

**В.В. Овчинников, д.т.н.,
Р.Н. Растопчин, инженер**
(ФГБОУ ВО Московский политехнический университет,
107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38)
E-mail: vikov1956@mail.ru, ruslanrast@mail.ru

Плазменная сварка высокопрочных алюминиевых сплавов

На основе анализа тенденций развития процессов плазменной сварки алюминиевых сплавов показано, что для сварки ответственных конструкций в большинстве случаев применяется сварка неплавящимся электродом на обратной полярности с подачей присадочной проволоки. Описан способ сварки с полым анодом для повышения стойкости неплавящегося вольфрамового электрода. Показано, что для повышения качества сварных швов алюминий-литиевых сплавов перспективно применение программируемой импульсной подачи плазмообразующего газа. Наряду с уменьшением количества дефектов в виде пор и оксидных пленок в этом случае отмечается получение более мелкозернистой структуры металла швов.

Ключевые слова: плазменная дуга; алюминиевые сплавы; сварка неплавящимся электродом; сварка проникающей дугой; импульсная подача плазмообразующих газов; механические свойства; структура швов.

**V.V. Ovchinnikov, Dr. Sc.Tech.,
R.N. Rastopchin, Engineer**
(FSBEI HE Moscow Polytechnic University, 38, Bolshaya Semyonovskaya Str., Moscow, 107023)

Plasma welding of high-strength aluminum alloys

On the analysis basis of trends in the development of aluminum alloy plasma welding it is shown that in most cases for critical structures there is used welding with a non-consumable electrode on reversed polarity with adding wire material. A welding method with a hollow anode to increase non-consumable tungsten electrode durability is described. It is shown that to increase quality of welded joints in aluminum-lithium alloys the application of plasma-forming gas programmable pulse feed has promising outlooks. In this case side by side with the decrease of such defects as pores and oxide films the obtaining of more fine-grained structure in metal seams is marked.

Keywords: plasma arc; aluminum alloys; welding with non-consumable electrode; welding with penetrating arc; pulse feed of plasma-forming gases; mechanical properties; seam structure.

Введение

В настоящее время наблюдается расширенное применение сварки трением с перемешиванием для изготовления сварных конструкций. Сварка трением с перемешиванием (СТП) обеспечивает формирование соединения в твердой фазе. Наибольшее распространение сварка трением с перемешиванием получила при производстве корпусных изделий транспортного и авиакосмического назначения из алюминиевых сплавов, что связано, в

первую очередь, с достаточно низкой температурой перехода алюминиевых сплавов в сверхпластичное состояние [1, 2].

При правильном подборе указанных параметров микроструктура сварных швов является дисперсной и свободной от дефектов, возникающих при сварке плавлением, а сами швы обладают улучшенными характеристиками [3]. Существуют проблемы подбора оптимальных параметров процесса СТП, которые требуют комплексного подхода к изучению кинетики деформирования материала,

выделения и распределения тепла, формирования микроструктуры сварного шва и т.д. Все эти составляющие взаимосвязаны и проблемы оптимизации возникают каждый раз при переходе от одного свариваемого материала к другому, при изменении толщины свариваемых материалов и использовании различных инструментов.

В технологии сварки для каждого случая предполагается существование диапазона значений технологических параметров, который обеспечивает качество сварного соединения. В случае нарушения технологических параметров, методу СТП присуще возникновение тех или иных дефектов структуры сварного соединения (дефектов типа каналов и непроваров, скоплений твердых включений и т.д.).

Поэтому совершенствование традиционных способов сварки конструкций из алюминиевых сплавов не перестает быть актуальным.

Для ответственных конструкций из листов алюминиевых сплавов толщиной 4...10 мм наилучшие результаты обеспечивает плазменная сварка неплавящимся вольфрамовым электродом на постоянном токе обратной полярности с подачей присадочной проволоки в сварочную ванну [4]. Для снижения тепловой нагрузки на вольфрамовый электрод и тем самым повышения его стойкости, был разработан способ плазменной сварки с полым анодом [5, 6]. Согласно схеме данного процесса возбуждают две дуги постоянного тока: одну – прямой полярности – между вольфрамовым электродом и соплом (дежурная дуга), другую

– обратной полярности – между соплом и обрабатываемым изделием. Вторая дуга называется основной.

Основная дуга сжимается электрическим путем: в результате выдувания плазмы дежурной дуги создается электрический проводник, который стягивает на себя поток основной дуги и тем самым обеспечивается сжимающий и стабилизирующий эффект. Возможно стабильное горение основной дуги при ее длине до 10 мм.

С позиций практики применение описанного способа плазменной сварки наиболее эффективно при сварке алюминиевых сплавов, когда требуется разрушение и удаление тугоплавкой поверхностной оксидной пленки, например, при сварке алюминиево-литиевых сплавов.

Целью данной работы является изучение технологических особенностей применения способа плазменной сварки с полым анодом для получения стыковых соединений листов современных высокопрочных алюминиевых сплавов, а также комплекса механических свойств этих соединений.

