



ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В. Д. ШЕЛЯГИН, В. Ю. ХАСКИН, В. С. МАШИН, кандидаты техн. наук, **М. П. ПАШУЛЯ, А. В. БЕРНАЦКИЙ, А. В. СИОРА**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрено влияние интенсивности испарения элементов основного металла и электродной проволоки, а также состава защитной газовой среды на прохождение лазерного излучения к свариваемому металлу при гибридной сварке алюминиевых сплавов. Исследованы технологические особенности гибридной лазерно-дуговой сварки плавящимся электродом, выбраны режимы, проведено сравнение полученных результатов со сваркой импульсной дугой плавящегося электрода.

Ключевые слова: лазерно-дуговая сварка, алюминиевые сплавы, импульсная дуга, плавящийся электрод, гибридный процесс, стыковые соединения, параметры режима, характерные дефекты, механические свойства

Алюминиевые сплавы применяют для сварных конструкций автомобильного и железнодорожного транспорта, судов различного назначения, авиационной и космической техники, корпусов приборов и т. д. Основной проблемой изготовления таких конструкций чаще всего является получение качественных сварных соединений, при выполнении которых используют присадочные или электродные проволоки, а также отбортовку кромок. Толщина стенок соединяемых деталей преимущественно составляет от десятых долей миллиметра до 1...3 мм (реже 4...8 мм) [1]. Одним из важных моментов при выборе того или иного алюминиевого сплава для изготовления элементов указанных выше конструкций является максимально возможное снижение общей массы изделий при сохранении их механических характеристик. Этот подход приводит к необходимости применения сплавов с различными системами легирования. Так, в современных ответственных конструкциях переходят от сплавов систем легирования Al-Mg-Mn (сплав АМг6) и Al-Cu-Mg (сплав Д16) к сплавам, например, системы Al-Mg-Li (сплав 1420), имеющим высокие механические характеристики при низкой их плотности и повышенном модуле упругости [2].

Для изготовления конструкций с указанным диапазоном толщин стенок отдельных элементов, кроме дуговых и плазменных (микроплазменных) способов сварки, можно использовать лазерную сварку (ЛС) [3]. На практике этот способ не получил широкого применения, в первую очередь, из-за высокой стоимости технологических лазеров. Однако использование лазерно-дуговой свар-

ки позволяет снизить примерно на 50 % себестоимость погонного метра сварного шва за счет частичной замены лазерной мощности дуговой и повысить на 50 % производительность процесса [4]. Такой процесс должен позволить сохранить большинство преимуществ ЛС и сделать его более привлекательным для потребителя.

Перед проведением экспериментальных исследований проанализированы публикации, посвященные гибридной лазерно-дуговой сварке алюминиевых сплавов с целью уточнения параметров режима сварки. В работе [5] рассмотрены технологические особенности сварки алюминия и его сплавов излучением CO₂-лазера мощностью $P = 0,6$ кВт совместно с дугой неплавящегося вольфрамового электрода. Так, сплав 5052 толщиной $\delta = 3,2$ мм предложено сваривать со скоростью $v_{св} = 30,5$ м/ч при токе $I_{св} = 70$ А в защитной среде гелия [5]. Соотношение лазерной мощности к дуговой составляло примерно 1:3. В связи с малой мощностью лазерного излучения формирование шва имело типичный для дуговой сварки характер. При соотношении лазерной и дуговой мощностей приблизительно 1:1 формирование швов имело кинжальный вид, который приближался к характерному для ЛС [6, 7]. Так, при повышении мощности лазерного излучения от 0,1 до 1,5 кВт (длина дуги 10 мм) для получения надежного проплавления скорость увеличивалась от 0,5 до 2,0 м/мин. При этом отношение глубины проплавления к ширине шва изменялось от 0,5 до 2,0, а погонная энергия от 3,2 до 0,5 кДж/см.

В работе [8] отмечается, что в отличие от ЛС, при которой зазор между стыкуемыми элементами не должен превышать 10 % толщины металла, при гибридной сварке этот параметр может составлять 25...30 %. В работе [9] рассматривалась гибридная сварка алюминиевых сплавов излуче-

нием CO₂- и Nd:YAG-лазеров в диапазоне мощностей от 0,4 до 6,0 кВт. По критерию снижения склонности к трещинообразованию был подобран режим гибридной сварки алюминиевого сплава серии 6000 ($\delta = 2$ мм), превосходящий по скорости ЛС на 40 %. В обзорной работе немецких ученых [10] отдельно рассмотрены технологические возможности комбинированной лазерно-дуговой сварки (при которой дуга и лазерный пучок воздействуют на изделие на определенном расстоянии один от другого) и гибридной сварки (оба источника тепла воздействуют на изделие в пределах общей сварочной ванны). Особое внимание авторы уделяют сварке алюминиевых сплавов гибридом лазерного излучения с дугой плавящегося электрода и даже рассматривают двухдуговой гибридный способ. В обзорной работе [11] для сварки алюминиевых сплавов (5052 и 6008) рекомендуемый диапазон варьирования расстояния между сфокусированным излучением Nd:YAG-лазера и дугой плавящегося электрода составлял 0...10 мм (лучше 4...10 мм). При этом ток дуги изменяли в пределах $I_{св} = 60...240$ А, мощность непрерывного излучения лазера $P = 1,5...3,5$ кВт.

