

# ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АСИММЕТРИЧНОГО И МОДУЛИРОВАННОГО ТОКОВ НА КАЧЕСТВО СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, А. А. ГРИНЮК, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрено влияние параметров асимметричного и модулированного токов на протяженность включений оксидной пленки в швах и пористость соединений сплавов АМг6, 1420 и 1460, полученных при сварке неплавящимся электродом пульсирующей дугой. Применение асимметричного тока позволяет уменьшить в 3 раза относительную протяженность включений оксидной пленки в швах сплава АМг6 и вероятность образования протяженных нитевидных включений в швах сплавов 1420 и 1460. Эффективная дегазация расплавленного металла сварочной ванны достигается при использовании модулированного тока с частотой модуляции 5 Гц.

*Ключевые слова:* пульсирующая дуга, асимметричный ток, модулированный ток, неплавящийся электрод, алюминиевые сплавы, включения оксидной пленки, поры

При сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом в швах часто встречаются включения оксидной пленки [1–3]. Кроме того, литийсодержащие сплавы отличаются повышенной склонностью к порообразованию [4, 5].

Методы сварки, основанные на интенсификации перемешивания металла, способствуют его дегазации, измельчению оксидных включений в донной части сварочной ванны и выносу их на поверхность под непосредственное воздействие дуги [6–10]. Эффективное перемешивание расплавленного металла по всему объему сварочной ванны обеспечивается при сварке неплавящимся электродом пульсирующей дугой. При этом пульсирующее силовое воздействие дуги возникает в результате изменения амплитудных значений тока прямой и обратной полярности (асимметричный ток) или больших перепадов амплитуды в период импульса и паузы (модулированный ток) [11]. Поскольку давление дуги пропорционально квадрату амплитудного значения тока и практически мгновенно «реагирует» на его изменения, то периодическое повышение тока способствует увеличению глубины погружения дуги в расплавленный металл и его перемешиванию, обеспечивая разрушение оксидных плен и всплытие пузырьков газа [12].

Целью настоящей работы является экспериментальное определение параметров асимметричного и модулированного токов, при которых достигается наиболее эффективное разрушение оксидной пленки и удаление пузырьков газа из расплавленного металла сварочной ванны. Автоматическую однопроходную сварку неплавящимся электродом стыковых соединений осуществляли в аргоне стационарной и пульсирующей дугой асимметричным и модулированным токами от источников питания ИСВУ-315 (Россия), И-126 (Украина), MW-450 (Австрия). Проплавы швов формировались на основе из нержавеющей стали с канавкой полусферической формы. В качестве присадок при сварке лис-

тов сплава АМг6 использовали стандартную проволоку СвАМг6, для сплава 1420 — СвАМг63, а для сплава 1460 — Св1201. Свариваемые листы и присадочные материалы подвергали химическому травлению по общепринятой технологии. Для оценки влияния параметров тока на образование включений оксидной пленки в швах сплава АМг6 стыковые соединения листов толщиной 6 мм собирали с гарантированным зазором  $b = 1,2$  мм [13]. Стыки листов сплавов 1420 и 1460 толщиной 6 мм собирали без зазора, поскольку характерные для литийсодержащих сплавов протяженные нитевидные оксидные включения образуются в швах и при обычных условиях сборки. Непосредственно перед сваркой кромки свариваемых листов зачищали механическим способом с трех сторон на глубину не менее 0,1 мм. Протяженность дефектов измеряли на продольных изломах швов. Относительную протяженность включений оксидной пленки в швах  $l_{o,п}$  определяли как суммарную длину дефектов в расчете на 1 пог. м шва. Поскольку в конструкциях ответственного назначения длина отдельных дефектов ограничивается, то в каждом варианте измеряли и максимальную протяженность отдельных оксидных включений в швах  $l_{max}$ .

