

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ, МИКРОПЛАЗМЕННОЙ И ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНО-МИКРОПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В. Д. ШЕЛЯГИН¹, А. М. ОРИШИЧ², В. Ю. ХАСКИН¹, А. Г. МАЛИКОВ², А. А. ЧАЙКА¹

¹ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

² Ин-т теорет. и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения РАН. 630090. г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1. E-mail: admin@itam.nse.ru

Показана актуальность применения лазерного, микроплазменного и гибридного лазерно-микроплазменного способов сварки алюминиевых сплавов. Выбраны технологические схемы проведения лазерной и лазерно-микроплазменной сварки. Для технологических особенностей трех рассматриваемых способов получения стыковых и торцевых тонколистовых соединений проведены соответствующие эксперименты. Установлено, что при микроплазменной сварке существуют следующие основные недостатки: в случае полного провара наблюдается провисание шва, на сварочных токах более 30 А наблюдается склонность к образованию подреза, при повышении скорости более 40 м/ч снижается стабильность процесса. Для гибридной лазерно-микроплазменной сварки характерно: стабильность процесса на высоких (свыше 60 м/ч) скоростях сварки, уменьшение (в 1,5...2,0 раза по сравнению с микроплазменной сваркой) ширины швов, значительное снижение (до полного устранения) остаточных деформаций, отсутствие разбрызгивания. Установлено, что к характерным дефектам лазерной и лазерно-микроплазменной сварки алюминиевых сплавов относятся провисания швов, сваренных без подкладки, образование подрезов и внутренних пор диаметром 0,1...0,2 мм. Основными путями устранения этих дефектов можно считать следующие: подача присадочных материалов (например, в виде проволоки), использование стальных подложек (в том числе с канавками для формирования нижнего валика), сварка по отбортовке (торцевыми швами); применение режимов сварки с модуляцией мощности источников; сварка внахлест (требует тщательной подготовки поверхностей). Оптимальными значениями погонной энергии при сварке излучением CO₂-лазера, по критериям качества формирования соединений, отсутствию пор и трещин, являются 36...70 Дж/мм. Снижение погонной энергии приводит к исчезновению парогазового канала и непровару металла, а увеличение – к образованию горячих трещин. Приведены характерные макро- и микроструктура металла швов и зоны термического влияния соединений, полученных микроплазменной, гибридной и лазерной сваркой. Библиогр. 7, рис. 11.

Ключевые слова: сварка, алюминиевые сплавы, лазерное излучение, микроплазма, гибридная лазерно-микроплазменная сварка, типы соединений, эксперименты, режимы, структуры

Алюминиевые сплавы широко применяются в современной промышленности для изготовления облегченных конструкций. Основной особенностью их сварки является необходимость устранения оксидной пленки Al₂O₃, образующейся на поверхности при взаимодействии с кислородом воздуха. Обычно подготовку поверхностей этих сплавов к сварке осуществляют механическим способом. Микроплазменная сварка разнополярными импульсами предоставляет возможность катодной очистки свариваемых поверхностей [1]. Соединение процессов лазерной и микроплазменной сварки позволяет не только обеспечить очистку поверхностей, но и способствует образованию гибридного лазерно-плазменного разряда, который дает возможность значительно повысить производительность сварки, а также качество сварных соединений [2]. Однако это не означает снижения актуальности лазерной сварки. Согласно данным ряда исследователей [3], правильный выбор режима лазерной сварки позволяет получать качествен-

ные соединения при минимальном перегреве основного металла.

В литературе [3, 4] описаны результаты апробации различных технологических схем лазерной и лазерно-микроплазменной сварки. Обычно лазерную сварку алюминиевых сплавов проводят с качественной газовой защитой верхней и нижней сторон шва (рис. 1). Одной из наиболее перспективных для соединения тонколистовых алюминиевых сплавов можно считать схему, показанную на рис. 2 [4]. В исследованиях, проведенных с применением этой схемы, изучались особенности формирования соединений в диапазоне погонных энергий 40...200 Дж/мм. Однако интерес также представляет сварка тонкостенных изделий в диапазоне энергий 10...30 Дж/мм. Исследованиям получения качественных соединений в этом диапазоне и посвящен один из аспектов данной работы. Другим важным моментом является определение оптимальных погонных энергий лазерной сварки аналогичных изделий. При этом в качестве критериев оптимизации целесообразно

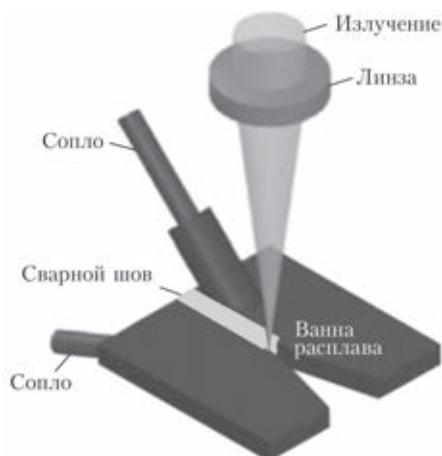


Рис. 1. Технологическая схема лазерной сварки алюминиевых сплавов

рассматривать качество формирования соединений, отсутствие дефектов в виде пор и трещин, а также минимизацию ЗТВ.

