

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СПОСОБОВ ДУГОВОЙ И ГИБРИДНОЙ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1561

В. Н. КОРЖИК^{1,2}, Н. А. ПАЩИН², О. Л. МИХОДУЙ², А. А. ГРИНЮК², А. А. БАБИЧ^{1,2}, В. Ю. ХАСКИН^{1,2}

¹Гуандунский Институт сварки (Китайско-украинский институт сварки им. Е. О. Патона), г. Гуанчжоу, КНР

²ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Для повышения ресурса работы и надежности сварных конструкций из алюминиевых сплавов целесообразно применять, кроме традиционной импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом на обратной полярности, гибридную плазменно-дуговую сварку плавящимся электродом. Проведены работы по определению технологических режимов гибридной плазменно-дуговой сварки алюминиевого сплава 1561 толщиной 5 мм, сравнение процессов традиционной дуговой сварки плавящимся электродом и гибридной плазменно-дуговой сварки с учетом остаточного напряженно-деформированного состояния получаемых стыковых сварных соединений, а также дана оценка перспективности замены традиционной дуговой сварки гибридной. В ходе определения технологических режимов гибридной плазменно-дуговой и импульсной дуговой сварки алюминиевого сплава 1561 установлено, что при одинаковых скоростях оба способа обеспечивают примерно равную погонную энергию. При этом отработанная технология гибридной сварки позволила уменьшить диаметр проволоки с 1,6 до 1,2 мм, что привело к уменьшению ширины шва по сравнению с дуговой сваркой на 25...50 %. Уменьшение площади лицевой части шва по сравнению с площадью корневой части при гибридном способе сварки привело к снижению уровня остаточного коробления сваренных пластин примерно в 3 раза, а остаточных напряжений вдоль линии шва — на 15...20 %. Библиогр. 6, табл. 1, рис. 10.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, сварка дугой плавящимся электродом, гибридная плазменно-дуговая сварка, режимы, спекл-интерферометрия, напряженно-деформированное состояние

Тонколистовые сварные конструкции из сплавов на основе алюминия получают все большее распространение в современной промышленности [1]. Такие конструкции широко применяются в авиакосмической технике, судостроении, автомобилестроении, железнодорожном транспорте и др. [2]. При изготовлении конструкций и изделий из алюминиевых сплавов применяют различные сварочные технологии, обеспечивающие качественное формирование неразъемных соединений, например, импульсно-дуговую сварку плавящимся электродом на обратной полярности (далее — дуговую сварку). Однако в ряде случаев (например, для повышения ресурса работы и надежности сварных конструкций) целесообразно применять более прогрессивные технологии. К ним относится гибридная плазменно-дуговая сварка плавящимся электродом с осевой подачей электродной проволоки через трубчатый электрод плазмотрона (далее — гибридная плазменно-дуговая сварка) [3].

Целью данной работы является определение технологических режимов гибридной плазменно-дуговой сварки алюминиевого сплава 1561 толщиной $\delta = 5$ мм, сравнение процессов традиционной дуговой сварки плавящимся электродом и гибридной плазменно-дуговой с учетом остаточного напряженно-деформированного состояния

получаемых стыковых соединений, а также оценка перспективности замены традиционной дуговой сварки гибридной.

Отработку технологических приемов гибридной плазменно-дуговой и дуговой сварки выполняли на пластинах из алюминиевого сплава 1561 размером 320×102,5 мм. При этом применяли разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона специализированный комплекс оборудования, в состав которого входили [4]: инверторный сварочный источник питания для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом TIGAC-DCEVO 450/TRobot, плазменный модуль FPM, EVOSpeedStar 520 TRobot, блоки автономного охлаждения, плазмотрон для машинной гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом с осевой подачей проволоки, многопозиционный лабораторный манипулятор на базе сварочной колонны и вращателя, общая система управления комплексом гибридной сварки. Сварку выполняли согласно технологической схеме, приведенной на рис. 1.