Для оценки пористости швов при сварке сплавов 1420 и 1460 зачищали только лицевые и боковые поверхности свариваемых кромок. С нижних поверхностный слой не снимали, чтобы исследовать поведение пузырьков газа, образующихся в нижней части сварочной ванны. Пористость сварных соединений оценивали по рентгеновским снимкам: подсчитывали количество пор различного диаметра в расчете на 100 мм шва, а затем вычисляли их общий объем, считая поры сферическими.

Проведенный анализ продольных изломов швов сплава АМг6 показал, что относительная протяженность включений зависит от амплитудных значений и времени протекания тока при прямой  $\tau_{пр}$  и обратной  $\tau_{об}$  полярностях (табл. 1). Увеличение  $\tau_{об}$  и уменьшение  $\tau_{пр}$  способствуют активизации процессов катодного разрушения оксидной пленки во время сварки и сокращению протяженности дефектов в швах. Амплитудная асимметрия сварочного тока



**Таблица 1.** Влияние параметров асимметрии разнополярного тока прямоугольной формы на относительную протяженность включений оксидной пленки в швах сплава АМг6

$I_{пр}, А$	$I_{об}, А$	$\tau_{пр}, мс$	$\tau_{об}, мс$	$f, Гц$	$l_{оп}, мм/пог.м$	$l_{max}, мм$		
290	290	4,6	4,6	109	78	9		
		8,0	8,0	63	86	10		
		10,4	10,4	48	102	12		
		8,0	12,8	48	73	9		
		4,6	8,0	79	65	9		
		6,1	12,8	53	64	8		
		4,6	10,4	67	59	8		
		440	220	4,6	4,6	109	58	7
				8,0	8,0	63	67	9
				10,4	10,4	48	79	9
8,0	12,8			48	47	6		
4,6	8,0			79	40	6		
6,1	12,8			53	38	5		
300*	300	4,6	10,4	67	31	5		
		10,0	10,0	50	125	21		

\* Сварка стационарной дугой.

вызывает интенсивные колебания расплавленного металла при изменении полярности за счет резких перепадов давления дуги. В период прохождения тока прямой полярности силовое воздействие дуги обеспечивает увеличение крутизны фронта проплавления и глубины погружения дуги в кратер сварочной ванны. В результате этого происходит дробление оксидной пленки в донной части, а ее отдельные неразрушенные частицы выносятся потоками расплавленного металла на поверхность и попадают под непосредственное воздействие дуги. Поэтому применение асимметричного тока с  $I_{пр} = 2I_{об}$  и  $2\tau_{пр} = \tau_{об}$  позволяет уменьшить в 3 раза протяженность включений оксидной пленки шва и в 3...4 раза максимальную длину отдельных дефектов в швах сплава АМг6.

**Таблица 3.** Влияние параметров модуляции разнополярного тока прямоугольной формы на относительную протяженность включений оксидной пленки в швах сплава АМг6

$I_{пр}, А$	$I_{об}, А$	$\tau_{пр}, мс$	$\tau_{об}, мс$	$\frac{\tau_{пр}}{\tau_{пр} + \tau_{об}}, \%$	$f, Гц$	$l_{оп}, мм/пог.м$	$l_{max}, мм$
445	135	62,5	62,5	50	8	126	20
365	110	87,5	37,5	70	8	116	18
445	135	125,0	125,0	50	4	119	16
365	110	175,0	75,0	70	4	103	12
340	100	200,0	50,0	80	4	85	8
445	135	250,0	250,0	50	2	137	9
365	110	350,0	150,0	70	2	107	8
340	100	400,0	100,0	80	2	82	7
445	135	500,0	500,0	50	1	194	11
365	110	700,0	300,0	70	1	95	8
340	100	800,0	200,0	80	1	90	8

Кроме того, применение тока с преобладанием  $\tau_{об}$  улучшает катодную очистку поступающей в сварочную ванну присадочной проволоки. А поскольку именно недостаточное разрушение оксидной пленки на поверхности присадки является одной из основных причин образования протяженных нитевидных оксидных включений в швах при сварке неплавящимся электродом литийсодержащих алюминиевых сплавов, то интенсивная катодная очистка присадочной проволоки способствует повышению качества швов. Так, при сварке пульсирующей дугой асимметричным током ( $I_{пр} = 2I_{об}$ ;  $2\tau_{пр} = \tau_{об}$ ) по сравнению со сваркой обычным синусоидальным током вероятность получения бездефектных швов сплавов 1420 и 1460 повышается в 3 раза.

