

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДНЫХ ПЛЕН В ШВАХ ПРИ СВАРКЕ ЛИТИЙСОДЕРЖАЩИХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, инж., А. В. ЛОЗОВСКАЯ, канд. техн. наук, А. А. ГРИНЮК, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрено влияние различных технологических факторов на образование протяженных нитевидных включений оксидной пленки в швах при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом литийсодержащих алюминиевых сплавов. Предполагается, что основными причинами образования этих дефектов является более высокая температура плавления присадочного материала, чем основного. Предложены рекомендации, позволяющие получать качественные сварные соединения литийсодержащих алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: аргонодуговая сварка, литийсодержащие алюминиевые сплавы, неплавящийся электрод, оксидная пленка, присадочная проволока, подогрев, асимметричный ток, вторичные фазы

Перспективные литийсодержащие алюминиевые сплавы отличаются низким удельным весом и высокими прочностными характеристиками [1]. Благодаря такому сочетанию свойств они находят широкое применение в авиационной и космической технике [2–4]. Конструктивные решения отдельных элементов, узлов и самих корпусов летательных аппаратов предусматривают использование различных способов сварки, из которых наиболее распространена аргонодуговая сварка неплавящимся электродом. Однако недостатком этого способа сварки является опасность образования дефектов в металле шва [4–6] (пор и оксидных плен), ухудшающих механические свойства сварных соединений и нарушающих их герметичность.

Известно, что на поверхности алюминия постоянно присутствует оксид алюминия Al_2O_3 в виде пленки, его температура плавления составляет 2300...2320 °С. Во влажной среде обычно образуется гидроксид алюминия $Al_2O_3 \cdot nH_2O$, имеющий переменный состав и структуру. Толщина оксидной пленки изменяется в широких пределах (от 2...3 до 20...40 нм) и увеличивается вместе с температурой нагрева. На горячекатаном металле она может достигать толщины 200 нм и более. Оксидная пленка обладает значительной адсорбционной способностью по отношению к газам и различного рода неметаллическим включениям. Наличие в алюминиевых сплавах добавок щелочных и щелочноземельных металлов способствует насыщению пленки оксидами этих металлов [7, 8].

В настоящее время разработан ряд технологических рекомендаций, обеспечивающих повышение качества металла шва при сварке алюминиевых сплавов. Они сводятся к удалению оксидных плен с поверхности сварочных материалов и усовершенствованию режимов и технологии сварки.

Для дегазации сварочной ванны и получения бездефектных сварных соединений, помимо по-

вышения требований к предварительной подготовке свариваемых кромок и улучшению защиты металла от окисления, рекомендуется также сварка пульсирующей дугой [9–11].

Однако выполнение указанных рекомендаций при сварке литийсодержащих алюминиевых сплавов еще не гарантирует получение швов с качественным формированием. Предполагается, что повышенная склонность металла шва к образованию оксидных плен обусловлена природой указанных сплавов. Закаты, микрорасслоения, строчечные скопления фазовых составляющих попадают в зону проплавления вместе с пленкой, находящейся на поверхности свариваемого металла, которая не обрабатывается дугой. Однако при выполнении соединений литийсодержащих алюминиевых сплавов дуговой сваркой без использования присадочной проволоки пленки в металле шва не образуются.

Механизм формирования протяженных включений оксидной пленки, располагающихся, как правило, в центральной части швов, и причины их возникновения пока до конца не изучены и требуют дальнейших исследований.

Материалы и методика исследований. С целью изучения влияния различных технологических мероприятий на процессы образования протяженных включений оксидной пленки в металле швов сваривали стыковые соединения литийсодержащих алюминиевых сплавов 1420 и 1460 толщиной 3, 4 и 6 мм. В качестве присадочных материалов использовали сварочные проволоки из чистого алюминия и систем легирования Al–Mg, Al–Cu, Al–Si, Al–Cu–Mg, Al–Cu–Si, имеющие различные диаметры (1,2; 1,6; 2,0 и 2,5 мм), а также пластины листовых материалов (сплавы 1420; 1460; 1201; AMg6). Перед сваркой поверхность образцов протравливали по общепринятой технологии, а свариваемые кромки зачищали механическим путем на глубину не менее 0,1 мм.

С помощью источников питания дуги ИСВУ-315, И-126 (производства Украины) и MW-450 (Австрия) осуществляли стационарный и пульсирующий режимы сварки.

