



# КОНТАКТНАЯ СТЫКОВАЯ СВАРКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, П. Н. ЧВЕРТКО, Л. А. СЕМЁНОВ, К. В. ГУЩИН, С. М. САМОТРСЯСОВ  
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Приведены обобщенные данные разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины технологий и оборудования для контактной стыковой сварки изделий из алюминиевых сплавов, а также типы изделий, которые свариваются контактной стыковой сваркой в ракетостроении. Рассмотрены основные направления исследований для усовершенствования технологий сварки высокопрочных алюминиевых сплавов: технология контактной стыковой сварки пульсирующим оплавлением как метод интенсификации нагрева, а также влияние степени деформации при осадке на структуру и свойства сварных соединений. Определена оптимальная степень деформации формирующих устройств, которая позволяет увеличить относительное удлинение сварного изделия в полтора раза при одновременном сохранении высоких показателей прочности. При сварке толстостенных термически упрочняемых алюминиевых сплавов послесварочная термомеханическая обработка позволяет получить соединения, равнопрочные с основным металлом. Создана технология сварки тонкостенных тавровых профилей из высокопрочных трудносвариваемых сплавов. Механические характеристики сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов находятся на уровне не ниже 90 % прочности основного металла. Библиогр. 10, табл. 3, рис. 10.

*Ключевые слова:* контактная стыковая сварка, оплавление, алюминиевые сплавы, сварное соединение, термомеханическая обработка, механические свойства, прочность, пластичность

Широкое применение алюминиевых сплавов для изготовления ответственных конструкций в авиационном и ракетостроении обусловило необходимость создания надежных и высокоэффективных технологий их соединения [1]. Для производства этих конструкций применяют различные способы сварки: дуговую, электронно-лучевую, контактную, трением и др. [2–4]. При изготовлении ответственных конструкций из трудносвариваемых сплавов получают неразъемные соединения клепкой. Эксплуатационные характеристики изделий существенно зависят от выбранного способа их соединения [5].

Контактная стыковая сварка оплавлением (КССО) успешно используется на предприятиях Украины и России для соединения различных деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов. Многолетний опыт применения КССО свидетельствует о высоком и стабильном качестве соединений. Технологический процесс КССО объединяет сборочные и сварочные операции, не требует вспомогательных расходных материалов (электродов, проволоки, флюсов, защитных газов) и легко поддается автоматизации, роботизации. При сварке оплавлением не требуется прецизионная подготовка торцов деталей [6–8].

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработаны технологии и оборудование для КССО различных изделий из сплавов на основе алюминия с площадью поперечного сечения до 90000 мм<sup>2</sup> (табл. 1). Технологии и специализи-

рованное оборудование внедрены на заводах ракетной отрасли Украины и России.

Технология КССО применяется для соединения:

– изделий замкнутой формы (шпангоутов) из пресованных профилей со сложным и разнотолщинным поперечным сечением площадью до 60000 мм<sup>2</sup> (примеры свариваемых профилей приведены на рис. 1);

– продольных швов обечаек корпусов топливных емкостей сечением до 2000×32 мм<sup>2</sup> из спла-

**Таблица 1. Оборудование для КССО деталей из алюминиевых сплавов**

Машины для КССО	Максимальные свариваемые сечения, мм <sup>2</sup>	Минимальный внутренний диаметр кольцевых заготовок, мм	Номинальная мощность при ПВ = 50%, кВт·А	Производительность, сварок/ч
K617	600	320	150	20
K724	600	250	100	36
K607	5000	500	350	8
K393	6000	1300	150	10
K756	15000	900	860	6
K566	26000	1400	930	4
K831	40000	1700	6000	2
K754	60000	5000	4800	4
K767	64000	1800	4800	2
K825	90000	1800	6000	2



Рис. 1. Примеры профилей из алюминиевых сплавов, свариваемых КССО

вов АМг6НПП, 1201 и 2000×45 мм<sup>2</sup> из сплава АМг6М;

– продольного силового набора (стрингеры, фитинги) толщиной от 2 мм из алюминиевых сплавов различных систем легирования (В95, Д16, АК6) в одно- и разнородном сочетаниях.