Поэтому целью работы являлось изучение технологических особенностей лазерной, микроплазменной и гибридной лазерно-микроплазменной сварки тонкостенных изделий из алюминиевых сплавов для получения качественных неразъемных конструкций, применяемых в авиа- и ракетостроении. Критериями качества сварных соединений было выбрано такое формирование швов, при котором отсутствовали подрезы, непровары, внутренние поры, свищи, а также формировались наиболее мелкодисперсные структуры металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ).

Исследование сварки тонколистовых алюминиевых сплавов излучением CO_2 -лазера с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм выполнялось в Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения РАН. Для получения сварных соединений использовали созданный в ИТПМ СО РАН автоматизированный лазерный технологический комплекс (АЛТК) «Сибирь 1», включающий непрерывный CO_2 -лазер мощностью до 8 кВт с параметром качества пучка $K = 0,7$ [5], технологический стол портального типа и компьютерную систему управления АЛТК

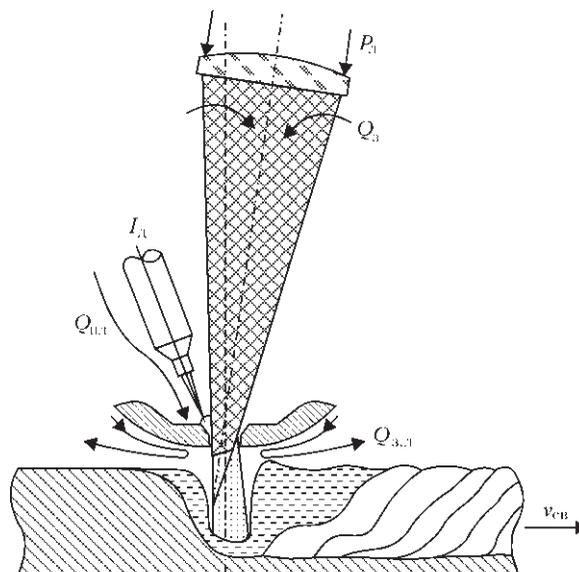


Рис. 2. Схема процесса гибридной сварки, осуществляемого при помощи интегрированного плазмотрона прямого действия: P_l – мощность лазерного излучения, кВт; I_d – сварочный ток, А; $Q_{3,л}$ – расход газа, защищающего фокусирующую линзу, л/мин; $Q_{пл}$ – расход плазмообразующего газа, л/мин; $Q_з$ – расход защитного газа, л/мин; $v_{св}$ – скорость сварки, м/ч

(рис. 3). Лазерное излучение фокусировалось на поверхности металла с помощью ZnSe-линзы с фокусным расстоянием 254 мм. Согласно схеме рис. 1, соосно с лазерным пучком подавалась струя инертного газа гелия. Для защиты формируемого сварного шва использовали защитное сопло, из которого подавался тот же газ. Корень шва защищали аргоном. В процессе проведения экспериментов над неподвижной заготовкой перемещали сварочную головку. В ходе исследований определяли оптимальные энергетические параметры лазерной сварки сплава АМг5.

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины был изготовлен комплекс лазерно-микроплазменной сварки с гибридным плазмотроном, показанный на рис. 4, позволяющий реализовать выбранную технологическую схему сварки (рис. 2). К отличительным особенностям этого плазмотрона относится расположение осей вольфрамового электрода и сфокусированного излучения под ми-



Рис. 3. Внешний вид АЛТК «Сибирь 1» (а) и лабораторного стенда (б) для лазерной сварки