Материалы и методы исследований

Исследования выполнялись на заготовках из алюминиевых сплавов 1565ч, 1151Т, В-1341Т1 и В-1469 толщиной 7 мм размером 300×100 мм. Механические свойства заготовок приведены в табл.1.

1. Механические свойства исследуемых сплавов

Марка сплава	Система легирования	Состояние	Временное сопротивление σ_B , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость КСУ, кДж/м ²
1565чМ	Al-Mg	отжиг	362	187	17,2	165
1151Т	Al-Cu-Mg	Закалка + естественное старение	463	337	13,8	120
В-1341Т1	Al-Mg-Si	Закалка + искусственное старение	335	305	17,5	135
В-1469Т1	Al-Cu-Li	Закалка + искусственное старение	550	450	8	85

Заготовки сплавов 1565чМ, В-1341Т1 и 1151Т перед сваркой подвергались травлению в щелочи с осветлением в 30%-ном растворе азотной кислоты. Непосредственно за 1...2 ч до сварки торцевая поверхность свариваемых кромок и прилежащие к ним поверхности заготовок на расстоянии 15 мм от стыка были зашпательны до металлического блеска.

Заготовки сплава В-1469Т1 были подвергнуты химическому травлению с контролируемым съемом толщины удаляемого слоя материала толщиной 0,06...0,08 мм с каждой стороны листа. После этого заготовки данного сплава обрабатывались аналогично заготовкам из других исследуемых сплавов.

При сварке стыковых соединений применя-

лась присадочная проволока диаметром 2,5 мм, подвергнутая операции скальпирования (гарантированный сьем дефектного слоя путем пропускания через алмазную фильеру) [7]. Для сварки сплава 1565ЧМ использовали проволоку марки Св1575, сплава 1151Т – проволоку Св1177, сплава В-1341Т1 – проволоку СВАК5 и сплава В-1469Т1 – проволоку Св1217.

Автоматическая плазменная сварка образцов стыковых соединений осуществлялась на следующих режимах: ток основной дуги $I_{св}$ составляет 60...115 А; дежурной дуги I_d – изменяется в пределах от 30 до 180 А в зависимости от толщины свариваемых заготовок; напряжение дуги – 18...28 В; скорость сварки – 12...18 м/ч; скорость подачи присадочной проволоки – 24...28 м/ч. В качестве плазмообразующего газа применяли аргон, защитного – гелий. Питание основной и дежурной дуг осуществлялось от двух источников марки ВСВУ-400.

Помимо питания дежурной дуги постоянным током применяли ее импульсное питание. Величину тока импульса задавали в пределах 350...800 А при длительности импульса тока 0,08...0,15 с.

В данной статье рассмотрен способ плазменной сварки с полым анодом с периодически изменяемой подачей плазмообразующих газов. Характерной особенностью данного процесса плазменной сварки является пульсация напряжения основной дуги при постоянной силе тока. Поэтому для данного процесса подачи плазмообразующего газа установлены частота пульсации f , соотношение продолжительности фаз повышенной t_B и пониженной t_H подачи газа.

На рис. 1 показано изменение напряжения плазменной струи при импульсной подаче плазмообразующего газа аргона. Для сварки исследуемых образцов были применены следующие режимы сварки: ток основной дуги 60...115 А; частота подачи плазмообразующих газов $f = 1$ Гц; $t_B : t_H = 1:1$; расход плазмообразующего газа $\Delta G = 2...4$ л/мин; диаметр канала в плазмообразующем сопле 3 мм.

Сравнение вольт-амперной характеристики плазменной дуги при сварке, как в различных газах, так и с импульсной их подачей показало, что при сварке с импульсной подачей газов напряжение на дуге выше, чем при сварке в аргоне, но ниже, чем при сварке в гелии (рис. 2).

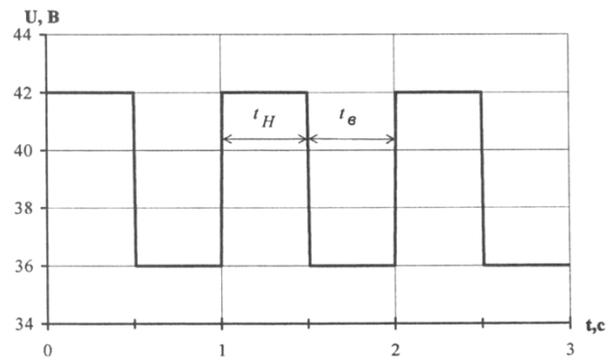


Рис. 1. Изменение напряжения плазменной струи дежурной дуги при импульсной подаче плазмообразующих газов

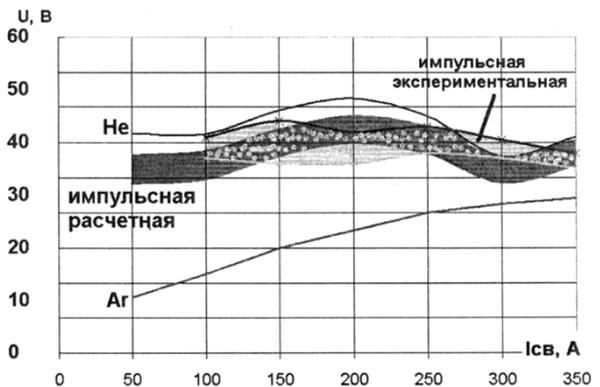


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика плазменной дуги при непрерывной подаче плазмообразующего газа (аргон, гелий) и импульсной попеременной подаче указанных газов

В этом случае при импульсном изменении плазмообразующего газа с аргона на гелий происходит скачкообразное изменение длины дуги. Изменяется силовое воздействие плазменной дуги на расплав сварочной ванны и, как результат, периодически меняется глубина проплавления. Установлено, что импульсное изменение состава плазмообразующего газа способствует снижению количества пор в металле шва.