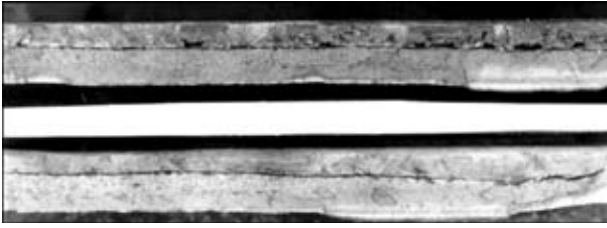


Рис. 1. Протяженные нитевидные включения оксидной пленки в изломах швов, образующиеся при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом пластин сплава 1460

Швы формировали на подкладке с различными размерами канавок. Для обеспечения дополнительной защиты корневой части швов использовали специальные подкладки с отверстиями для подачи аргона. Кроме того, для защиты верхней и нижней поверхностей некоторых стыков применяли фольгу из алюминия.

С помощью трансформатора ТДМ-315 и балластного реостата РБ-300 для подогрева присадочной проволоки на ее участке длиной 25 мм пропускали переменный синусоидальный ток промышленной частоты. Трансформатором тока УТТ-5 измеряли проходящий через присадку ток. При этом учитывали известную формулу

$$cm\Delta T = I^2 R t, \quad (1)$$

где c — удельная теплоемкость материала проводника; m — его масса; ΔT — изменение его температуры; I и R — соответственно ток и сопротивление в проводнике; t — время прохождения в нем тока.

Температуру подогрева присадочной проволоки определяли из выражения

$$\Delta T_{II} = 16 \frac{I_{II}^2 \rho_{II} l_{II}}{\pi^2 d_{II}^4 v_{II} c_{II} j}, \quad (2)$$

где I_{II} — проходящий через присадочную проволоку ток; ρ_{II} — удельное сопротивление материала присадочной проволоки; l_{II} — длина участка присадочной проволоки, через который проходит ток; v_{II} — скорость подачи присадочной проволоки; j — удельный вес материала присадки.

После сварки механическим способом удаляли усиления и корни швов и делали продольные изломы. На основании исследований изломов оценивали качество швов, полученных с использованием различных технологических приемов.

Результаты исследований. При обычной аргонодуговой сварке стационарной дугой неплавящимся электродом без применения присадочной проволоки литийсодержащих алюминиевых сплавов 1420 и 1460 как в одноименном, так и в разноименном сочетаниях материалов возникновения протяженных включений оксидной пленки в швах не наблюдалось. В случае подачи присадочной проволоки в сварочную ванну в центральной части швов появляются протяженные дефекты, причем независимо от системы легирования, диаметра и способа предварительной подготовки поверхности проволоки (рис. 1). Даже при механической зачистке ее поверхности непосредственно

перед сваркой не возможно избежать образования нитевидных включений, хотя и более тонких.

Комплекс мероприятий, направленных на обеспечение надежной защиты металла от окисления при аргонодуговой сварке, получение качественных сварных соединений не обеспечил. Поддув аргона через отверстия в специальной подкладке образованию протяженных дефектов не препятствовал. Защита стыка от окружающей атмосферы полоской алюминиевой фольги с его лицевой стороны или с обеих сторон привела к появлению наряду с протяженной продольной пленой мелких дезориентированных дефектов.

Попытки повлиять на характер расположения оксидных включений в металле швов с помощью изменения формы и размеров формирующей канавки, угла наклона горелки или формы разделки кромок оказались безрезультатными. Появление нитевидных протяженных включений оксидной пленки по-прежнему происходит в центральной части шва.

Применение источников питания дуги И-126, ИСВУ-315, MW-450 с различными динамическими характеристиками и формой волны сварочного тока существенного влияния на образование рассматриваемого типа оксидных включений в металле швов при сварке литийсодержащих алюминиевых сплавов не оказали. Изменение частоты смены полярностей тока ($f = 50 \dots 250$ Гц) или использование сварочного тока с низкочастотной пульсацией при модуляции ($f_M = 2 \dots 5$ Гц) также не дали ощутимых результатов. Интенсивные колебания расплавленного металла сварочной ванны приводят к периодическому изменению скорости его кристаллизации, но не нарушают непрерывности процесса. Поэтому оксидные включения в металле швов по-прежнему образуются по всей длине стыка, как и при сварке стационарной дугой.

