

PACS: 68.35.Fx, 73.61.At

К.В. Гуцин¹, И.Н. Клочков¹, А.В. Завдоев^{1,2}, А.А. Чайка¹,
С.И. Мотрунич¹

КОНТАКТНО-СТЫКОВАЯ СВАРКА ОПЛАВЛЕНИЕМ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТЕРМИЧЕСКИ УПРОЧНЯЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

¹Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины

²Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины

Статья поступила в редакцию 25 августа 2015 года

Проведены исследования свариваемости высокопрочных термически упрочняемых (ВТУ) алюминиевых сплавов методом контактно-стыковой сварки оплавлением (КССО). На примерах цинк- и медьсодержащих алюминиевых сплавов продемонстрирована возможность формирования качественного сварного соединения (прочность не менее 90% прочности основного металла) ВТУ-сплавов как между собой, так и с алюминиевыми сплавами средней прочности.

Ключевые слова: высокопрочные термически упрочняемые алюминиевые сплавы, контактно-стыковая сварка оплавлением, экструзия, сварное соединение, структура, механические свойства

Проведено дослідження зварюваності високоміцних термічно зміцнених (ВТЗ) алюмінієвих сплавів методом контактно-стикового зварювання оплавленням (КСЗО). На прикладах алюмінієвих сплавів, легованих цинком і міддю, продемонстровано можливість формування якісного зварного з'єднання (міцність становить не менше 90% міцності основного металу) ВТЗ-сплавів як між собою, так і з алюмінієвими сплавами середньої міцності.

Ключові слова: високоміцні алюмінієві сплави, що термічно зміцнюються, контактно-стикове зварювання оплавленням, екструзія, зварне з'єднання, структура, механічні властивості

1. Введение

Высокопрочные термически упрочняемые алюминиевые сплавы нашли широкое применение в промышленности при производстве ответственных элементов и конструкций в авиа- и ракетостроении. Эти сплавы упрочняются термической обработкой, приобретая при этом высокие механические свойства и сохраняя достаточную технологическую пластичность. В настоящее время, например, для изготовления силовых элементов корпусов авиационной и ракетно-космической техники используют ВТУ-сплавы В95, АА7056, Д16. При этом применяются клепаные соединения, так как указанные сплавы

относятся к группам трудносвариваемых или до последнего времени несвариваемых.

В то же время существенный недостаток клепаного соединения – увеличение веса конструкции вследствие появления вспомогательных элементов при клепке стыкуемых элементов. Клепка является трудоемкой, экономически затратной, сопряженной с тяжелыми условиями труда операцией. Необходима тщательная обработка поверхности отверстия под заклепку для надежного соединения изделия. В процессе длительной эксплуатации клепаное соединение подвержено расшатыванию, что отражается на ресурсе работы изделий.

Эффективным способом решения проблемы повышения прочности, качества соединений и повышения тактико-технических характеристик летательных аппаратов (в частности, снижения веса конструкции и соответственно повышения полезного груза летательных аппаратов) является применение сварки вместо клепки [1]. Одним из наиболее перспективных способов получения качественных сварных соединений с высокими механическими свойствами для данных задач является КССО.

В связи с этим проведены исследования свариваемости ВТУ алюминиевых сплавов методом КССО. С целью демонстрации перспектив данного метода получены соединения алюминиевых сплавов как одной, так и различных систем легирования. В настоящей работе рассмотрено формирование структуры и свойств соединений ВТУ алюминиевых сплавов в упрочненном состоянии при КССО в сочетании с экструзией.

2. Методика эксперимента

В качестве исследуемых материалов использованы алюминиевые сплавы, химический состав которых приведен в таблице. Среди высокопрочных сплавов на основе алюминия наибольшее применение в ракетно-космических и авиационных конструкциях получили сплавы типа В95 и АА7056, относящиеся к системе Al–Zn–Mg–Cu. Цинк, магний и медь образуют между собой и с алюминием твердые растворы и различные металлические соединения – фазы $M(MgZn_2)$, $S(Al_2CuMg)$, $T(Al_2Mg_3Zn_3)$, играющие большую роль в упрочнении сплава при его термической обработке.

