



ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ШВОВ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ АЛЮМИНИЕВО-МЕДНЫХ СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СКАНДИЙСОДЕРЖАЩИХ ПРИСАДОК

А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, А. В. ЛОЗОВСКАЯ, кандидаты техн. наук, А. А. ГРИНЮК, М. Р. ЯВОРСКАЯ, А. А. ЧАЙКА, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проведен сравнительный анализ механических свойств наплавленного металла, полученного при использовании присадочных проволок типа Св1201 с различным содержанием меди и скандия. Показано, что введение скандия (0,5%) в сварочные проволоки создает предпосылки для дополнительного повышения предела прочности и условного предела текучести швов. Предложены способы дополнительного повышения прочности сварных соединений и металла швов непосредственно в процессе сварки за счет пропускания тока через участок присадки и применения послесварочной термической обработки по специальному режиму.

Ключевые слова: дуговая сварка, алюминий-медные сплавы, скандийсодержащие присадки, сварные соединения, подогрев присадочной проволоки, закалка, термическая обработка, механические свойства

Для изготовления сварных конструкций в различных областях машиностроения среди высокопрочных алюминий-медных сплавов наиболее широкое применение находят сплавы 1201 (Al-6,3Cu-0,3Mn-0,06Ti-0,17Zr-0,1V) и 1460 (Al-3,0Cu-2,0Li-0,1Mg-0,12Ti-0,08Sc). После полной термической обработки (закалка + искусственное старение) листовой прокат из этих сплавов имеет достаточно высокие механические свойства (табл. 1). Для их сварки используют серийную проволоку Св1201, близкую по химическому составу к соответствующему основному металлу. Однако под воздействием тепла при дуговой сварке происходит разупрочнение этих сплавов и прочность сварных соединений, как и литого металла швов, становится намного ниже, чем у основного металла [1].

Одним из эффективных способов упрочнения швов из алюминиевых сплавов является использование при сварке проволок, легированных скандием [2-5]. Однако при наличии в сварочной ванне меди, поступающей из основного металла или присадочной проволоки, поведение скандия оставалось неизвестным. При определенных соотношениях в

сплаве этих элементов медь может взаимодействовать со скандием, существенно снижая эффективность его применения [6].

В данной работе проведена оценка механических характеристик сварных соединений, полученных дуговой сваркой сплавов 1201 и 1460 при использовании сварочных проволок с различным содержанием меди и добавок скандия. Целесообразность использования скандия в присадочных проволоках системы Al-Cu, содержащих от 3 до 6 % меди, оценивали сначала на литом металле, полученном при трехслойной наплавке швов на лист из сплава 1201 толщиной 6 мм. Наплавку аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом проводили со скоростью 12 м/ч на установке АС-ТВ-2М от источника питания MW-450. Первый слой состоял из трех швов, полученных на токе 250 А при скорости подачи 125 м/ч присадочной проволоки диаметром 1,6 мм. Второй слой выполняли двумя швами на тех же режимах, третий — одним швом на токе 270 А. После выполнения каждого шва пластина остывала до комнатной температуры, а перед наложением последующего валика поверхность металла зачищали до блеска механическим способом. Пределы прочности и пластичности швов оценивали при растяжении круглых образцов, изготовленных из верхних слоев наплавленного металла для устранения влияния легирующих элементов металла подложки. Резуль-

Таблица 1. Механические свойства алюминий-медных сплавов

Марка сплава	Толщина металла, мм	Предел прочности σ_b , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость a_n , Дж/см ²	Угол загиба α , град
1201	6	$\frac{436,2...435,1}{435,7}$	$\frac{353,8...353,4}{353,6}$	$\frac{9,6...9,5}{9,6}$	$\frac{8,9...8,6}{8,8}$	$\frac{30...28}{29}$
		$\frac{586,4...556,5}{573,6}$	$\frac{546,5...508,0}{532,2}$	$\frac{3,9...2,9}{3,5}$	$\frac{2,6...2,2}{2,4}$	$\frac{20...16}{17}$
1460	6	$\frac{514,4...509,3}{511,7}$	$\frac{467,7...460,1}{463,8}$	$\frac{4,6...4,4}{4,5}$	$\frac{4,3...3,7}{4,0}$	$\frac{29...26}{28}$

Примечания. 1. Образцы для механических испытаний вырезаны вдоль проката. 2. Здесь и далее в числителе приведены максимальные и минимальные, а в знаменателе — средние значения по результатам испытаний 2...5 образцов.