В ходе экспериментов по длинной стороне образцов выполняли продольные стыковые швы (рис. 2). Основными критериями выбора режима при сварке образцов из сплава 1561 служило каче-

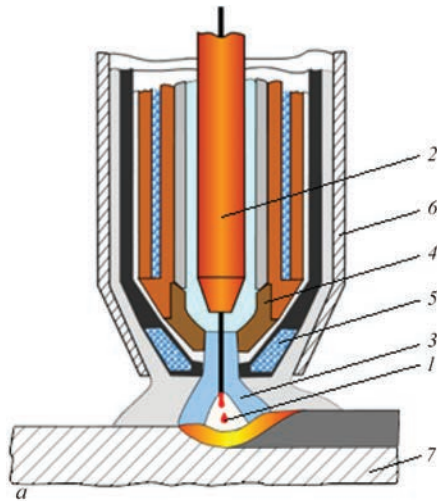


Рис. 1. Технологическая схема (а) и комплекс оборудования (б) гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом: 1 — дуга плавящегося электрода; 2 — подающий мундштук плавящегося электрода; 3 — сжатая дуга прямого действия; 4 — трубчатый электрод плазмотрона (анод); 5 — плазмообразующее сопло; 6 — защитное сопло; 7 — свариваемый образец

ственное формирование швов при сопутствующей минимизации порообразования. Используемые режимы сварки (скорость сварки $v_{св}$, сварочный ток I_d , напряжение на дуге U_d , диаметр сварочной проволоки $d_{пр}$) и геометрические характеристики пластин (f_1-f_3 — продольные прогибы, Δ_1, Δ_2 — поперечные прогибы в начале и конце соединения, соответственно) представлены в таблице. Внешний вид макрошлифов сварных соединений показан на рис. 3. Отработанная технология гибридной сварки позволила уменьшить диаметр проволоки с 1,6 до 1,2 мм при той же толщине свариваемых пластин и тех же значениях погон-

ной энергии (таблица). Поскольку, как показано в работе [5], объем наплавленного металла прямо пропорционален диаметру электродной проволоки, это привело к уменьшению ширины шва при равных скоростях сварки.

При выбранных режимах погонные энергии сравниваемых процессов сварки примерно одинаковы и составляют порядка 600 Дж/мм. Однако в случае гибридной плазменно-дуговой сварки швы имеют меньшую (по сравнению с традиционной дуговой) ширину: по усилению шва — на 25 %, в его среднем сечении — до 50 % (рис. 3). При этом высота усиления верхнего валика при гибридной сварке снижается примерно вдвое по сравнению с аналогичным параметром при дуговой. Из рис. 3 видно, что фланговый угол сечения шва уменьшается, а радиус перехода шва к основному металлу — напротив, увеличивается. Это, в свою очередь, приводит к снижению коэффициента концентрации напряжений. Можно предположить, что форма проплавления шва, характерная для гибридной сварки, определяет меньший уровень остаточного напряженно-деформированного состояния стыковых соединений. Для проверки этого предположения методом электронной спекл-интерферометрии измеряли параметры напряженно-деформированного состояния сварных пластин.