Таблица

Характеристики алюминиевых сплавов

Сплав	σ_b , МПа	Содержание легирующих элементов, mass%			
		Zn	Mg	Cu	Si
В95	580	7.0	2.8	2.0	–
АА7056	590	9.5	1.8	1.6	–
Д16	455	< 0.3	1.8	4.9	–
АК6	387	–	1.0	2.0	1.0

Сплав Д16 имеет как минимум шесть легирующих компонентов: алюминий, медь, магний, марганец, железо и кремний, основными из которых являются медь и магний. Поэтому данный сплав относят к системе Al–Cu–Mg.

Сплав АК6 системы легирования Mg–Si–Cu используется, как правило, в виде поковок, получаемых преимущественно из прессованных прутков. Основными легирующими элементами являются магний, кремний и медь. Данный сплав относится к группе средней прочности и после термической обработки состоит из зерен твердого раствора алюминия и включений фаз CuAl_2 и Mg_2Si . Сплав АК6 активно применяется в самолетостроении, и существует необходимость в соединении его с ВТУ алюминиевыми сплавами. Следует отметить, что этот сплав менее чувствителен к нагреву, чем сплавы Д16 и В95 [2,3].

Сварку образцов проводили на универсальной лабораторной машине для контактной стыковой сварки непрерывным оплавлением, оснащенной пневмогидравлическим приводом осадки с усилием $F_{\text{ups}} = 130 \text{ kN}$ и сварочным трансформатором мощностью 150 kW.

Для определения структурных особенностей и свойств полученных соединений выполнены металлографические исследования, измерение твердости, механические испытания. Также проведены усталостные испытания соединений ВТУ-сплава AA7056 при циклической нагрузке с асимметрией цикла напряжений $R_\sigma = -0.1$ и 0.4 при одноосном переменном нагружении и чистом переменном изгибе. Образцы испытывали на универсальной сервогидравлической машине MTS 318.25 (Material Test System) до полного разрушения.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Известно, что термически упрочненные сплавы чувствительны к нагреву и степень их разупрочнения зависит от температуры нагрева и времени выдержки при данной температуре. При сварке наиболее высокие механические свойства можно получить в том случае, когда длительность нагрева до температур выше критических не превышает определенных пределов [4]. Такой температурный цикл тяжело обеспечить при сварке алюминиевых сплавов ввиду их большой теплопроводности. В связи с этим необходимо обеспечить интенсивное высококонцентрированное вложение тепла в зону нагрева.

Процесс КССО осуществляется в автоматическом режиме, при котором достигается высокое стабильное качество соединения. Конструкция сварочного оборудования и технологической оснастки обеспечивает совмещение сборочно-сварочных операций в едином цикле и высокую точность геометрических размеров сварного соединения [5]. Обязательным условием получения качественных сварных соединений из алюминиевых сплавов является формирование соединения в сочетании с экструдированием металла при осадке в зазор между формирующими устройствами. При этом степень деформации растет по мере сближения ножей [6]. Схема процесса КССО с экс-

трузией приведена на рис. 1. Формирующие устройства выполняют две важные функции: при осадке они образуют соединение в условиях объемно-пластической деформации; выполняют функцию ножей для срезки грата. В результате образуется сварное соединение, которое практически не нуждается в дальнейшей механической зачистке от грата (рис. 2).

