



МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВО-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКОЙ

Т. М. ЛАБУР, д-р техн. наук, А. А. ГРИНЮК, инж., А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проведен сравнительный анализ механических соединений высокопрочных алюминиевых сплавов 1420 и 1460, полученных плазменной и аргодуговой сваркой разнополярным асимметричным током неплавящимся электродом с использованием серийных сварочных проволок СвАМг63 и Св1201. Показано, что прочность и вязкость разрушения швов при внецентренном растяжении образцов существенно зависят от теплофизических условий сварки.

Ключевые слова: плазменная сварка, алюминий-литиевые сплавы, сварные соединения, металл шва, механические свойства

Создание изделий аэрокосмической техники новых модификаций с более эффективными тактико-техническими и экономическими параметрами выдвигает повышенные требования к свойствам материалов и их сварных соединений. Использование в таких изделиях нового класса алюминиевых сплавов систем легирования Al-Mg-Li (сплав 1420) и Al-Cu-Li (сплав 1460) позволяет уменьшить массу конструкций на 8...15 % благодаря высокой удельной прочности и повышенному модулю упругости. Особенностью сплавов является многокомпонентный состав и наличие включений упрочняющих фаз, расположенных параллельно направлению прокатки. В условиях технологических нагревов, включая и сварочные процессы, сплавы проявляют склонность к охрупчиванию [1, 2].

Наиболее технологичными и часто используемыми способами получения неразъемных соединений алюминий-литиевых сплавов являются дуговые способы сварки. Широкое использование неплавящегося электрода обеспечивает более высокую плотность металла шва по сравнению со сваркой плавящимся электродом, который отличается большей производительностью. Традиционные способы сварки переменным синусоидальным током характеризуются относительно низкой проплавающей способностью. Использование разнополярного асимметричного тока с прямоугольной формой волны и низкочастотной модуляции вызывает периодическое углубление сварочной ванны, облегчая при этом дегазацию металла и уменьшая количество пор и включений оксидной пленки в металле шва.

Использование гелия в качестве защитного газа при сварке неплавящимся электродом на постоян-

ном токе прямой полярности способствует повышению тепловой мощности дуги, что приводит к увеличению глубины проплавления и повышению скорости сварки. Для реализации процесса требуется большая точность подготовки и сборки деталей, а также сложное оборудование для его управления. Кроме того, гелий повышает себестоимость технологических операций.

Для увеличения скорости сварки, обеспечения качества швов и уменьшения деформаций необходимо использование концентрированных источников нагрева. Одним из них может быть сжатая дуга, которая «обжимается» потоком газа, продуваемым через специальное сопло. Процесс плазменной сварки является дальнейшим развитием способа сварки неплавящимся электродом. Инертный газ, подаваемый через сопло небольшого отверстия, обжимает электрическую дугу, горящую между вольфрамовым электродом и изделием.

В сварных соединениях, полученных различными способами дуговой (плавящимся и неплавящимся электродом) и электронно-лучевой сварки, наблюдается образование неоднородной структуры и разупрочнение металла в ЗТВ [3], обусловленное перегревом металла во время термического цикла сварки. Последний приводит к развитию неоднородности в сварном соединении по содержанию легирующих элементов и примесей вследствие их сегрегации вдоль границ зерен, образования хрупких межзеренных прослоек из пересыщенных фаз, особенно на границе сплавления, где прослойки формируют плотный каркас вокруг зерен. Связанное с этим повышение концентрации напряжений облегчает зарождение трещины путем растрескивания фаз или нарушения контакта с матрицей, что снижает показатели прочности и вязкости сварных соединений литий-содержащих сплавов и надежность эксплуатации сварных конструкций в целом. В связи с этим целесообразно оценить механические свойства

сварных соединений алюминий-литиевых сплавов, выполненных плазменной сваркой, и сопоставить их с результатами, полученными при обычной аргонодуговой сварке неплавящимся электродом.

