

ИМПУЛЬСНАЯ И ПУЛЬСИРУЮЩАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Ю.Е.Игнатьев, В.В. Овчинников, В.И.Рязанцев



ИГНАТЬЕВ
Юрий
Евгеньевич

Ведущий специалист ОАО «ОКБ Сухого» по сварке алюминиевых и титановых сплавов в конструкциях самолетов гражданского назначения. Автор 15 научных работ, аспирант заочной аспирантуры МГИУ



ОВЧИННИКОВ
Виктор
Васильевич

Доктор технических наук, профессор. Академик Международной академии информатизации. Ведущий специалист по сварке ФГУП «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ». Основное научное направление — разработка методов и технологических средств получения качественных сварных соединений при изготовлении ответственных конструкций из высокопрочных алюминиевых сплавов. Автор 250 научных работ, в том числе 87 авторских свидетельств и патентов на изобретения.



РЯЗАНЦЕВ
Владимир
Иванович

Кандидат технических наук, главный научный специалист ОАО «Национальный институт авиационной технологии» в области сварки алюминиевых сплавов. Автор более 300 научных работ, в том числе 8 монографий.

Для дуговой сварки деформируемых и литейных алюминиевых сплавов неплавящимся электродом все более широкое применение находят процессы, вызывающие интенсивные гидродинамические колебания расплавленного металла в сварочной ванне. При этом наблюдается эффективное перемешивание основного металла с присадочным металлом и дробление оксидных включений в донной части ванны, активизируются процессы газовыделения, изменяются условия кристаллизации металла, приводящие к формированию мелкокристаллической структуры металла сварных швов. Колебания расплавленного металла при сварке могут происходить за счет прерывистой подачи присадочной проволоки, механических колебаний электрода, наложения на основной сварочный ток кратковременных импульсов,

применения модулированного тока и воздействия дополнительных магнитных полей или вращения электрода [1–9].

При механическом колебании неплавящегося электрода движение расплава в сварочной ванне происходит в результате изменения нормальной составляющей давления дуги, обратно пропорциональной углу отклонения электрода от вертикали [1–6]. Прерывистая подача присадочной проволоки приводит к «встряхиванию» сварочной ванны из-за изменения объема поступающего в нее металла [6, 10].

В случае наложения кратковременных импульсов тока колебания в сварочной ванне возникают из-за резкого увеличения давления дуги во время их прохождения, а при использовании модулированного или асимметричного тока – благодаря разности силового воздействия дуги на металл в моменты импульса и паузы или при прямой и обратной полярности [10]. Отклонения дуги от ее вертикального положения, а, следовательно, и колебания металла сварочной ванны создаются также за счет взаимодействия объемной электромагнитной силы с внешним магнитным полем [8]. Переменное магнитное поле вызывает периодическое отклонение столба дуги, амплитуда и скорость которых зависят от напряженности магнитного поля и частоты смены его полюсов.

Кроме того, возможно воздействие на сварочную дугу электромагнитного поля, возникающего в результате пропускания переменного тока через участок присадочной проволоки [9]. При этом колебания металла сварочной ванны возникают за счет изменения силового воздействия дуги в результате постоянного изменения ее положения относительно электрода, что обусловлено действием переменных электромагнитных полей, создаваемых сварочной дугой и токопроводящим участком присадочной проволоки.

С учетом работ [1–10] наиболее перспективным является наложение мощных импульсов тока, сварка пульсирующей дугой и сварка с вращением электрода. Последний процесс наиболее рационален при автоматической сварке протяженных швов сложной конфигурации.

Целью данной работы являлось изучение влияния импульсной и пульсирующей сварки и прерывной сварки неплавящимся электродом на

параметры проплавления, геометрию сварного шва, структуру, плотность, разупрочнение и механические свойства сварных соединений высокопрочных деформируемых и литейных алюминиевых сплавов и их сравнение.

Методика исследований

Сварку проводили на образцах алюминиевых сплавов АМг6, 1420, 1423, 1460, 1201, 1151, 1570, ВАЛ8, АЛ9, ВАЛ10, ВАЛ16 толщиной 2, 3 и 4 мм. Источники питания сварочной дуги – ИСВУ-315 и ИСВУ-400. Использовали ручную и автоматическую однопроходную сварку с присадочными проволоками и без проволоки. Рентгеновское просвечивание сварных соединений проводили на аппаратах РУП 120-5 на пленку РТ-5.

При сварке торцевых соединений по поперечным макро- и микрошлифам определяли процентное отношение длины дефектного участка к высоте шва в зависимости от способа сварки. При сварке тавровых соединений на проплаве по макро- и микрошлифам определяли наличие или отсутствие дефектных участков в зоне соединения (стыка стенки и полки) в зависимости от способа сварки.

При сварке нахлесточных соединений глубину проплавления в нижний элемент соединения и наличие дефектных участков в зависимости от способа сварки определяли по макро- и микрошлифам.

В случае сварки стыковых соединений процентное отношение длины дефектных участков к общей длине сварных швов в зависимости от способа сварки рассчитывали по рентгеновским снимкам.

При пульсирующей сварке основными параметрами процесса были: ток в импульсе $I_{и}$, ток дежурной дуги (ток в паузе) $I_{п}$, длительность импульса $t_{и}$ и длительность паузы $t_{п}$.

При импульсной сварке основными параметрами процесса были: ток непрерывной дуги $I_{н}$, ток в импульсе $I_{и}$, длительность импульса $t_{и}$ и число импульсов в серии n . Кроме того, важное технологическое значение имело парное взаимодействие параметров: жесткость режима $G = t_{п}/t_{и}$ и коэффициент модулирования сварочного тока $K = I_{и}/I_{п}$.

Первоначально проведенные эксперименты показали:

– с повышением тока в импульсе однозначно повышаются все геометрические параметры шва (ширина и глубина проплавления);

– с повышением длительности импульса тока увеличиваются ширина шва и глубина проплавления;

– с увеличением длительности паузы уменьшается глубина проплавления и ширина шва;

– с повышением жесткости режима пульсирующей сварки заметно снижается глубина проплавления и ширина шва;

– повышение коэффициента модуляции сва-

рочного тока приводит к увеличению ширины шва, а глубина проплавления увеличивается незначительно;

– повышение тока дежурной дуги (тока в паузе) оказывает небольшое влияние на ширину шва, но существенно изменяет глубину проплавления и внешний вид шва.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Показатели дефектности сварных соединений в зависимости от типа сварного соединения и способа сварки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели дефектности сварных соединений