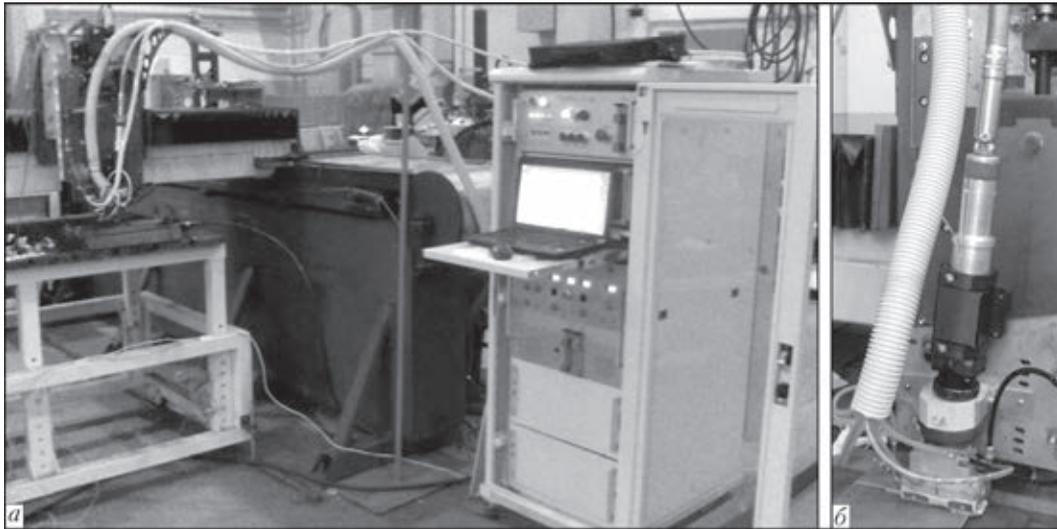


Рис. 4. Внешний вид комплекса лазерно-микроплазменной сварки (а) и гибридного плазмотрона (б)

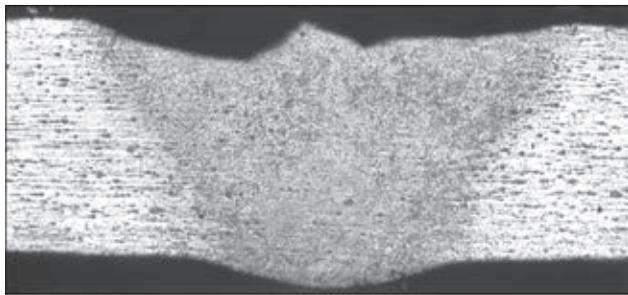


Рис. 5. Макроструктура ($\times 25$) поперечного сечения стыкового сварного соединения сплава АМг6 ($\delta = 1,4$ мм), выполненного плазменным способом со скоростью сварки 30 м/ч

нимальными углами к вертикали. Для фокусирования излучения волоконного лазера модели YLR-400-AC (фирмы IPG, Германия) ($\lambda = 1,07$ мкм, мощность до 400 Вт) использовали линзу с фокусным расстоянием 200 мм, предохраняемую от попадания сварочных аэрозолей газом (аргоном) и защитным стеклом. Расход защищающего линзу аргона составлял $Q_{зл} = 3 \dots 6$ л/мин. Дуговую плазму создавали при помощи вольфрамового электрода диаметром 1,6 мм, медного плазмообразующего сопла с отверстием диаметром 1,5 мм. В качестве плазмообразующего и защитного газа использовали аргон с расходами $Q_{пл} = 0,1 \dots 0,3$ л/мин, $Q_{заш} = 6 \dots 9$ л/мин. Применяемый в экспериментах сварочный ток прямой полярности не превышал 40 А при напряжении дуги до 22 В.

Питание гибридного плазмотрона осуществлялось от источника питания типа МПУ-50, рассчитанного на непрерывные и импульсные сварочные токи до 50 А. Лазерное излучение вводилось в плазмотрон при помощи коллиматора. Плазмотрон крепился на каретку трехкоординатного манипулятора, на рабочем столе которого располагали сварочную струбцину для фиксации образцов.

Материалом свариваемых образцов послужили сплавы АМг2 ($\delta = 1$ и 2,5 мм), АМг4 ($\delta = 1$ мм), АМг5 ($\delta = 1,5$ мм) и АМг6 ($\delta = 1,4$ мм). Размер образцов $(100 \dots 300) \times (10 \dots 50) \times \delta$ мм. Сварку вели

без подкладки. Лазерную сварку стыковых швов выполняли как излучением CO_2 -лазера, так и волоконного лазера. В случае CO_2 -лазера мощности излучения хватило, чтобы получить стабильный провар. При сварке волоконным лазером из-за большого отражения мощности непрерывного излучения 400 Вт оказалось недостаточно для получения провара глубиной более 0,1...0,3 мм.

В экспериментах по микроплазменной и гибридной сварке стыковых и торцевых соединений ток прямой полярности $I_{пр}$ устанавливали в пределах 10...40 А, обратной $I_{обр} - 6 \dots 15$ А, длительность импульсов прямой полярности $\tau_{пр}$ составляла 20 и 30 мс, обратной $\tau_{обр} - 10$ мс.