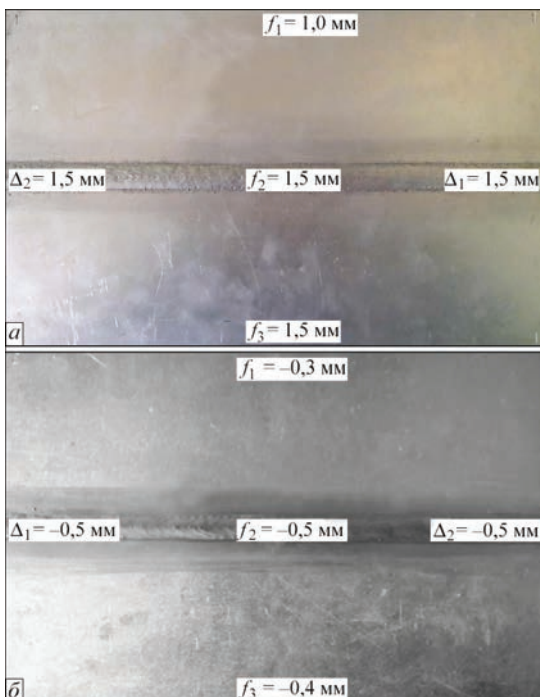


Рис. 2. Внешний вид лицевой поверхности и геометрические характеристики сварных соединений пластин из сплава 1561, выполненных дуговой (а) и гибридной плазменно-дуговой сваркой (б)

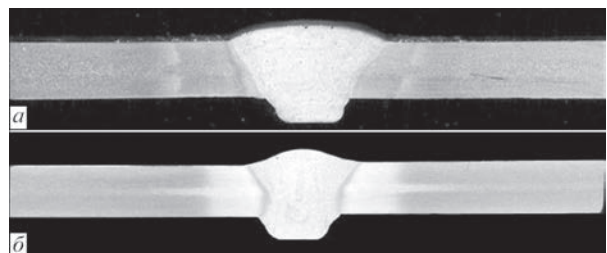


Рис. 3. Внешний вид макрошлифов сварных соединений пластин из сплава 1561: а — дуговая сварка; б — гибридная плазменно-дуговая сварка

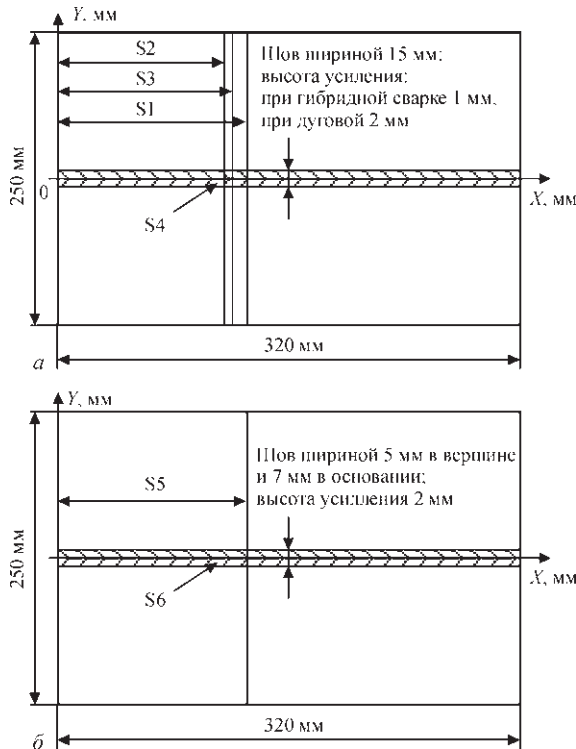


Рис. 4. Схемы измерения остаточных напряжений на стыковых сварных соединениях алюминиевого сплава 1561, выполненных дуговой и гибридным способами: а — лицевая (верхняя) сторона, сечения S1–S3 — измерения поперек шва, S4 — вдоль линии шва; б — обратная (нижняя) сторона, сечение S5 — поперек шва, S6 — вдоль шва; по оси X сечения расположены на расстоянии: S1 — 166, S2 — 148, S3 — 155, S5 — 168 мм; по оси Y сечения S4 и S6 проходили по нулевой отметке

Метод основан на измерении перемещений при упругой разгрузке объема металла в исследуемых точках на поверхности образца, вызванной сверлением несквозных отверстий диаметром и глубиной 1,0 мм [6]. Сопоставляя параметры напряженного состояния и остаточного деформирования на конкретном образце сварного соединения, выполненного дуговой и гибридной сваркой, определяли эффективность каждого из процессов с позиций напряженно-деформированного состояния.