Использование асимметричного по амплитуде тока улучшает условия дегазации расплавленного металла за счет его колебаний, возникающих вследствие резких изменений силового воздействия дуги при смене полярности. В результате в сварных соединениях литийсодержащих сплавов 1420 и 1460

**Таблица 2.** Пористость сварных соединений сплава 1420, полученных при сварке симметричным и асимметричным током

$I_{пр}, А$	$I_{об}, А$	$\tau_{пр}, мс$	$\tau_{об}, мс$	Количество пор на 100 мм шва, шт., диаметром, мм			Суммарное количество пор, шт.	Объем пор на 100 мм шва, мм <sup>3</sup>	Месторасположение пор
				0,1...0,3	0,4...0,6	0,7...1,0			
<i>Симметричный ток</i>									
260	260	10,4	10,4	255	38	27	320	12,2	Шов и зона сплавления
<i>Асимметричный по амплитуде</i>									
360	180	10,4	10,4	212	26	19	257	8,7	Зона сплавления
170	340	10,4	10,4	219	19	15	253	7,0	»
<i>Асимметричный по длительности</i>									
260	260	11,4	6,0	221	29	21	271	9,6	Шов и зона сплавления
250	250	7,0	14,0	208	17	18	243	7,8	»

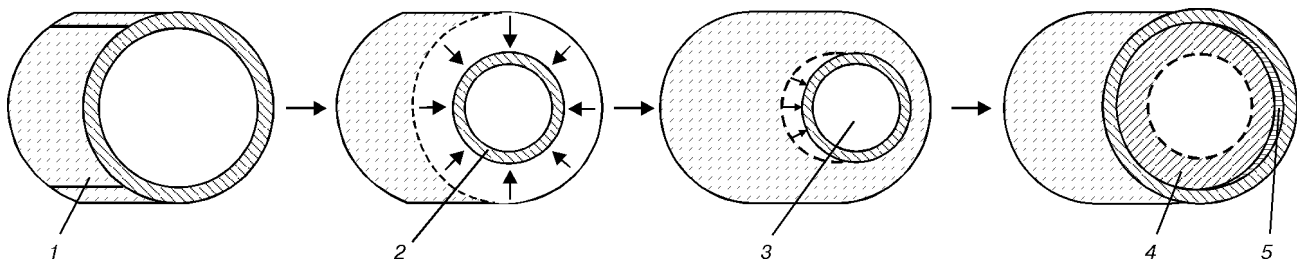


Рис. 1. Схема катодного разрушения оксидной пленки при сварке модулированным током: 1 — окисленная поверхность переплавленного металла шва; 2 — зона катодной очистки; 3 — поверхность расплавленного металла шва; 4, 5 — окисленная поверхность, расплавляемая в момент воздействия импульса (4 — шов; 5 — стык впереди сварочной ванны)

Таблица 4. Пористость сварных соединений сплава 1420, полученных при сварке модулированным током

$f_m$ , Гц	$\tau_{п} / (\tau_{п} + \tau_{и})$ , %	$I_{п}$ , А	$I_{и}$ , А	Количество пор на 100 мм шва, шт., диаметром, мм			Суммарное количество пор, шт.	Объем пор на 100 мм <sup>3</sup> шва, мм <sup>3</sup>	Месторасположение пор
				0,1...0,3	0,4...0,6	0,7...1,0			
1	50	400	120	268	46	36	350	15,7	Шов и зона сплавления
	80	305	90	255	52	38	345	16,7	
2	50	400	120	241	35	29	305	12,6	»
	80	305	90	231	30	24	285	10,6	
5	50	400	120	206	9	0	215	1,5	Зона сплавления
	80	305	90	215	5	0	220	1,3	
10	50	400	120	215	27	8	250	5,2	»
	80	305	90	206	29	5	240	4,4	