Эксперименты по микроплазменной сварке разнополярными импульсами позволили устранить следующие основные недостатки (рис. 5): в случае полного провара наблюдается провисание шва; на более высоких токах прямой полярности (свыше 30 А) наблюдается склонность к образованию подреза; при повышении скорости ($v \geq 40$ м/ч) снижается стабильность процесса.

Эксперименты по гибридной лазерно-микроплазменной сварке показали следующие основные преимущества: повысилась стабильность процесса на высоких (свыше 60 м/ч) скоростях сварки, уменьшилась в 1,5...2,0 раза ширина швов, значительно снизились остаточные деформации, отсутствовало разбрызгивание. Также была установлена такая особенность гибридной сварки, как склонность к образованию подрезов при формировании стыковых соединений на токах прямой полярности свыше 30 А (рис. 6).

Исследование путей устранения характерных дефектов лазерно-микроплазменной сварки алюминиевых сплавов показало, что основными из них можно считать следующие: подачу присадочного материала; сварку по отбортовке (или торцевыми швами) (рис. 7); сварку внахлест.

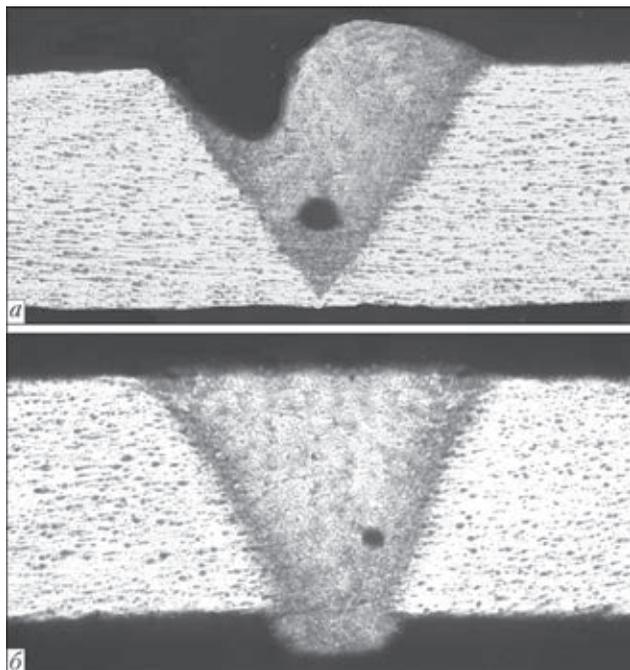


Рис. 6. Макроструктура ($\times 25$) поперечных сечений провара (а) и стыкового соединения (б), выполненных гибридным способом в сплаве АМг6 ($\delta=1,4$ мм) со скоростью сварки 150 м/ч

Для проведения металлографических исследований из сваренных образцов в поперечном сечении швов вырезали темплеты, которые затем зажимали в алюминиевые струбцины, шлифовали и полировали (применяли электрополировку). Выявление микроструктуры проводили травлением в растворе из 10 см³ плавиковой кислоты, 15 см³ соляной кислоты и 30 см³ воды. Полученные образцы изучали при помощи оптического микроскопа “Neophot-30” при увеличениях от 25 до 500.

Сначала были изучены панорамные виды швов, выполненных в сплавах АМг6 ($\delta = 1,4$ мм) (рис. 5–7). На рис. 5 приведена макроструктура поперечного сечения сварного соединения, полученного плазменным способом на режиме $I_{пр} = 30$ А, $I_{обр} = 10$ А, $\tau_{пр} = 20$ мс, $\tau_{обр} = 10$ мс, напряжение дуги $U = 19$ В, $\nu = 30$ м/ч. Несмотря на небольшое провисание сварного шва в целом он имеет структуру, характерную для микроплазменной сварки. Его макроструктура мелкокристаллическая, плотная, без видимых дефектов. Ширина шва в верхней части составляет примерно 2,7 мм, в нижней 0,7 мм. Размер ЗТВ достаточно невелик и составляет порядка 0,27 мм.

Далее изучали провар (рис. 6, а) и стыковой шов (рис. 6, б), выполненные гибридным способом. В обоих случаях режим сварки был одинаковым: $I_{пр} = 30$ А, $I_{обр} = 10$ А, $\tau_{пр} = 20$ мс, $\tau_{обр} = 10$ мс, $U = 21,5$ В, $\nu = 150$ м/ч, $P_{л} = 400$ Вт, фокус на поверхности образца. Отличие глубины провара листа сплава АМг6 от сварки стыкового соединения связано с наличием зазора между свариваемыми кромками. Характерными дефектами являлись



Рис. 7. Макроструктура ($\times 25$) поперечного сечения качественно торцевого соединения сплава АМг6 ($\delta = 1,4$ мм), выполненного гибридным способом со скоростью сварки 168 м/ч

подрез с одной из сторон шва и образование внутренней поры диаметром 0,1...0,2 мм. Устранение этих дефектов связано с уменьшением давления дуги и плазмообразующего газа.