Методика экспериментов. Плазменную сварку на подкладке с формирующей канавкой сплавов 1420 и 1460 толщиной 4 и 3 мм выполняли разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой волны. Плазматрон перемещали сварочной головкой АСТВ-2М со скоростью 36 м/ч. Для увеличения стойкости вольфрамового электрода плазматрона сварку выполняли с обеспечением большей протяженности протекания тока прямой полярности. Длительность прохождения тока обратной полярности выбирали минимально допустимой для эффективного катодного разрушения оксидной пленки. Соотношение между временем протекания тока при прямой и обратной полярности составило 3:1. Эксперименты выполняли с использованием комплекса для плазменной сварки на основе оборудования фирмы «Фрониус» (Австрия), в состав которого входят источник питания РТ 450-02 WZ, механизм подачи присадочной проволоки KD 4000, плазматрон РМВ 350 и система управления процессом сварки FPA 2003. Источник питания позволяет регулировать сварочный ток в широком диапазоне 10...450 А с частотой изменения полярностей 40...240 Гц. Частота разнополярного тока составляла 100 Гц. Плазматрон РМВ 350 обеспечивал стабильное формирование высокотемпературной плазменной струи. Диаметр плазмообразующего сопла выбирали минимальным (3,2 мм), исходя из условия предотвращения двойного дугообразования. Диаметр канала сопла при этом рассчитывали по формуле $d_c \geq 1 + 0,01I_{св}$, где d_c — диаметр сопла, мм, $I_{св}$ — сила сварочного тока, А.

Аргонодуговую сварку разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой волны тока выполняли с помощью источника питания MW 450 фирмы «Фрониус» (Австрия) и сварочной головки АСТВ-2М, скорость перемещения горелки 12...14 м/ч. Режимы плазменной и аргонодуговой сварки приведены в табл. 1.

В качестве присадочного материала использовали сварочные проволоки СвАМг63 и Св1201 диаметром 1,6 мм. Алюминиевые листы и присадочные проволоки перед сваркой подвергали химическому травлению, а торцы листов дополнительной механической зачистке на глубину не менее 0,1 мм.

Было изучено влияние различных способов сварки высокопрочных алюминий-литиевых сплавов 1420 и 1460 на физико-механические свойства металла швов, включая прочность, твердость и показатели вязкости разрушения. Испытания проводили при одноосном и внецентренном

растяжении [4]. Для испытания в условиях одноосного растяжения использовали плоские стандартные образцы, а при внецентренном — образцы размером 36×57 мм, толщиной 3 мм и острым надрезом глубиной 11 мм с радиусом 0,1 мм в его вершине. Скорость растяжения при испытании образцов сварных соединений составляла 2 мм/мин ($3,3 \cdot 10^{-5}$ м/с). В процессе испытаний на осциллографе записывали диаграмму нагрузка – деформация, которая фиксировала важные с практической точки зрения моменты зарождения и развития трещины в исследуемом образце до полного разрушения. Диаграмма позволяет количественно оценить не только интенсивность напряжений в процессе деформации образца при внецентренном растяжении, но и определить протяженность стадии стабильного течения металла и работу, которую он затрачивает на отдельных этапах развития трещины, образующейся при разрушении сварного соединения. Условия испытания при внецентренном растяжении отвечали техническим требованиям ГОСТ 25.506. Экспериментальные результаты получены при испытании пяти образцов с использованием универсальной машины РУ-5 и расчета исходных данных.

По результатам испытания в условиях внецентренного растяжения определяли значения номинального напряжения σ_p и критического коэффициента интенсивности напряжений $K_{с}$, а также удельной работы зарождения J_c и распространения (УРРТ) трещины [4, 5]. Значения показателя J_c оценивали путем расчета функции изменения энергии деформации в зависимости от длины трещины, используя соотношение Меркли – Кортена [5].

Результаты анализа сравнивали с данными о характере изменения рельефа излома, который получали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) JSM-840 с системой микроанализаторов Analitik Link — 860 /500 Obtek (при усредненном напряжении 15, 20, 30 кВ). Такой комплексный подход позволил выявить структурные особенности формирования швов при плазменной и аргонодуговой сварке неплавящимся электродом.