Марка сплава	Тип сварного соединения	Наличие дефектов в зависимости от способа сварки, %			Примечание
		непрерывная	пульсирующая	импульсная	
АМг6	Торцевое	80	25	0–15	Без присадки
	Нахлесточное	60	35	0–10	С присадкой
	Тавровое	70	32	0	На проплав без присадки
	Стыковое	15	8	0	Химическое травление
		70	30	0	С искусственной оксидной пленкой
1420	Торцевое	85	30	0	Без присадки
	Нахлесточное	65	30	0–5	С присадкой
	Тавровое	60	35	0–5	На проплав без присадки
	Стыковое	20	10	0	Химическое травление
		75	15	0–5	С искусственной оксидной пленкой
1201	Торцевое	65	15	0	Без присадки
	Нахлесточное	50	10	0	С присадкой
	Тавровое	50	20	0	На проплав без присадки
	Стыковое	10	3	0	Химическое травление
		55	15	0	С искусственной оксидной пленкой
ВАЛ8	Стыковое	70	10–15	5–7	С присадкой
ВАЛ10	Стыковое	50	5–10	0	С присадкой
ВАЛ14	Стыковое	45	5–10	0	С присадкой
ВАЛ16	Стыковое	40	5–10	0	С присадкой

Из анализа этих данных видно, что в большинстве случаев при использовании пульсирующей и импульсной сварки удается резко снизить или полностью ликвидировать все дефекты в швах. Кроме того, введение пульсирующей или импульсной сварки позволяет изменить показатели свариваемости по сравнению с непрерывной сваркой [3, 4].

Наиболее распространенными дефектами сварных швов из алюминиевых сплавов являются оксидные пленки, которые, как правило, располагаются по оси шва в корневой его части, и высокая пористость. Особенно сильно эти дефекты проявляются в нахлестанных и торцовых соединениях, которые обусловлены конструктивными особенностями изделий. При аргонодуговой сварке неплавящимся электродом в таких соединениях тугоплавкая гигроскопичная оксидная пленка разрушается недостаточно интенсивно. Так, при автоматической аргонодуговой сварке переменным током она составляет 60–80 % высоты шва, а при ручной сварке – более 80 % и даже выходит на поверхность.

Как показывает производственный опыт, наличие такой пленки в шве приводит к несплошностям металла шва и, следовательно, к несплошностям соединений, которые выявляются при испытании узлов и в процессе их эксплуатации.

При сварке различного рода конструкций с вакуумно-плотными соединениями предъявляют повышенные требования к структуре металла шва. Известно, что плотность шва тем выше, чем мельче и разориентированнее структура литого металла. Таким образом, для решения проблемы получения плотных сварных соединений, особенно при изготовлении тонкостенных конструкций из алюминиевых сплавов, необходимо повысить интенсивность разрушения оксидной пленки и одновременно создать условия формирования дезориентированной структуры.

Интенсивность разрушения оксидных пленок можно повысить путем изменения характера ввода тепловой энергии и увеличения ее

плотности.

Для решения этой задачи перспективным является наложение на дугу мощных кратковременных импульсов тока, которые позволяют увеличить интенсивность разрушения оксидной пленки и получить дезориентированную структуру металла шва [2–4].

Сварка с наложением импульсов тока производится от двух параллельно подключенных источников: переменного тока и импульсов. Сварка выполняется рабочей дугой, на которую в периоды прямой полярности от самостоятельного источника ИМИ-2 накладываются регулируемые по длительности и частоте как единичные, так и импульсы тока в различных сериях, амплитуда которых должна совпадать с амплитудой синусоидального тока рабочей дуги. В случае наложения импульсов при горении дуги обратной полярности электрод из-за высокой динамической нагрузки разрушается, а частицы его попадают в металл шва.

Процесс сварки с наложением на дугу кратковременных импульсов тока характеризуется большим количеством параметров режима. Поэтому для получения наилучшего эффекта необходима оптимизация режима с учетом получения дезориентированной структуры металла шва. На основе серийной технологии были опробованы различные способы подготовки поверхности под сварку: травление в растворе щелочи и осветление в азотной кислоте с последующим шабрением перед сваркой и только травление с осветлением без шабрения с выдержкой перед сваркой от 1 до 7 суток. Для установления влияния отдельных параметров режима сварки на качество швов в испытательных целях часть образцов нагревали в печи в атмосфере воздуха при 350–400 °С в течение 1 ч и охлаждали не вынимая из печи, отключив ее. После такой подготовки поверхности при сварке без наложения импульсов обнаруживается большое количество дефектов, при сварке же с наложением импульсов наличие дефектов зависит от значений отдельных параметров процесса.

Так как при наложении на дугу мощных

кратковременных импульсов тока в сварочной ванне возникают высокие градиенты температур и сложный турбулентный характер движения жидкого металла, определить расчетным путем оптимальные параметры режима сварки, зависящие от теплофизических свойств жидкого металла ванны и места приложения периодически действующей силы, невозможно. Они могут быть определены только экспериментально.

Влияние параметров режима наложения импульсов тока на плотность металла шва (наличие откидных включений и пор) изучали с использованием многофакторного планирования экспериментов. Для этого был реализован полный трехфакторный план. В качестве переменных факторов были выбраны основные регулируемые параметры наложения импульсов: амплитудное значение тока, длительность паузы и число импульсов в «серии». Длительность импульса и скорость автоматической сварки оставались неизменными. В качестве искомой величины (отклика) было принято отношение суммарной длины дефектных участков к общей длине шва. Длину дефектных участков определяли по рентгенограммам. Статистическая обработка данных реализованных экспериментов в соответствии с полным трехфакторным планом позволила получить следующие адекватные уравнения регрессии:

для материала толщиной 1 мм

$$y = 0,384 + 0,095x_1 + 0,062x_2 + 0,044x_3 + 0,169x_1x_3 - 0,119x_2x_3 - 0,162x_1x_2x_3;$$

для материала толщиной 2 мм

$$y = 0,230 + 0,076x_1 + 0,035x_2 + 0,022x_1x_2 + 0,044x_1x_3 - 0,271x_2x_3 - 0,057x_1x_2x_3;$$

для материала толщиной 3 мм

$$y = 0,250 + 0,036x_1 + 0,057x_2 + 0,035x_3 + 0,083x_1x_3,$$

где x_1 – ток в импульсе; x_2 – длительность паузы; x_3 – число импульсов в серии.

Полученные уравнения регрессии позволили установить степень влияния каждого фактора на плотность металла шва. В наибольшей степени влияет амплитудное значение тока, в меньшей степени – число импульсов в серии и

совсем незначительно – длительность паузы. Поэтому область оптимальных режимов по току и числу импульсов в серии находится в пределах между максимальным и нулевым уровнями, а по длительности паузы – между минимальным и нулевым уровнями (0,02–0,06 с). Интервал варьирования по току импульса выбирали в пределах 100 А (например, для деталей толщиной 2 мм – от 170 до 270 А).