КССО шпангоутов с площадью сечения 2500 мм<sup>2</sup> на машине К393 и обечайки с площадью сечения 64000 мм<sup>2</sup> на машине К767 показана на рис. 2.

В связи с широким применением в сварных конструкциях высокопрочных алюминиевых сплавов, относящихся к категории трудносвариваемых, возникает необходимость совершенствования технологии КССО. Установлено, что для получения высоких показателей механических

свойств сварных соединений прежде всего необходимо оптимизировать энергозатраты при сварке и контролировать распределение температуры в металле ЗТВ. При сварке термоупрочненных сплавов особенно важно оптимизировать температуру и время нагрева [9]. Наряду с этим существенное влияние на механические свойства соединений оказывают условия деформации при контактных слоях металла, претерпевающих интенсивную деформацию.

В результате многолетних исследований в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработаны методы интенсификации нагрева (программное снижение напряжения, импульсное и пульсирующее оплавление) [6]. В настоящее время в ИЭС им. Е. О. Патона разрабатываются технологии нагрева пульсирующим оплавлением алюминиевых сплавов с применением современных мощных гидравлических приводов и компьютерных систем управления. Суть способа нагрева пульсирующим оплавлением заключается в поддержании сварочного тока в диапазоне, при котором генерируется максимальная полезная мощность в контакте между деталями. Данный режим обеспечивается путем регулирования скорости сварки в зависимости от значения сварочного тока. Применение пульсирующего оплавления вместо подгрева сопротивлением позволяет получать равномерный высококонцентрированный нагрев по

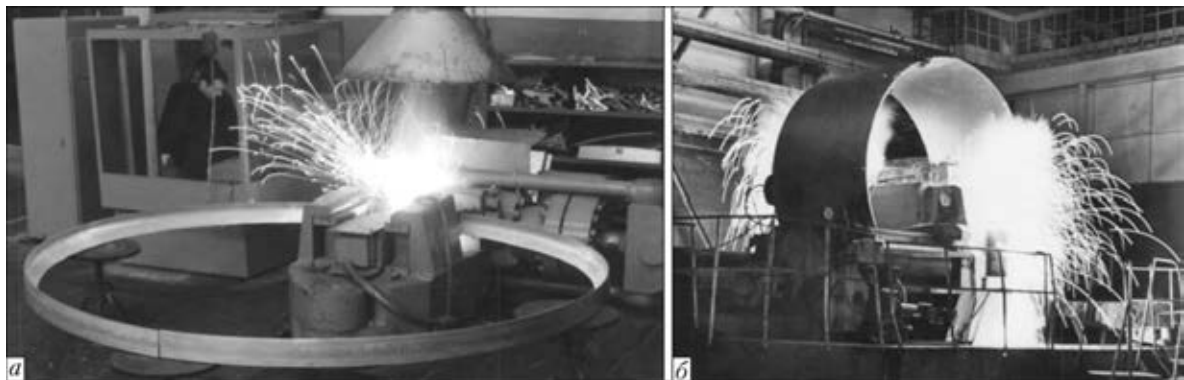


Рис. 2. КССО шпангоутов на машине К393 (а) и обечайек на машине К767 (б)