Геометрические размеры пластин, сваренных дуговой и гибридным способами, а также схемы измерения остаточных напряжений представлены на рис. 4. Измерения продольной (вдоль линии шва) компоненты σ_x плоского напряженного состояния выполняли в трех сечениях S1–S3 на лицевой стороне пластины (рис. 4, а), и в одном сечении S5 — на обратной (рис. 4, б). Дублирование

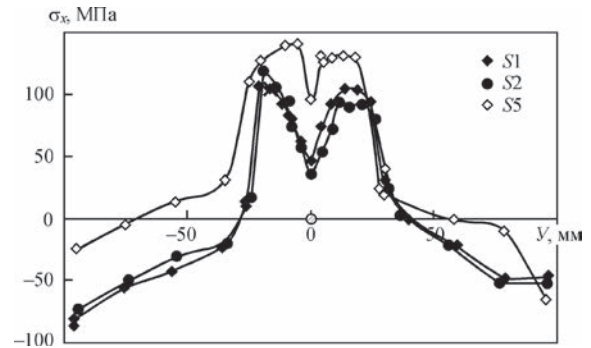


Рис. 5. Остаточные сварочные напряжения σ_x на лицевой стороне выполненного дуговой сваркой соединения сплава 1561 в поперечных сечениях S1 и S2 и обратной — в сечении S5

измерений σ_x на лицевой стороне пластины осуществляли с целью обеспечения достоверности результатов.

Образец, выполненный дуговой сваркой (табл., рис. 2, а и 3, а), имеет продольные прогибы f_1 – f_3 в диапазоне значений 1,0...1,5 мм, направленные в сторону от лицевой поверхности. Значения поперечных прогибов Δ_1 – Δ_2 стабильны по длине сварного соединения и составляют 1,5 мм. Особенности данного формоизменения определяются формой проплавления шва (рис. 3, а), характеризующейся несовпадением линии приложения усачного укорочения и нейтральной оси сечения. Результатом данного несоответствия является изгибающий момент, вызывающий коробление пластины в продольном направлении. Стабильность значений Δ по длине пластины связана с ее геометрическими характеристиками, обеспечивающими равномерный теплоотвод с поверхности в течение сварочного термомодеформационного цикла. Распределение остаточных продольных напряжений σ_x в поперечных сечениях сварной пластины после сварки МИГ представлены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что в центре шва на лицевой и обратной поверхностях пластины имеет место локальное понижение растягивающих напряжений σ_x соответственно до 45...50 и 100 МПа. Пиковые значения σ_x на лицевой и обратной поверхностях находятся в зоне сплавления и достигают соответственно 100 и 140 МПа. Реактивные сжимающие напряжения σ_x на лицевой и обратной поверхностях достигают максимальных значений на продольных краях пластины, соответственно –50...–80 и –25...–60 МПа. Форма эпюры σ_x связана с малой шириной пластины, при которой

Режимы дуговой и гибридной плазменно-дуговой сварки с близкими погонными энергиями (порядка 600 Дж/мм) и геометрические характеристики сварных пластин из сплава 1561 ($\delta = 5$ мм)

Вид сварки											
МИГ						Плазма-МИГ					
$v_{св}^*$, мм/с	I_d^* , А	U_d^* , В	$d_{пр}^*$, мм	$f_1/f_2/f_3$, мм	Δ_1/Δ_2	$v_{св}^*$, мм/с	$I_{МИГ}/I_{плазма}^*$, А	$U_{МИГ}/U_{плазма}^*$, В	$d_{пр}^*$, мм	$f_1/f_2/f_3$, мм	Δ_1/Δ_2
10	240	26,5	1,6	1,0/1,5/1,2	1,5/1,5	10	145/149	17,4/25,5	1,2	-0,3/ -0,5/-0,4	-0,5/ -0,5