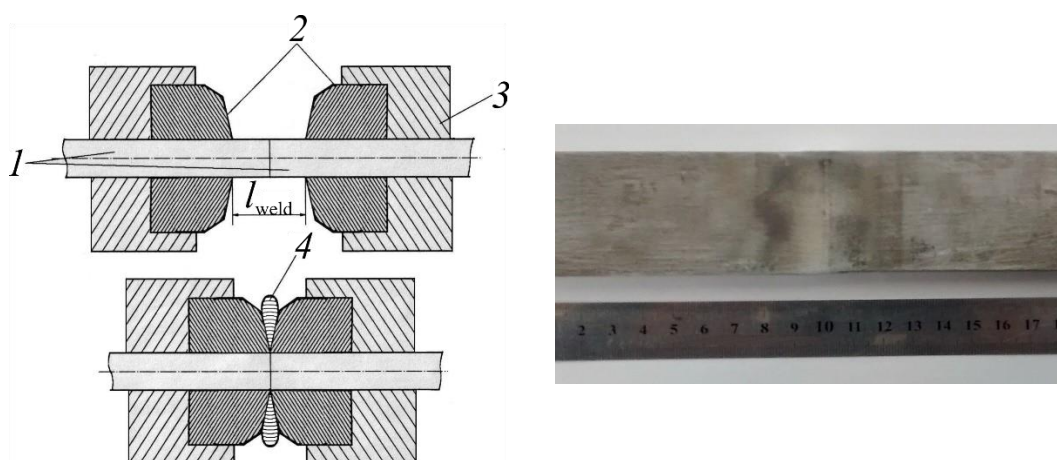


Рис. 1. Схема контактной стыковой сварки с формированием соединения: 1 – детали; 2 – формирующие устройства; 3 – токоподвод; 4 – экструдированный металл; l_{weld} – припуск на сварку

Рис. 2. Сварное соединение алюминиевого сплава АА7056

Выбор и последующую коррекцию режимов сварки проводили экспериментальным путем. Распределение температуры в разогретой оплавляемой приконтактной зоне пластины толщиной 4 мм из сплава Д16 перед осадкой (которое учитывали при выборе режимов сварки) представлено на рис. 3. В процессе отработки режимов сварки также проводили экспресс-анализ качества сварных соединений – загиб образцов с надрезом по шву до разрушения. Качество соединений оценивали по наличию или отсутствию дефектов при визуальном осмотре разрушенного по шву образца (оксидных плен и т.п.). В режимах сварки стремились минимизировать время сварки с целью уменьшения разупрочнения металла при нагреве. По изложенной методике были определены оптимальные режимы, которые обеспечивают отсутствие дефектов по линии соединения. Отличия физических свойств сплавов (теплопроводность сплава АК6 на 30% выше, чем сплава Д16 [2,3]) значительно влияют на их нагрев во время оплавления, на формирование шва, характер деформации и структурных превращений в зоне термического влияния, что учитывалось при подборе параметров сварочного процесса.

При КССО в процессе осадки в результате экструзии металла между формирующими устройствами образуется текстура сварного соединения с характерным разворотом волокон основного металла на угол, близкий к 90° . На

рис. 4 приведены макроструктуры сварных соединений ВТУ алюминиевых сплавов как одной, так и различных систем легирования.

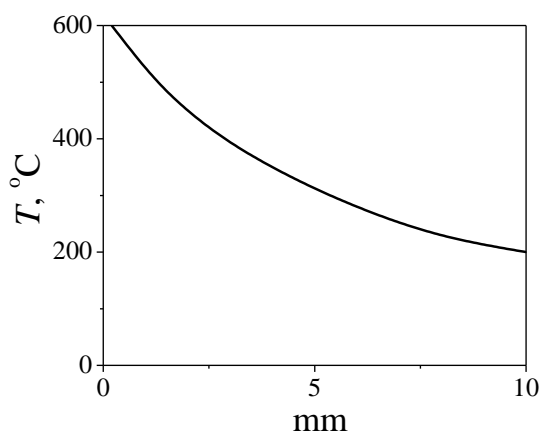


Рис. 3. Распределение температуры в разогретой оплавлением приконтактной зоне пластины из сплава Д16 толщиной 4 мм перед осадкой