Торцевые соединения сплава АМг6 ($\delta = 1,4$ мм) выполняли гибридным (рис. 7) и лазерным (рис. 8) способами. Режим гибридной сварки: $I_{пр} = 12$ А, $I_{обр} = 7$ А, $\tau_{пр} = 30$ мс, $\tau_{обр} = 10$ мс, $U = 16$ В, $\nu = 168$ м/ч, $Q_{пл} = 0,1$ л/мин, $Q_{защ} = 9$ л/мин, $Q_{з.л} = 3...6$ л/мин, $P_{л} = 400$ Вт, фокус на поверхности образца. В случае лазерной сварки шов глубиной порядка 0,35 мм образовывался при скорости 110 м/ч и максимальной мощности излучения (400 Вт).

Размер ширины шва и ЗТВ при гибридной сварке с увеличением скорости уменьшился и составил: для стыкового соединения (рис. 6, б) ширина верхней части шва 1,9 мм, ширина нижней части шва 0,46 мм, ширина ЗТВ 0,08 мм; для торцевого соединения (рис. 7, б) ширина верхней части шва 1,14 мм, ширина нижней части шва 0,39 мм, ширина ЗТВ порядка 0,05 мм.

Более детально на рис. 8 показана микроструктура металла швов, полученных в случаях микроплазменной, гибридной и лазерной сварки. Отдельно рассмотрена микроструктура гибридной сварки стыкового и торцевого соединений. Исследование микроструктуры во всех полученных сварных соединениях указывает на наличие в сварных швах дендритного строения литого металла, который к периферии становится несколько более грубым. Металл шва имеет довольно мелкозернистое строение (величина зерна около 50 мкм). При оценке дисперсности структуры металла швов исследуемых соединений, наряду с объемной долей структурных составляющих, толщиной избыточных включений и их удельной поверхностью основной характеристикой дисперсности структуры является дендритный параметр. Из сравнения микроструктур видно, что наиболее

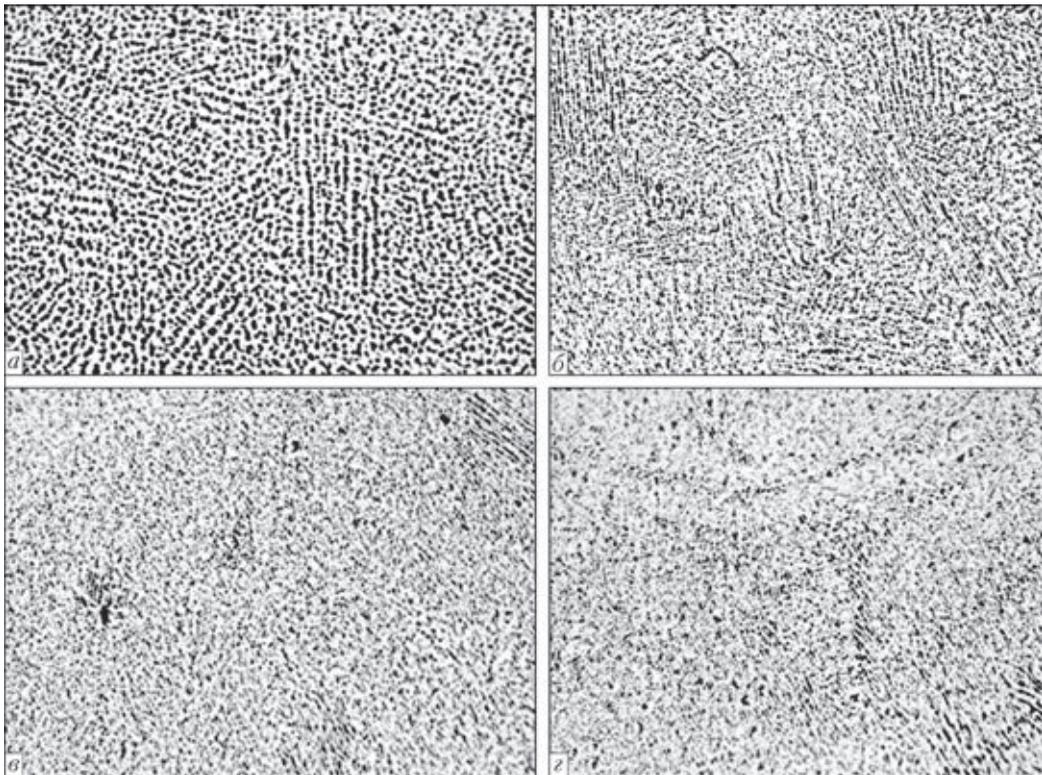


Рис. 8. Микроструктура ($\times 500$) металла швов, полученных плазменным (а), гибридным в стыковом соединении (б), гибридным в торцевом соединении (в) и лазерным (г) способами