Проанализировав литературные данные, можно заключить, что для гибридной сварки алюминиевых сплавов толщиной $\delta = 4...6$ мм целесообразно использовать лазерное излучение с длиной волны 1,06 мкм в диапазоне мощностей $P = 2...5$ кВт и дугу плавящегося электрода. При этом соотношение мощностей лазерного излучения и дуги должно лежать в пределах от 1/1 до 1/1,5.

Целью данного исследования являлась отработка техники и технологических режимов сварки алюминиевых сплавов АМг6, 1420 и Д16 гибридным способом с использованием излучения Nd:YAG-лазера и импульсной дуги плавящегося электрода (ИДПЭ), а также изучение технологических особенностей такой гибридной лазерно-дуговой сварки.

Для достижения поставленной цели был проведен ряд экспериментов согласно схеме, приведенной в работе [12] (рис. 1). Как показано в работе [13], эта схема полностью пригодна для сварки алюминиевых сплавов. В качестве источника лазерного излучения использовали Nd:YAG-лазер модели DY 044 (фирмы «Rofin Synar», Германия) с мощностью излучения до $P = 4,4$ кВт. Импульсную дугу плавящегося электрода питали от установки «Fronius TPS-2700» (фирмы «Fronius», Австрия), обеспечивающей сварочный ток до $I_{св} = 270$ А.

Гибридную головку размещали на манипуляторе, перемещавшем ее относительно неподвижного образца, зажатого в сварочном приспособ-

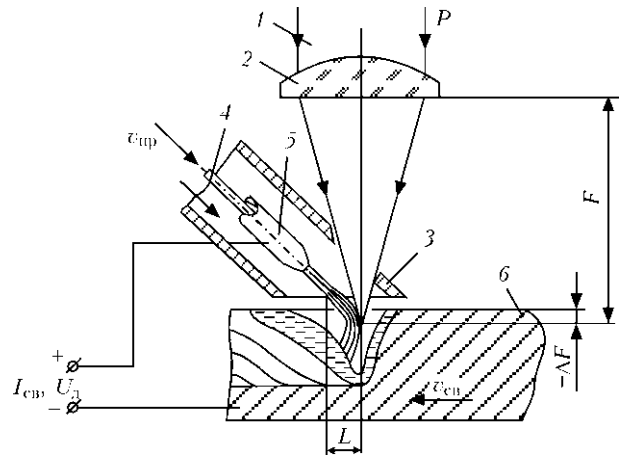


Рис. 1. Схема проведения экспериментов по гибридной лазерно-дуговой сварке алюминиевых сплавов: 1 — лазерное излучение мощностью P ; 2 — фокусирующий объектив с фокусным расстоянием F ; 3 — защитное сопло; 4 — присадочная проволока; 5 — медный токоподводящий муфштук; 6 — образец; ΔF — заглабление горловины каустика излучения относительно поверхности образца; L — расстояние между концом плавящегося электрода и осью лазерного излучения

лении. Образцы размером $300 \times 100 \times \delta$ мм сваривали встык. Использовали сплавы АМг6 ($\delta = 6$ мм), Д16 ($\delta = 5$ мм) и 1420 ($\delta = 4$ мм) (ГОСТ 4784–74), а также проволоки СВАМг6 и СВАК5 диаметром 1,2 мм (ГОСТ 7871–75). Перед проведением экспериментов были определены механические свойства свариваемых металлов (табл. 1). Испытания на растяжение образцов проводили на машине УМЭ-10ТМ. Сварку проводили на съемной подкладке из нержавеющей стали с канавкой глубиной 2 мм в аргоне (ГОСТ 10157–79) или гелии марки Б (ТУ 51-940–80), подаваемых соответственно с расходом 20 и 30 л/мин. Сварку вели «углом вперед». При этом угол наклона оси лазерного излучения относительно нормали к образцу составлял 9° , а угол наклона дуговой горелки — 55° . Скорость сварки изменяли в пределах $v_{св} = 30...60$ м/ч. В момент завершения каждого эксперимента по гибридной сварке при остановке сварочной головки сначала выключали ИДПЭ, а через 1...2 с лазерное излучение, что позволяло точно определить положение сфокусированного лазерного излучения относительно зоны действия ИДПЭ. Наибольшая глубина проплавления соответствовала расстоянию 2...4 мм. Кроме того, исследовали взаимное влияние мощ-

Т а б л и ц а 1. Механические свойства свариваемых алюминиевых сплавов

Сплав	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,01}$, МПа	δ_5 , %
Д16	458...462	318...348	235...265	14,6...16,2
	460	330	257	15,4
1420	465...477	236...252	—	9,1...10,1
	470	244	—	9,5



ности лазерного излучения и скорости подачи электродной проволоки (сварочного тока) на электрические параметры процесса ИДПЭ.