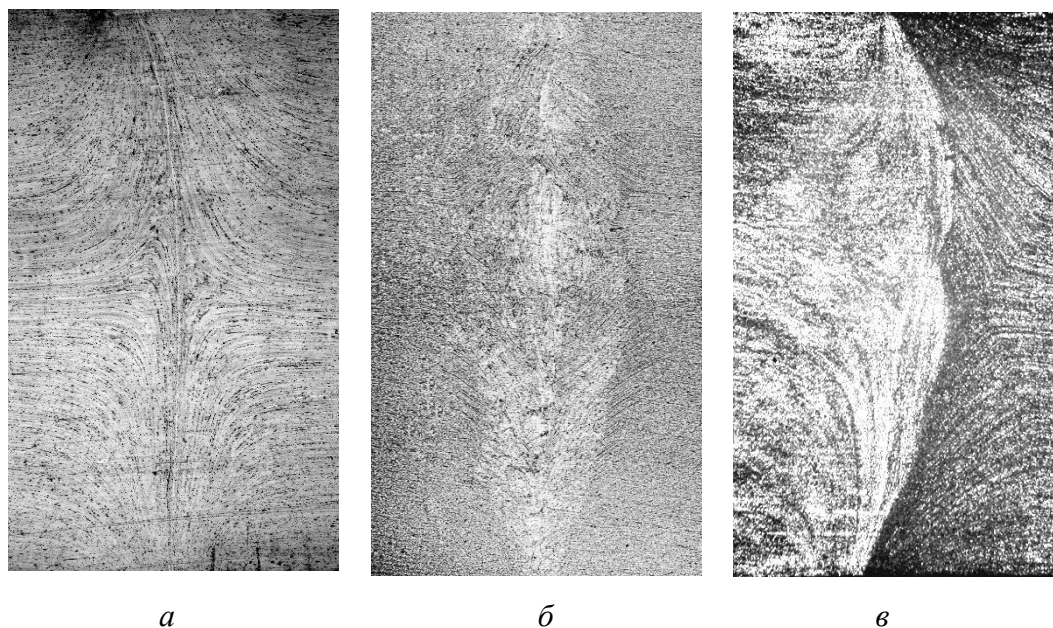


Рис. 4. Макроструктура стыка сварного соединения из сплавов: *а* – В95; *б* – АА7056; *в* – АК6 (слева) + Д16 (справа). Увеличение $\times 25$

Микроструктура зоны соединения ВТУ алюминиевых сплавов характеризуется деформированными вытянутыми зёрнами твёрдого раствора с высокой плотностью интерметаллидных фаз в виде продолговатых цепочек, образовавшихся в процессе термической обработки (рис. 5). По мере приближения к шву интерметаллидные включения измельчаются. В структуре сварного соединения из сплава В95 (рис. 5,*а*) образуется сварной шов. Металл шва имеет характерную мелкозернистую структуру, содержащую зёрна твёрдого раствора Mg, Zn, Cu в алюминии и измельченных интерметаллидных фаз М, Т, S

размером 1–2 μm , ориентированных в направлении течения металла при осадке.