Таблица 2. Механические свойства наплавленного металла, полученного аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом при использовании присадочных проволок с различным содержанием меди и скандия

Содержание легирующих элементов в присадке, %	После сварки		После искусственного старения (170 °С, 16 ч)		После закалки в воду (525 °С, 5 мин) и искусственного старения (170 °С, 16 ч)	
	предел прочности σ_b , МПа	условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	предел прочности σ_b , МПа	условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	предел прочности σ_b , МПа	условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа
6Cu	<u>258,5...231,8</u> 245,5	<u>174,4...165,2</u> 171,2	<u>300,3...264,1</u> 281,3	<u>252,7...238,4</u> 245,8	<u>315,1...311,2</u> 314,6	<u>275,1...268,7</u> 272,6
6Cu-0,2Sc	<u>264,6...251,6</u> 258,1	<u>175,9...173,7</u> 174,8	<u>288,9...281,7</u> 285,3	<u>249,8...247,4</u> 248,6	<u>326,3...314,4</u> 320,4	<u>279,6...274,8</u> 277,2
6Cu-0,5Sc	<u>299,7...287,8</u> 289,4	<u>281,8...247,9</u> 260,9	<u>319,8...304,1</u> 314,0	<u>262,2...258,6</u> 261,6	<u>344,5...342,6</u> 343,3	<u>286,4...277,4</u> 280,7
5Cu-0,2Sc	<u>212,5...186,5</u> 199,5	<u>147,6...143,1</u> 145,4	<u>256,7...224,1</u> 240,4	<u>223,4...220,7</u> 222,1	<u>310,3...309,9</u> 310,2	<u>272,3...246,9</u> 259,6
5Cu-0,5Sc	<u>254,8...242,5</u> 248,7	<u>171,3...168,1</u> 169,7	<u>272,1...269,8</u> 271,0	<u>246,3...243,6</u> 244,2	—	—
3Cu-0,2Sc	<u>197,3...178,9</u> 188,1	<u>125,4...118,0</u> 121,7	<u>223,1...212,0</u> 217,6	<u>167,3...165,8</u> 166,6	<u>268,0...257,8</u> 262,9	<u>212,5...207,5</u> 210,0
3Cu-0,5Sc	<u>231,8...220,8</u> 226,3	<u>157,6...152,3</u> 155,0	<u>263,5...254,8</u> 259,2	<u>219,6...207,3</u> 214,0	<u>278,9...275,1</u> 277,0	<u>235,2...232,7</u> 234,0

таты механических испытаний образцов, вырезанных в продольном направлении из наплавленного металла, приведены в табл. 2.

Введение 0,5 % Sc в присадку Св1201 позволило повысить предел прочности наплавленного металла на 18, а условный предел текучести — на 52 %. При последующем искусственном старении образцов прочность металла швов, наплавленных с использованием этой присадки, также сохраняется более высокой (на 12 %). Полная термическая обработка швов после сварки, включающая их закалку по специальному режиму и искусственное старение, позволяет сохранить эффект упрочнения, достигнутый за счет основного легирующего элемента — меди, и дополнительно повысить прочность за счет скандия. При использовании присадочных проволок с более низким содержанием меди также прослеживается прямо пропорциональная зависимость между пределами прочности и пластичности с одной стороны и процентным со-

держанием скандия в присадке с другой. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о целесообразности применения скандийсодержащих присадок при аргонодуговой сварке алюминий-медных сплавов, в которых концентрация меди изменяется в пределах 3...6 %.

С целью определения влияния добавок 0,5 % Sc на механические свойства реальных стыковых соединений сваривали листы сплавов 1201 и 1460 толщиной 6 мм аргонодуговой сваркой плавящимся (ПЭ) и неплавящимся (НЭ) электродами. Результаты механических испытаний плоских образцов, изготовленных из полученных соединений, приведены в табл. 3.

При использовании НЭ для сварки листов толщиной 6 мм состав присадочной проволоки на прочность сварных соединений существенно не влиял. Образцы с усилением при растяжении разрушались в зонах сплавления швов с основным металлом, где отмечался его большой перегрев. Уменьшение

Таблица 3. Механические свойства сварных соединений листов толщиной 6 мм сплавов 1201 и 1460