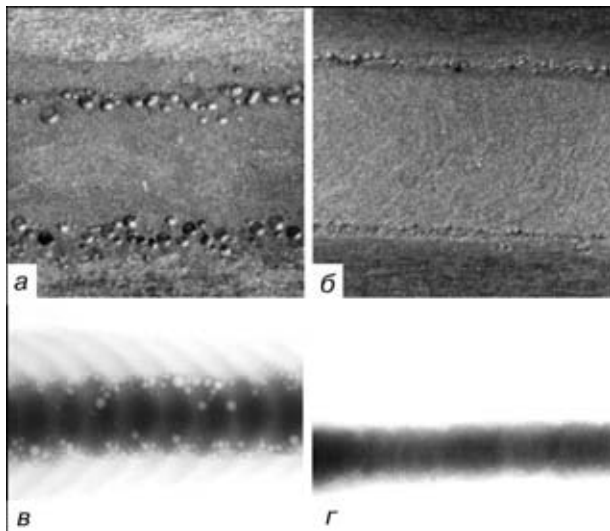


Рис. 2. Макрошлифы корня шва со снятым проплавом (а, б, X2) и рентгенограммы швов сплава 1420 (в, д); сварка пульсирующей дугой с  $f_m = 1$  (а, в) и 5 (б, д) Гц

поры остаются только в зонах сплавления швов с основным металлом. При этом по сравнению с симметричным током объем пустот снижается на 60...70 % (табл. 2).

Интенсифицировать колебания расплавленного металла и его перемешивание по всему объему сва-

рочной ванны удается при сварке пульсирующей дугой модулированным током. При частоте модуляции  $f_m = 1...4$  Гц вследствие резких колебаний жидкого металла происходит механическое разрушение протяженных включений оксидной пленки, что приводит к уменьшению  $I_{max}$ . При этом относительная протяженность оксидной пленки в швах  $l_{o,п}$  существенно зависит от соотношения длительности импульсов  $\tau_{и}$  и пауз  $\tau_{п}$  сварочного тока (табл. 3). Это обусловлено различными условиями окисления расплавленного металла и катодного разрушения им оксидной пленки в моменты импульсов и пауз сварочного тока. Во время паузы эффективность катодной очистки существенно снижается вследствие уменьшения уровня тока, а процесс окисления металла, расплавленного предыдущим импульсом тока, активизируется. Поэтому следующий импульс тока с низкой частотой модуляции и большой длительностью паузы не обеспечивает полного катодного разрушения образовавшейся оксидной пленки (рис. 1). Увеличение  $\tau_{и}$  и уменьшение  $\tau_{п}$  модулированного тока при одной и той же частоте модуляции способствуют улучшению катодной очистки и снижению интенсивности окисления расплавленного дугой металла. Относительная протяженность включений оксидной пленки в швах сплава АМг6, полученных при сварке модулированным током с