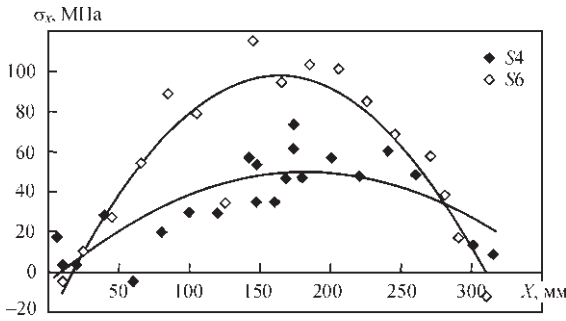


Рис. 6. Остаточные сварочные напряжения σ_x на лицевой стороне выполненного дуговой сваркой соединения сплава 1561 в продольном сечении вдоль линии шва S4 и обратной — в сечении S6

сжимающие напряжения в ее поперечном сечении не достигают нулевых значений. При сопоставлении эпюр σ_x на обеих сторонах пластины можно видеть, что имеет место значительная изгибная составляющая напряжений, что подтверждает полученная форма коробления образца.

Распределение остаточных продольных напряжений σ_x в сварной пластине вдоль линии шва (рис. 6) подтверждают результаты, полученные для поперечного сечения S1 (рис. 5). Из рисунка видно, что эпюры σ_x на обеих сторонах пластины характеризуются разницей пиковых значений, что определяет значительную изгибную составляющую напряженно-деформированного состояния пластины и подтверждает характеристики ее формоизменения.

Образец, выполненный гибридной сваркой (табл., рис. 2, б и 3, б), имеет продольные прогибы f_1-f_3 величиной $-0,3...-0,5$ мм, направленные в сторону лицевой поверхности. Значения поперечных прогибов $\Delta_1-\Delta_2$ стабильны по длине сварного соединения и также равны $-0,5$ мм. Особенности данного формоизменения определяются формой проплавления шва (рис. 3, б), характеризующейся практически совпадением линии приложения усадочного укорочения и нейтральной оси сечения сварного шва. Сравнение форм швов, выполненных дуговым и гибридным способами (рис. 3)

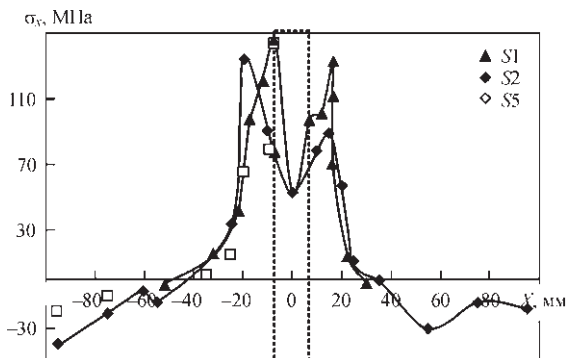


Рис. 7. Остаточные сварочные напряжения σ_x на лицевой стороне выполненного гибридной сваркой соединения сплава 1561 в поперечных сечениях S1–S3; штриховой линией показаны контуры сварного шва

показывает, что площадь сечения сварного шва при гибридной сварке на 30 % меньше, чем при дуговой сварке.

Пластина, выполненная гибридным способом, характеризуется меньшим объемом продольного усадочного укорочения металла шва и, соответственно, меньшим значением продольной усадочной силы P_{yc} , чем образец после дуговой сварки. Это связано с заметным уменьшением площади верхней относительно горизонтальной продольной оси части шва при гибридной сварке (рис. 3, б) по сравнению с дуговой (рис. 3, а). При этом в обоих случаях площадь нижней части остается прежней. Учитывая практическое совпадение линии приложения продольной P_{yc} и продольной нейтральной оси, а также меньшее значение P_{yc} , можно заключить, что пластина, сваренная гибридным способом, подвергается существенно меньшему изгибающему моменту, чем после дуговой сварки. Данный факт поясняет меньшую величину (до трех раз) коробления пластины в продольном направлении, чем при дуговой сварке. Стабильность Δ по длине пластины, как и их малые значения после гибридной сварки, связаны с формой шва, характеризующейся более равномерным (по сравнению с дуговой) проплавлением по толщине пластины, а также с геометрическими характеристиками образца, обеспечивающими стабильный теплоотвод с его поверхностей в течение сварочного термомодеформационного цикла.