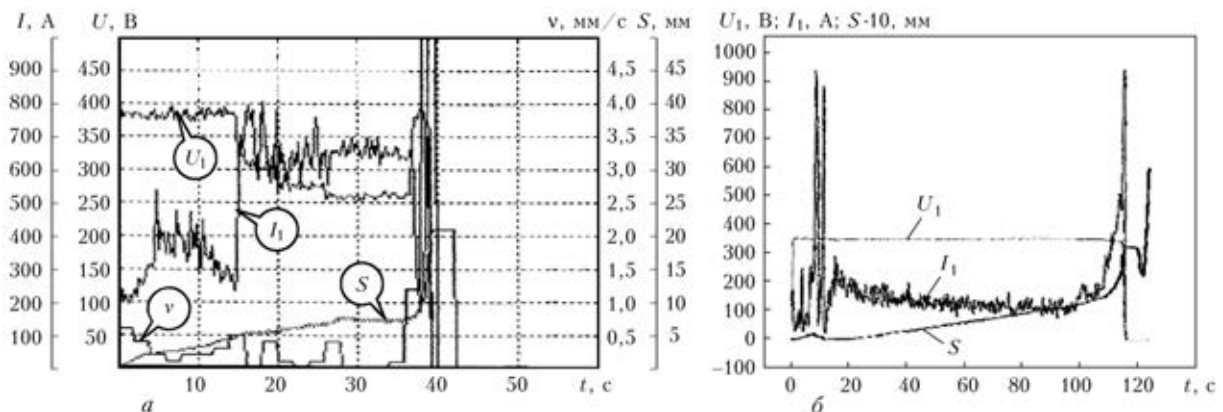


Рис. 3. Программы изменения основных параметров процесса при сварке деталей из алюминиевого сплава площадью сечения 30×140 мм<sup>2</sup> пульсирующим (а) и непрерывным (б) оплавлением

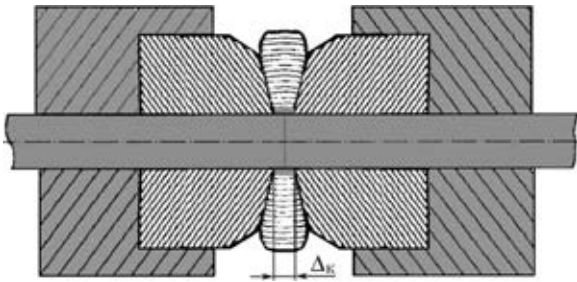


Рис. 4. Схема формирования сварного соединения с конечным зазором  $\Delta_k$

Для повышения пластических характеристик сварных соединений исследовано влияние степени деформации при формировании сварного соединения на механические свойства сварных швов.

При сварке с формирующими устройствами (рис. 4) металл толщиной  $\delta$  при осадке экструдируется в зазор  $\Delta_3$ , значение которого изменяется во времени, при этом степень деформации  $\epsilon$  также меняется во времени [10]:

$$\Delta_3(t) = \Delta_k + \Delta_{oc} - v_{oc} t, \quad \epsilon(t) = \frac{\delta - \Delta_3(t)}{\delta} \cdot 100 \%$$

где  $\Delta_{oc}$  — припуск на осадку;  $v_{oc}$  — скорость осадки.

При увеличении конечного зазора между формирующими устройствами пропорционально уменьшается степень деформации и угол изгиба волокон под кромками ножей. Установлено, что при сварке оплавлением уменьшение степени деформации в сварном соединении за счет увеличения конечного зазора позволяет повысить относительное удлинение  $\delta_5$  с 7 до 10...11 % при одновременном сохранении высоких показателей прочности (рис. 5). Макроструктуры зоны сварного соединения с разной конечной степенью деформации приведены на рис. 6. Результаты механических испытаний сварных соединений, полученных при КССО, образцов из сплава 1201 толщиной 30 мм с разными условиями экструзии приведены в табл. 2. Применение термомеханической обработки после сварки позволяет получать сварные соединения, близкие к прочности основного металла (табл. 3).

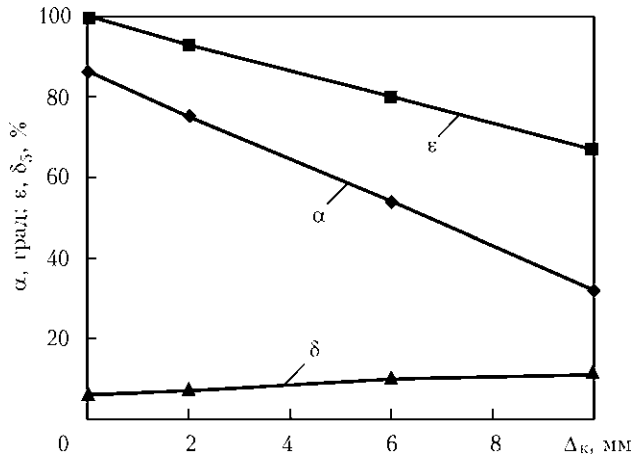


Рис. 5. Зависимость степени деформации, угла изгиба волокна и относительного удлинения от конечного зазора

свариваемому сечению, уменьшить припуски на оплавнение и длительность нагрева.

Проведенные исследования показали, что возможность плавного регулирования сварочного напряжения при нагреве пульсирующим оплавлением позволяет задавать режим нагрева с наиболее оптимальными параметрами сварки (см. рис. 3).