На установленных оптимальных режимах наложения импульсов тока сваривали образцы с различной формой стыка. Анализ результатов обработки рентгенограмм сварных швов (табл. 2) показал, что при подготовке поверхности травлением и шабрением наложение импульсов тока приводит к уменьшению числа дефектов соответственно в 15–20 и 1,6–3,7 раза (для сплава АМг6), в 17–24 и 2–5,2 раза (для сплава 1420), в 23–32 и 4–5 раз (для сплава 1201). Причем наибольшее уменьшение числа дефектов имеет место для нахлесточного соединения.

Значительное уменьшение числа дефектов в швах связано только с изменением гидродинамического состояния жидкого металла в ванне за счет наложения импульсов тока. Активное перемешивание металла вызывает интенсивное механическое разрушение и дробление оксидных пленок, облегчает всплытие фрагментов и удаление пор.

Для оценки направленности потоков жидкого металла в ванне, при различных режимах сварки, на кромки с оксидной пленкой наносили карбид вольфрама в виде полосок шириной 3–4 мм с расстоянием между полосками 25–30 мм. Распределение частиц карбида вольфрама определяли по внешнему виду швов и рентгенограммам.

Проведенные эксперименты показали, что при сварке образцов дугой переменного тока без наложения модулированных импульсов тока протяженность включений оксидной пленки составила 1,42–1,67 мм. При наложении на дугу модулированных импульсов тока с амплитудой до 100–280 А при длительности импульса 0,02–0,05 с как дисперсность, так и суммарная про-

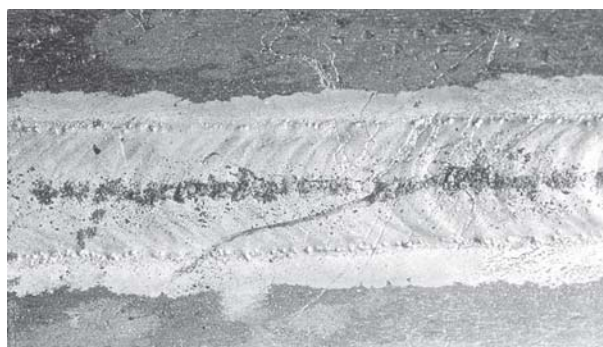
Таблица 2

Влияние способа сварки на число дефектов в сварных швах алюминиевых сплавов

Форма соединения	Способ сварки	Число дефектов (оксидные пленки, поры) на 100 мм длины шва для сплавов:		
		АМг6	ВАД1	1201
Стыковое	С наложением импульсов	2,17 (0,2)	1,3 (0,9)	0,5 (0,7)
	Без импульсов	40,4 (0,58)	21,7 (0,33)	16,9 (0,35)
Нахлесточное	С наложением импульсов	3,5 (0,35)	2,1 (0,15)	0,9 (0,1)
	Без импульсов	58,6 (1,3)	29,5 (0,8)	20,8 (0,5)
Стыковое с односторонним усилением сверху	С наложением импульсов	2,4 (0,4)	1,2 (0,2)	-
	Без импульсов	39,2 (0,74)	28,3 (0,4)	-
Примечания: 1. Приведены средние данные по результатам обработки рентгенограмм швов длиной не менее 3 м. 2. Без скобок приведены результаты сварки образцов после подготовки поверхности травлением с вылеживанием до сварки в течение 7 суток. 3. В скобках приведены результаты сварки образцов после подготовки поверхности шабрением с вылеживанием до сварки в течение 3 часов.				

тяженность включений оксидной пленки в шве мало отличается от величин, характерных для аргонодуговой сварки без наложения импульсов. С увеличением амплитудного значения тока в импульсе до 450–460 А возрастает дисперсность оксидных включений в металле шва при общем сокращении их суммарной протяженности.

Анализ внешнего вида сварных швов и их рентгенограмм показал, что при величине амплитудного значения тока в амплитуде до 280 А частицы карбида вольфрама (вместе с фрагментами оксидной пленки) располагаются вдоль линии стыка торцевых поверхностей свариваемых кромок (рис. 1, а). Увеличение амплитудного значения тока в импульсе до 300–460 А способствует возникновению направленного движения жидкого металла сварочной ванны (рис. 1, б). Рост амплитудного значения тока в импульсе до 500–750 А сопровождается уве-



а

Рис. 1. Внешний вид лицевой поверхности соединений сплава АМг6 с частицами карбида вольфрама, выполненных автоматической аргонодуговой сваркой с наложением модулированных импульсов тока:
 а – ток импульса 100–280 А; б – ток импульса 300–460 А; в – ток импульса 500–750 А

личением глубины кратера в ванне (рис. 1, в).
 Можно сформулировать следующую схему механизма фрагментации оксидной пленки в



Рис. 1.б

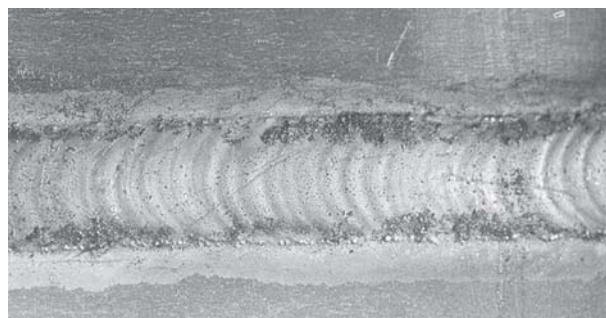


Рис. 1.в

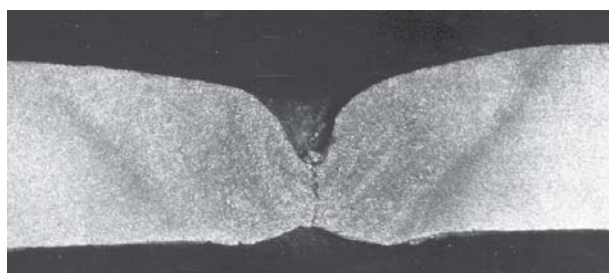
стыке при сварке алюминиевых сплавов: для более мелкой фрагментации оксидной пленки в ванне необходимо формирование углубления виде кратера в жидком металле под действием источника нагрева. Образование кратера создает условия для непосредственного воздействия ионной бомбардировкой на оксидную пленку, расположенную на торцевой поверхности свариваемых кромок. При образовании кратера в жидком металле сварочной ванны формируются устойчивые и направленные потоки расплавленного металла, обеспечивающие вынос на поверхность шва фрагментов оксидной пленки по боковым стенкам кратера.