крупнодисперсная структура наблюдается при плазменной сварке, а наиболее мелкодисперсная в случае лазерной. Дендритный параметр составляет около 4 мкм для плазменной сварки и уменьшается примерно в три раза для лазерной сварки. При гибридной сварке более мелкодисперсная структура наблюдается для случая торцевого соединения. По нашему мнению, это связано с повышением скорости сварки, ставшим возможным из-за улучшения поглощения лазерного излучения в отбортовке.

Исследование влияния технологических параметров сварки излучением CO_2 -лазера на особенности формирования стыковых соединений алюминиевого сплава АМг5 ($\delta = 1,5$ мм) проводили согласно схеме рис. 1. Для этого перед сваркой оксидную пленку с поверхности образцов удаляли с помощью раствора МР-35, разработанного в НИИХимПром (РФ). Для сравнения получаемых результатов использовали стыковую сварку и проход лазерным пучком по металлу.

При сварке алюминиевых сплавов возможно образование пор, источником которых является водород, хорошо растворяющийся в алюминии при температуре плавления. Сплавы системы Al-Mg характеризуются повышенной склонностью к пористости при сварке, так как магний увеличивает растворимость водорода в алюминии [6]. Согласно статистике одним из основных дефектов (примерно 48 % брака) сварных конструкций из алюминиевых и магниевых сплавов является га-

зовая пористость. Поэтому в ходе данной работы была оценена пористость сварных швов. В результате визуально-оптического исследования установлено следующее.

При лазерной сварке на всех режимах наблюдается «чешуйчатость» (рис. 9, а). Это связано с нестационарными процессами в сварочной ванне и прерывистостью ее кристаллизации. Поры, кратеры в сварном шве и капли металла, образовавшиеся во время сварки, являются дефектами сварных соединений. В начальный момент сварки наблюдаются многочисленные поры, что связано с перегревом металла при наборе скорости технологическим столом. С увеличением скорости процесса наблюдается непровар, обусловленный снижением энергии, вкладываемой в единицу объема расплавляемого металла.

Для исследования структуры сварных швов изготавливали по два макрошлифа из каждого образца. В качестве травящего реактива использовался реактив Келлера [7]. Во всех случаях были обнаружены рассеянные поры малых диаметров (до 0,2 мм) (рис. 10, 11). Для образцов, сваренных встык излучением CO_2 -лазера со скоростью 420 м/ч, характерно провисание сварного шва, превышающее 10 % толщины металла (рис. 10, а). При этом на проплавленных цельных образцах наблюдаются подрезы (рис. 10, б). При оптимальных параметрах процесса наблюдается небольшая пористость сварного соединения (поры диаметром 0,1...0,2 мм), которую принято считать допу-

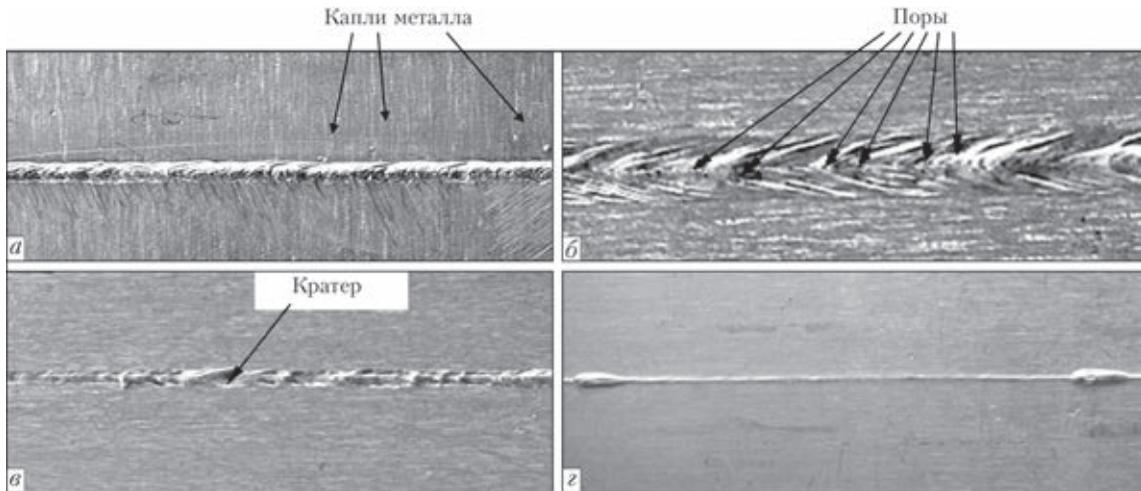


Рис. 9. Внешний вид и характерные дефекты сварных соединений ($\times 3$): а-в — лицевая сторона; г — обратная