Т а б л и ц а 1. Режимы плазменной и аргонодуговой сварки алюминий-литиевых сплавов разнополярным асимметричным током

Марка сплава	$v_{св}$, м/ч	$I_{св}$, А	$Q_{пл}$, л/мин	$v_{пр}$, м/ч
<i>Аргонодуговая сварка</i>				
1460	14	200	—	82
1420	12	200	—	75
<i>Плазменная сварка</i>				
1460	36	180	0,1	123
1420	36	200	0,2	142

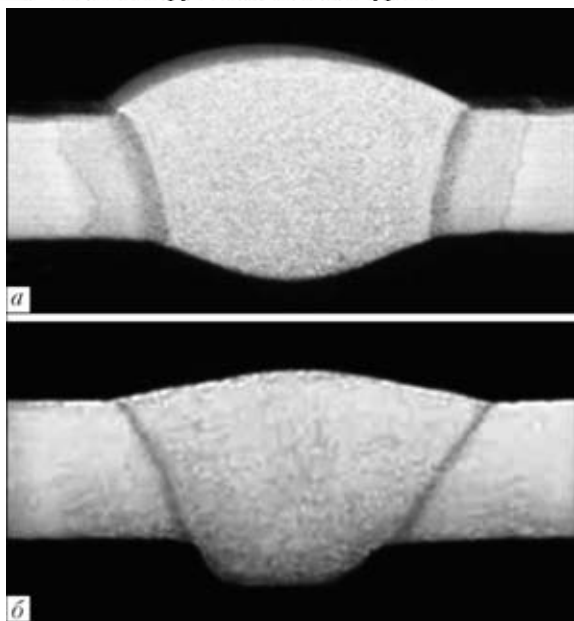


Рис. 1. Поперечные макрошлифы соединений сплава 1460 толщиной 3 мм, выполненных плазменной (а) и аргодуговой (б) сваркой неплавящимся электродом с присадкой проволоки Св1201: а — $v_{св} = 36$; б — 14 м/ч

Результаты и их обсуждение. Высокая удельная мощность плазменного потока и уровень температуры на участке металла, где действует активное пятно нагрева, способствуют увеличению проплавления способности сжатой дуги и величины ее заглупления в расплав сварочной ванны, что позволяет повысить скорость процесса по сравнению с обычной аргодуговой сваркой неплавящимся электродом в 2...3 раза при одинаковых значениях тока (рис. 1). Меньший тепловой вклад в основной металл приводит к некоторому сокращению протяженности ЗТВ и уменьшению степени разупрочнения сварного соединения (рис. 2). Однако в условиях одноосного растяжения прочность сварных соединений и металла швов, полученных как аргодуговой, так и плазменной сваркой, находятся практически на одном уровне (табл. 2).

При внецентренном растяжении сварных соединений показатели прочности и вязкости разрушения швов существенно зависят от способа сварки (табл. 3). Различные тепловые условия нагрева и скорости охлаждения металла, сопровождающие процесс формирования сварных соединений, приводят к изменению показателей прочности, пластичности и вязкости разрушения швов. Разрушающее напряжение σ_p в металле швов, полученных при аргодуговой сварке сплава 1420, составляет 289...320 МПа, а сплава 1460 —

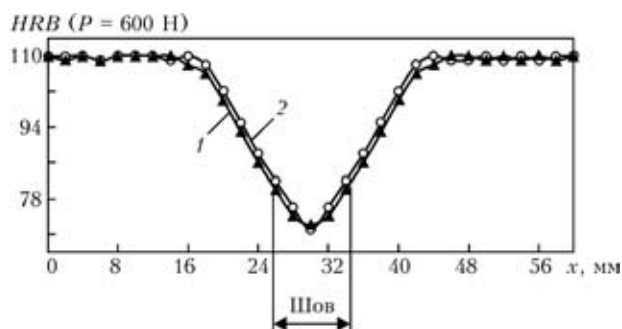


Рис. 2. Твердость сварных соединений сплава 1460 ($\delta = 3$ мм), полученных аргодуговой (1) и плазменной (2) сваркой с использованием присадки Св1201 на подкладке с формирующей канавкой

278...306 МПа (табл. 3). Значения K_c для швов сплава 1420 равны 23...25, а для сплава 1460 — 25...27 МПа $\sqrt{м}$. Меньшие по сравнению со сплавом 1420 значения σ_p обусловлены, возможно, способностью меди, входящей в его состав, снижать стабильность состава пересыщенных твердых растворов и вызывать более интенсивный их распад при технологических нагревах, включая сварочные [6, 7]. Швы сплава 1460 при этом характеризуются более высокими значениями энергии зарождения трещины: J_c — 5,8...7,2 и УРРТ — 5,3...6,1 Дж/см².