На рис. 2 представлены фотографии макрошлифов кратера в сварочной ванне при раз-

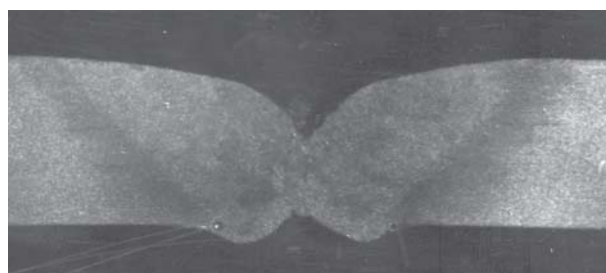
личном значении тока модулированных импульсов.

Образование кратера в сварочной ванне связано с изменением формы столба и диаметра активного пятна дуги при наложении импульсов. Форма столба дуги определяется характером пламенных потоков в нем и зависит от физических характеристик газа дуги, конструктивных особенностей неплавящихся электродов, характера тока и его полярности.

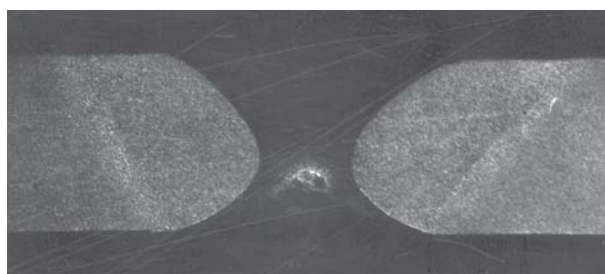
Для изучения формы столба дуги при наложении модулированных импульсов применялась методика поперечного зондирования двойным горизонтальным зондом [11]. Два зонда, выполненные из вольфрамовой проволоки (ВНР) диаметром 0,3 мм, располагаются в горизонтальной плоскости на некотором рас-



а



б



в

Рис. 2. Макроструктура сварочной ванны (кратера) при сварке с модулированными импульсами со значением тока импульса:

а – 100–280 А; б – 300–460 А; в – 500–750 А

стоянии друг от друга и жестко закрепляются в электрододержателе, конструкция которого обеспечивает пространственное позиционирование блока зондов в дуге и вращение его вокруг вертикальной оси. Расстояние между электродами при позиционировании блока в дуговом промежутке определяли с помощью бинокулярного микроскопа МБС-9, оснащенного окулярами с измерительной сеткой. Длину дуги устанавливали по индикатору с ценой деления шкалы 0,1 мм. Измерение потенциала обоих зондов относительно неплавящегося электрода при прохождении ими через дугу фиксировалось с помощью двухлучевого цифрового запоминающего осциллографа С9-8.

Эксперименты выявили, что существенное влияние на форму дуги и диаметр ее столба оказывает наложение на дугу модулированных импульсов тока. Увеличение амплитудного значения тока в импульсе сопровождается уменьшением диаметра столба дуг (рис. 3) как в аргоне, так и в гелии. При этом уменьшение диаметра столба дуги более интенсивно протекает в гелии. Следует отметить, что при этом проявляется определенная зависимость между током дуги и амплитудным значением тока в импульсе, определяющая степень сжатия столба дуги (см. рис. 3)

Перспектива роста глубины проплавления и формирование кратера при наложении на дугу модулированных импульсов тока неразрывно

связаны с механическим воздействием дуги на металл сварочной ванны. Давление дуги на металл сварочной ванны зависит от характера импульсов тока (динамическое давление). Давление сварочной дуги является одной из важнейших технологических характеристик, определяющей ее проплавляющую способность, движение расплавленного металла и формирование сварного шва.

Для обоснования выбора параметров режима импульсной сварки существенным является определение зависимости газодинамического давления дуги переменного тока от параметров импульса. Известные «весовые» способы и аппаратура позволяют устанавливать связь между общей силой, воздействующей на активное пятно открытой дуги, и эффективным значением тока при разряде, и не могут быть пригодны для замера газодинамического давления импульсной дуги.

Для определения газодинамического давления импульсной дуги использовалась схема, представленная в работе [12], состоящая (рис. 4) из плоского медного охлаждаемого электрода с осевым отверстием диаметром 2 мм, соединенным с малогабаритным индуктивным датчиком для измерения ударных и стационарных газовых потоков. Механическое перемещение мембраны датчика от воздействия газовых потоков, преобразуется в электрический сигнал,

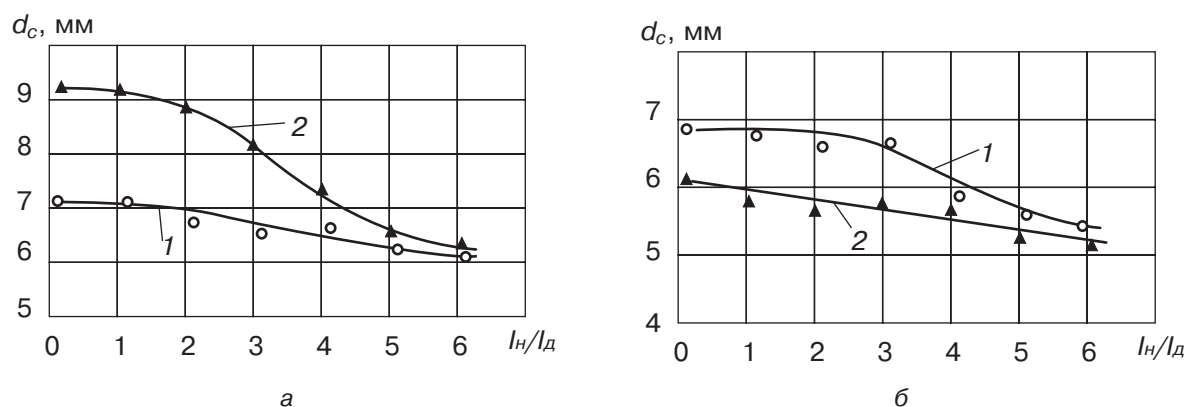


Рис. 3. Зависимость диаметра столба дуги от соотношения тока импульсе к току дуги на расстоянии 1,0 мм (1) и 2,0 мм (2) от электрода при горении дуги в аргоне (а) и в гелии (б) ($I_d=75$ А ; $L_d=3$ мм, $t_n=0,08$ с)