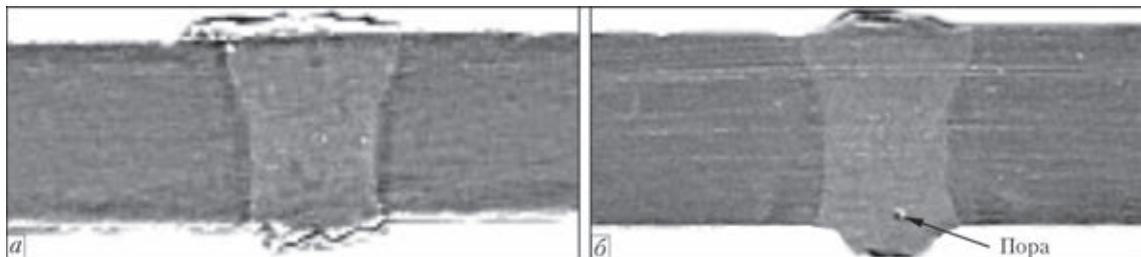


Рис. 10. Макроструктура ($\times 20$) сварных соединений сплава Амг5 ($\delta = 1,5$ мм), полученных при скорости сварки 360 м/ч

стимой. Стоит заметить, что в основном металле также наблюдается небольшая пористость.

В заключение следует отметить, что для получения качественных стыковых соединений из тонколистовых алюминиевых сплавов как в случае лазерной, так и в случае гибридной лазерно-микроплазменной сварки необходимо вкладывать погонную энергию порядка 20 Дж/мм на один миллиметр глубины провара в диапазоне скоростей 100...300 м/ч. При сварке торцевых соединений этот показатель может снижаться до 15 Дж/мм и меньше. При этом использование микроплазменной составляющей в гибридном процессе позволяет за счет теплового механизма повышения поглощающей способности основного металла снижать мощность излучения в соотношении примерно 1:1, что значительно снижает себестоимость оборудования.

При микроплазменной сварке алюминиевых сплавов толщиной до 1,5 мм наблюдается прови-

сание шва в случае полного провара, склонность к образованию подрезов при сварке на токах свыше 30 А, снижение стабильности процесса при увеличении скорости свыше 40 м/ч. Основным недостатком лазерной сварки непрерывным излучением алюминиевых сплавов является необходимость повышения мощности для получения стабильного провара, приводящая к удорожанию сварочного оборудования. Одним из способов устранения этих недостатков является объединение микроплазменного и лазерного процессов.

Гибридная лазерно-микроплазменная сварка алюминиевых сплавов толщиной до 1,5 мм характеризуется стабильностью процесса на скоростях сварки свыше 60 м/ч, уменьшенной (в 1,5...2,0 раза по сравнению с микроплазменной сваркой) шириной швов, значительным снижением остаточных деформаций, а также возможностью получения качественных соединений при сравнительно низких погонных энергиях (порядка 12...15 Дж/мм

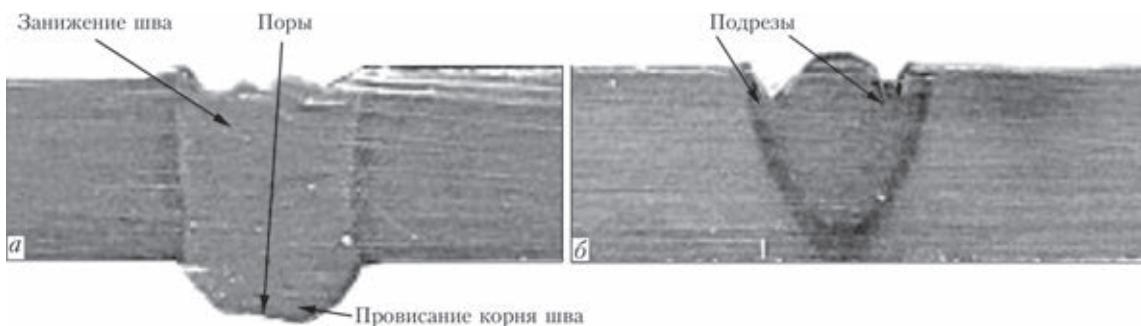


Рис. 11. Макроструктура ($\times 20$) сварных соединений сплава Амг5 ($\delta = 1,5$ мм), полученных при скорости сварки 420 м/ч