Таблица 2. Механические свойства основного металла и сварных соединений из сплава 1201 толщиной 30 мм

Материал	$\epsilon$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$K_{II} = \sigma_{B\text{св}} / \sigma_{B\text{ом}}$
Основной металл	—	433	15	—
Сварное соединение	93	411	7	0,95
	80	427	10	0,98
	67	430	11	0,99

Разработка технологии сварки сопровождалась совершенствованием конструкции оборудования для КССО. Разработаны системы быстродействующих гидроприводов машин на базе современных комплексов, компьютеризированные системы управления параметрами процесса оплавления. Они позволяют воспроизводить с высокой точностью заданные режимы сварки (см. рис. 3, а), обеспечивающие устойчивое оплавление при более высоких плотностях тока, чем при непрерывном оплавлении (см. рис. 3, б).

Таблица 3. Механические свойства основного металла и сварных соединений без и с термомеханической обработкой после сварки

Сплав (аналог)	Без термической обработки			Термомеханическая обработка после сварки			$K_{II}$
	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	
1201 (2219)	176/177	86/100	23/23	441/432	325/345	25/8	0,98
B95 (7075)	217/219	103/128	21/13	487/479	419/406	12/9	0,98
АД33 (6061)	132/131	67/73	32/27	281/301	276/297	19/15	1

Примечание. В числителе приведены значения основного металла, в знаменателе — сварного соединения.

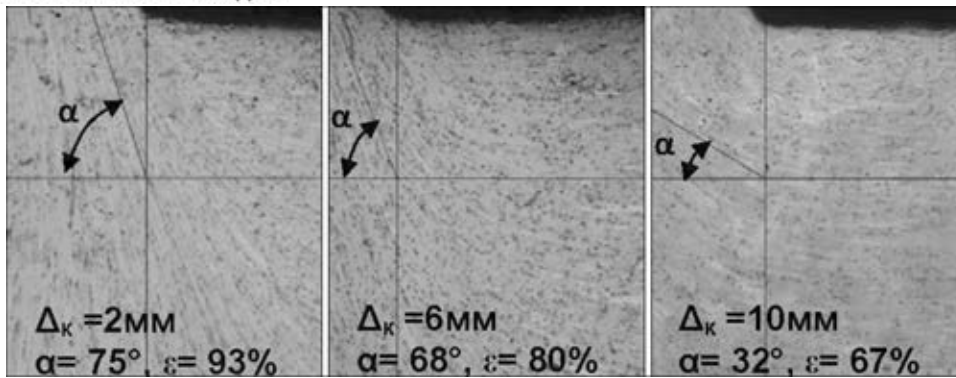


Рис. 6. Макроструктуры зоны сварного соединения ( $a$ – $в$ ) при сварке сплава 1201 толщиной 30 мм с разной конечной степенью деформации

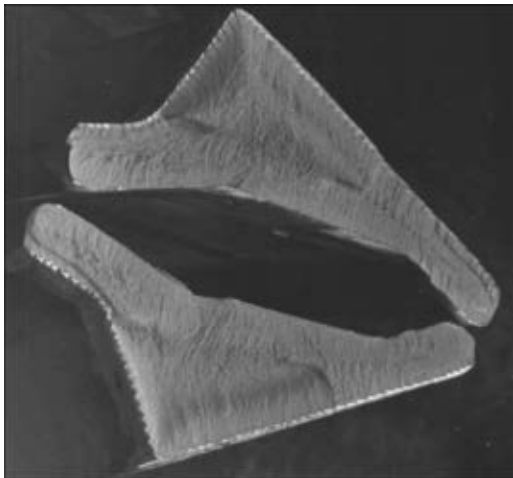


Рис. 7. Изломы сварных соединений

В процессе отработки режимов сварки критерием оценки качества в производственных условиях является испытание сварных соединений, предварительно надрезанных по сварному шву на изгиб до разрушения (экспресс-анализ качества). Данный метод позволяет визуально обнаружить дефекты непосредственно в шве. Пример излома приведен на рис. 7.