Временное сопротивление сварных соединений определяли на плоских образцах с шириной в рабочей части 10 мм и толщиной 3 мм по ГОСТ 6996–66. Испытания образцов проводили на стенде «ИНСТРОН ТТ-ДМ». Испытания на изгиб осуществляли на плоских образцах сварных соединений толщиной 7 мм размерами 10×90 мм.

Сварные соединения испытывались в двух вариантах: с усилением и проплавом, а также с удаленным усилением шва и проплавом –

для определения прочности металла сварного шва.

Макроструктуру сварных соединений изучали на образцах, вырезанных из сварных соединений, которые после обработки исследуемой поверхности подвергали твердому цветному анодированию.

Исследование макро- и микроструктуры производили на оптическом микроскопе и растровом электронном микроскопе Evo-50 фирмы Carl Zeiss.

Результаты исследований и их обсуждение

На первом этапе исследований были изучены макроструктуры сварных соединений, полученные применяемыми методами плазменной сварки на листовых заготовках сплава 1565чМ. Исследуемые макроструктуры соединений приведены на рис. 3. При выполнении исследуемых соединений постоянным параметром являлся ток основной дуги на уровне 95 А.

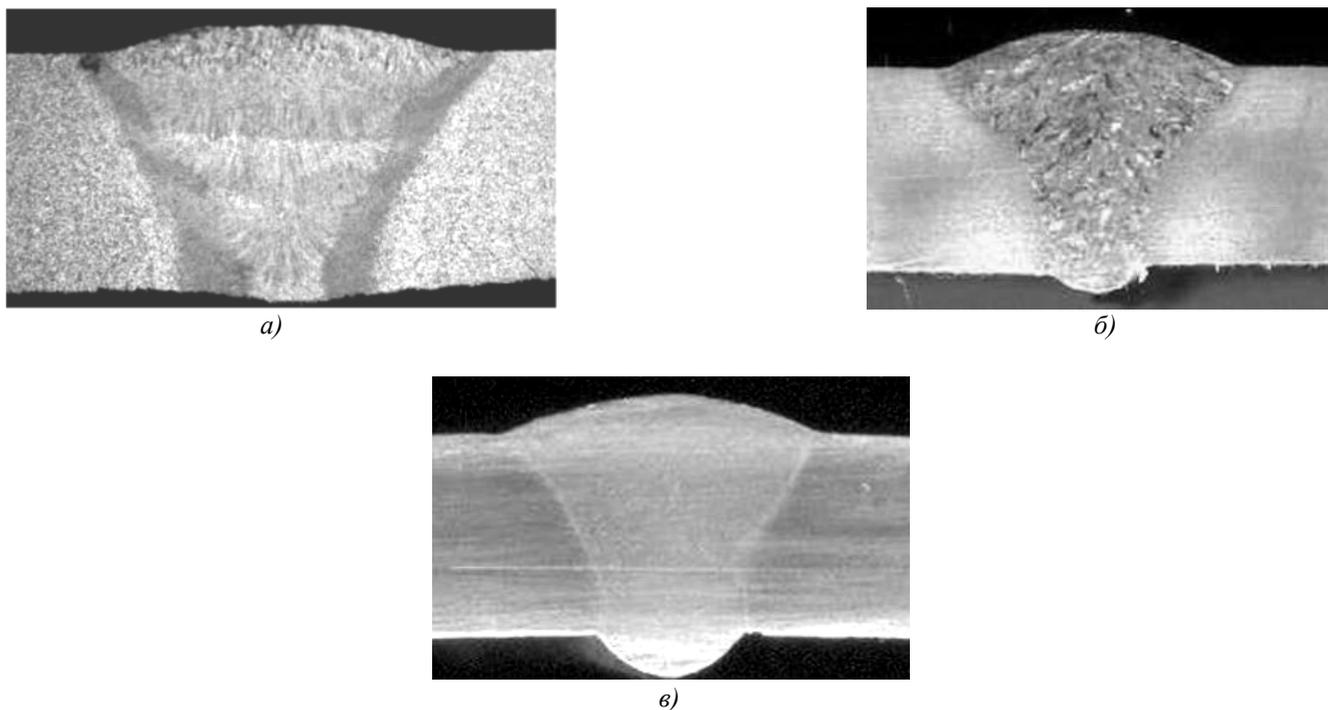


Рис. 3. Макроструктура сварных соединения листов сплава 1565чМ, выполненных плазменной сваркой с по-
лым анодом на обратной полярности (а), с импульсным питанием дежурной дуги (б) и импульсной попере-
менной подачей плазмообразующих газов: аргон и гелий (в), (×5)