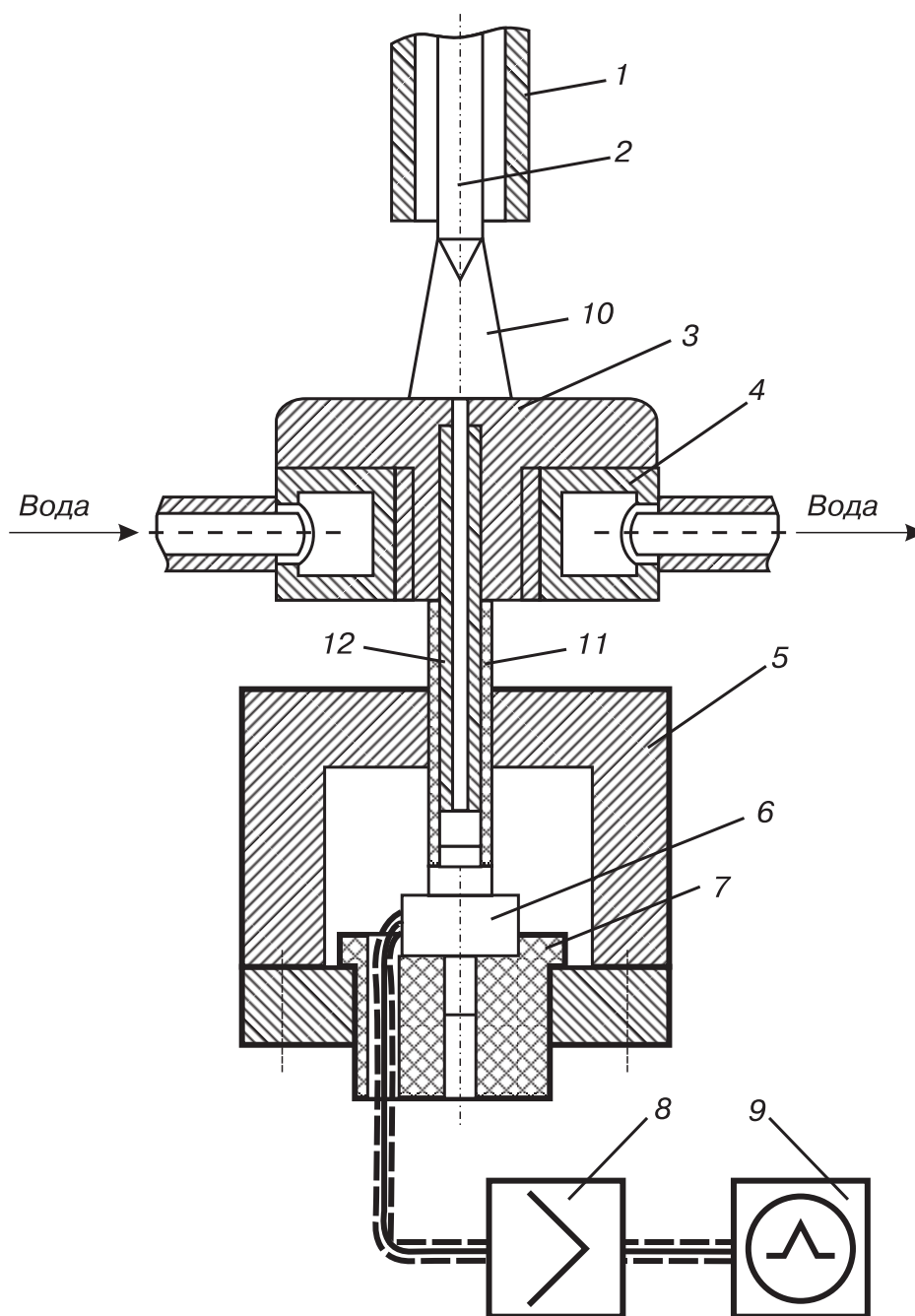


Рис. 4. Схема измерения газодинамического давления дугового разряда:

- 1 – сопло сварочной горелки; 2 – вольфрамовый электрод; 3 – медный электрод;
4 – охладитель; 5 – стальной экран; 6 – индуктивный датчик; 7 – изолятор; 8 – усилитель;
9 – осциллограф; 10 – дуговой разряд; 11 – изоляционная трубка; медная трубка

который затем усиливался и регистрировался осциллографом.

Измерение газодинамического давления осуществляли при импульсном дуговом разряде переменного тока при расстоянии 3 мм между вольфрамовым электродом диаметром 3 мм

и медным электродом. Эксперименты показали, что величина и скорость изменения газодинамического давления разряда наиболее существенно зависит от скорости нарастания импульса тока (рис. 5). Установлено, что при импульсном разряде со скоростью нарастания

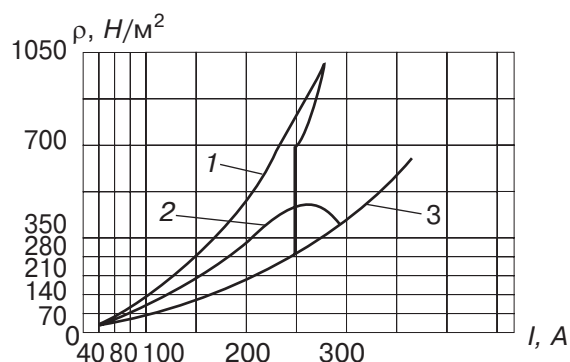


Рис. 5. Циклы амплитудных значений давления в центре столба дуги от величины тока в импульсе и скорости его нарастания S_u :

1 – $S_u \approx 3$ кА/с; 2 – $S_u \approx 0,6$ кА/с;

3 – стационарный установившийся разряд

импульса $S_u \approx 3$ кА/с, несмотря на меньшие значения максимального тока, давление значительно превосходит величину давления импульса со скоростью нарастания $S_u \approx 0,6$ кА/с. При крутом фронте нарастания тока импульса в диапазоне величин 40–200 А наблюдается резкое повышение давления и затем спад при установившемся значении тока. Импульсы тока со скоростью нарастания 0,6 кА/с также вызывают повышение давления при нарастании тока, однако это проявляется в небольших пределах.

Анализ процессов, протекающих при импульсном разряде, показал, что из-за большого начального давления в столбе открытой дуги наблюдается расширение плазменного жгута с одновременным ускорением потоков плазмы вдоль электродов под действием магнитного давления. Поэтому наиболее вероятными причинами значительного роста газодинамического давления в начальный период развития импульсно-дугового разряда при атмосферном давлении по сравнению со стационарным разрядом являются ускорение плазменных потоков, а также отставание скорости роста площади активного пятна дуги от скорости нарастания тока импульса. Это приводит к эпизодическому повышению плотности тока в активном пятне дуги. Результаты экспериментов показали, что газодинамическое давление дуги в импульсном режиме в начальный период раз-

вития разряда значительно выше значения газодинамического давления в стационарном режиме горения дуги.

Получение сварных соединений практически без дефектов или с дефектами, не превышающими норм стандартных производственных инструкций для поверхностей, обработанных только травлением с выдержкой до 7 суток перед сваркой, позволяет в ряде случаев полностью отказаться от операции шабрения. В серийном производстве трудоемкость операции шабрения весьма высока, поэтому сварка с наложением на дугу кратковременных импульсов тока не только повышает качество соединений, но и снижает трудоемкость их изготовления.