В структуре сварных соединений различают:  
 — основной металл с большими вытянутыми вдоль линии проката зернами и большими скоплениями интерметаллидов по их границам;  
 — зону термического влияния, которая состоит из участков с различной степенью рекристаллизованного и деформированного металла, что приводит к резкому уменьшению размера зе-

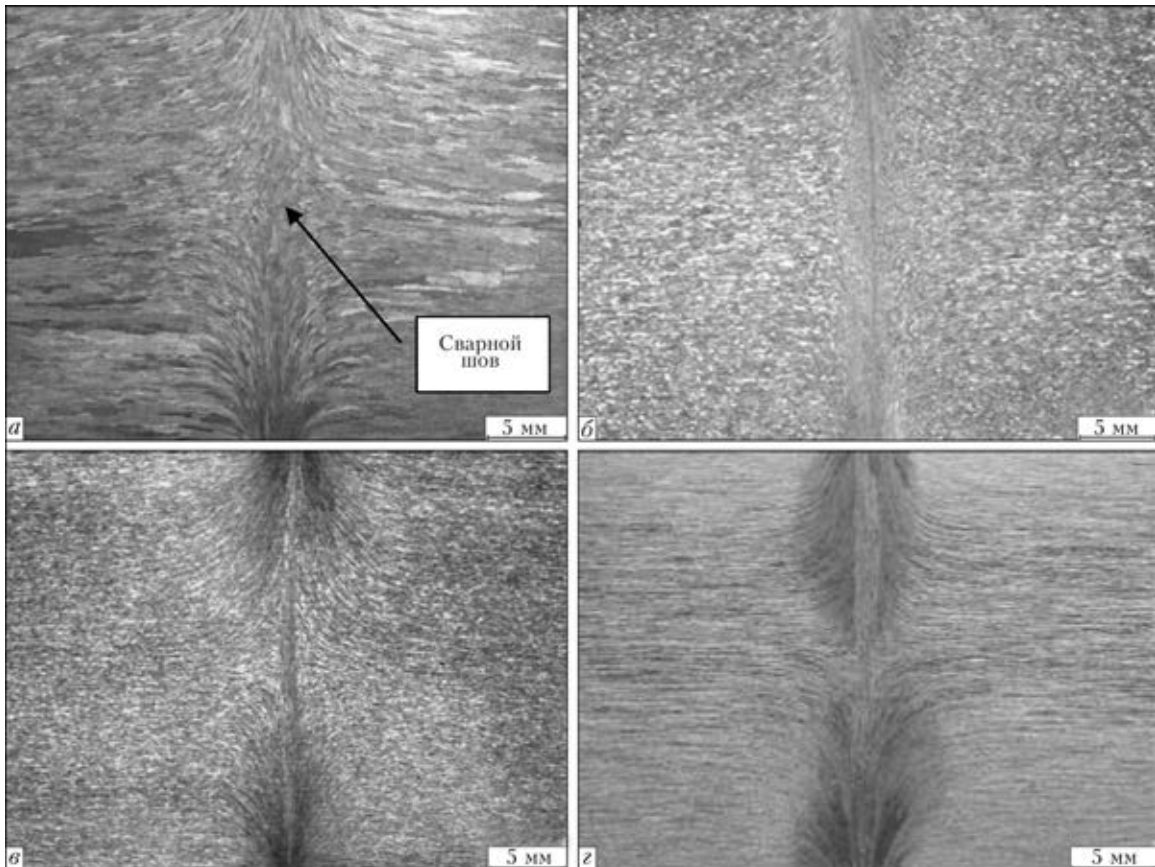


Рис. 8. Макроструктуры сварных соединений, полученных методом КССО сплава 1201 ( $a$ ), АД33 ( $б$ ), 1570 ( $в$ ) и В95 ( $г$ )

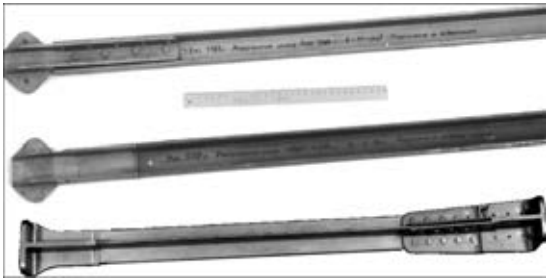


Рис. 9. Клепаное и сварное соединения разнородных сплавов на основе алюминия элементов фитинг–стрингер, применяемых в аэрокосмической промышленности

рен и их ориентации по отношению к направлению зерен основного металла вплоть до 90°;

— металл шва, имеющий плотную мелкозернистую структуру.