Анализ макроструктуры соединений показывает, что при сварке на обратной полярности на постоянном токе шов формируется с характерной для данного способа сварки формой трапеции с меньшим основанием на обратной стороне соединения (рис. 3, а). В случае сварки с импульсным питанием дежурной дуги можно отметить формирование шва с параллельными стенками в нижней его половине (рис. 3, б). При этом ширина обратной стороны шва (проплава) увеличивается, а ширина шва с лицевой стороны соединения – уменьшается.

Импульсная попеременная подача плазмообразующих газов способствует увеличению ширины участка шва с параллельными стенками и ширины проплава. При этом при свар-

ке без формирующей подкладки несколько возрастает величина выпуклости шва со стороны проплава (рис. 3, в). Такое формирование профиля сварного шва в поперечном сечении является следствием изменения напряжения на дежурной дуге (см. рис. 1) и, как следствие, оно должно способствовать снижению остаточных деформаций сварных заготовок и вытеснению оксидных пленок в проплав.

Количественно изменение размеров сварного шва листов сплава 1565чМ при различных вариантах плазменной сварки приведено на рис. 4.

На сварных соединениях сплава В-1469Т1 исследовалось влияние способа плазменной сварки на количество дефектов в виде, кото-

рые являются весьма распространенным дефектом сварных соединений, полученных сваркой плавлением алюминий-литиевых сплавов. Для такой оценки использовались образцы, поверхность которых подвергалась только травлению в щелочи и осветлению в 30%-ном растворе азотной кислоты. В этом случае оксидная поверхностная пленка, служащая источником газов для формирования пор, на поверхности образцов сохранялась [8].

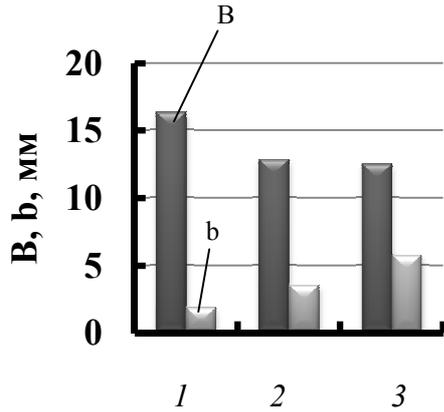


Рис. 4. Влияние способа плазменной сварки с полым анодом на размеры сварного шва на сплаве 1565ЧМ толщиной 7 мм:

1 – на постоянном токе обратной полярности; 2 – с импульсным питанием дежурной дуги; 3 – с импульсной попеременной подачей плазмообразующих газов

Рентгенограмма сварного соединения, выполненного на постоянном токе обратной полярности, представлена на рис. 5. В шве можно отметить наличие развитой пористости.

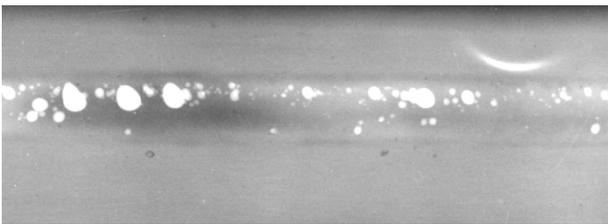


Рис. 5. Рентгенограмма сварного соединения сплава В-1469Т1, выполненного плазменной сваркой на постоянном токе обратной полярности

Анализ пористости в металле шва показал, что при переходе от сварки на постоянном токе обратной полярности к импульсным процессам (сварка с импульсным питанием дежурной дуги и сварка с периодической импульсной подачей плазмообразующих газов) наблюдается ее интенсивное уменьшение (рис. 6). Это явление можно связать с возник-

новением низкочастотных пульсаций расплава в кратере при сварке, который инициируется изменением напряжения на дежурной дуге.

