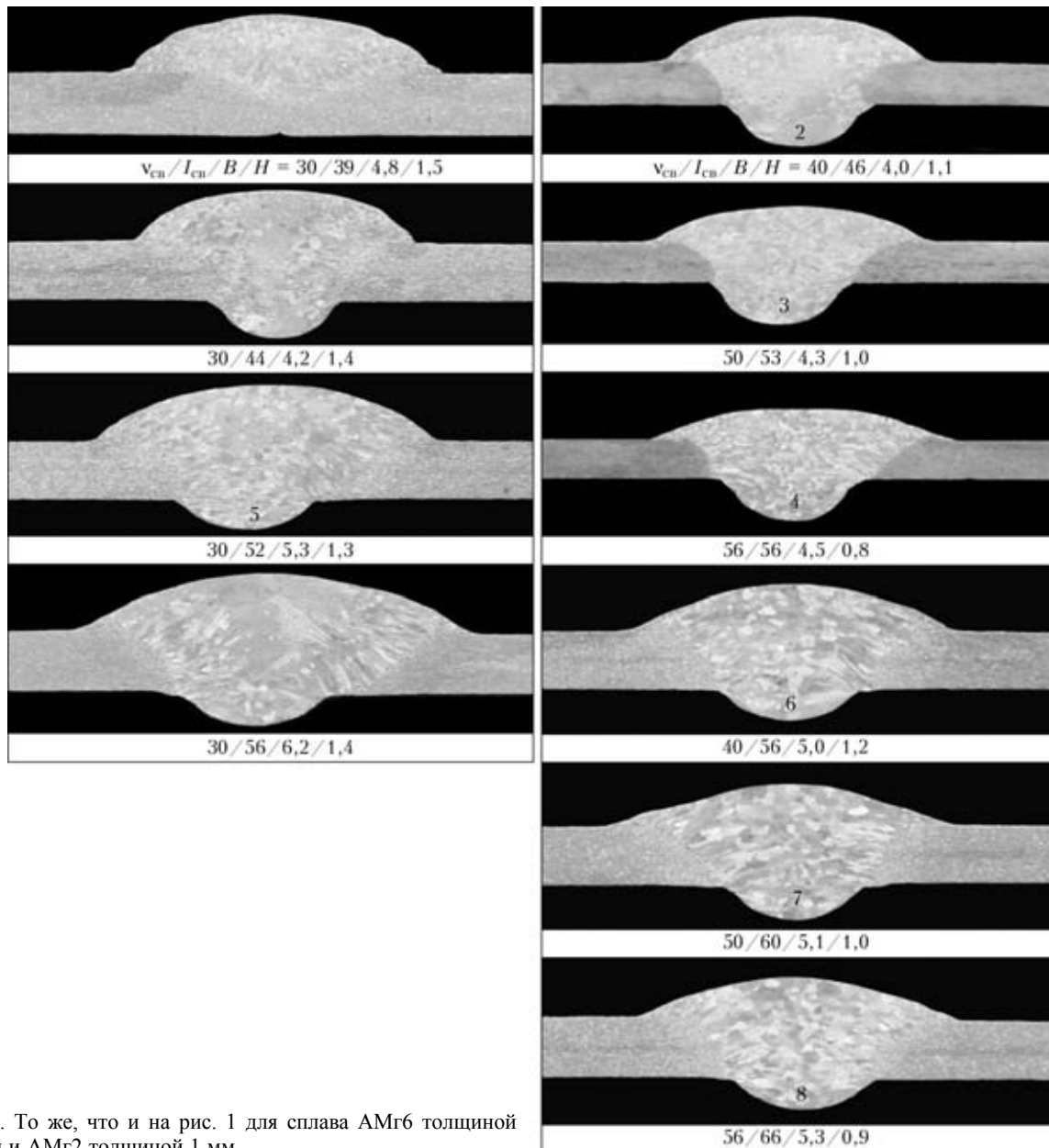


Рис. 2. То же, что и на рис. 1 для сплава АМг6 толщиной 1,5 мм и АМг2 толщиной 1 мм