Распределение остаточных продольных напряжений σ_x в поперечных сечениях лицевой и обратной сторон пластины, сваренной гибридным способом, представлены на рис. 7, 8, а их сопоставление — на рис. 9. Из рисунков видно, что в центре шва на лицевой и обратной поверхностях пластины имеет место локальное понижение растягивающих напряжений σ_x соответственно до 45...50 и 100 МПа. Пиковые значения σ_x на лицевой и обратной поверхностях находятся в зоне сплавления и достигают соответственно 140 и 150 МПа. Реактивные сжимающие напряжения σ_x на лицевой и обратной поверхностях находятся максимальных значений на продольных краях пластины $-20...-40$ МПа. Данная форма эпюры сжимающих напряжений σ_x , как и в случае дуговой сварки, связана с малой шириной пластины, при которой сжимающие напряжения в ее поперечном сечении не достигают нулевых значений. При сопоставлении эпюр σ_x на обеих сторонах пластины можно видеть, что, в отличие от дуговой сварки, изгибная составляющая напряжений в реактивной зоне эпюры напряжений гибридной сварки незначительна, что определяет меньшую величину коробления образца по сравнению с дуговой (таблица).

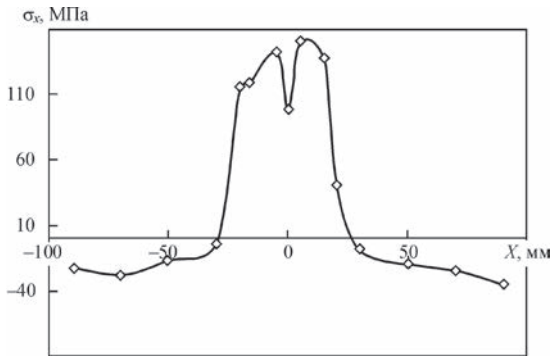


Рис. 8. Остаточные сварочные напряжения σ_x на обратной стороне выполненного гибридной сваркой соединения сплава 1561 в поперечном сечении S5

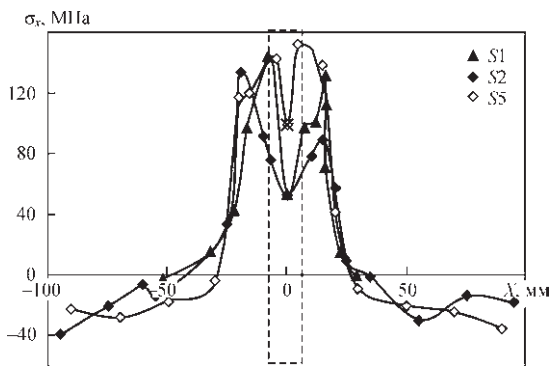


Рис. 9. Остаточные сварочные напряжения σ_x на лицевой стороне выполненного гибридной сваркой соединения сплава 1561 в поперечных сечениях S1 и S2 и обратной — в сечении S5; штриховой линией показаны контуры сварного шва

Следует отметить, что при анализе остаточных напряженных состояний пластин, выполненных дуговой и гибридной сваркой (рис. 5, 9), заметно некоторое несоответствие между уровнем растягивающих напряжений и значениями прогибов. Так, пиковые значения растягивающих напряжений σ_x для рассматриваемых способов сварки, в отличие от значений прогибов, достаточно близки, как и величины изгибной составляющей напряжений в активной зоне (в центре шва). Данный факт можно пояснить малой продольной жесткостью исследуемых сварных пластин, а также особенностями напряженно-деформированных состояний, характерных для дуговой и гибридной сварки.

