

## КОНТАКТНАЯ СТЫКОВАЯ СВАРКА ОПЛАВЛЕНИЕМ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ ТЕРМИЧЕСКИ УПРОЧНЯЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

П. Н. ЧВЕРТКО, Л. А. СЕМЕНОВ, К. В. ГУЩИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Тонкостенные профили из высокопрочных алюминиевых сплавов нашли применение в продольных силовых наборах летательных аппаратов и прочих ответственных конструкциях. В промышленности применяются серийные профили, термически обработанные на максимальную прочность, что исключает возможность соединения их способами сварки плавлением. Актуальна проблема получения сварных соединений данных элементов силового набора в твердой фазе. Целью настоящей работы является изучение формирования соединений тонкостенных профилей разно- (АК6+Д16) и однородных (В95) алюминиевых сплавов в упрочненном состоянии при контактной стыковой сварке непрерывным оплавлением. Исследованы особенности контактной стыковой сварки с формированием соединений при осадке с экструзией и разработана базовая технология, которая применяется для получения соединений деталей из алюминиевых сплавов. Данная технология позволяет значительно повысить качество сварных соединений этой группы сплавов, а также расширить диапазон толщин металла, который соединяется контактной сваркой оплавлением. Приведены основные параметры режима контактной стыковой сварки непрерывным оплавлением. Исследованы структура металла и перераспределение легирующих элементов в зоне сварного шва. Прочностные свойства сварных соединений составляют не менее 90 % прочности основного металла. Библиогр. 6, рис. 8.

*Ключевые слова:* контактная стыковая сварка, непрерывное оплавление, осадка, формирование соединений, алюминиевые сплавы

Сплавы В95, Д16 и АК6 широко применяют при производстве ответственных элементов и конструкций в авиа- и ракетостроении. Так, в настоящее время для изготовления продольного силового набора корпусов авиационной и ракетно-космической техники из сплавов В95, АК6+Д16 применяют клепаные соединения, так как эти сплавы относятся к группам трудносвариваемых. Существенным недостатком клепаного соединения является увеличение массы конструкции из-за появления вспомогательных элементов при клепке стыкуемых элементов (рис. 1, а). Клепка является трудоемкой операцией, сопряженной с тяжелыми условиями труда. 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.

Применение сварки вместо клепки (рис. 1, б) является одним из эффективных способов решения проблемы повышения прочности, качества соединений и повышения тактико-технических характеристик летательных аппаратов, в частности, снижение массы конструкции и соответственно повышение полезного груза летательных аппаратов [1].

Одними из основных узлов силовых элементов конструкций летательных аппаратов являются

соединения стрингер-фитинг. Стрингеры изготавливают из тонкостенных профилей в большинстве случаев таврового сечения из высокопрочных термически упрочненных сплавов Д16, В95 и пр. Фитинги изготавливают фрезерованием из

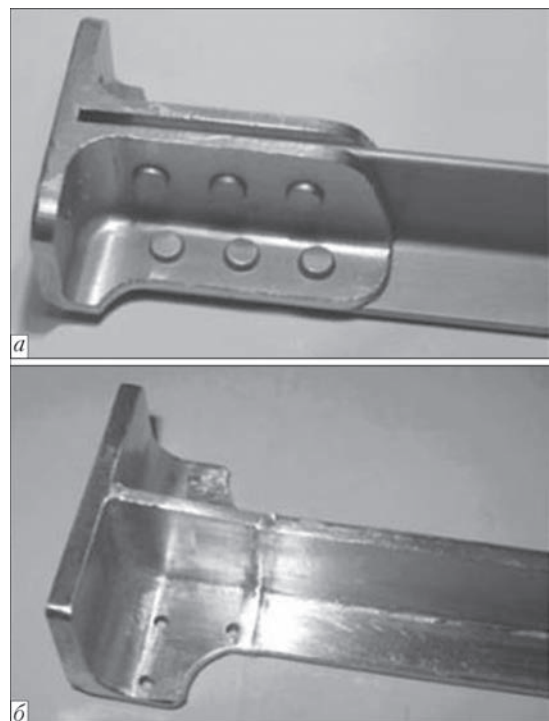


Рис. 1. Соединение элементов типа фитинг-стрингер продольного силового набора летательных аппаратов клепкой (а) и контактной стыковой сваркой (б)



различных заготовок (например, поковок из сплава АК6 или плит того же сплава, что и стрингерные панели).