Для исследований по подбору режимов гибридной сварки сплавов АМгб, Д16 и 1420 приняли следующую методику. Критерием оптимизации режима служило стабильное формирование корня шва при минимальной мощности обоих источников нагрева и максимальной скорости сварки $v_{св}$. При этом сочетание мощностей лазерного и дугового источников выбирали близким к рекомендованному в литературе соотношению 1:1. Выбор режима проводили путем выполнения наплавов образцов и их сварки. Геометрические параметры швов определяли по поперечным макрошлифам с точностью $\pm 0,1$ мм. Измеряли ширину швов B , высоту их выпуклости H , ширину b и высоту h корня шва при полном проплавлении металла (табл. 2), глубину швов (в случае непол-

ного проплавления металла) и площадь сечения швов S в различных их зонах. Оценивали также количество и диаметр пор и пустот в швах. Макроструктуру швов выявляли путем химического травления шлифов в растворе, состоявшем из трех кислот — $72 \text{ см}^3 \text{ HCl} + 24 \text{ см}^3 \text{ HNO}_3 + 4 \text{ см}^3 \text{ HF}$. Для определения прочностных характеристик сварных соединений использовали образцы с выпуклостью швов и удаленным корнем.

В ходе проведения экспериментов установлено, что через 5...10 с после начала гибридной сварки начиналось интенсивное поглощение лазерного излучения образующимся над сварочной ванной плазменным факелом. Это приводило к падению глубины проплавления. По нашему мнению, это связано с интенсивным выделением сварочных аэрозолей, образующихся над ванной расплава под действием дуги плавящегося электрода [14]. Исследования, проведенные в ИЭС им.

Таблица 2. Влияние режимов сварки ИДПЭ и гибридной ИДПЭ+ЛС алюминиевого сплава АМгб в аргоне на геометрические параметры швов

№ образца	$v_{св}$, м/ч	$I_{св}$, А	$U_{д}$, В	$v_{пр}$, м/ч	P^* , кВт	B , мм	H , мм	b , мм	h , мм
1	30	126	20,0	8,3	—	9,0	3,0	—	—
2-1	30	113	21,9	8,3	2	9,5	2,7	—	—
2-2	30	119	20,6	8,3	2	10,0	3,0	—	—
3	30	121	20,1	8,3	3	—	—	—	—
4	30	120	20,0	8,3	4	9,0	2,5	5,0	2,0
15	30	119	19,0	7,5	—	8,0	2,8	—	—
14	30	111	20,5	7,5	4	14,0	2,5	2,5	1,0
16	30	130	20,5	8,3	—	8,8	2,7	—	—
18	30	122	21,0	8,3	4	14,2	1,5	5,5	1,4
17	30	145	21,5	9,3	—	9,0	3,3	—	—
19	30	138	21,5	9,3	4	16,0	2,0	4,0	1,3
20	45	131	19,6	8,3	—	6,2	2,7	—	—
12	45	123	21,1	8,3	4	11,0	2,3	—	—
22	45	150	21,3	9,3	—	8,5	2,2	—	—
11	45	142	21,1	9,3	4	12,0	2,0	3,0	1,2
23	45	164	21,9	10,1	—	9,0	2,3	—	—
21	45	156	22,6	10,1	4	13,0	2,0	—	—
25	60	150	21,0	9,3	—	7,0	2,2	—	—
6	60	140	21,7	9,3	4	10,0	2,2	—	—
27	60	177	22,0	10,9	—	8,0	2,5	—	—
9	60	162	22,4	10,9	4	11,0	1,5	—	—
26	60	198	22,3	12,2	—	8,5	2,2	—	—
24	60	194	23,0	12,2	4	12,0	2,0	—	—
7	60	126	20,5	8,3	4	9,0	2,0	—	—
8	60	157	22,0	10,1	4	10,0	2,0	—	—
10	60	182	23,7	11,6	4	12,0	1,7	—	—

* Непрерывное излучение с длиной волны 1,06 мкм.