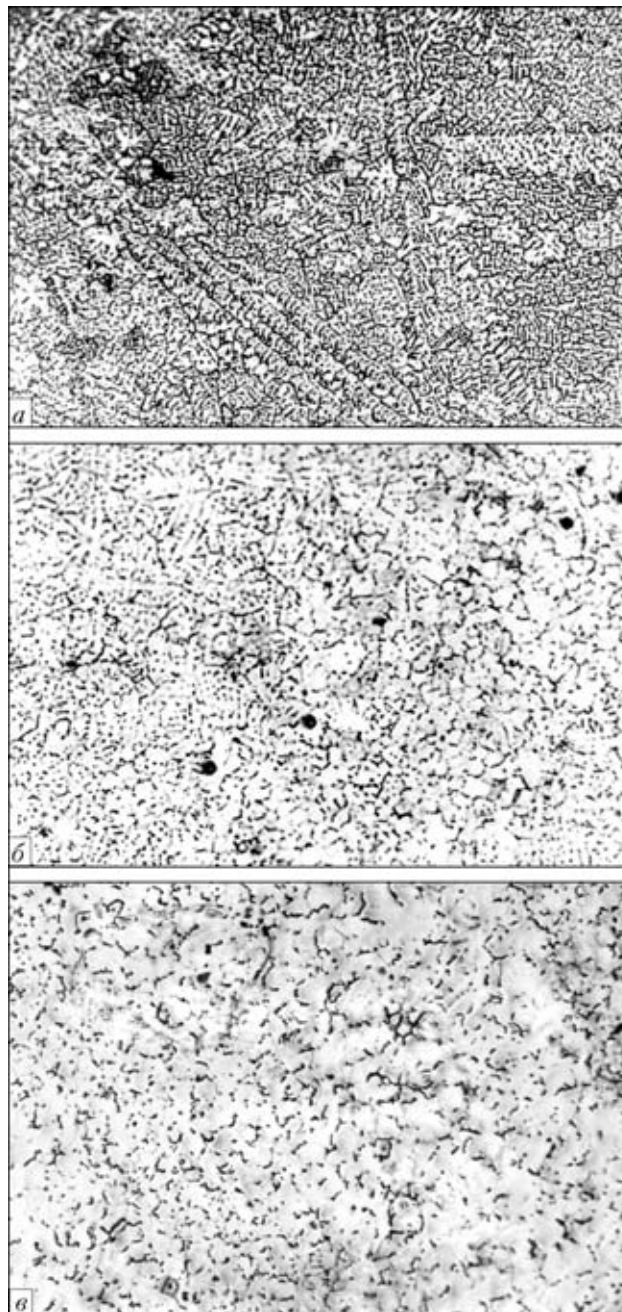
Марка сплава	Марка присадки	Способ сварки	Временное сопротивление разрыву, МПа		Ударная вязкость металла шва a_n , Дж/см ²
			сварного соединения σ_b	металла шва $\sigma_b^{м.ш}$	
1201	Св1201	НЭ	<u>243,8...237,4</u> 240,6	<u>238,0...234,2</u> 236,1	<u>12,2...11,8</u> 12,0
			<u>245,4...242,2</u> 243,8	<u>262,2...250,0</u> 256,1	<u>9,4...9,0</u> 9,2
	Св1201	ПЭ	<u>269,4...263,0</u> 266,2	<u>262,8...257,8</u> 260,3	<u>18,4...18,0</u> 18,2
			<u>285,3...272,5</u> 278,9	<u>273,8...269,8</u> 271,8	<u>14,2...14,0</u> 14,1
1460	Св1201	НЭ	<u>279,4...270,4</u> 274,9	<u>251,2...244,4</u> 247,8	<u>14,6...14,2</u> 14,4
			<u>284,0...276,2</u> 280,1	<u>279,8...270,0</u> 274,9	<u>10,2...10,0</u> 10,1
	Св1201	ПЭ	<u>292,2...286,6</u> 289,4	<u>289,3...283,9</u> 286,6	<u>17,0...16,4</u> 16,8
			<u>306,4...299,8</u> 303,1	<u>298,8...292,6</u> 295,7	<u>14,6...14,2</u> 14,4



погонной энергии при сварке ПЭ способствует некоторому повышению предела прочности соединений, в том числе и при использовании скандийсодержащей проволоки. При кристаллизации металла сварочной ванны скандий способствует повышению дисперсности остаточных фаз, образованию сложного, насыщенного медью и скандием, твердого раствора и измельчению структуры шва в результате формирования субдендритов. Поэтому прочность металла швов, полученных с использованием такой проволоки, несколько повышается как при сварке ПЭ, так и НЭ. Однако коэффициент прочности стыковых соединений сплавов 1201 и 1460, полученных дуговой сваркой, не превышает соответственно значений 0,65 и 0,60 даже при использовании проволоки типа Св1201, легированной 0,5 % Sc. Для повышения прочности сварных соединений их подвергают дополнительному термическому воздействию. Обычно применяют низкотемпературное искусственное старение или высокотемпературную закалку с последующим искусственным старением.