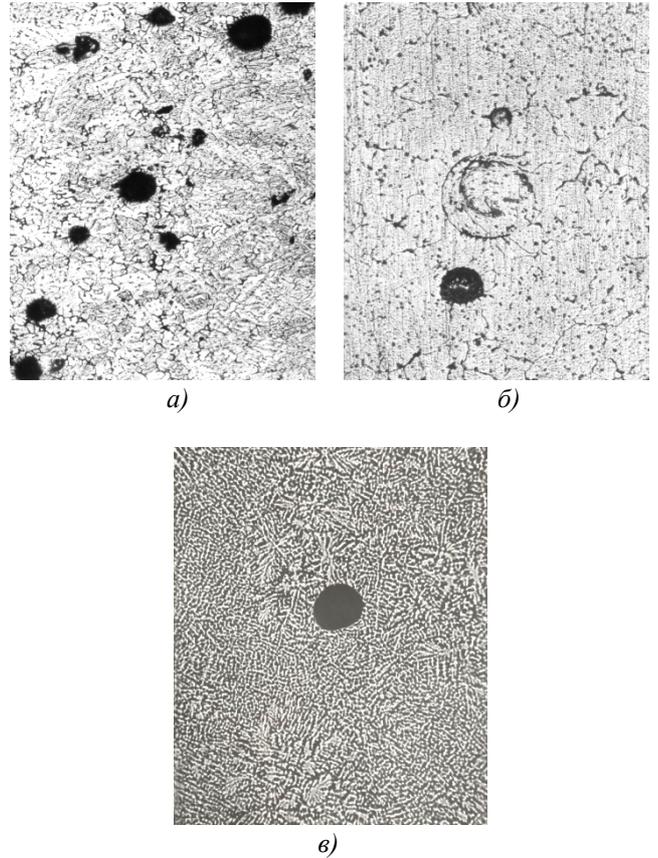


Рис. 6. Поры в металле шва при плазменной сварке (×150):

а – на постоянном токе обратной полярности; б – с импульсным питанием дежурной дуги; в – с импульсной попеременной подачей плазмообразующих газов

Количественная оценка площади пор на 100 мм длины шва при различных вариантах плазменной сварки листов сплава В-1469Т1 показана на рис. 7. Представленные на рисунке данные свидетельствуют о том, что наибольшая пористость наблюдается при сварке на постоянном токе.

В случае сварки с импульсным питанием дежурной дуги можно наблюдать существенное снижение суммарной площади пор. В случае применения импульсной попеременной подачи плазмообразующих газов также можно отметить уменьшение суммарной площади пор на 100 мм длины шва. Это снижение пористости уступает влиянию импульсного питания дежурной дуги на пораженность швов сплава В-1469Т1 порами.

По мнению авторов, отмеченный процесс является следствием меньшей частоты механических колебаний расплава в кратере сва-

рочной ванны под действием изменяющегося давления дуги при переходе с аргона на гелий в плазмообразующей атмосфере. Следует предположить, что частоту колебаний расплава можно увеличить в том случае, если повысить частоту смены порций плазмообразующего газа. Но для реализации такого процесса необходима разработка специального программатора подачи газов в плазмотрон.

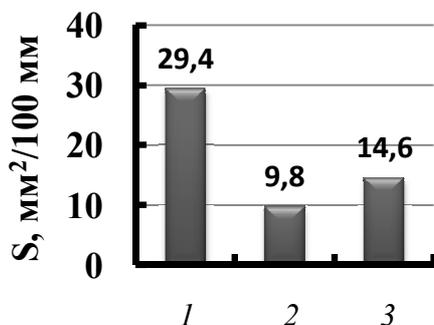


Рис. 7. Влияние способа плазменной сварки с полым анодом на суммарную площадь S пор на 100 мм длины шва сплава В-1469Т1:

1 – на постоянном токе обратной полярности; 2 – с импульсным питанием дежурной дуги; 3 – с импульсной попеременной подачей плазмообразующих газов

Следует также учесть, что, приведенные на рис. 7, данные соответствуют варианту с заведомо интенсивным порообразованием из-за поверхностной пленки. Если провести предварительное размерное травление поверхности листов сплава В-1469Т1 перед сваркой, то реальная величина суммарной пористости на 100 мм длины шва будет на порядок меньше.

Механические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов, выполненных исследуемыми методами плазменной сварки, представлены в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 показывает, что прочность сварных соединений для исследованных алюминиевых сплавов достигает своих наибольших значений при плазменной сварке с полым анодом для большинства из исследуемых сплавов. Для сплава 1151Т наиболее высокие значения временного сопротивления наблюдаются для плазменной сварки неплавящимся электродом в импульсном режиме питания дежурной дуги.

Плазменная сварка сплавов В-1341Т1, В-1469Т1 и 1565чМ в импульсном режиме и с импульсной подачей плазмообразующих газов обеспечивает получение соединений с несколько меньшими значениями временного сопротивления разрыву сварного соединения.

Коэффициент прочности соединения при этом определяется химическим составом сплава, составом присадочной проволоки и применяемым способом плазменной сварки. Для большинства термически упрочняемых алюминиевых сплавов значения коэффициента прочности соединения варьируются в диапазоне 0,6–0,8.

Разрушение образцов при испытаниях, у которых не удалены выпуклости швов с лицевой и корневой сторон, для термически упрочняемых сплавов 1151Т и В-1469Т1 происходит по зоне сплавления шва и основного металла. Сварные образцы сплава В-1341Т1 разрушаются по зоне термического влияния, а образцы сплава 1565чМ – на расстоянии 2...4 мм от границы сплавления по зоне термического влияния.

Для сварных соединений сплава В-1469 максимальные значения малоциклового усталости (осевое растяжение, $f = 3$ Гц, $\sigma_{\max} = 180$ МПа) получено на сварных образцах, выполненных плазменной сваркой с полым анодом в непрерывном режиме горения дуги – 66 373 циклов. Плазменная сварка с полым анодом при импульсном режиме горения дуги обеспечивает получение соединений с малоциклового усталостью на уровне 62 355 циклов.