для торцевых соединений и около 30 Дж/мм для стыковых); отсутствие разбрызгивания. К характерным дефектам лазерно-микроплазменной сварки алюминиевых сплавов относятся провисание швов, сваренных без подкладки, образование подрезов и внутренних пор диаметром 0,1...0,2 мм. Основными путями устранения этих дефектов можно считать следующие: подача присадочного материала (например, в виде проволоки); использование стальных подкладок (в том числе с канавками для формирования нижнего валика); сварка по отбортовке (торцевыми швами); сварка внахлест (требует тщательной подготовки поверхностей); уменьшение энергозатрат от микроплазменной составляющей при сохранении общего уровня вкладываемой энергии; введение сварочных режимов с высокочастотной модуляцией мощности излучения.

Оптимальными величинами параметров сварки излучением CO₂-лазера являются мощность 3,0...3,5 кВт при скорости 180...300 м/ч, т. е. диапазон погонных энергий 36...70 Дж/мм. Снижение погонной энергии приводит к непровару металла, а увеличение – к образованию горячих трещин. При оптимальных параметрах процесса наблюдается небольшая пористость сварного соединения (поры диаметром 0,1...0,2 мм), считающаяся допустимой. Стоит заметить, что в основном металле также наблюдается небольшая пористость.

Детальное изучение структур металла швов, полученных плазменной, гибридной и лазерной

сваркой, показало, что во всех случаях структура является достаточно равноосной, плотной, без видимых дефектов, имеет дендритный характер. Наиболее крупнодисперсная структура наблюдается при плазменной сварке, наиболее мелкодисперсная — в случае лазерной. Дендритный параметр составляет около 4 мкм для плазменной сварки и уменьшается примерно в три раза для лазерной сварки. При гибридной сварке более мелкодисперсная структура наблюдается для случая торцевого соединения, что связано с повышением скорости сварки, ставшим возможным из-за улучшения поглощения лазерного излучения в образованном отбортовкой узком несквозном зазоре.

1. *Микроплазменная сварка* / Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, Д. А. Дудко и др. – Киев: Наук. думка, 1979. – 248 с.
2. *Гибридная лазерно-микроплазменная сварка металлов малых толщин* / Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, И. В. Кривцун и др. // Автомат. сварка. – 2002. – № 3. – С. 5–9.
3. *Бондарев А. А., Бондарев Андр. А. Лазерная сварка алюминиевых сплавов (обзор)* // Там же. – 2001. – № 12. – С. 21–28.
4. *Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов* / И. В. Кривцун, В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин и др. // Там же. – 2007. – № 5 – С. 49–53.
5. *Генерация излучения с качеством ТЕМ00 моды в непрерывном CO₂-лазере мощностью 8 кВт* / Ю. В. Афонин, А. П. Гольшев, А. И. Иванченко и др. // Квант. электроника. – 2004. – 31, № 4. – С. 307–310.
6. *Рабкин Д. М. Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов.* – Киев: Наук. думка, 1986. – 256 с.
7. *Коваленко В. С. Металлографические реактивы: Справочник.* – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1981. – 120 с.

Поступила в редакцию 07.02.2014

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

www.patonpublishinghouse.com



Журнал «Автоматическая сварка» издается с 1948 г. 12 выпусков в год, ISSN 005-111X. Один из наиболее авторитетных и популярных журналов, издаваемых в СНГ, в области сварки и родственных процессов.

Журнал «The Paton Welding Journal» издается с 2000 г. 12 выпусков в год, ISSN 0957-798X. Полный перевод журнала «Автоматическая сварка» на английский язык.



Журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» издается с 1985 г. 4 выпуска в год, ISSN 0235-3474. В журнале публикуются статьи по технической диагностике сооружений, конструкций и машин, а также по всем методам неразрушающего контроля. Журнал переиздается в полном объеме на английском языке под названием «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» издательством «Cambridge International Science Publishing», Великобритания.



Журнал «Современная электрометаллургия» издается с 1989 г. 4 выпуска в год, ISSN 0235-3474. Журнал не имеет аналогов в СНГ. Журнал включает разделы: электрошлаковый переплав, электронно-лучевые процессы, плазменно-дуговые процессы, вакуумно-индукционная плавка, общие вопросы металлургии, новые материалы. Журнал переиздается в полном объеме на английском языке под названием «Advances in Electrometallurgy» издательством «Cambridge International Science Publishing», Великобритания.