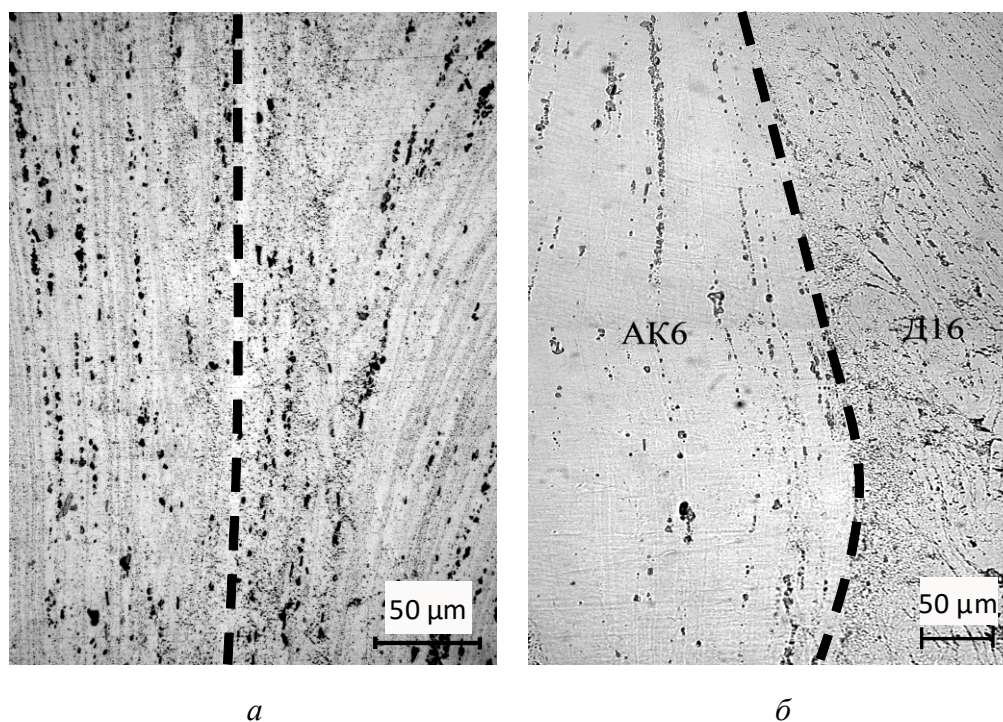


Рис. 5. Микроструктура швов сварного соединения из сплавов: *a* – В95; *б* – АК6 + Д16; ---- – линия сплавления

Также проведены структурные исследования сварных соединений из сплавов Д16 + АК6 (рис. 5,б). Для определения перераспределения легирующих элементов между сплавами в шве выполнен энергодисперсионный анализ сварных соединений Д16 + АК6 [7]. Переходная зона перераспределения составляет $\sim 300 \mu\text{m}$. За переходной зоной содержание легирующих элементов соответствует составу основного металла.

По результатам проведенных исследований распределения твердости металла в сварных соединениях (рис. 6) можно сделать вывод, что общая величина зоны термического влияния составляет 15–20 mm, максимальное разупрочнение сварного шва не превышает 6%.

Прочность сварных соединений профиля из сплава В95 (рис. 6,а) находится на уровне, который выше 90% прочности основного металла ($\sigma_b^{\text{weld}} = 521\text{--}542 \text{ MPa}$, $\sigma_b^{\text{basB95}} = 580 \text{ MPa}$).

Испытания соединений сплава АА7056 показали их высокие механические характеристики. Абсолютные значения предела прочности соединений достигают 530 МПа, что составляет около 90% от соответствующих показателей основного металла ($\sigma_b^{\text{weld}} = 529\text{--}538 \text{ MPa}$, $\sigma_b^{\text{basAA7056}} = 590 \text{ MPa}$). Измерения распределения твердости зон сплавления и термического влияния показали, что

она находится на уровне соответствующих значений для основного материала и составляет ~ 110 HRB (рис. 6,б).