Микроструктура металла шва сплава 1565чМ, выполненного плазменной сваркой с полым анодом с присадочной проволокой СвАМг61, состоит из α -твердого раствора, на фоне которого закристаллизовалась дендритная сетка (рис. 8, а). Степень распада твердого раствора в металле шва не одинакова – имеются участки с повышенным и пониженным содержанием эвтектики.

Микроструктура переходной зоны характеризуется оплавлением эвтектики вдоль деформированного волокна металла (рис. 8, б). Ширина переходной зоны составляет 0,76...0,95 мм. Микроструктура основного металла выражена текстурой деформации с выделениями вторичной β (Al₃Mg₂)-фазы (рис. 8, в). Проведено исследование влияния состава присадочного материала на микроструктуру сварных соединений сплава В-1469Т1 при плазменной сварке. Максимальный размер зерна характерен для швов, выполненных серийной проволокой Св1201. Величина зерна в металле шва для указанной присадки составляет 55...95 мкм (рис. 9, а). Введение в присадочную проволоку скандия [7] приводит к измельчению дендритной структуры шва до размера зерна 20...40 мкм.

Рентгеноструктурный анализ сварных швов сплава В-1469Т1, выполненных плазменной сваркой с различными присадочными проволоками, показал, что скандий наблюдается на

границах дендритных ячеек в виде дисперсных частиц типа $Al_3(Sc)$, а также может находиться в твердом растворе на основе алюминия (рис. 10).

2. Механические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов плазменной сваркой

Марка сплава и толщина листа, мм	Марка присадочной проволоки и ее диаметр, мм	Способ плазменной сварки	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа		Коэффициент прочности сварного соединения	Угол изгиба α , °	Ударная вязкость КСУ, кДж/м ² металла шва
			соединение	металл шва			
1565чМ, 7 мм	–	Основной металл	355	–	–	55	258
	СвАМг61, 2,5 мм	ПСНЭ с полым анодом	340,3	294,6	0,95	180	208,2
	СвАМг61, 2,0 мм	ПСНЭ в импульсном режиме	331,4	288,3	0,93	180	203,1
	СвАМг61, 2,5 мм	ПСНЭ с импульсной подачей ПГ	330,7	287,6	0,93	180	202,5
В-341Т1, 7 мм	–	Основной металл	332	–	–	150	139,2
	СвАК5, 2,5 мм	ПСНЭ с полым анодом	315,2	266,8	0,94	32	123,4
	СвАК5, 2,5 мм	ПСНЭ в импульсном режиме	312,2	264,6	0,94	30	122,6
	СвАК5, 2,5 мм	ПСНЭ с импульсной подачей ПГ	308,5	263,2	0,92	28	122,1
В-469Т1, 7 мм	–	Основной металл	550	–	–	25	280
	Св1217, 2,5 мм	ПСНЭ с полым анодом	375,6	266,9	0,68	56	230,4
	Св1217, 2,5 мм	ПСНЭ в импульсном режиме	358,3	247,1	0,65	50	221,7
	Св1217, 2,5 мм	ПСНЭ с импульсной подачей ПГ	356,3	246,6	0,64	52	222,8
1151Т, 5 мм	–	Основной металл	463	–	–	37	120,2
	Св1177 2,5 мм	ПСНЭ с полым анодом	355,2	287,2	0,77	24	98,3
	Св1177 2,5 мм	ПСНЭ в импульсном режиме	362,4	288,3	0,78	30	99,2
	Св1177 2,5 мм	ПСНЭ с импульсной подачей ПГ	347,5	282,5	0,76	26	97,4

Примечание: ПСНЭ – плазменная сварка неплавящимся электродом; ПГ – плазмообразующий газ.

Исследования нетравленных шлифов на растровом электронном микроскопе показали, что в сварных швах, выполненных без присадочного материала, по границам зерен наблюдаются участки микрорыхлоты. Наличие таких дефектов в сварном шве и, особенно вблизи зоны сплавления, может привести к снижению механических характеристик.

В целом микроструктура сварных соединений алюминиевых сплавов, выполненных плазменной сваркой, идентична микрострук-

туре соединений, полученных аргонодуговой сваркой.

Существенное отличие заключается в протяженности зоны термического влияния, которая для плазменной сварки существенно меньше. Кроме того, время пребывания металла зоны термического влияния при повышенных температурах примерно в 2,5–3 раза меньше, чем при аргонодуговой сварке за счет более высокой концентрации тепловой энергии последней.