Изменение структуры металла при сварке без наложения импульсов тока, в частности наличие на рентгенограммах темных и светлых полос по оси шва или вдоль линии сплавления сплава 1201, связано только с весьма значительной структурной неоднородностью в шве. Наложение импульсов тока постоянно изменяет тепловое и гидродинамическое состояние металла шва у межфазной границы, что вызывает дискретный рост дендритов из новых центров с изменением направления их осей. Поэтому образуется дезориентированная более мелкозернистая структура шва. На рентгенограммах швов полос нет, что свидетельствует о высокой структурной однородности металла шва.

Наложение на дугу импульсов тока изменяет показатели горячеломкости (табл. 3). Так, критическая скорость деформации возрастает на 25–50 % по сравнению со сваркой без импульсов. Это связано с тем, что периодическое изменение температурных условий в ванне оказывает существенное влияние на процесс кристаллизации и характер образующейся структуры шва и, как следствие, на его технологическую прочность в температурном интервале кристаллизации. Повышение стойкости против образования горячих трещин связано не только с образованием дезориентированной и более мелкозернистой структуры, но и с эффектом залечивания зарождающихся тре-

Таблица 3

Показатели трещинообразования алюминиевых сплавов в зависимости от способа сварки

Марка сплава	Марка присадочной проволоки	Способ сварки	Коэффициент трещинообразования по пробе «рыбий скелет»	Критическая скорость деформации, мм/мин
АМг6	Св.АМг63	I	10	5,8
		II	8	6,8
		III	3	7,0
1420	Св.АМг63	I	17	5,5
		II	15	5,8
		III	8	6,1
1423	Св.АМг63	I	15	5,6
		II	10	5,9
		III	6	6,3
1201	Св.1201	I	17	4,9
		II	15	5,5
		III	8	5,9
1460	Св.1217	I	20	4,5
		II	15	4,8
		III	10	5,6
1151	Св.1177	I	16	4,9
		II	10	5,2
		III	8	5,7
1570	Св.1571	I	8	6,8
		II	7	7,0
		III	3	7,2

Примечания:

1. Критическую скорость деформации определяли на установке ЛТП-1-6 по методике, разработанной МВТУ.
2. Коэффициент трещинообразования по пробе «рыбий скелет» определяли по методике, разработанной в ИЭС им.Е.О. Патона.
3. Способы сварки: I – непрерывная, II – пульсирующая, III – импульсная.
4. Приведены средние данные по результатам испытаний 5 образцов.

щин под действием периодических гидродинамических колебаний металла в ванне.

Прочностные свойства соединений, выполненных с наложением на дугу кратковременных импульсов тока, выше, чем при сварке без них. Так, для сплава АМг6 предел прочности повышается на 7–15 %, а угол изгиба на 15–35%. Для сплавов 1420 и 1201 характерны аналогичные зависимости (табл. 4 и 5). Малоцикловая

усталость образцов из сплавов АМг6, 1420 и 1201, сваренных с наложением кратковременных импульсов тока, заметно выше, чем при обычной сварке (табл. 6). Так, число циклов до разрушения при высоких нагрузках (250–280 МПа) на образцах, сваренных с наложением импульсов тока, увеличивается в 1,5–2 раза, а при низких уровнях нагружения (200–230 МПа) – в 3–4 раза.

Таблица 4

Механические свойства сварных соединений из деформируемых алюминиевых сплавов
в зависимости от способа сварки

Марка сплава	Марка присадочной проволоки	Способ сварки	Предел прочности, МПа	Угол загиба, град.	Ударная вязкость, кДж/м ²	
					по шву	по линии сплавления
АМг6	Св.АМг63	I	312	109	19,5	12,5
		II	325	115	21,7	17,5
		III	318	116	22,0	15,1
		IV	320	118	23,0	16,5
1420	Св.АМг63	I	372	82	16,5	7,6
		II	378	89	19,5	10,5
		III	380	86	17,8	9,5
		IV	378	83	19,5	9,6
1423	Св.АМг63	I	345	80	22,0	9,0
		II	348	80	25,0	9,8
		III	352	78	23,5	9,5
		IV	348	78	24,0	9,3
1460	Св.1217	I	285	28	14,0	8,0
		II	315	33	16,0	9,0
		III	312	31	15,9	9,0
1201	Св.1201	I	275	78	17,5	10,5
		II	284	75	17,9	11,5
		III	286	84	18,5	11,0
1151	Св.1177	I	376	28	6,0	3,6
		II	386	31	7,2	4,8
		III	390	35	7,8	4,7
1570	Св.1571	I	371	112	34,0	26,0
		II	385	115	37,5	29,0
		III	381	124	38,0	29,5
		IV	374	108	35,0	31,0

Примечания:

1. Способы сварки: I – непрерывная, II – пульсирующая, III – импульсная, IV –пульсирующая с импульсами.

2. Приведены средние данные по результатам испытаний пяти образцов.

Металлографические исследования показали, что наложение импульсов тока приводит к уменьшению дендритной ячейки на сплавах АМг6 и 1420 с 0,029–0,040 до 0,012–0,019 мм, т.е. 1,5–3 раза.

Поверхности разрушенных образцов после

испытаний на малоцикловую усталость исследовали с помощью электронного микроскопа. Рост трещины за цикл оценивали по расстоянию между усталостными бороздками – знаками, которые оставляют трещины в каждом цикле нагружения. Для одной и той же глубины трещины рас-

Таблица 5

Механические свойства сварных соединений из литейных алюминиевых сплавов в зависимости от способа сварки

Марка сплава	Марка присадочной проволоки	Способ сварки	Предел прочности, МПа	Угол загиба, град.	Ударная вязкость по шву, кДж/м ²
ВАЛ8	Св.1177	I	257	16	1,6
		II	275	18	2,1
		III	305	27	2,35
ВАЛ10	Св.1201	I	253	30	17,1
		II	294	35	19,2
		III	315	42	19,9
ВАЛ16	Св.АМг63	I	265	36	22,5
		II	280	42	24,3
		III	286	46	29,7
		IV	295	53	30,2
Примечания: 1. Способы сварки: I – непрерывная, II – пульсирующая, III – импульсная, IV –пульсирующая с импульсами. 2. Приведены средние данные по результатам испытаний пяти образцов. 3. Образцы отливались в песчаной форме.					