В связи с этим проведена оценка свариваемости тонкостенных профилей развитого сечения из сплава В95Т1 и пластин из сплавов Д16Т+АК6Т1 между собой.

Полуфабрикаты из сплавов Д16 и В95 нашли широкое применение в промышленности. Эти сплавы упрочняются термической обработкой и в результате приобретают высокие механические свойства и сохраняют достаточную технологическую пластичность.

Среди высокопрочных сплавов на основе алюминия наибольшее применение в ракетно-космических и авиационных конструкциях получил сплав В95, который относится к системе Al–Zn–Mg–Cu (5,0...7,0 % Zn, 1,8...2,8 % Mg, 1,4...2,0 % Cu). Цинк, магний и медь образуют с алюминием и между собой твердые растворы и различные металлические соединения — фазы М ( $MgZn_2$ ), S( $Al_2CuMg$ ), T( $Al_2Mg_3Zn_3$ ), играющие большую роль в упрочнении сплава при его термической обработке.

Д16 — сплав, по крайней мере, шести компонентов: алюминия, меди, магния, марганца, железа и кремния, хотя основными легирующими элементами являются медь и магний (3,8...4,9 % Cu, 1,2...1,8 % Mg), поэтому его относят к сплавам системы Al–Cu–Mg.

Сплав АК6 системы легирования Mg–Si–Cu в основном используется в виде поковок, получаемых преимущественно из прессованных прутков. Основными легирующими элементами являются магний, кремний и медь (0,6...1,0 % Mg, 0,9...1,0 % Si, 2,0 % Cu). Сплав широко применяется в промышленности (строительстве, транспортном машиностроении, авиации) для изготовления штампованных и кованных деталей сложной формы, а также для нагруженных деталей типа рам, фитингов и др. Микроструктура сплава АК6 после термической обработки состоит из зерен твердого раствора алюминия и включений металлических соединений  $CuAl_2$  и

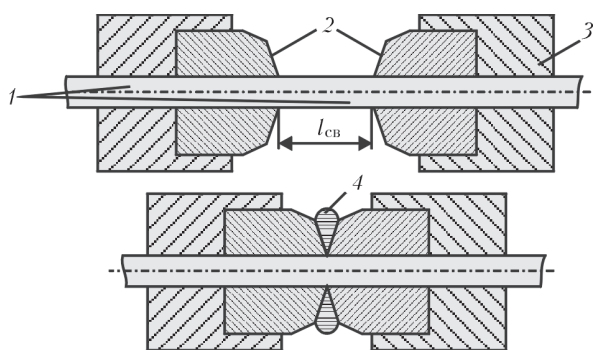


Рис. 2. Схема КСС с формированием соединения: 1 — детали; 2 — формирующие устройства; 3 — токоподвод; 4 — экструдированный металл ( $l_{св}$  — припуск на сварку)

$Mg_2Si$ . Сплав АК6 менее чувствительный к нагреву чем сплавы Д16 и В95 [2, 3].

Термомеханически упрочненные сплавы очень чувствительны к нагреву. Степень разупрочнения зависит от температуры нагрева и времени пребывания при ней. 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 сложно обеспечить при сварке алюминиевых сплавов вследствие их большой теплопроводности. Необходимо интенсивное высококонцентрированное вложение тепла в зону нагрева.

Одним из наиболее перспективных способов получения качественных сварных соединений с высокими механическими свойствами является контактная стыковая сварка (КСС) непрерывным оплавлением.

Целью настоящей работы является изучение особенностей формирования соединений тонкостенных профилей разно- (Д16+АК6) и однородных (В95) алюминиевых сплавов в упрочненном состоянии при КСС непрерывным оплавлением с экструзией.