В какой-то степени термическую обработку соединений удалось осуществить непосредственно в процессе сварки путем пропускания тока через участок присадочной проволоки. Взаимодействие электромагнитных полей, возникающих вокруг дугового разряда и токопроводящей присадки, способствует постоянному изменению пространственного положения дуги [7, 8]. В совокупности с изменением теплового баланса в сварочной ванне, возникающим в результате поступления в нее подогретой проволоки, создаются благоприятные условия для эффективного теплового воздействия дуги на кристаллизующийся металл шва, что приводит к изменению его структуры (рисунок). При обычной аргодуговой сварке НЭ сплава 1460 с использованием серийной присадочной проволоки Св1201 в шве образуются крупные направленные кристаллиты. Введение 0,5 % скандия в присадочную проволоку способствует формированию смешанной дендритной и субдендритной структуры. Подогрев поступающей в сварочную ванну присадочной проволоки позволяет получить наиболее мелкую субдендритную структуру швов. Это обеспечивает повышение прочности швов со скандием сразу после сварки до уровня, получаемого на образцах, которые подверглись дополнительно искусственному старению (табл. 4).

Режимы закалки соединений после сварки выбирали таким образом, чтобы реализовать одновременно оба механизма упрочнения металла в результате выделения частиц основных легирующих элементов и алюминиево-скандиевых фаз. Исследования показали, что при кратковременном нагреве до 550 °С когерентность фазы ScAl₃ с матрицей, по-видимому, не нарушается. Поэтому объединение операций высокотемпературного кратковременного старения с целью выделения алюминиево-скандиевой фазы и высокотемпературного возврата к закаленному состоянию (с последующим низкотемпературным старением) для выделения упрочняющих частиц основных легирующих элементов позволило значительно повысить прочность



Микроструктура швов (×156), полученных аргодуговой сваркой неплавящимся электродом, листов толщиной 3 мм сплава 1460 с использованием присадочной проволоки Св1201 (а); 1201+0,5 % Sc (б) и подогретой присадочной проволоки 1201 + 0,5 % Sc

металла шва и сварного соединения в целом. Коэффициент прочности сваренных со скандийсодержащей проволокой соединений повысился до 0,76. Причем сравнительный анализ данных, полученных при сварке проволоками Св1201 и 1201 + 0,5 % Sc, показывает, что достигнутый вследствие полной термической обработки прирост прочности (105,6 МПа) примерно на 46 % (49,1 МПа) обеспечен благодаря введению скандия в присадку. При этом ударная вязкость металла шва выше, чем для основного металла. С целью повышения прочности определенных сварных конструкций или отдельных сварных узлов можно дополнительно применять после сварки термическую обработку,



Таблица 4. Механические свойства сварных соединений листов толщиной 3 мм сплава 1460, полученных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом

Состояние сварного соединения	Присадка	Предел прочности сварного соединения $\sigma_{\text{в}}^{\text{св}}$, МПа	Предел прочности металла шва $\sigma_{\text{в}}^{\text{м.ш}}$, МПа	Ударная вязкость металла шва $a_{\text{ш}}$, Дж/см ²	Угол загиба сварного соединения α , град
После обычной аргонодуговой сварки	Св1201	$\frac{313,0 \dots 306,0}{307,2}$	$\frac{258,6 \dots 243,7}{251,4}$	$\frac{18,5 \dots 18,1}{18,3}$	$\frac{180 \dots 163}{174}$
	1201 + 0,5 % Sc	$\frac{313,7 \dots 304,2}{308,1}$	$\frac{301,3 \dots 281,4}{288,3}$	$\frac{18,7 \dots 18,4}{18,6}$	$\frac{80 \dots 78}{79}$
После сварки с подогревом присадки	Св1201	$\frac{310,9 \dots 303,9}{306,9}$	$\frac{281,9 \dots 268,8}{274,6}$	$\frac{15,9 \dots 15,6}{15,8}$	$\frac{104 \dots 102}{103}$
	1201 + 0,5 % Sc	$\frac{334,3 \dots 329,1}{331,2}$	$\frac{316,2 \dots 292,4}{304,3}$	$\frac{13,7 \dots 13,3}{13,5}$	$\frac{93 \dots 92}{93}$
После искусственного старения (130 °С, 20 ч + 160 °С, 16 ч)	Св1201	—	$\frac{296,3 \dots 286,9}{290,3}$	$\frac{13,2 \dots 12,0}{12,7}$	$\frac{42 \dots 37}{40}$
	1201 + 0,5 % Sc	—	$\frac{304,2 \dots 302,4}{303,8}$	$\frac{12,9 \dots 12,4}{12,6}$	$\frac{39 \dots 35}{37}$
После нагрева до 550 °С, мгновенного охлаждения и последующего искусственного старения (130 °С, 20 ч + 160 °С, 16 ч)	Св1201	$\frac{401,9 \dots 377,7}{387,7}$	$\frac{378,2 \dots 354,1}{364,9}$	$\frac{9,2 \dots 9,1}{9,2}$	$\frac{33 \dots 32}{32}$
	1201 + 0,5 % Sc	$\frac{440,2 \dots 433,4}{436,8}$	$\frac{397,0 \dots 390,5}{393,5}$	$\frac{5,5 \dots 5,1}{5,3}$	$\frac{21 \dots 16}{19}$