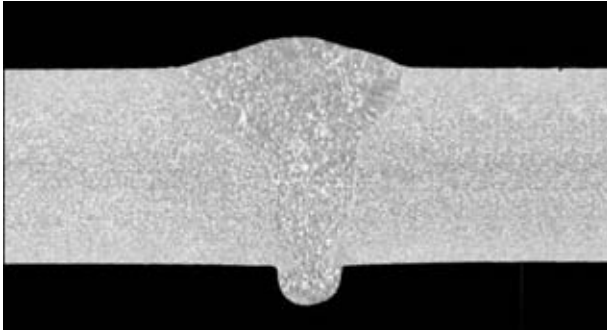


Рис. 2. Макрошлиф соединения сплава АМг6, полученного гибридным процессом сварки в среде гелия: $v_{св} = 60$ м/ч; $P = 3$ кВт; $I_{св} \approx 74$ А; $U_{д} = 17$ В

Е. О. Патона, показали [15], что с увеличением тока при сварке плавящимся электродом в инертных газах средняя температура капле электродного металла повышается, достигая температуры кипения алюминиевого сплава, из которого изготовлена электродная проволока. При неизменном сварочном токе повышение диаметра проволоки приводит к снижению средней температуры капле электродного металла. С повышением содержания гелия в гелий-аргоновых смесях температура капле также снижается, достигая наименьших значений при сварке в чистом гелии [15]. Это, в свою очередь, приводит к снижению испарения магния в каплях, повышению его содержания в шве и улучшению механических свойств соединений. При гибридной сварке ИД-ПЭ+ЛС наблюдалось свечение лазерного излучения над сварочной ванной около зоны действия ИДПЭ, свидетельствующее о возросшем поглощении излучения. С повышением скорости плавления проволоки (сварочного тока) увеличивается количество капле электродного металла и объем продуктов испарения из них и основного металла [14]. Это повышает плотность газовой среды, способствует поглощению лазерного излучения и соответственно снижению глубины проплавления.

Как показано в работе [16], при ЛС в гелии и в аргоне процесс испарения металла сварочной ванны различный. При испарении в гелии в результате более интенсивной боковой разгрузки парового факела плотность паров металла на пути лазерного излучения оказывается существенно меньше, чем при испарении в аргоне. Это позволяет объяснить наблюдаемый эффект достижения стабильного глубокого проплавления при использовании гелия или гелийсодержащих смесей.

В связи с предположением относительно изменения характера разлета паров металла, образующихся над сварочной ванной в том или ином защитном газе, было предложено использовать вместо непрерывного излучения импульсное. Ожидалось, что в случае защиты аргоном на протяжении паузы произойдет необходимый для устранения экранирования лазерного излучения раз-

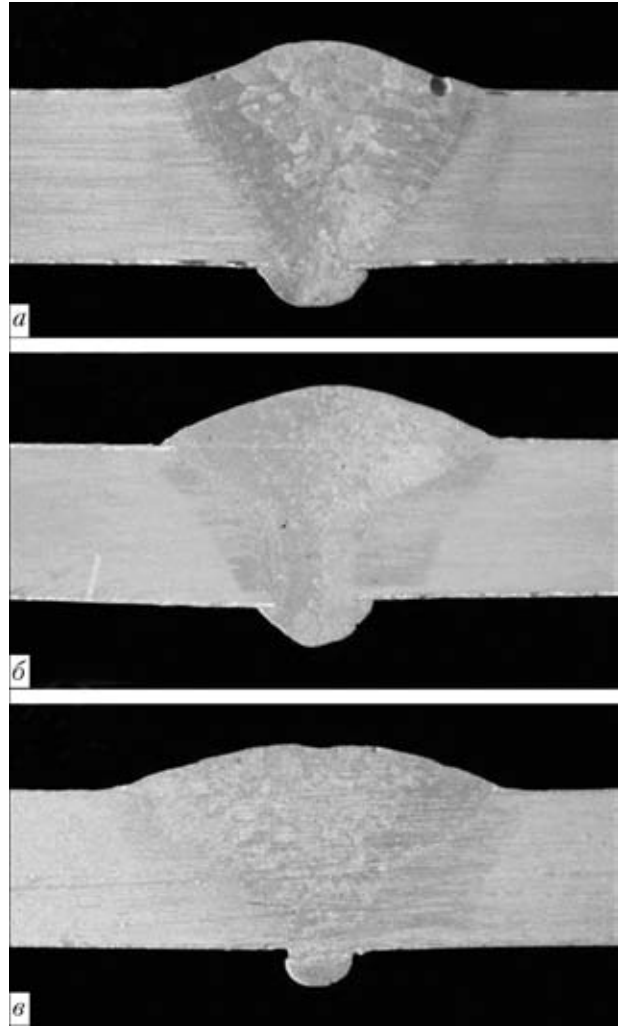


Рис. 3. Макрошлифы стыковых соединений сплава Д16, полученных гибридной сваркой с импульсным лазерным излучением в среде аргона проволокой СвАМг6 ($P_{ср} = 3$ кВт, $P_{пик} = 4$ кВт, $Q_{имп} = 3$, $f = 250$ Гц, $v_{св} = 60$ м/ч): а — $I_{св} \approx 185$ А, $U_{д} \approx 21,5$ В, $v_{пр} = 11,6$ м/мин; б — $I_{св} \approx 200$ А, $U_{д} \approx 21,5$ В, $v_{пр} = 12,4$ м/мин; в — $I_{св} \approx 210$ А, $U_{д} \approx 21,5$ В, $v_{пр} = 13,0$ м/мин