Процесс сварки происходит в автоматическом режиме, который обеспечивает высокое стабильное качество соединения. Конструкция сварочного оборудования и технологической оснастки обеспечивают 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 с экструдированием металла при осадке в зазор между формирующими устройствами. При этом степень деформации увеличивается по мере сближения ножей [6]. Схема процесса КСС с формированием соединения приведена на рис. 2. Формирующие устройства выполняют две важные функции: при осадке они формируют соединение в условиях объемно-пластической деформации, а также выполняют функцию ножей для срезки грата. В результате образуется сварное соединение, которое

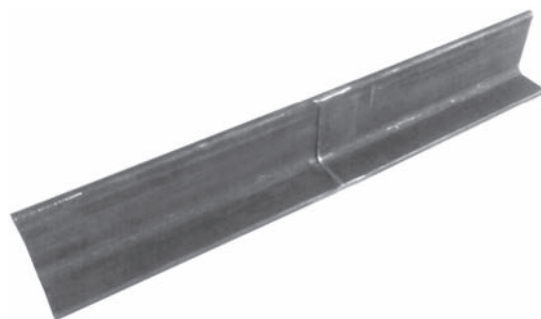


Рис. 3. Сварное соединение таврового профиля из алюминиевого сплава В95Т1

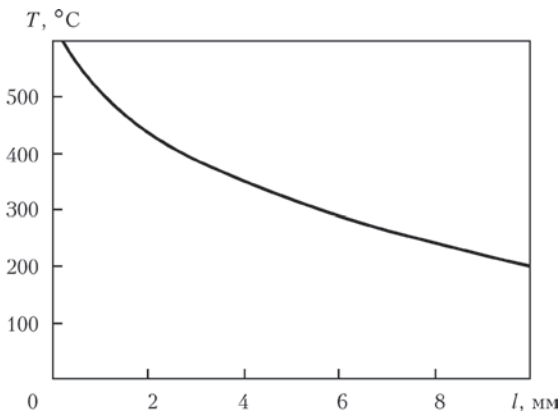


Рис. 4. Распределение температуры в глубину  $l$  разогретой оплавлением приконтактной зоны пластины толщиной 4,0 мм из сплава Д16Т перед осадкой

практически не нуждается в дальнейшей механической зачистке от графа (рис. 3).

Сварку сплавов разных систем легирования (Д16Т и АК6Т1) проводили на пластинах толщиной 2,5...5,0, шириной 25...35 мм.

С целью макетирования сварного соединения элементов типа фитинг-стрингер исследования проводили на тавровом профиле из сплава В95Т1 толщиной полк  $\delta = 2,5$  и 4,0 мм. Для экспериментов по сварке профилей разработана сварочная оснастка в виде кондукторов.

Сварку образцов проводили на универсальной лабораторной машине для КСС непрерывным оплавлением, которая была оснащена пневмогидравлическим приводом осадки с усилием  $F_{ос} = 130$  кН и сварочным трансформатором мощностью 150 кВ·А.

Различия в физических свойствах сплавов (теплопроводность сплава АК6 на 30 % выше чем сплава Д16 [2, 3]) значительно влияют на их нагрев во время оплавления, формирование шва, характер деформации и структурных превращений в зоне термического влияния.

Выбор и последующую корректировку режимов сварки проводили экспериментально с учетом приведенных выше особенностей сплавов. В процессе отработки режимов сварки 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 образца по шву (оксидных плен и т. п.). В режимах сварки стремились минимизировать время сварки для уменьшения разупрочнения металла при нагреве. По изложенной методике были определены оптимальные режимы, которые обеспечивают отсутствие дефектов по линии соединения.

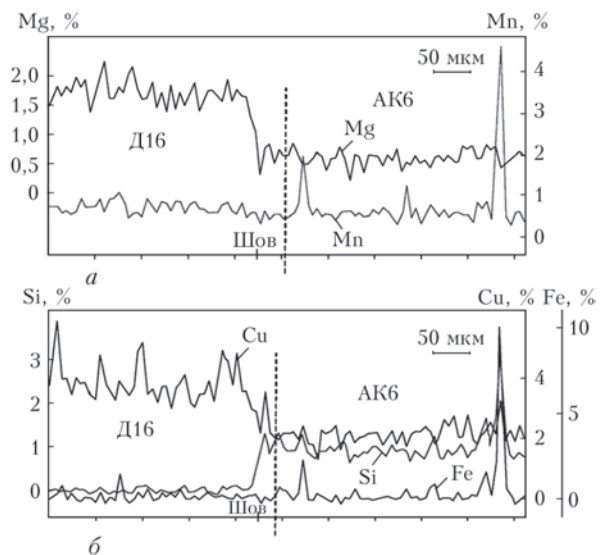


Рис. 5. Распределение элементов в сварном соединении (а) и зоне термического влияния (б)

Основные параметры сварки: вторичное напряжение  $U_{2x,x} = 4$  В, скорость оплавления изменяется экспоненциально от 2 до 25 мм/с, скорость осадки не менее 250 мм/с, время сварки — не более 5 с.