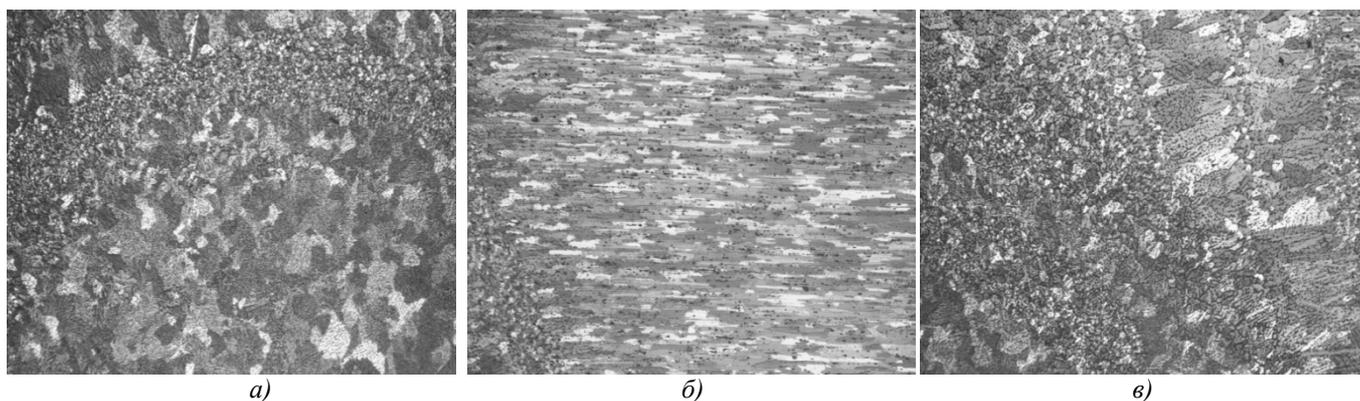


Рис. 8. Микроструктура металла шва (а), зоны сплавления (б) и основного металла (в) сварного соединения сплава 1565чМ, ($\times 230$)

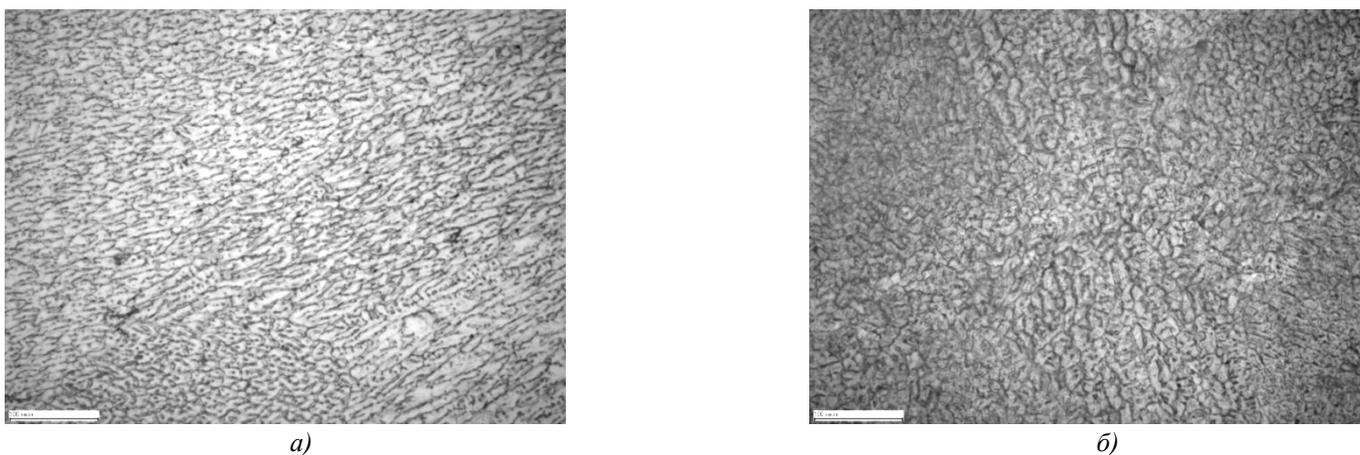


Рис. 9. Центральная зона сварного шва сплава В-1469Т1, выполненного с присадками: а – Св1201; б – 6%Cu + Sc, ($\times 300$)

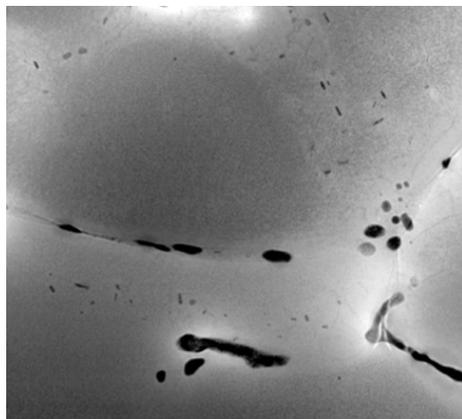


Рис. 10. Выделения дисперсных частиц типа $Al_3(Sc)$ на границах дендритных ячеек в металле шва ($\times 1500$)

В результате в зоне термического влияния снятие нагартовки (для термически неупрочняемых алюминиевых сплавов) и полнота структурных превращений (для термически упрочняемых алюминиевых сплавов) происходит в неполной степени, что и обеспечивает более высокий уровень прочностных свойств соединений, по сравнению с аргонодуговой сваркой.

Выводы

1. Анализ направлений развития процесса

плазменной сварки показал, что для выполнения соединений современных высокопрочных алюминиевых сплавов весьма эффективно применение плазменной сварки на обратной полярности с полым катодом, который может быть реализован как в постоянном, так и в импульсном режиме.