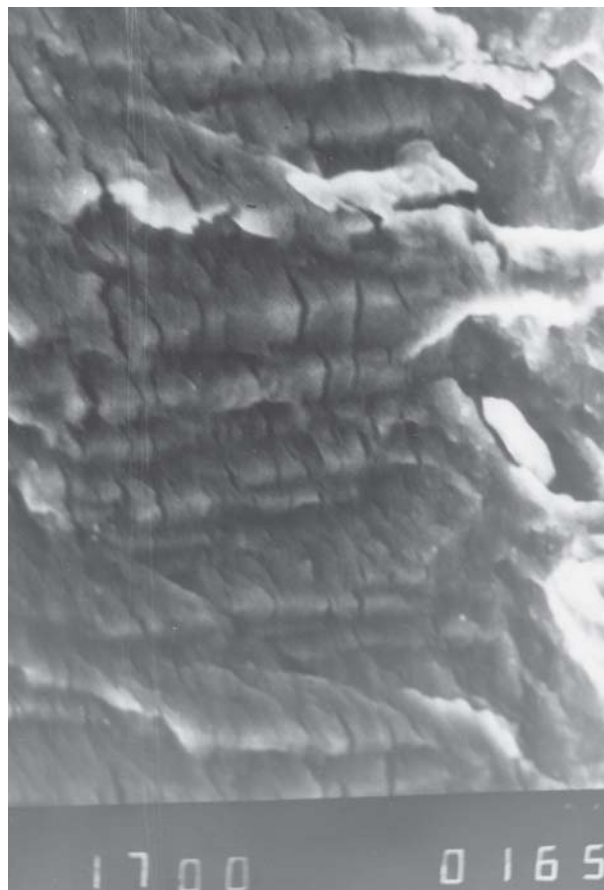
Таблица 6

Малоцикловая усталость сварных соединений алюминиевых сплавов в зависимости от способа сварки

Марка сплава	Способ сварки	Число циклов до разрушения ($\times 10^3$) при нагрузке МПа				
		280	250	230	200	180
АМг6	I	0,72	2,15	4,0	12,3	21,2
	II	1,0	4,25	10,2	26,02	44,5
	III	1,13	6,25	14,4	36,82	74,3
1201	I	0,76	2,05	4,17	11,5	19,5
	II	1,26	3,70	10,3	37,4	68,6
	III	1,56	5,75	15,39	47,45	88,7
1420	I	0,63	-	4,4	-	-
	II	0,88	-	12,8	-	-
	III	0,98	-	13,9	-	-
1460	I	1,1	2,3	3,95	-	-
	II	1,76	4,30	10,75	-	-
	III	1,85	5,35	13,7	-	-
1570	I	0,88	2,9	4,85	15,6	-
	II	1,3	5,1	10,9	24,9	-
	III	1,45	6,9	16,5	37,1	-
Примечания: 1. Способы сварки: I – непрерывная, II – пульсирующая, III – импульсная, IV –пульсирующая с импульсами. 2. Приведены средние данные по результатам испытаний пяти образцов.						



а



б

Рис. 6. Фрактограммы зоны разрушения образцов сплава 1420 при испытаниях на малоциковую усталость:

а – полученных сваркой без наложения модулированных импульсов тока ($\times 1500$);

б – с наложением модулированных импульсов тока ($\times 1500$)

стояние между усталостными бороздками больше, т.е. скорость ее роста выше для образцов, сваренных без наложения импульсов тока. При глубине трещины 1,4 мм механизм ее развития на образцах, сваренных без наложения импульсов, характерен для спонтанного разрушения (рис. 6, а), а с наложением – трещина растет медленнее при достаточном уровне сопротивления материала ее развитию (рис. 6, б). Таким образом, способность материала сопротивляться дальнейшему росту трещины возрастает при сварке с наложением импульсов. Увеличение долговечности при одном и том же уровне нагружения на образцах, сваренных с наложением импульсов тока, только за счет стадии роста трещины более чем в 2 раза маловероятно. Поэтому, очевидно, имеет место и увеличение стадии зарождения трещины.

Для изготовления конструкций из алюми-

ниевых сплавов при отсутствии доступа к обратной стороне стыка технологически целесообразно применять сварку на весу со свободным формированием корня шва. Как показал многолетний производственный опыт и результаты предварительных экспериментов, обычно применяемое оборудование и широко используемый процесс непрерывной сварки переменным током в аргоне не обеспечивают качественного формирования корня шва при толщине металла более 3–4 мм, так как сварочную ванну трудно удержать на весу.

Как показали результаты экспериментов, при сварке на весу переменным током непрерывно горящей дугой не удастся обеспечить стабильное проплавление на толщинах 4, 5 и 6 мм. Отмечается значительный рост ширины зоны проплавления по длине шва с образованием зоны прожогов (особенно при толщине 5

и 6 мм). На образцах толщиной 2 и 3 мм удаётся сформировать незначительно расширяющуюся зону проплавления на весу, что связано только с тем, что при большой толщине (4–6 мм) формируется сварочная ванна значительно больших размеров, чем при малой толщине изделия, и сил поверхностного натяжения не хватает для удержания ванны на весу (при применяемых источниках и режимах сварки).

Эффективность процесса дуговой сварки алюминиевых сплавов на весу можно, по-видимому, повысить путем локализации нагрева основного металла. Это достигается несколькими способами, например, путем сосредоточения во времени действия теплового источника при ограниченном темпе распространения теплоты – с помощью пульсирующего источника теплоты.

Ранее считали, что пульсирующая сварка наиболее эффективна при толщине свариваемых деталей из алюминиевых сплавов 0,5–1,8 мм и может применяться при толщине 2–2,5 мм. При этом длительность импульса выбирали в пределах от 0,1 до 0,18 с, длительность паузы 0,1–0,2 с, жесткость режима 0,9–1,2.

При пульсирующей сварке деталей малой

толщины (0,5–1,8 мм) полагали, что ток "дежурной" дуги (ток в паузе) необходим только для поддержания в ионизированном состоянии дугового промежутка и обычно не превышает 5–15 А. Каких-либо других требований к току "дежурной" дуги не выдвигали. При пульсирующей сварке деталей большой толщины малым "дежурным" током для проплавления требуется высокий ток в импульсе, что приводит к получению чрезвычайно грубой чешуйчатой поверхности шва как со стороны зоны проплавления, так и со стороны выпуклости. Отдельные чешуйки шва по высоте достигают 2–3,5 мм и более (табл. 7), что в большинстве случаев является недопустимым. При таком малом "дежурном" токе для стабильного проплавления длительность импульсов необходимо увеличивать в 2–3,5 раза по сравнению со сваркой деталей малой толщины (до 0,3–0,6 с). Жесткость режима уменьшается в 2–3 раза (до 0,3–0,5).

Такое положение, по-видимому, связано с тем, что при сварке образцов толщиной 4,5 и 6 мм требуется нагреть и расплавить большой объем металла при интенсивном теплоотводе в основной металл.