лет паров свариваемого металла. Соотношение длительности импульса и паузы излучения выбирали по критерию отсутствия характерного снижения глубины проплавления при гибридном процессе. Выбранное соотношение составило 3:1, т. е. скважность импульса $Q_{имп} = 3$ при частоте следования импульсов $f = 250$ Гц. Такой импульсный режим излучения позволил проводить гибридную сварку в защите аргона. Возможно, выбранное соотношение не является оптимальным, а частота следования импульсов лазерного излучения должна определенным образом соответствовать частоте импульсов дуги плавящегося электрода. Этот момент, очевидно, требует дальнейших исследований.

Пример влияния режимов сварки сплава АМг6 на форму швов приведен в табл. 3, из которой видно, что в диапазоне скоростей сварки $v_{св} = 30 \dots 45$ м/ч и подачи электродной проволоки



Таблица 3. Форма швов в зависимости от скорости сварки и скорости подачи электродной проволоки СвАМг6 при сварке ИДПЭ и гибридной ИДПЭ+ЛС сплава АМг6

Режим сварки		ИДПЭ*	ИДПЭ+ЛС* ($P = 4 \text{ кВт}$)
$v_{\text{св}}$, м/ч	$v_{\text{пр}}$, м/мин		
30	7,5		
	8,3		
45	8,3		
	9,3		
60	10,9		
	12,2		

* Номера шлифов соответствуют номерам образцов из табл. 2.

$v_{\text{пр}} = 7,5 \dots 9,3$ м/мин ИДПЭ не удается полностью от ИДПЭ+ЛС. Оптимальные режимы гибридного проплавить образец из сплава АМг6, в отличие процесса ИДПЭ+ЛС в защите аргона наблюда-

ются при $v_{св} = 30$ м/ч, $P = 4$ кВт, $I_{св} \approx 120$ А и при $v_{св} = 45$ м/ч, $P = 4$ кВт, $I_{св} \approx 140$ А. При использовании гелия появляется возможность повышения скорости сварки до 60 м/ч при одновременном снижении мощности излучения и тока ИДПЭ (рис. 2). Результаты гибридной сварки сплава Д16 в защите аргона с использованием импульсного лазерного излучения с пиковой мощностью $P_{пик} = 4$ кВт и средней мощностью $P_{ср} = 3$ кВт показаны на рис. 3. Наилучший режим такого вида сварки имеет место при $I_{св} = 200$ А, $U_{д} = 21,5$ В, $v_{пр} = 12,4$ м/мин. Использование импульсного излучения привело к необходимости повышения мощности ИДПЭ, однако при этом форма провара, размер ЗТВ и величина зерна остались на уровне, характерном для гибридной сварки непрерывным излучением (см. табл. 3). При одной и той же скорости подачи проволоки ($v_{св} = 30$ м/ч) гибридный процесс ИДПЭ+ЛС по сравнению с ИДПЭ позволяет повысить в 1,6...1,9 раза ширину швов и снизить в 1,1...1,6 раза высоту их выпуклости H . Такие зависимости наблюдаются и при больших скоростях сварки, но при меньших абсолютных значениях геометрических параметров швов. Характерным недостатком гибридной сварки является порообразование в швах. При сварке рассмотренных сплавов это явление наиболее четко проявляется на сплаве 1420 (рис. 4). По всей вероятности это связано с интенсивным испарением лития и магния из основного металла под действием лазерного излучения.

Установлено, что независимо от скорости подачи проволоки (от 7,5 до 13,2 м/мин) лазерное излучение мощностью 4 кВт повышает на 1...2 В напряжение на дуге (наблюдаемую длину дуги) и уменьшает на 10...15 А сварочный ток. С повышением мощности лазерного излучения от 1 до 4 кВт и неизменной подаче электродной проволоки наблюдается обратная зависимость — увеличивается сварочный ток и уменьшается напряжение на дуге (табл. 2, 4). Это связано, в первую очередь, с повышением ионизации дуговой области лазерным излучением и соответственно изменением вольт-амперных характеристик дуги.