Использование концентрированного источника тепла при плазменной сварке обеспечивает более высокие значения показателя σ_p . Его значение у швов сплава 1420 возрастает до 379...428,

Таблица 2. Механические свойства сварных соединений алюминиево-литиевых сплавов при одноосном растяжении, полученных при различных способах сварки

Марка сплава (толщина образца, мм)	Способ сварки	Марка присадки	$\sigma_{св}$, МПа	$\sigma_{св}^{м.ш}$, МПа
1420 ($\delta = 4$)	Аргодуговая	СвАМг63	328	322
	Плазменная		330	316
1460 ($\delta = 3$)	Аргодуговая	Св1201	308	252
	Плазменная		302	261

Таблица 3. Показатели прочности, вязкости разрушения и ударной вязкости сварных соединений алюминиево-литиевых сплавов 1420 и 1460 при внецентренном растяжении

Марка сплава	Марка присадки	σ_p , МПа	K_c , МПа $\sqrt{м}$	J_c	УРРТ	KCV
				Дж/см ²		
<i>Аргодуговая сварка</i>						
1420	СвАМг63	$\frac{289...320}{304}$	$\frac{23...25}{24}$	$\frac{3,5...5,8}{4,4}$	$\frac{4,5...5,7}{4,9}$	$\frac{3,5...5,3}{4,9}$
1460	Св1201	$\frac{278...306}{293}$	$\frac{25...27}{26}$	$\frac{5,8...7,2}{6,5}$	$\frac{5,3...6,1}{5,7}$	$\frac{6,7...7,1}{7,2}$
<i>Плазменная сварка</i>						
1420	СвАМг63	$\frac{379...428}{401}$	$\frac{25...35}{30}$	$\frac{6,3...10,2}{7,4}$	$\frac{5,3...7,5}{6,4}$	$\frac{4,4...7,9}{5,9}$
1460	Св1201	$\frac{383...420}{403}$	$\frac{31...36}{35}$	$\frac{8,4...9,3}{8,8}$	$\frac{7,0...8,1}{7,5}$	$\frac{8,6...10,4}{9,5}$

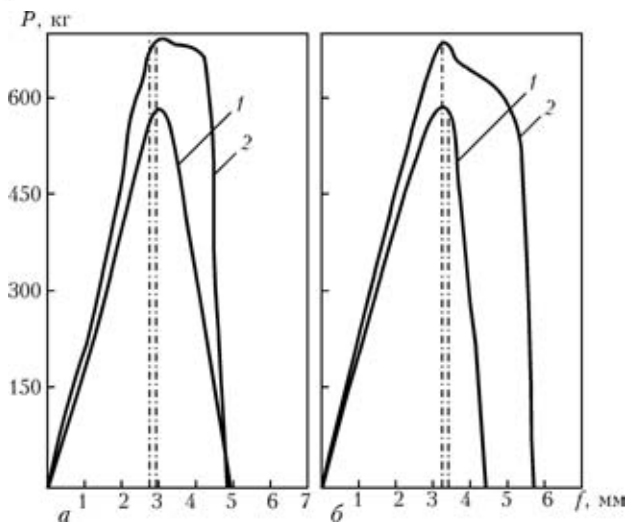


Рис. 3. Диаграммы нагрузка – перемещение $P-f$ при испытании в условиях внецентренного растяжения образцов сварных соединений сплавов 1420 (а) и 1460 (б), полученных аргонодуговой (1) и плазменной (2) сваркой

а у швов сплава 1460 — до 383...420 МПа. Показатель K_c для швов из сплава 1420 повышается до 25...35, 1460 — до 31...36 МПа $\sqrt{м}$. При этом швы сплава 1420 характеризуются значениями $J_c = 7,4$ Дж/см 2 , что почти в 2 раза выше, чем при аргонодуговой сварке. Значения УРРТ и KCV также повышаются не меньше чем на 30...50 % при использовании плазменной сварки (рис. 3), чему способствует образование мелкокристаллической структуры швов. Толщина слоя кристаллов и межзеренных промежутков в 1,5 раза меньше в швах, полученных плазменной сваркой. Более высокая мощность источника нагрева и скорость перемещения плазматрона изменяют характер кристаллизации металла шва и способствуют получению его субдендритной структуры.