включающую кратковременную высокотемпературную (550 °С) закалку и последующее искусственное старение (130 °С, 20 ч + 160 °С, 16 ч).

Выводы

1. Предел прочности и условный предел текучести швов, полученных дуговой сваркой с использованием алюминий-медных проволок, повышается при введении в их состав скандия. При кристаллизации металла шва образуется сложный, насыщенный медью, твердый раствор скандия в алюминии, повышается дисперсность остаточных фаз и измельчается структура швов в результате образования кристаллов субдендритной формы.

2. Применение для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом сплава 1460 присадочной проволоки типа Св1201, легированной 0,5 % Sc и подогретой проходящим током, позволяет повысить прочность металла швов и сварных соединений до уровня, достигаемого при дополнительном их искусственном старении.

3. Разработанные режимы термической обработки сварных соединений сплава 1460 позволяют повысить прочность швов и сварных соединений путем объединения механизмов высокотемпературного возврата металла к закаленному состоянию с растворением упрочняющих фаз, образованных его основными легирующими элементами, и высокотемпературного старения с выделением частиц

алюминий-скандиевой фазы ScAl₃. При последующем низкотемпературном старении происходит выделение упрочняющих частиц основных легирующих элементов. Коэффициент прочности сварных соединений сплава 1460 толщиной 3 мм повышается при этом от 0,53 до 0,76, а коэффициент прочности металла шва — с 0,43 до 0,69.

1. *Разупрочнение* высокопрочных алюминиевых сплавов при различных способах сварки плавлением / А. В. Лозовская, А. А. Чайка, А. А. Бондарев и др. // Автомат. сварка. — 2001. — № 3. — С. 15–19.
2. *Лукин В. И.* Sc — перспективный легирующий элемент для присадочных материалов // Свароч. пр-во. — 1996. — № 6. — С. 13–14.
3. *Елагин В. И., Захаров В. В., Ростова Т. Д.* Перспективы легирования алюминиевых сплавов скандием // Цвет. металлы. — 1982. — № 12. — С. 96–99.
4. *Структура* и свойства соединений, полученных при сварке сплава АМг6 с использованием присадочных проволок со скандием / А. Я. Ищенко, А. В. Лозовская, А. Г. Покляцкий и др. // Автомат. сварка. — 1999. — № 4. — С. 19–25.
5. *Повышение* прочности швов при дуговой сварке сплава 1420 с применением скандийсодержащих присадок / А. Я. Ищенко, А. В. Лозовская, А. Г. Покляцкий и др. // Там же. — 2002. — № 1. — С. 11–15.
6. *Захаров В. В., Ростова Т. Д.* Легирование скандием алюминиевых медьсодержащих сплавов // Металловедение и терм. обработка металлов. — 1995. — № 2. — С. 23–27.
7. *Аргонодуговая* сварка алюминиевых сплавов неплавящимся электродом с колебаниями дуги / А. Г. Покляцкий, А. Я. Ищенко, А. А. Гринюк и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 2. — С. 18–22.
8. *Покляцкий А. Г., Лозовская А. В., Гринюк А. А.* Предотвращение образования оксидных плен в швах при сварке литийсодержащих сплавов // Там же. — 2002. — № 12. — С. 45–48.

Comparative analysis of mechanical properties of deposited metal produced by using filler wires of the Sv-1201 type with a different content of copper and scandium has been conducted. It is shown that an addition of scandium (0.5 %) to welding wires creates prerequisites for extra increase in tensile strength and proof stress of the welds. Methods are offered to provide an extra increase of strength of welded joints and weld metal directly during the welding process by passing the current through a filler region and using postweld heat treatment under special conditions.

Поступила в редакцию 20.05.2005