(например, с 20 до 60 м/ч) требует увеличение силы сварочного тока всего в 1,7 раза и повышения напряжения на дуге в 1,15 раза, что приводит к снижению в 1,6 раза погонной энергии процесса сварки (рис. 3). Это, вероятнее всего, объясняется тем, что глубина проплавления алюминиевых сплавов  $h$  находится в пропорциональной зависимости от давления дуги  $P$ , которое, в свою очередь, зависит от квадрата силы сварочного тока и определяется по следующему уравнению [12]:  $h = f(P) \approx B_0 + B_1 I_{св} + B_2 I_{св}^2$ , где  $B_0$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  — коэффициенты уравнения регрессии, зависящие от состава защитного газа, диаметра и марки электродной проволоки и пр.

Анализируя данные, представленные на рис. 1–3, можно сделать вывод, что автоматическую ИДСПЭ алюминиевых сплавов толщиной

1...2 мм необходимо выполнять при  $I_{св} \geq 55$  А и  $v_{св} \geq 50$  м/ч ( $q_{п} \leq 0,5$  кДж/см). Это касается технологий сварки без применения систем слежения за перемещением сварочной горелки по кромкам стыкового соединения. В случае использования указанных выше систем слежения скорость сварки может быть значительно повышена.

На рис. 4 представлены размеры выпуклости швов и макроструктура соединений сплава 1915 в зависимости от режимов сварки. Установлено, что в швах соединений, полученных на оптимальных режимах сварки ( $v_{св} = 40...50$  м/ч), отсутствуют поры диаметром более 0,1 мм.

Исследования показали, что геометрические размеры швов, полученные ИДСПЭ, не превышают соответствующих значений, которые рекомендуются государственными (ГОСТ 14806–80)



Средние значения механических свойств сварных соединений (числитель), выполненных ИДСПЭ и основного металла (знаменатель) (во всех испытуемых образцах направление проката металла совпадает с осью сварного шва)

Марка сплава	$\delta$ , мм	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{0,01}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\sigma_B^{cc}/\sigma_B^{om}$	$\sigma_{0,2}^{cc}/\sigma_{0,2}^{om}$	Зона разрушения
АМг2	1,0	180	82	79	12,3	0,94	1,0	ЗТВ, ОМ
АМг2*	1,0	$\frac{177}{192}$	$\frac{80}{82}$	$\frac{78}{80}$	$\frac{12,4}{22}$	0,92	0,98	»
АМг6	1,5	352	182	146	15	0,96	0,93	ЗС и ЗТВ
АМг6*	1,5	$\frac{312}{365}$	$\frac{171}{196}$	$\frac{139}{148}$	$\frac{12}{20}$	0,85	0,87	Шов
АМг6	1,8	348	166	111	17	0,97	0,86	ЗС и ЗТВ
АМг6*	1,8	$\frac{319}{357}$	$\frac{158}{192}$	$\frac{97}{151}$	$\frac{14}{20}$	0,89	0,82	Шов
АД33Т1	2,8	218	126	81	8,8	0,69	0,44	ЗТВ
АД33*	2,8	$\frac{216}{314}$	$\frac{124}{277}$	$\frac{79}{151}$	$\frac{8,7}{14,9}$	0,68	0,45	»
1915Т1	2,8	346	216	185	9,2	0,82	0,72	ОМ
1915Т1*	2,8	$\frac{297}{426}$	$\frac{173}{297}$	$\frac{155}{205}$	$\frac{5,7}{19,0}$	0,70	0,58	Шов

\* Выпуклости шва сняты.

и отраслевыми стандартами на сварные алюминиевые соединения при ручной и автоматической сварке вольфрамовым электродом.