Еще одним важным параметром, характеризующим сварочный процесс, является погонная энергия, которая была определена для дуговой и гибридной сварки сплава АМг6. При этом КПД дуговой сварки в аргоне приняли за 0,72, а в гелии — за 0,88 [17]. КПД лазерной составляющей гибридного процесса приняли за единицу, так как сварку вели с глубоким проплавлением. Проведенные расчеты позволили построить зависимости влияния погонной энергии на ширину швов, их общую высоту (глубину проплавления δ и высоту корня шва h), а также площадь сечения

Таблица 4. Режимы гибридной сварки стыковых соединений алюминиевых сплавов ($v_{св} = 60$ м/ч)

Сплав (проволока)	$I_{св}$, А	$U_{д}$, В	$v_{пр}$, м/мин	P , кВт
Д16 (СвАМг6)	185...190	21,5...21,6	11,6	4,0
Д16 (СвАК5)	190...200	22,5...23,0	10,3	4,0
1420 (СвАМг6)	48...50	13,8	3,1	2,0

переплавленного металла (рис. 5). Установлено, что при одинаковой погонной энергии гибридная сварка по сравнению с ИДПЭ позволяет повысить глубину проплавления металла, а также снизить ширину швов и площадь их сечения.

Анализ результатов механических испытаний высокопрочных алюминиевых сплавов показал (табл. 5), что соединения сплава Д16, полученные проволокой СвАК5, имеют более высокие прочностные характеристики, чем соединения, сваренные проволокой СвАМг6. Во всех случаях разрушения образцов сплава Д16 начинаются с зоны сплавления корня шва с основным металлом и переходят в шов. Соединения сплава 1420 как

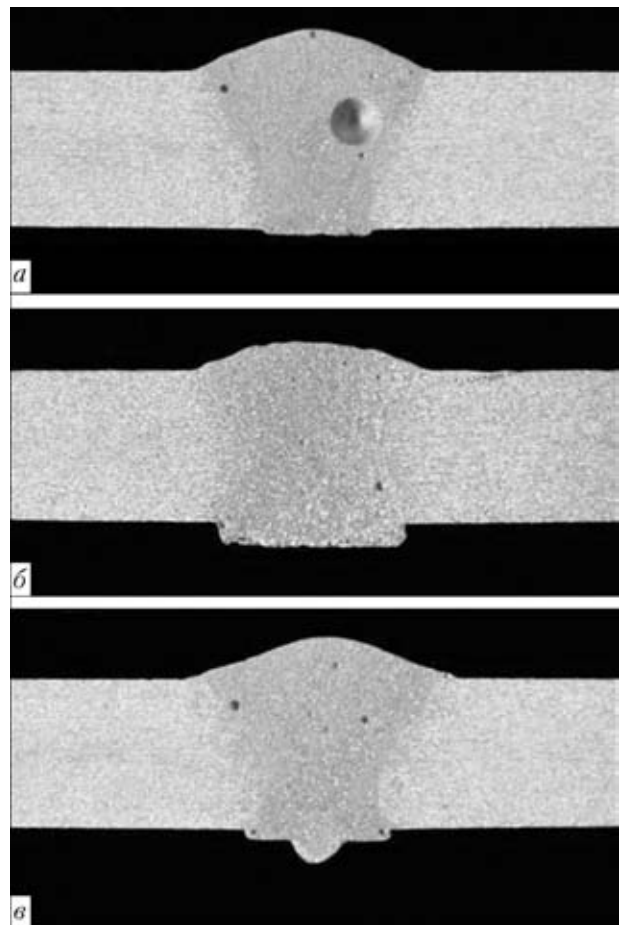


Рис. 4. Влияние параметров режима ИДПЭ ($v_{св} = 60$ м/ч) при гибридной сварке (непрерывное излучение, $P = 2$ кВт) в аргоне на геометрические параметры швов сплава 1420: а — $I_{св} = 40$ А, $U_{д} = 12,3$ В, $v_{пр} = 2,3$ м/мин; б — $I_{св} = 42$ А, $U_{д} = 12,5$ В, $v_{пр} = 2,7$ м/мин; в — $I_{св} = 51$ А, $U_{д} = 14,3$ В, $v_{пр} = 3,1$ м/мин

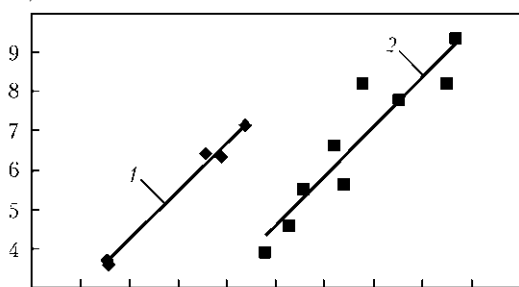


Таблица 5. Механические свойства соединений алюминиевых сплавов, полученных гибридной сваркой