Таким образом, более качественные характеристики вязкости разрушения сварных соединений алюминий-литиевых сплавов 1420 и 1460 обеспечиваются при использовании способов сварки, характеризующихся минимальной погонной энергией. Последняя способствует формированию металла шва более высокого качества с ограниченной степенью разупрочнения металла в ЗТВ и пониженной склонностью алюминий-литиевых сплавов к охрупчиванию. Более высокое сопротивление разрушению металла шва обеспечивает высокий уровень работоспособности и надежности сварных соединений в конструкциях.

Comparative analysis has been performed on mechanical joints in high-strength aluminium alloys 1420 and 1460, produced by plasma and argon-arc welding using consumable electrode and standard welding wires SvAMg63 and Sv1201 at alternating-polarity asymmetric current. It is shown that strength and fracture toughness of the welds in off-centre tension of specimens strongly depend upon the thermal-physical welding parameters.

В заключение можно отметить, что концентрация энергии и высокая температура активного пятна нагрева плазменной струи способствуют увеличению глубины проплавления швов, что позволяет повысить скорость плазменной сварки в 2...3 раза по сравнению с обычной аргонодуговой. Высокие значения удельной мощности сжатой дуги и скорость сварки обеспечивают сокращение протяженности ЗТВ дуги и уменьшение степени разупрочнения сварных соединений.

Уровень прочности сварных соединений и металла шва, полученных аргонодуговой и плазменной сваркой, в условиях одноосного растяжения идентичны. При испытании на внецентренное растяжение, когда на образец одновременно действует растяжение и изгиб, номинальное разрушающее напряжение увеличивается на 30...35 % только в случае выполнения плазменной сварки.

Установлены значения показателей сопротивления разрушению (σ_p , K_c , KCV) сварных соединений алюминий-литиевых сплавов, полученных плазменной сваркой разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой волны. Повышение прочности и вязкости разрушения швов при внецентренном растяжении в сварных соединениях, полученных плазменной сваркой убедительно показывает, что применение этого способа в неразъемных соединениях может обеспечить необходимые работоспособность и надежность конструкций из этих сплавов.

1. Козут Н. С., Лабура Т. М., Ищенко А. Я. Тріщиностійкість високоміцних алюмінієвих сплавів та їх зварних з'єднань // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 1990. — № 3. — С. 122–123.
2. Рязанцев В. И. Сварные конструкции из алюминиевых сплавов с литием // Авиац. пр-сть. — 2005. — № 2. — С. 32–41.
3. Влияние способа сварки на сопротивление разрушению соединений алюминий-литиевых сплавов 1420 и 1460 / Т. М. Лабура, А. А. Бондарев, А. В. Лозовская и др. // Автомат. сварка. — 2001. — № 7. — С. 12–16.
4. Разрушение / Под ред. Г. Либовиц. Т. 6. Разрушение металлов / Пер. с англ. — М.: Мир, 1976. — 496 с.
5. Статическая прочность и механика разрушения сталей / Под. ред. В. Даля, В. Антона; пер. с нем. — М.: Металлургия, 1986. — 565 с.
6. Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства / И. Н. Фридляндер, К. В. Чустов, А. Л. Березина, Н. Н. Колобнев. — Киев: Наук. думка, 1992. — 192 с.
7. Алюминиевые сплавы, содержащие литий, медь, магний / Л. Л. Рохлин, Т. В. Добаткина, Е. В. Муратова, И. Г. Королькова // Изв. АН СССР. Металлы. — 1994. — № 1. — С. 113–118.

Поступила в редакцию 01.11.2005