Эпюры σ_x в реактивной зоне сжимающих напряжений выходят на свободные продольные кромки (рис. 5 и 9). При этом значения напряжений на кромках пластины при гибридной сварке существенно ниже, чем при дуговой, что вызывает ее меньшие продольные прогибы и, соответственно, более высокий уровень растягивающих напряжений σ_x . Таким образом, уровень растягивающих напряжений σ_x в изогнутой пластине, сваренной дуговым способом, сопоставим с уровнем σ_x в плоской пластине, сваренной гибридным. Можно заключить, что при сопоставлении напряженных состояний пластин, выполненных гибри-

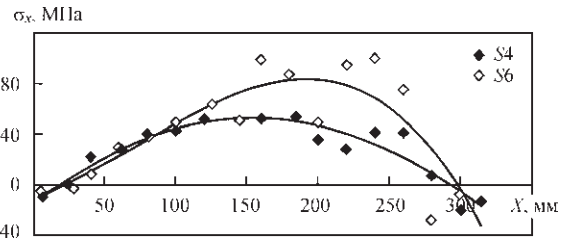


Рис. 10. Остаточные сварочные напряжения σ_x на лицевой стороне выполненного гибридной сваркой соединения сплава 1561 в продольном сечении вдоль линии шва S4 и обратной — в сечении S6

ной и дуговой сваркой с равными величинами прогибов, значения σ_x в последней будут выше.

Распределение остаточных продольных напряжений σ_x в сварной пластине вдоль линии шва (рис. 10) подтверждают результаты, полученные для поперечного сечения S1 (рис. 9). Из рисунка видно, что эпюры σ_x на обеих сторонах пластины, полученной гибридной сваркой, характеризуются меньшей разницей пиковых значений, чем при дуговой сварке, что определяет изгибную составляющую напряженно-деформированного состояния пластины и подтверждает характеристики ее формирования (таблица).

Сравнение значений напряжений σ_x вдоль линии шва в пластинах, выполненных гибридной и дуговой сваркой, показало снижение их уровня на 15...20 % в случае гибридной сварки, что может способствовать повышению долговечности таких сварных соединений при нагрузке в этом направлении. Такое повышение долговечности соединений, нагруженных вдоль сварного шва, может положительно сказываться на результатах сварки стрингерных панелей и оболочек специальных летательных аппаратов из алюминиевых сплавов.

Выводы

1. В ходе определения технологических режимов гибридной плазменно-дуговой и импульсной дуговой сварки алюминиевого сплава 1561 толщиной 5 мм установлено, что при одинаковых скоростях сварки оба способа обеспечивают примерно равную погонную энергию. При этом отработанная технология гибридной сварки позволила уменьшить диаметр применяемой проволоки с 1,6 до 1,2 мм, что привело к уменьшению ширины шва по сравнению с дуговой сваркой на 25...50 %.
2. Уменьшение площади лицевой части шва по сравнению с площадью корневой части при гибридном способе сварки привело к снижению уровня остаточного коробления сваренных пластин примерно в 3 раза, а остаточных напряжений σ_x вдоль линии шва — на 15...20 %.
3. Эпюры напряжений σ_x вдоль линии шва на обеих сторонах пластины, сваренной встык гибридным способом, характеризуются мень-

шей разницей пиковых значений, чем при дуговой сварке, что определяет примерно в три раза меньшую изгибную составляющую напряженно-деформированного состояния пластины и подтверждается характеристиками ее формоизменения.

4. Дальнейшие исследования напряженно-деформированного состояния стыковых соединений, выполненных гибридной сваркой, целесообразно проводить с использованием пластин размером 500×500×8 мм, как обеспечивающих близкие к нулю напряжения сжатия на кромках.