Результаты исследований механических свойств образцов сварных соединений представлены в таблице и свидетельствуют о том, что для термически неупрочненных сплавов типа Al-Mg-Mn условный предел прочности соединений (с двухсторонним усилением шва) снижается по сравнению с основным металлом не более чем на 6 %, а условный предел текучести не более чем на 14 %. Наибольшее снижение  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$  по сравнению с основным металлом наблюдается для соединений термически упрочненных сплавов: для

сплава АД33Т1 соответственно на 32 и 55 %; для сплава 1915Т1 на 16 и 28 %. Особенность разрушения сварных соединений с выпуклостями шва состоит в том, что все они разрушаются за пределами металла шва. Со снятыми выпуклостями соединения сплавов АМг2, АМг6 и 1915Т1 разрушаются по металлу шва, а снижение механических свойств по сравнению с основным металлом составляет соответственно: для соеди-

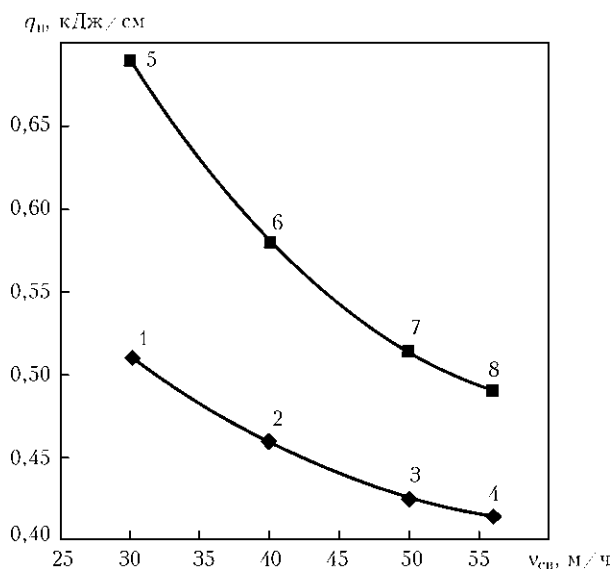


Рис. 3. Влияние скорости сварки на среднее значение погонной энергии процесса ИДСПЭ сплава АМг2 толщиной 1 мм (точки № 1...4) и сплава АМг6 толщиной 1,5 мм (№ 5...8)

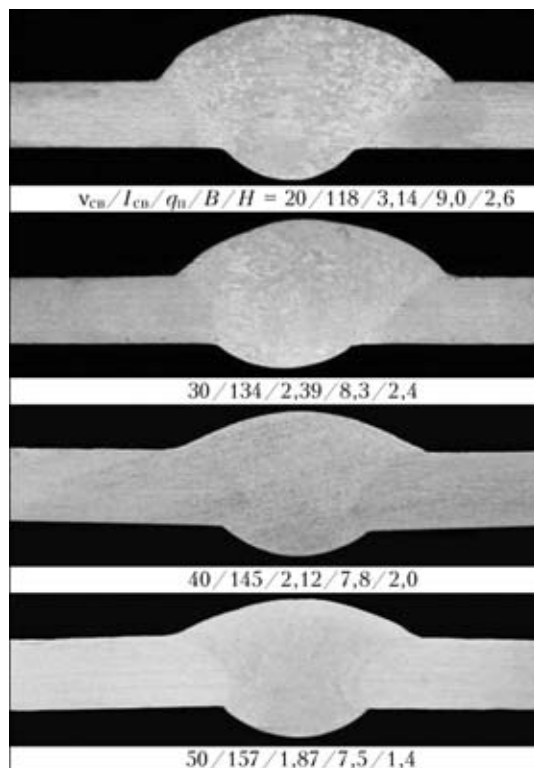


Рис. 4. Влияние скорости сварки, сварочного тока и погонной энергии сварки на геометрию соединений сплава 1915Т1

нений сплава АМгб  $\sigma_B$  — до 15 %,  $\sigma_{0,2}$  — до 16 %; для соединений сплава 1915Т1  $\sigma_B$  — до 16 %, а  $\sigma_{0,2}$  — до 28 %. Для соединений сплава АД33 наличие или отсутствие выпуклостей шва практически не влияет на показания условных пределов прочности и текучести, поскольку разрушение соединений происходит по металлу ЗТВ.

## Выводы

1. Современные импульсные источники питания с синергетическим управлением процессом ИДСПЭ позволяют расширить диапазоны толщин свариваемых металлов в сторону меньших их значений. При этом оптимизация режимов сварки, обеспечивающих стабилизацию равномерного формирования корня шва, приводит к повышению качества соединений тонколистовых алюминиевых сплавов.