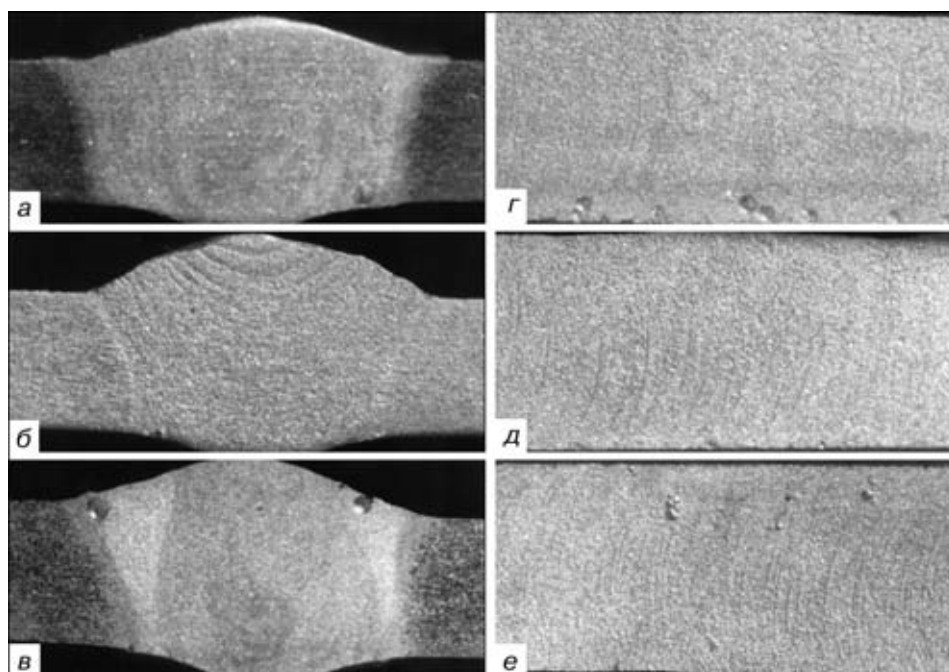


Рис. 3. Поры на поперечных (а-в, X3) и продольных (г-е, X4), выполненных по зоне сплавления (з-е, X4), макрошлифах сварных соединений сплава 1420; сварка стационарной (а, г) и пульсирующей дугой с  $f_m = 5$  (б, д) и 10 (в, е) Гц (уменьш. 2/3)



$f_m = 1 \dots 4$  Гц и длительности импульсов тока, равной 70...80 % длительности цикла, на 20...25 % меньше, чем при сварке симметричным синусоидальным током. При  $f_m > 4$  Гц эффективность динамического воздействия дуги на расплавленный металл снижается.

Частота модуляции тока существенно влияет и на процессы дегазации расплавляемого дугой металла (табл. 4). При значительной длительности импульсов и пауз модулированного тока ( $f_m = 1 \dots 2$  Гц) в корневой части швов и зонах его сплавления с основным металлом наблюдается большое количество пор диаметром до 1 мм — их суммарный объем составляет 10,6...16,7 мм<sup>3</sup> (см. рис. 2, а, в). Повышение частоты модуляции до 5 Гц создает благоприятные условия для интенсивного всплытия пузырьков газа на поверхность сварочной ванны. В результате в металле шва поры полностью отсутствуют, а в зоне сплавления их диаметр не превышает 0,3 мм при суммарном объеме пустот 1,2...1,5 мм<sup>3</sup> (рис. 2, б, г).

При дальнейшем повышении частоты модуляции количество и диаметр пор в зоне сплавления увеличиваются. Пытающиеся всплыть пузырьки газа не успевают достигнуть поверхности сварочной ванны и остаются в кристаллизующемся металле (рис. 3).

## Выводы

1. При сварке неплавящимся электродом пульсирующей дугой алюминиевых сплавов по сравнению со стационарной дугой сокращается протяженность оксидной пленки в швах и пористость сварных соединений.

2. Применение асимметричного тока (с  $I_{пр} = 2I_{об}$  и  $2\tau_{пр} = \tau_{об}$ ) способствует интенсификации перемешивания расплавленного металла и активизации процессов катодного разрушения оксидной пленки. Это позволяет в 3 раза уменьшить относительную протяженность включений оксидной пленки в швах сплава АМг6 и вероятность образования протяженных нитевидных включений в швах литийсодержащих сплавов 1420 и 1460.