Распределение температуры в приконтактной зоне разогретых оплавлением кромок непосредственно перед осадкой приведено на рис. 4.

Для определения перераспределения легирующих элементов между сплавами в шве был выполнен микрорентгеноспектральный анализ сварных соединений АК6Т1+Д16Т (рис. 5). Переходная зона перераспределения легирующих элементов в шве составляет приблизительно 300 мкм. За переходной зоной содержание легирующих элементов соответствует составу основного металла.

В процессе осадки в результате экструзии металла между формирующими устройствами образуется текстура сварного соединения с характерным разворотом волокон основного металла на 90°. На рис. 6 приведены макроструктуры сварных соединений. Микроструктура зоны соединения характеризуется деформированными вы-

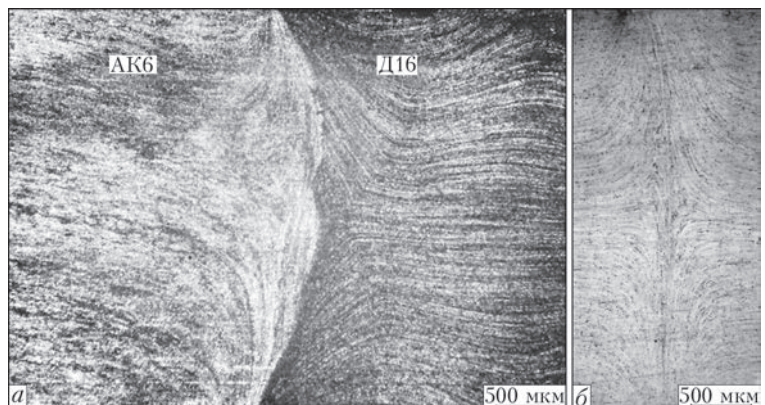


Рис. 6. Макроструктура стыка сварного соединения: а — АК6+Д16; б — В95



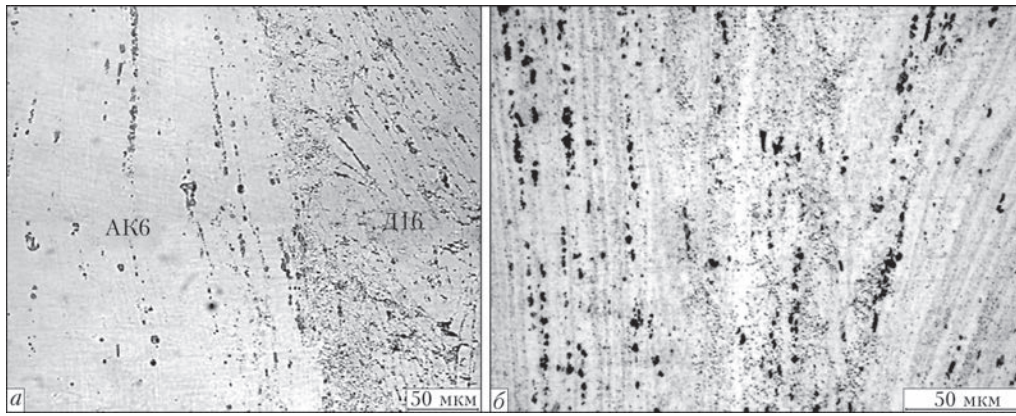


Рис. 7. Микроструктура шва сварного соединения из сплавов АК6Т1+Д16Т (а) и В95Т1 (б)