2. С помощью ИДСПЭ в аргоне можно получать соединения алюминиевых сплавов толщиной 1...2,8 мм с достаточно хорошим качеством формирования швов и высокой их плотностью. При этом геометрические размеры наплавленного металла не превышают соответствующих значений параметров швов, получаемых ручной или автоматической сваркой вольфрамовым электродом.

3. Для снижения погонной энергии процесса ИДСПЭ и получения качественных соединений из тонколистовых алюминиевых сплавов необходимо применять относительно высокие сварочные токи и повышенные скорости сварки.

4. Результаты исследований процесса ИДСПЭ тонколистовых сплавов могут быть использованы для внесения изменений в существующие государственные и отраслевые стандарты на сварные соединения алюминиевых сплавов и послужат в дальнейшем широкому применению технологии

высокоскоростной сварки плавящимся электродом тонколистовых изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов.

1. *Алюминий и его сплавы в современных конструкциях* / А. Я. Ищенко, Т. М. Лабур, В. Н. Бернадский, О. К. Маковецкая. — Киев: Екотехнологія, 2006. — 112 с.
2. *Машин В. С., Покляцкий А. Г., Федорчук В. Е.* Механические свойства соединений алюминиевых сплавов при сварке плавящимся и неплавящимся электродом // Автомат. сварка. — 2005. — № 9. — С. 43–49.
3. *Левченко О. Г., Машин В. С.* Санитарно-гигиеническая характеристика процесса сварки плавящимся электродом в инертных газах алюминиевого сплава АМгб // Там же. — 2003. — № 1. — С. 48–50.
4. *Средняя температура металла электродных капель при сварке алюминиевых сплавов в инертных газах* / А. Я. Ищенко, В. С. Машин, И. В. Довбищенко, С. М. Гетманец // Там же. — 1994. — № 1. — С. 48–49.
5. *Влияние режимов импульсно-дуговой сварки алюминия АДЮ на форму и пористость швов* / В. С. Машин, В. М. Павшук, И. В. Довбищенко, П. П. Шейко // Там же. — 1991. — № 4. — С. 57–60.
6. *Жерносеков А. М., Андреев В. В.* Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом (Обзор) // Там же. — 2007. — № 10. — С. 48–51.
7. *Воропай Н. М., Илюшенко В. М., Ланкин Ю. Н.* Особенности импульсно-дуговой сварки с синергетическим управлением параметрами режимов // Там же. — 1999. — № 6. — С. 26–31.
8. *Дриц А. М., Овчинников В. В.* Особенности лазерной сварки алюминиево-литиевых сплавов 1420 и 1460 // Цветн. металлы. — 2009. — № 9. — С. 59–63.
9. *Особенности лазерно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов различных систем легирования* / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, В. С. Машин, М. П. Пашуля // Автомат. сварка. — 2009. — № 12. — С. 28–36.
10. *Довбищенко И. В., Ищенко А. Я., Машин В. С.* Применение гелия при сварке алюминиевых сплавов плавящимся электродом // Там же. — 1997. — № 2. — С. 14–19.
11. *Ищенко А. Я., Машин В. С., Будник В. П.* О пористости швов при сварке алюминиевых сплавов плавящимся электродом в инертных газах // Там же. — 1995. — № 1. — С. 16–18.
12. *Средняя температура металла ванны при дуговой сварке алюминиевых сплавов в инертных газах* / А. Я. Ищенко, В. С. Машин, И. В. Довбищенко, С. М. Гетманец // Там же. — 1994. — № 11. — С. 15–19.

Technological peculiarities of pulsed-arc butt welding of 1...2,8 mm thick sheet aluminium alloys АМts, АМg2, АМg6, 1915Т1 and АД33Т1 by the MIG method in argon atmosphere were studied. The effect of welding parameters on geometric parameters of the welds, their macrostructure and mechanical properties of the welded joints was shown. Recommendations on the welding technology are given.

Поступила в редакцию 30.07.2009