3. Резкие изменения силового воздействия дуги во время импульсов и пауз модулированного тока

The effect of parameters of the asymmetrical and modulated currents on the length of oxide film inclusions in the welds and porosity of the joints in alloys АМg6, 1420 and 1460 produced by pulsed-arc TIG welding is considered. The use of the asymmetrical current allows a decrease of 3 times in the relative length of the oxide film inclusions in the АМg6 alloy welds and reduces the probability of formation of whisker inclusions in the welds. Efficient degassing of the molten pool metal is achieved in the case of using the modulated current with a modulation frequency of 5 Hz.

с  $f_m = 5$  Гц обеспечивают также наиболее благоприятные условия для удаления газовых пузырьков из расплава сварочной ванны. При этом по сравнению со сваркой стационарной дугой обычным синусоидальным током суммарный объем пустот в сварных соединениях сплавов 1420 и 1460 (лист толщиной 6 мм) уменьшается в 7...10 раз.

1. Моисеенко И. Г., Столбов В. И., Турченко М. А. Окисные включения при сварке сплава АМг6 // Свароч. пр-во. — 1968. — № 5. — С. 23–24.
2. Моисеенко И. Г., Лукашин Н. В. К вопросу о повышении герметичности сварных емкостей из сплава АМг6 // Там же. — 1969. — № 8. — С. 31–32.
3. Влияние окисных включений на прочность сварных соединений сосудов давления из сплава АМг6 // В. Ф. Лукьянов, В. Н. Фомин, В. П. Моисеенко и др. // Там же. — 1970. — № 6. — С. 24.
4. Особенности сварки плавлением высокопрочного алюминиевого сплава 01420 / А. Я. Ищенко, А. Г. Чаюн, В. М. Белецкий и др. // Автомат. сварка. — 1977. — № 3. — С. 38–41.
5. Технологические особенности сварки высокопрочного алюминиевого сплава 1460 / Н. С. Барабохин, Ю. Г. Бушуев, Е. В. Шульгина и др. // Свароч. пр-во. — 1999. — № 11. — С. 12–14.
6. Щиряева Н. В., Овчинников В. В., Габидуллин Р. М. Образование пор при сварке сплава системы алюминий — магний — литий // Автомат. сварка. — 1987. — № 3. — С. 16–18.
7. Оботуров В. И., Толкачев Ю. Н. Некоторые особенности образования и разрушения оксидных плен при аргонодуговой сварке алюминиевых сплавов // Свароч. пр-во. — 1973. — № 11. — С. 22–24.
8. Склонность легких сплавов к образованию оксидных включений при сварке / В. Н. Сушков, Ю. Н. Качков, О. М. Новиков и др. // Там же. — 1975. — № 5. — С. 23–24.
9. Чаюн А. Г., Сыроватка В. В., Матяш В. И. Дуговая сварка алюминиевого сплава 01420 с применением ЭМП // Автомат. сварка. — 1981. — № 6. — С. 19–21.
10. Ищенко А. Я., Чаюн А. Г., Илюшенко Р. В. Свариваемость и технология дуговой сварки сплава системы алюминий — магний — литий // Там же. — 1985. — № 10. — С. 47–49.
11. Предотвращение образования включений оксидной пленки в швах при сварке алюминиевых сплавов пульсирующей дугой / А. Г. Покляцкий, А. Я. Ищенко, А. С. Бессонов и др. // Там же. — 1991. — № 7. — С. 43–47.
12. Maruo H., Hirata Yo., Makino H. Rectangular wave AC TIG arc welding of aluminum alloy // Quarterly J. of JWS. — 1989. — 7, № 1. — С. 63–69.
13. Ищенко А. Я., Покляцкий А. Г., Яворская М. Р. Предотвращение включений оксидной пленки в швах при аргонодуговой сварке алюминиевых сплавов // Автомат. сварка. — 1989. — № 6. — С. 38–41.

Поступила в редакцию 29.05.2000,  
в окончательном варианте 13.07.2000