Вероятность образования нитевидных включений в металле швов уменьшается в случае активизации процессов разрушения оксидной пленки при сварке, что достигается использованием асимметричного тока с преобладанием длительности импульсов при обратной полярности. Результаты исследования продольных изломов швов показали, что для получения швов с качественным формированием при сварке присадочными проволоками различных систем легирования необходимо изменить соотношение длительностей импульсов при прямой и обратной полярностях. В случае сварки с присадочной проволокой системы Al-Cu бездефектные швы формируются при использовании асимметричного тока с коэффициентом временной асимметрии $K_{ac}^t = 0,35 \dots 0,40$. Применяя присадочную проволоку систем легирования Al-Mg и Al-Cu-Mg, во избежание образования дефектов необходимо уменьшить значения K_{ac}^t до $0,25 \dots 0,30$. Но при сварке с присадочными проволоками систем Al-Cu-Si и Al-Si оксидные включения в металле швов возникают даже при $K_{ac}^t \leq 0,2$.

На рис. 2 показаны поверхности изломов швов с включениями оксидной пленки в сварных соединениях, полученных при аргонодуговой сварке

пластин сплава 1460 толщиной 3 мм с использованием присадочных проволок различных систем легирования. Включения оксидной пленки независимо от типа присадочной проволоки имели различную форму и цвет, развитую поверхность с углублениями и выступами. Изменение цвета пленки от блестящего до черного, по-видимому, обусловлено ее различной толщиной. Под тонкой прозрачной пленкой просматривается дендритная структура литого металла (рис. 2, а, б). Пленки черного цвета плотные и характеризуются наличием большого количества трещин (рис. 2, в, г).

Установлено, что на поверхности оксидных пленок скапливаются включения интерметаллидных фаз, содержащих железо, кремний, скандий, а также в большом количестве калий и кальций. Результаты сканирующего микрорентгеноспектрального анализа поверхности излома швов по месту расположения оксидной пленки и поверхности долома показали, что содержание легирующих и примесных элементов зависит от химического состава металла шва. При сопоставлении спектров, отражающих количественное содержание элементов в участках с пленкой и без нее, существенного отличия выявлено не было. Таким образом, применение присадочных проволок различных систем легирования не исключает появления оксидных пленок в металле швов, однако приводит к изменению его состава.

Результаты исследований показали, что образование протяженных нитевидных включений оксидной пленки в центральной части швов при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом с использованием присадочной проволоки является характерной особенностью литийсодержащих алюминиевых сплавов. И если хотя бы одна из свариваемых встык пластин алюминиевого сплава содержит литий, то образование дефектов практически неизбежно. Анализ изломов макро- и микроструктуры металла швов однозначно свидетельствует, что оксидные пленки располагаются в центре шва на расстоянии примерно 1/3 от его корня.

Не обнаруживаются протяженные дефекты в изломах швов, выполненных аргонодуговой сваркой на повышенных токах или в гелии. Увеличение температуры нагрева присадочной проволоки способствует активизации процессов катодного и термического разрушения оксидной пленки. По этой же причине вероятность образования протяженных оксидных включений в металле швов уменьшается при использовании асимметричного тока с преобладанием длительности импульсов при обратной полярности.

Однако аргонодуговая сварка термически упрочняемых сплавов, содержащих литий, на повышенных режимах неприемлема, так как вызывает перегрев