Работа выполнялась при поддержке Программы иностранных экспертов КНР № WQ20124400119, Программы инновационной группы провинции Гуандун, КНР № 201101C0104901263, Гуандунского научно-технического проекта № 2015A050502039, Гуандунского научно-технического проекта № 2016B050501002.

Список литературы

1. Хаскин В. Ю. Развитие лазерной сварки алюминиевых сплавов в ИЭС им. Е. О. Патона (Обзор) // Автоматическая сварка. – 2013. – № 5. – С. 52–57.
2. Зусин В. Я., Серенко В. А. Сварка и наплавка алюминия и его сплавов. – Мариуполь: Издат. дом «Рената», 2004. – 468 с.
3. Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов / А. А. Гринюк и др. // Автоматическая сварка. – 2015. – № 11. – С. 39–50.
4. Гибридные технологии сварки алюминиевых сплавов на основе дуги с плавящимся электродом и сжатой дуги / А. А. Гринюк и др. // Там же. – 2016. – № 5-6. – С. 107–113.
5. Шонин В. А., Покляцкий А. Г. Малоцикловая усталость сварных стыковых соединений сплава АМг6, выполненных в среде инертного газа // Там же. – 2001. – № 3. – С. 20–24.
6. Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии / Л. М. Лобанов и др. // Там же. – 2006. – № 1. – С. 25–30.

В. М. Коржик^{1,2}, М. О. Пашин², О. Л. Миходуй²,
А. А. Гринюк², О. А. Бабич^{1,2}, В. Ю. Хаскин^{1,2}

¹Гуандунский Институт зварювання
(Китайсько-український інститут зварювання
ім. С. О. Патона), м. Гуанчжоу, КНР

²ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА СПОСОБІВ ДУГОВОГО І ГІБРИДНОГО ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ 1561

Для підвищення ресурсу роботи і надійності зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів доцільно застосовувати, крім традиційного імпульсно-дугового зварювання плавким електродом на зворотній полярності, гібридне плазмово-дугове зварювання плавким електродом. Проведено роботи по визначенню технологічних режимів гібридного плазмово-дугового зварювання алюмінієвого сплаву 1561 товщиною 5 мм, порівняння процесів традиційного дугового зварювання плавким електродом та гібридного плазмово-дугового зварювання з урахуванням залишкового напружено-деформованого стану одержуваних стыкових зварних з'єднань, а також дана оцінка перспективності заміни традиційного дугового зварювання гібридним. В ході визначення технологічних режимів гібридного плазмово-дугового та імпульсного дугового зварювання алюмінієвого сплаву 1561 встановлено, що при однакових швидкостях обидва способи забезпечують приблизно рівну погонну енергію. При цьому відпрацьована технологія гібридного зварювання дозволила зменшити діаметр дроту з 1,6 до 1,2 мм, що призвело до зменшення ширини шва в порівнянні з дуговим зварюванням на 25...50 %. Зменшення площі лицьової частини шва в порівнянні з площею кореневої частини при гібридному способі зварювання призвело до зниження рівня залишкового жолоблення зварених пластин приблизно в 3 рази, а залишкових напружень вздовж лінії шва — на 15...20 %. Бібліогр. 6, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, зварювання дугою плавким електродом, гібридне плазмово-дугове зварювання, режими, спекл-інтерферометрія, напружено-деформований стан

Поступила в редакцію 15.02.2017



Ассоциация «Электрод» ♦ Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ
ООО «Новооскольский электродный завод» ♦ ООО «Керамглас»

Международный научно-практический семинар «Совершенствование сварочных материалов и технологий их производства под прогнозируемые требования»

5–8 июня 2017 г.

г. Белгород, отель «АМАКС Конгресс»

Контакты:

ООО «Керамглас», пер. Харьковский, 36д, г. Белгород, Россия, 308012,
тел./факс: +74722240010, моб. тел.: +79030246944. E-mail: ban@keramglass.ru

Контактное лицо:

Бондаренко Андрей Николаевич