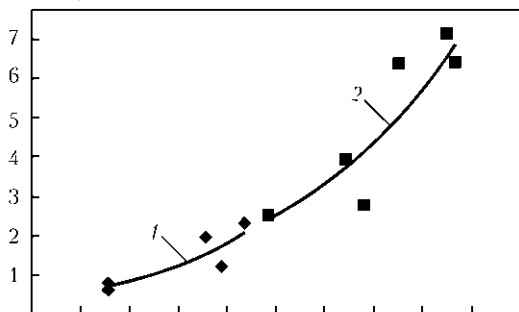
Сплав (проволока)	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,01}$, МПа	$\sigma_B^{c.c}/\sigma_B^{o.M}$	$\sigma_{0,2}^{c.c}/\sigma_{0,2}^{o.M}$
Д16* (СВАМг6)	$\frac{290...324}{304}$	$\frac{229...238}{234}$	$\frac{101...161}{139}$	0,66	0,71
Д16** (СВАМг6)	$\frac{291...300}{294}$	$\frac{211...218}{216}$	$\frac{96...122}{111}$	0,64	0,65
Д16* (СВАК5)	$\frac{311...326}{319}$	$\frac{236...245}{240}$	$\frac{126...155}{139}$	0,69	0,77
Д16** (СВАК5)	$\frac{286...306}{293}$	$\frac{200...228}{217}$	$\frac{93...134}{117}$	0,64	0,66
1420* (СВАМг6)	$\frac{293...318}{302}$	$\frac{179...184}{181}$	$\frac{86...96}{92}$	0,64	0,74
1420** (СВАМг6)	$\frac{275...308}{294}$	$\frac{167...180}{173}$	$\frac{91...120}{106}$	0,63	0,71

* В образцах удалено усиление корня шва. ** В образцах удалены верхнее усиление и усиление корня шва.

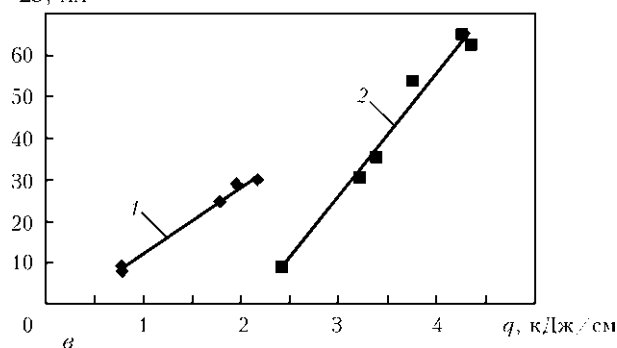
В, мм



а

 $\delta_{o.M} + h$, мм

б

 ΣS , мм²

в

Рис. 5. Влияние погонной энергии q процессов ИДПЭ (1) и ИДПЭ+ЛС (2) сплава АМг6 при использовании непрерывного излучения мощностью $P = 4$ кВт на ширину швов B (а), глубину проплавления $\delta_{o.M} + h$ (б), площадь сечения швов ΣS (в)

с верхним усилением, так и без него разрушаются по центру шва. Коэффициенты прочности соединений сплавов Д16 и 1420, полученные гибридной лазерно-дуговой сваркой плавящимся электродом, составляют $\sigma_B^{c.c}/\sigma_B^{o.M} = 0,63...0,69$, а коэффициенты текучести соединений — $\sigma_{0,2}^{c.c}/\sigma_{0,2}^{o.M} = 0,65...0,77$. Удаление усилений верхней части и корня шва приводит к некоторому снижению прочностных характеристик соединений.

Выводы

1. При гибридной лазерно-дуговой сварке плавящимся электродом (ИДПЭ+ЛС) алюминиевых сплавов интенсивность испарения отдельных элементов из основного металла и электродной проволоки, а также состав защитной газовой среды существенно влияют на прохождение лазерного излучения к свариваемому металлу. Использование аргона и высоких сварочных токов приводит к экранированию излучения и, как следствие, к значительному уменьшению глубины проплавления. Для устранения этого эффекта целесообразно применять для защиты сварочной ванны смеси аргона с гелием или чистый гелий, а также использовать импульсную модуляцию лазерного излучения.

2. В диапазоне скоростей 30...60 м/ч гибридная сварка по сравнению с ИДПЭ позволяет повысить в 1,8...2,6 раза скорость сварки металла толщиной 6 мм, снизить в 1,3...1,6 раза тепловложение в свариваемый металл и значительно уменьшить деформации соединений толщиной 4 мм. Исследование характера формирования сварных швов позволяет заключить, что при гибридной сварке металла толщиной 6 мм и более с использованием лазерного излучения мощностью 1...4 кВт ведущую роль играет способ ИДПЭ.

3. Устранить такие характерные дефекты при гибридной сварке алюминиевых сплавов систем легирования Al-Mg-Mn, Al-Cu-Mg и Al-Mg-Li, как пористость и свищи, можно путем улучшения защиты сварочной ванны, а также тщательного подбора и оптимизации режимов сварки.

4. Такие механические характеристики сварных соединений, как прочность и текучесть, для гибридного лазерно-дугового процесса несколько превышают уровень аналогичных значений, получаемых при использовании ИДПЭ. С учетом повышения производительности это свидетельствует о целесообразности замены процесса ИДПЭ процессом ИДПЭ+ЛС.