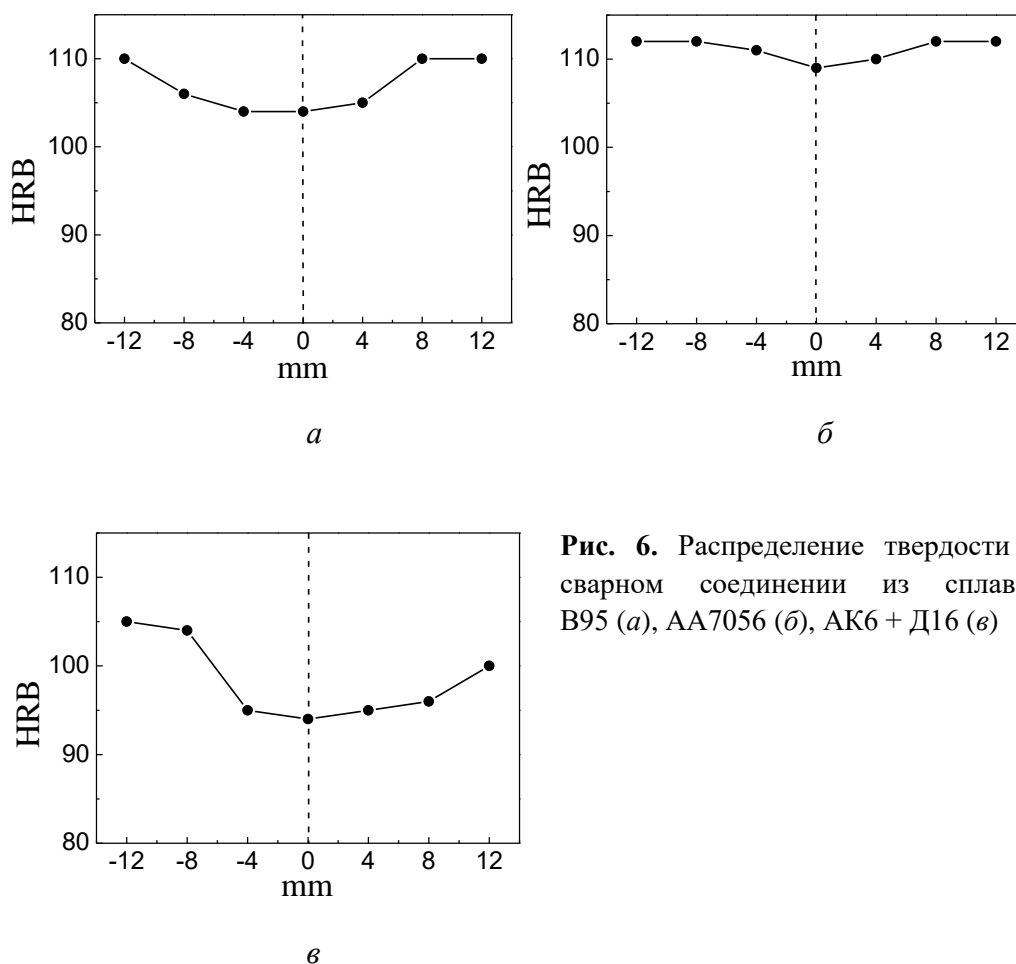


Рис. 6. Распределение твердости в сварном соединении из сплавов В95 (а), АА7056 (б), АК6 + Д16 (в)

Результаты механических испытаний основного металла и сварных образцов из сплавов АК6 + Д16 (рис. 6,в) показали прочность сварных соединений на уровне основного металла менее прочного сплава АК6 ($\sigma_b^{\text{weld}} = 383$ МПа, $\sigma_b^{\text{basAK6}} = 387$ МПа, $\sigma_b^{\text{basД16}} = 455$ МПа). Образцы разрушались по зоне термического влияния со стороны сплава АК6.

В силу того, что ВТУ алюминиевые сплавы АА7056 в рабочих условиях подвержены переменным нагрузкам (в отличие от В95, работающих при статическом нагружении), для соединений этих сплавов были проведены усталостные испытания. Экспериментально установлено, что сваренные по технологии КССО стыковые соединения высокопрочного алюминиевого сплава АА7056 с поперечным (относительно действия нагрузки) сварным швом по показателям сопротивления усталости превышают соответствующие значения для аналогичных соединений, выполненных дуговой сваркой. Значение ограниченного предела выносливости исследуемых соединений на базе $2 \cdot 10^6$

циклов перемен напряжений, испытанных при $R_\sigma = -0.1$ и $R_\sigma = 0.4$, составляет соответственно $2\sigma_a = 140$ МПа и $2\sigma_a = 110$ МПа. Полученные экспериментальные данные отвечают требованиям Европейских норм EN 1999-1-3 для стыковых соединений без остаточных напряжений, выполненных двусторонней сваркой [8].