Поэтому при пульсирующей сварке дета-

Таблица 7

*Влияние способа сварки на размер чешуек на поверхности шва
при сварке алюминиевых сплавов на весу*

Толщина образцов, мм	Способ сварки	Глубина чешуек со стороны, мм	
		выпуклости	проплава
4	I	2,0	1,2
	II	1,4	1,0
	III	0,8	0,5
5	I	2,6	1,9
	II	1,7	1,5
	III	0,95	0,6
6	I	2,9	2,0
	II	1,85	1,5
	III	1,0	0,7

Примечания:

1. Способы сварки: I – непрерывная, II – пульсирующая, III – импульсная, IV – пульсирующая с импульсами.
2. Приведены средние данные по результатам испытаний пяти образцов.

Таблица 8

Рекомендуемые режимы пульсирующей сварки на весу деталей из алюминиевых сплавов

Толщина деталей, мм	Жесткость режима по длительности импульса	Длительность, с	
		импульса	паузы
1,0	1,0–1,2	0,12–0,18	0,12–0,20
2,0	0,9–1,0	0,14–0,24	0,14–0,20
3,0	0,8–1,0	0,20–0,32	0,16–0,32
4,0	0,6–0,8	0,3–0,4	0,20–0,30
5,0	0,4–0,6	0,32–0,5	0,16–0,30
6,0	0,3–0,5	0,4–0,6	0,12–0,24

лей большой толщины малым "дежурным" током для каждой последующей точки необходимо всякий раз как бы почти заново нагревать и расплавлять значительный объем металла. Следовательно, требуются большой сварочный ток в импульсе (см. табл. 7 режим I) и высокое давление дуги, что и приводит к образованию грубой чешуйчатой поверхности шва.

Таким образом, для пульсирующей сварки на весу деталей большой толщины следует изменить требования к току "дежурной" дуги. Она должна выполнять роль не только ионизатора дугового промежутка, но и поддерживать в расплавленном состоянии определенный объем металла (без сквозного проплавления). В этом случае можно значительно уменьшить сварочный ток в импульсе и получить швы с минимальной допустимой чешуйчатостью со стороны зоны проплавления выпуклости.

В табл. 7 приведены режимы II и III пульсирующей сварки с "дежурной" дугой, ток которой составляет 0,3–0,5 от тока в импульсе. Использование этих режимов (особенно III) позволяет при сварке на весу получать стабильное проплавление и швы с мелкочешуйчатой поверхностью. С учетом результатов этих экспериментов жесткость режимов пульсирующей сварки следует оценивать не только по отношению длительностей паузы и импульса, но и самое главное, по отношению тока в импульсе к току "дежурной" дуги (току в паузе). Чем боль-

ше толщина свариваемых деталей, тем меньшую жесткость по току и длительности пауз (см. табл. 7 и 8) необходимо устанавливать.

Выводы

1. Установлено влияние отдельных параметров процесса сварки с наложением на дугу кратковременных импульсов тока на качество швов. Показано, что число дефектов (оксидных пленок и пор) в швах уменьшается за счет наложения импульсов тока от 2 до 5 раз (при шабрении поверхности стыка) и от 15 до 32 раз (при травлении).

2. Переменные градиенты температур и сложный турбулентный характер движения жидкого металла сварочной ванны у межфазной границы при наложении импульсов тока вызывают дискретный рост дендритов из новых центров с постоянным изменением направления их осей, что приводит к образованию дезориентированной мелкозернистой структуры шва.

3. На рентгенограммах швов из сплавов АМг6, 1420 и 1201 при наложении импульсов тока нет ни темных, ни светлых полос, что указывает на высокую структурную однородность металла шва.

4. Наложение на дугу импульсов тока повышает показатели горячеломкости (повышение критической скорости деформации) за счет увеличения технологической прочности метал-

ла шва в температурном интервале кристаллизации и залечивания зарождающихся трещин под действием периодических гидродинамических колебаний жидкого металла ванны.

5. Механические свойства соединений, выполненных с наложением импульсов тока, выше, чем без импульсов. Число циклов до разрушения при малоцикловых испытаниях возрастает от 1,5 до 4 раз.

6. Пульсирующая сварка на весу без флюса позволяет в широких пределах регулировать тепловые процессы в зоне сварки и активно воздействовать на процесс кристаллизации, обеспечивая стабильное проплавление при сварке деталей из алюминиевых сплавов толщиной 4, 5 и 6 мм.

Список литературы

1. Петров А.В., Славин Г.А. Исследование технологических возможностей импульсной дуги // Сварочное производство. 1962. № 2. С. 1–4.
2. Славин Г.А. Формирование дезориентированной структуры металла при наложении низкочастотных возмущений на сварочную ванну // Сварочное производство. 1980. № 6. С. 3–5.
3. Славин Г.А., Трохинская Н.М., Рязанцев В.И. Оптимизация параметров режимов ручной и автоматической сварки тонколистовых алюминиевых сплавов с наложением на дугу кратковременных импульсов тока // Сварочное производство. 1986. № 1. С. 14–16.
4. Рязанцев В.И., Славин Г.А., Трохинская Н.М. Особенности кристаллизации сварочной ванны при сварке с наложением на дугу кратковременных импульсов тока // Сварочное производство. 1988. №4. С. 39–41.
5. Овчинников В.В., Лопаткин А.И. Применение автоматической аргодуговой сварки крупногабаритных конструкций из высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов на станках с ЧПУ // Сварочное производство. 1994. №10. С. 20–21.
6. Рязанцев В.И., Мацнев В.Н., Овчинников В.В., Гринин В.В. Сборка – сварка авиационных конструкций на станочных комплексах с ЧПУ // Заготовительные производства в машиностроении. 2006. №4. С. 11–16.
7. Зубриенко Г.Л., Галкин Н.П., Гапонов Д.Н. Аргодуговая сварка алюминиевых сплавов с прерывистой подачей присадочной проволоки // Сварочное производство. 1972. № 4. С. 46–47.
8. Ищенко А.Я., Покляцкий А.Г., Лозовская А.В. Влияние параметров низкочастотной модуляции разнополярного тока прямоугольной формы на структуру швов при сварке алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка. 1990. №9. С. 23–27.
9. Багелис И.А. Магнитное управление сварочной дугой // Сварочное производство. 1965. № 1. С. 17–19.
10. Покляцкий А.Г., Ищенко А.Я., Гринюк А.А. Аргодуговая сварка алюминиевых сплавов неплавящимся электродом с колебаниями дуги // Автоматическая сварка. 2002. № 2. С. 18–22.
11. Власов С.Н., Лапин Т.Е. Лысак В.И. Влияние инертного газа на форму столба дуги и степень сосредоточенности малоамперной дуги неплавящегося электрода // Сварочное производство. 2006. № 12. С. 3–6.
12. Барабохин Н.С., Шиганов Н.В., Сошко И.Ф., Иванов В.В. Газодинамическое давление открытой импульсной дуги // Сварочное производство. 1976. №2. С. 4–6.