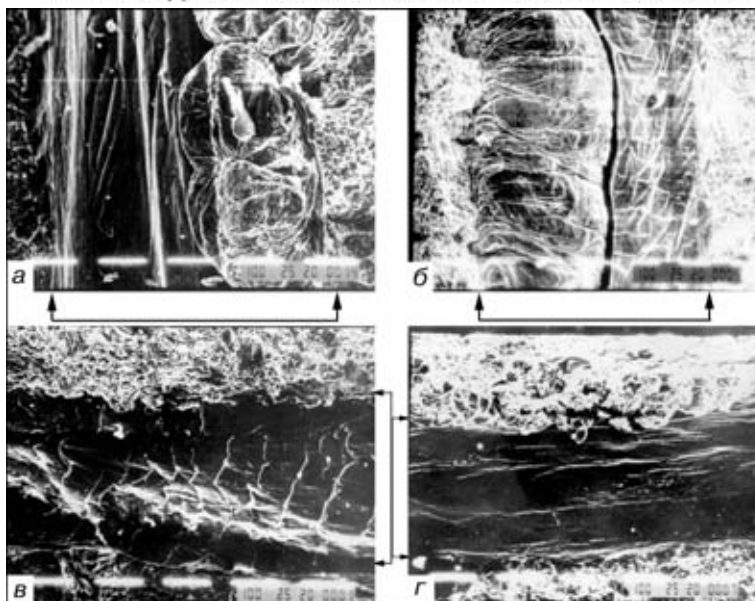


Рис. 2. Микроструктуры ($\times 100$) оксидных пленок в изломах швов, полученных при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом пластин сплава 1460 с использованием различных типов присадочных проволок (стрелками показаны участки оксидной пленки): а — СвАК5; б — СвАМг63; в — 1201Sc; г — Св-1201

металла шва и зоны термического влияния.

Можно предположить, что поскольку присадочные проволоки типа Св-1201 и СвАМг6 имеют температуру плавления выше, чем свариваемый металл, то на режимах, обеспечивающих его плавление, полного катодного разрушения оксидной пленки на поверхности присадочной проволоки не происходит и ее неразрушенные фрагменты попадают в расплав. Под действием силы тяжести они опускаются в донную часть сварочной ванны, но силы поверхностного натяжения препятствуют их полному погружению. Поэтому в большинстве случаев оксидные включения обнаруживаются в центральной части сварочной ванны.

Результаты сравнительных исследований температурного интервала плавления и кристаллизации сварочных материалов в неравновесных условиях, приближающихся к условиям сварки, позволили установить, что самый большой интервал плавления и самый низкий солидус имеет основной металл. Температура солидуса у сплава 1460 не превышает $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и колеблется в интервале $460\text{...}490\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура солидуса присадочных сварочных проволок на $50\text{...}70\text{ }^{\circ}\text{C}$, а ликвидуса на $20\text{...}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, чем у основного металла.

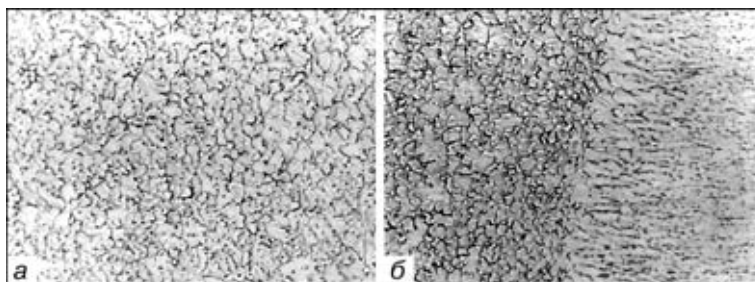


Рис. 3. Микроструктура ($\times 200$) металла шва (а) и зоны сплавления (б) сварочного соединения, полученного при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом пластин сплава 1460 с подогревом присадочной проволоки

Подтверждением такого механизма появления дефектов является тот факт, что при выполнении сварных соединений без присадочной проволоки они не образуются. Кроме того, если вместо непрерывно поступающей в сварочную ванну присадочной проволоки между кромками или на кромки положить полоску металла, с аналогичным ей химическим составом, то на продольных изломах швов появление дефектов не наблюдается. По-видимому, при подогреве присадочного материала исчезает перепад температур на границе контакта расплава присадочной проволоки и основного металла. В результате остающиеся в металле швов выделения не концентрируются в определенном месте, а рассредоточиваются по всему его объему. И даже если мелкие частицы пленки со свариваемых кромок основного металла или вставленной полоски присадочного материала не разрушаются и попадают в сварочную ванну, то они не могут инициировать скопление вокруг себя выделений разрозненных фаз. Поэтому протяженные включения оксидной пленки не образуются.

При разработке способа предотвращения появления оксидных плен в металле шва при сварке литийсодержащих алюминиевых сплавов следует учитывать, что образование оксидной пленки на поверхности свариваемых материалов происходит мгновенно приблизительно за $1 \cdot 10^{-7}$ с [12]. Оксидная пленка обладает адсорбционной способностью по отношению к газам и влаге. Формула и структура пленки изменяются в зависимости от температуры нагрева, и на границе контакта «холодной» присадочной проволоки со сварочной ванной происходит локальное охлаждение расплава.

Таким образом, подогрев присадочной проволоки способствует уменьшению nH_2O адсорбированной оксидной пленки и повышению или выравниванию температуры в зоне контакта присадочной проволоки с расплавом сварочной ванны. Проведенные эксперименты подтвердили целесообразность такой операции.