2. Создание импульсного режима может быть осуществлено, как за счет импульсного питания дежурной дуги, так и за счет попеременной импульсной подачи плазмообразующих инертных газов (аргона и гелия).

3. Плазменная сварка с полым анодом про-

никающей дугой с подачей присадочной проволоки обеспечивает высокое качество сварных швов. В процессе сварки образование горячих трещин не проявлялось, сварные швы имели высокий товарный внешний вид лицевой стороны и корня с плавным переходом к основному металлу.

4. Интенсивная катодная очистка металла в процессе плазменной сварки на обратной полярности обеспечивает получение качественных сварных швов при снижении требований к подготовке поверхности заготовок из алюминиевых сплавов под плазменную сварку.

5. Коэффициент прочности соединения определяется химическим составом сплава, составом присадочной проволоки и применяемым способом плазменной сварки. Для большинства термически упрочняемых алюминиевых сплавов значения коэффициента прочности соединения варьируются в диапазоне 0,6–0,8.

6. При плазменной сварке с полым анодом алюминиевых сплавов для повышения свойств соединений, снижения склонности к образованию трещин при сварке может быть рекомендовано применение присадочных материалов дополнительно легированных скандием.

7. Рентгеноструктурный анализ сварных швов сплава В-1469Т1, выполненных плазменной сваркой с различными присадочными проволоками, показал, что скандий наблюдается на границах дендритных ячеек в виде дисперсных частиц типа $Al_3(Sc)$, а также может находиться в твердом растворе на основе алюминия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Stephen Leon J.** Investigation of mechanical properties of aluminium 6061 alloy friction stir welding / J. Leon Stephen, V. Jayakumar // *International Journal of Student's Research in Technology & Management*. – 2014. – Vol. 2. – Iss. 04. – P. 140–144.
2. **Овчинников, В.В.** Научные технологии сварки в производстве объектов транспорта из алюминиевых сплавов // *Научные технологии в машиностроении*. – 2016. – №5. – С. 3-9.
3. **Лукин, В.И., Оспенникова, О.Г., Иода, Е.Н., Пантелеев, М.Д.** Сварка алюминиевых сплавов в авиакосми-

ческой промышленности // *Сварка и диагностика*. – 2013. – № 2. – С. 47-51.

4. **Дриц, А.М., Овчинников, В.В.** Сварка алюминиевых сплавов: монография. – М.: Издательство «Руда и металлы», 2017. – 440 с.

5. **Овчинников, В.В., Редчиц, В.В., Редчиц, А.В.** Повышение проплавающей способности плазменной дуги при сварке алюминиевых сплавов // *Новые материалы и технологии*. – М.: МАТИ, 1997. – 160 с.

6. **Пат. на изобретение РФ № 2292256.** Способ плазменной сварки / Овчинников В.В., Алексеев В.В.; Опубл. 25.01.2007, бюл. 46.

7. **Дриц, А.М., Овчинников, В.В., Игонкин, Б.Л.** Алюминиевая проволока, легированная скандием, для сварки судовых конструкций // *Мир сварки*. – 2019. №1 (53). – С.30–31.

8. **O. Grushko, V. Ovsyannikov, V. Ovchinnikov.** Aluminum-lithium Alloys: Process Metallurgy, Physical Metallurgy and Welding. – CRS Press, 2016, London, New York, – 308 p.

REFERENCES

1. Stephen Leon J. Investigation of mechanical properties of aluminium 6061 alloy friction stir welding / J. Leon Stephen, V. Jayakumar // *International Journal of Student's Research in Technology & Management*. – 2014. – Vol. 2. – Iss. 04. – P. 140–144.
2. Ovchinnikov, V.V. Science intensive welding technologies in manufacturing aluminum alloy transport products // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.5. – pp. 3-9.
3. Lukin, V.I., Ospennikova, O.G., Ioda, E.N., Panteleev, M.D. Aluminum alloy welding in aerospace industry // *Welding and Diagnostics*. – 2013. – No.2. – pp. 47-51.
4. Drits, A.M., Ovchinnikov, V.V. *Aluminum Alloy Welding*: monograph. – M.: "Ore and Metals" Publishers, 2017. – pp. 440.
5. Ovchinnikov, V.V., Redchits, V.V., Redchits, A.V. Increase of plasma welding penetration capacity at aluminum alloy welding // *New Materials and Technologies*. – M.: МАТИ, 1997. – pp. 160.
6. Pat. for invention the RF No.2292256. *Plasma Welding Method* / Ovchinnikov V.V., Alexeev V.V.: published: 25.01.2007, Bull. 46.
7. Drits, A.M., Ovchinnikov, V.V., Igonkin, B.L., Aluminum wire alloyed with scandium for ship structure welding // *Welding World*. – 2019. No.1 (53). – pp. 30-31.
8. O. Grushko, V. Ovsyannikov, V. Ovchinnikov. Aluminum-lithium Alloys: Process Metallurgy, Physical Metallurgy and Welding. – CRS Press, 2016, London, New York, – 308 p.

Рецензент д.т.н. В.М. Самойленко