Примеры микроструктуры сварных соединений, полученных методом КССО образцов толщиной 30 мм из сплавов 1570, АД33, 1201, В95, приведены на рис. 8.

Применение сварки вместо клепки является одним из эффективных способов решения проблемы снижения массы летательных аппаратов (рис. 9).

В результате проведенных исследований разработана технология КССО тонкостенных термически упрочненных тавровых профилей из сплава В95Т1, применяемая при изготовлении узлов продольного силового набора последней ступени с полезной нагрузкой ракет-носителей (фитинг–стрингер и стрингер–стрингер). Данная технология обеспечивает коэффициент прочности сварных соединений  $K_{\text{п}} \geq 0,9$ . Средние значения механических свойств основного металла (числитель) и сварных соединений (знаменатель) профиля толщиной 2,5 мм из сплава В95Т1 приведены ниже:  $\sigma_{\text{в}}$  (МПа) = 580/536;  $\sigma_{0,2}$  (МПа) = 505/426;  $\delta_5$  (%) = 15/6 ( $K_{\text{п}} = 0,92$ ).

На основе технологии КССО тонкостенных профилей из высокопрочных алюминиевых сплавов создана новая машина для сварки элементов стрингер – фитинг, стрингер – стрингер (рис. 10), которая обеспечивает КССО профилей из высокопрочных алюминиевых сплавов площадью поперечного сечения до 300 мм<sup>2</sup>.

Применение данной технологии в производстве для сварки соединений фитинг – стрингер, вместо используемых на данный момент клепанных, позволит существенно увеличить массу полезного груза, выводимого на орбиту отечественными ракетносителями.

### Выводы

1. Использование технологии контактной стыковой сварки оплавлением для соединения деталей из высокопрочных сплавов на основе алюминия



Рис. 10. Машина для КССО тонкостенных профилей из высокопрочных алюминиевых сплавов

обеспечивает механические свойства сварных соединений на уровне не ниже 90% прочности основного металла.

2. Определена оптимальная степень деформации при осадке с использованием формирующих устройств, которая позволяет увеличить относительное удлинение сварного изделия в полтора раза при одновременном сохранении высоких показателей прочности.

3. При сварке толстостенных термически упрочняемых алюминиевых сплавов послесварочная термомеханическая обработка позволяет получить соединения, равнопрочные с основным металлом.

4. Разработана технология и оборудование для КССО тонкостенных тавровых профилей из высокопрочных термически упрочненных сплавов на основе алюминия.

1. Николаев Г. А., Фридляндер И. Н., Арбузов Ю. П. Свариваемые алюминиевые сплавы. — М.: Металлургия, 1990. — 296 с.
2. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (Обзор) / А. Я. Ищенко, С. В. Подбельников, А. Г. Покляцкий // Автомат. сварка. — 2007. — № 11. — С. 32–38.
3. Ищенко А. Я. Сварка алюминиевых сплавов (направление исследований, проводимых в ИЭС им. Е. О. Патона) // Там же. — 2007. — № 11. — С. 10–13.
4. Ищенко А. Я. Особенности применения алюминиевых высокопрочных сплавов для сварных конструкций // Там же. — 2004. — № 9. — С. 16–26.
5. Ищенко А. Я., Чапор В. О. Свариваемость высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–(Cu) (Обзор) // Там же. — 2000. — № 4. — С. 6–12.
6. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.
7. Контактная стыковая сварка изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов / С. И. Кучук-Яценко, Г. П. Сахацкий, Л. А. Семенов, О. П. Поповский // Автомат. сварка. — 1967. — № 7. — С. 13–18.
8. Гельман А. С. Основы сварки давлением. — М.: Машиностроение, 1970. — 312 с.
9. Особенности контактной стыковой сварки высокопрочного алюминиевого сплава 2219 / С. И. Кучук-Яценко, П. Н. Четвертко, Л. А. Семенов и др. // Автомат. сварка. — 2010. — № 3. — С. 9–12.
10. Полухин П. И. Технология металлов и сварка. — М.: Высш. шк., 1977. — 464 с.

Поступила в редакцию 10.06.2013