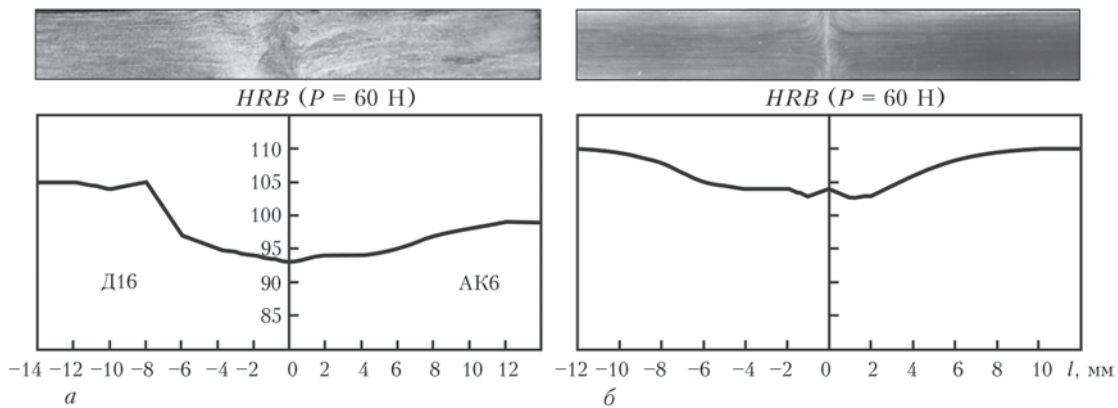


Рис. 8. Распределение твердости в сварном соединении пластин из сплавов АК6Т1+Д16Т (а) и профиля из сплава В95Т1 (б) тянутыми зернами твердого раствора с высокой плотностью интерметаллидных фаз в виде продолговатых цепочек (рис. 7). По мере приближения к шву интерметаллидные включения измельчаются. В структуре сварного соединения профиля из сплава В95Т1 образуется сварной шов шириной 6,0 мкм, который имеет характерную мелкозернистую структуру твердого раствора и измельченных интерметаллидных фаз размером 1,0...2,0 мкм.

Согласно результатам проведенных исследований распределения твердости металла в сварных соединениях (рис. 8) общее значение зоны термического влияния составляет 15...20 мм, максимальное разупрочнение сварного шва не превышает 6 %.

Результаты механических испытаний основного металла и сварных образцов из сплавов АК6Т1+Д16Т показали прочность сварных соединений на уровне основного металла менее прочного сплава АК6Т1 ( $\sigma_{\text{в}}^{\text{св}} = 386$  МПа,  $\sigma_{\text{осн АК6}} = 387$  МПа,  $\sigma_{\text{в}}^{\text{осн Д16}} = 455$  МПа). Образцы разрушались по зоне термического влияния со стороны сплава АК6Т1.

Прочность сварных соединений профиля из сплава В95Т1 находится на уровне выше 90 %

прочности основного металла ( $\sigma_{\text{в}}^{\text{св}} = 521...542$  МПа,  $\sigma_{\text{в}}^{\text{осн В95Т1}} = 580$  МПа).

По полученным результатам исследований можно сделать положительный вывод о перспективности применения технологии КСС непрерывным оплавлением для соединения элементов тонкостенных профилей из высокопрочных алюминиевых сплавов в ответственных конструкциях. Данная технология позволяет сваривать элементы конструкции в термически упрочненном состоянии с потерей прочности не более 10 %.

1. Николаев Г. А., Фридляндер И. Н., Арбузов Ю. П. Свариваемые алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1990. – 296 с.
2. Алюминиевые сплавы. Применение алюминиевых сплавов: Справ. руководство / Под ред. А. Т. Туманова, И. Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 1973. – 408 с.
3. Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник / Под ред. Ф. И. Квасова, И. Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.
4. Особенности контактной стыковой сварки высокопрочного алюминиевого сплава 2219 / С. И. Кучук-Яценко, П. Н. Чвертко, Л. А. Семенов и др. // Автомат. сварка. – 2010. – № 3. – С. 9–12.
5. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением. – Киев: Наук. думка, 1992. – 236 с.
6. Контактная стыковая сварка изделий из высокопрочных сплавов на основе алюминия / С. И. Кучук-Яценко, П. Н. Чвертко, Л. А. Семенов и др. // Автомат. сварка. – 2013. – № 7. – С. 3–7.

Поступила в редакцию 19.05.2014