1. Рабкин Д. М. *Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов*. — Киев: Наук. думка, 1986. — 256 с.
2. Шахов С. В. *Технологические и металлургические особенности лазерной сварки современных авиационных алюминиевых сплавов*: Дис. ... канд. техн. наук. — М., 2007. — 223 с.
3. *Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением* / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
4. Irving B. *Automotive engineers plunge into tomorrow's joining problems* // *Welding J.* — 1994. — 73, № 11. — P. 47–50.
5. Diebold T. P., Albright C. E. «Laser-GTA» welding of aluminum alloy 5052 // *Ibid.* — 1984. — 63, № 6. — P. 18–24.
6. Wendelstorf J., Decker I., Wohlfahrt H. *Laser-enhanced gas tungsten arc welding (laser-TIG)* // *Welding in the World.* — 1994. — 34. — P. 395–396.
7. Moeniralam Z., Luijendijk T. *Wisselwerking tussen laserlassen en booglassen* // *Lastechniek.* — 1996. — 62, № 7–8. — P. 3–6.

The paper deals with the influence of the intensity of evaporation of base metal and electrode wire elements, as well as shielding gas atmosphere composition on laser radiation propagation to the metal being welded in hybrid welding of aluminium alloys. Technological features of hybrid consumable electrode laser-arc welding were studied, modes were selected and the obtained results were compared with consumable electrode pulsed arc welding.

8. Walduck R. P., Biffin J. *Plasma arc augmented laser welding* // *Welding and Metal Fabric.* — 1994. — 62, № 4. — P. 172–176.
9. Blundell N. J. *Arc takes laser welding into new territory* // *Materials World.* — 1998. — № 9. — P. 537–538.
10. Diltthey U., Wieschemann A. *Prospects by combining and coupling laser beam and arc welding processes* // *Rivista Italiana della Saldatura.* — 2000. — 52, № 6. — P. 749–759.
11. Катаяма С. *Развитие гибридной лазерно-дуговой сварки* // *Welding Technology (яп.).* — 2008. — 56, № 2. — P. 51–58.
12. *Гибридная сварка излучением CO₂-лазера и дугой плавящегося электрода в углекислом газе* / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, В. П. Гаращук и др. // *Автомат. сварка.* — 2002. — № 10. — С. 38–41.
13. *Гибридная лазерно-дуговая сварка углеродистых сталей и алюминиевых сплавов* / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, Т. Н. Набока и др. // *Доп. НАН України.* — 2005. — № 7. — С. 97–102.
14. Левченко О. Г., Машин В. С. *Санитарно-гигиенические характеристики процесса сварки плавящимся электродом в инертных газах алюминиевого сплава АМГ6* // *Автомат. сварка.* — 2003. — № 1. — С. 48–50.
15. *Средняя температура металла электродных капель при сварке алюминиевых сплавов в инертных газах* / А. Я. Ищенко, В. С. Машин, И. В. Довбищенко и др. // *Там же.* — 1994. — № 1. — С. 48–49.
16. Сухоруков С. Б., Кривцун И. В., Сидорец В. Н. *Математическое моделирование газодинамики, тепло- и массообмена в потоке металлического пара при лазерной сварке с глубоким проплавлением* // Четвертая международ. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», 27–30 мая 2008 г. — Казивели, Крым. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2009. — С. 155–164.
17. Ищенко А. Я., Машин В. С., Будник В. П. *О пористости швов при сварке алюминиевых сплавов плавящимся электродом в инертных газах* // *Автомат. сварка.* — 1995. — № 1. — С. 16–18, 22.

Поступила в редакцию 07.04.2009

ВЫШЕЛ ИЗ ПЕЧАТИ И РАССЫЛАЕТСЯ СПЕЦИАЛИСТАМ

Українсько-російський, російсько-український словник із зварювання (CD-ROM). — К.: Довіра, 2008.

В рамках проекта «Словники України» Інститутом електросварки ім. Е.О. Патона совместно с Украинским языково-информационным фондом НАН Украины к 90-летию Национальной академии наук Украины издан «Українсько-російський, російсько-український словник із зварювання» в электронном формате (CD-ROM).

Словарь, имея нормативный характер, содержит более 6,5 тыс. терминов и терминосочетаний, которые отражают основную терминологию по сварочным и родственным технологиям, актуализированную с действующими международными и национальными стандартами по сварке.

Словарь предназначен для инженерно-технических работников, студентов и переводчиков технической литературы.

*Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины вышет **БЕСПЛАТНО** «Словарь...» при условии направления заявки с точным указанием Ваших почтовых реквизитов на адрес:*

**Киев-150, ул. Боженко, 1, ИЭС им. Е.О. Патона, отдел № 41
тел.: 287-62-68, факс: 287-74-57
E-mail: bernadsky@paton.kiev.ua**