4. Заключение

Рассмотрены особенности контактной стыковой сварки оплавлением ВТУ алюминиевых сплавов с формированием соединений при осадке с экструзией. Данная технология позволяет значительно повысить качество сварных соединений этой группы сплавов, а также расширить диапазон видов сплавов, которые соединяются методом КССО. Исследованы структура и механические свойства металла в зоне сварного шва алюминиевых сплавов как одной, так и разных систем легирования. Полученные результаты показывают перспективность применения технологии КССО для соединения элементов ВТУ алюминиевых сплавов в ответственных конструкциях, работающих при постоянных и переменных нагрузках. Технология КССО позволяет получать соединения ВТУ алюминиевых сплавов с прочностью на уровне 90% прочности основного металла.

1. *Г.А. Николаев, И.Н. Фридляндер, Ю.П. Арбузов*, Свариваемые алюминиевые сплавы, Металлургия, Москва (1990).
2. *Алюминиевые сплавы. Применение алюминиевых сплавов: Справ. руководство, А.Т. Туманов, И.Н. Фридляндер (ред.)*, Металлургия, Москва (1973).
3. *Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник, Ф.И. Квасов, И.Н. Фридляндер (ред.)*, Металлургия, Москва (1984).
4. *С.И. Кучук-Яценко, П.Н. Чвертко, Л.А. Семенов, С.М. Самотрясов, К.В. Гуцин*, Автомат. сварка № 3, 9 (2010).
5. *С.И. Кучук-Яценко*, Контактная стыковая сварка оплавлением, Наукова думка, Киев (1992).
6. *С.И. Кучук-Яценко, П.Н. Чвертко, Л.А. Семенов, К.В. Гуцин, С.М. Самотрясов*, Автомат. сварка № 7, 3 (2013).
7. *П.Н. Чвертко, Л.А. Семенов, К.В. Гуцин*, Автомат. сварка № 12, 37 (2014).
8. <https://archive.org/details/en.1999.1.3.2007>.

I.N. Klochkov, K.V. Guschin, A.V. Zavidov, A.A. Chayka, S.I. Motrunich

BUTT RESISTANCE WELDING BY BURNING-OFF OF HIGH-STRENGTH HEAT-HARDENABLE ALUMINUM ALLOYS

Welding tests of high-strength heat-hardenable (HHH) aluminum alloys have been carried out by the butt resistance welding with burning-off (BRWB). By the examples of zinc and copper containing aluminum alloys, the possibility has been demonstrated to form qualitative welded joints of the HHH alloys and the HHH ones and aluminum alloys of medium

strength. The strength of the welded joints is not less than 90% of the strength of the original metal.

Keywords: high-strength heat-hardened aluminum alloys, butt resistance welding by burning-off, extrusion, welded joint, structure, mechanical properties

Fig. 1. Scheme of a butt resistance welding with a joint formation: 1 – parts; 2 – forming devices; 3 – current contact jaw; 4 – extruded metal; l_{weld} – upsetting allowance

Fig. 2. Welded joint of the AA7056 aluminum alloy

Fig. 3. Temperature distribution in a burning-off heated near-contact zone of a plate of the D16 alloy of 4 mm in thickness before the upsetting

Fig. 4. Macrostructure of the welded joint of the alloys: *a* – B95; *b* – AA7056; *c* – AK6 (left) + Д16 (right). Magnification $\times 25$

Fig. 5. Microstructure of the welded joint of the alloys: *a* – B95; *b* – AK6 + Д16; ---- – weld-fusion line

Fig. 6. Hardness distribution in the weld joint of the alloys B95 (*a*), AA7056 (*b*), AK6 + Д16 (*c*)