При аргонодуговой сварке неплавящимся электродом литийсодержащих алюминиевых сплавов 1420 и 1460 присадочную проволоку подогревали до 50...200 °С переменным током. Результаты исследования изломов швов, выполненных присадочной проволокой, подогретой на 150 °С, показали, что независимо от системы ее легирования образование протяженных дефектов в металле швов не происходит.

Металлографические исследования макро- и микроструктуры сварных соединений при сварке сплава 1460 с подогревом присадочной проволоки свидетельствовали о том, что полученный металл

шва отличается высоким качеством: металл шва имеет мелкокристаллическую структуру без оксидных плен и других видов дефектов (рис. 3).

В результате проведенных исследований установлено, что образование протяженных нитевидных включений оксидной пленки в швах при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом литийсодержащих алюминиевых сплавов с использованием присадочных проволок типа Св-1201, СвАМг6 обусловлено локальным охлаждением в зоне контакта присадочной проволоки с расплавом ванны.

Во избежание образования этих дефектов необходимо обеспечить благоприятные условия для активизации процессов разрушения оксидной пленки на поверхности поступающей присадочной проволоки и свариваемых кромок. Поэтому сварку литийсодержащих алюминиевых сплавов рекомендуется выполнять асимметричным током с преобладанием длительности импульсов тока при обратной полярности и подогревом присадочной проволоки перед ее подачей в сварочную ванну.

1. *Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства* / И. Н. Фридляндер, К. В. Чунстов, А. Л. Березина, Н. Н. Колобнев. — Киев: Наук. думка, 1992. — 192 с.
2. *Братухин А. Г., Редчиц В. И., Лукин В. И.* Перспективы использования алюминий-литиевых сплавов для штампо-сварных конструкций летательных аппаратов // Свароч. пр-во. — 1996. — № 7. — С. 18–21.
3. *Chien P.* Welding the space shuttle's Al-Li external tank presents a challenge // *Welding J.* — 1998. — № 6. — P. 45–48.
4. *Овчинников В. В., Дриц А. М., Крылова Т. В.* Технологические особенности производства сварных конструкций летательных аппаратов из алюминий-литиевого сплава 1460 // Свароч. пр-во. — 1997. — № 12. — С. 26–29.
5. *Рязанцев В. И., Федосеев В. А., Маничев В. Н.* Создание сварного кузова автомобиля из алюминиевых сплавов // Там же. — 1999. — № 11. — С. 36–42.
6. *Покляцкий А. Г.* Особенности образования макровключений оксидной пленки в металле швов алюминиевых сплавов (Обзор) // *Автомат. сварка.* — 2001. — № 3. — С. 38–40.
7. *Варакина П. П., Мироенко В. В., Полянский В. М.* Влияние вылеживания сплава 01420 при комнатной температуре на изменение фазового состава поверхностного слоя // *Технология легких сплавов.* — 1979. — № 6. — С. 10–11.
8. *Ширяева Н. В., Овчинников В. В., Габидуллин Р. М.* Образование пор при сварке сплава системы алюминий-магний-литий // *Автомат. сварка.* — 1987. — № 3. — С. 16–18.
9. *Влияние способов подготовки свариваемой поверхности на образование пор в швах на сплаве алюминий-магний-литий* / В. И. Рязанцев, В. А. Федосеев, В. В. Гришин, Н. В. Ширяева // Там же. — 1982. — № 6. — С. 53–54.
10. *Чаюи А. Г.* Сварка алюминий-литиевого сплава 01420 с защитой обратной стороны шва гибкой металлической подкладкой // Там же. — 1980. — № 8. — С. 72–73.
11. *Илющенко Р. В.* Влияние параметров режима сварки пульсирующей дугой в аргоне на пористость соединений сплава 1420 // Там же. — 1990. — № 9. — С. 27–30.
12. *Рабкин Д. М.* Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов. — Киев: Наук. думка, 1986. — 256 с.

The effect exerted by different technological factors on formation of extended filamentary inclusions of an oxide film in the TIG welds on aluminium-lithium alloys is considered. The main cause of formation of these defects is supposed to be a higher melting temperature of the filler metal, compared with the base metal. Recommendations are offered, allowing the quality welded joints to be produced on aluminium-lithium alloys

Поступила в редакцию 04.07.2001,
в окончательном варианте 27.10.2002