

Белинин Д.С., Щицын Ю.Д., Никулин Р.Г., Ольшанская Т.В., Загребин Д.С., Пичкалев М.В. Перспективы применения плазменной дуги обратной полярности для исправления литейных дефектов изделий из сплава АК7Ч // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 74–81. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.10

Belinin D.S., Schitsyn Yu.D., Nikulin R.G., Olshanskaya T.V., Zagrebina D.S., Pichkalev M.V. Prospects for the use of a reverse polarity plasma arc for correcting casting defects in products made of AK7Ch alloy. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 74–81. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.10

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 1, 2021
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.10

УДК 621.79

Д.С. Белинин¹, Ю.Д. Щицын¹, Р.Г. Никулин¹,
Т.В. Ольшанская¹, Д.С. Загребин², М.В. Пичкалев³

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²Вятское машиностроительное предприятие «АВИТЕК», Киров, Россия

³Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства ПФИЦ
Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГИ ОБРАТНОЙ ПОЛЯРНОСТИ
ДЛЯ ИСПРАВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ДЕФЕКТОВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СПЛАВА АК7Ч**

Представлены результаты исследования применения плазменной сварки на токе обратной полярности относительно ремонта литейных дефектов изделий из алюминиевого сплава АК7Ч. Показана практическая возможность исправления литейных дефектов крупногабаритных отливок. Проведены сравнительные исследования возможности заварки дефектов в зависимости от вида подготовки поверхности.

Проведена оценка геометрических и прочностных характеристик мест заварки дефектов. Показано, что в зависимости от параметров режима и вида подготовки поверхности меняются размеры зоны термовлияния и величины цепочки газовых пор в зоне сплавления, причем в обоих вариантах эти величины находятся в пределах допуска, регламентированного ОСТом. Показано, что значения микротвердости основных зон мест ремонта примерно одинаковые, с небольшим расхождением в области зоны термовлияния, что позволяет говорить о равнопрочности сварного соединения.

Проведены исследования микроструктуры полученных образцов-свидетелей. Установлено, что в обоих случаях структура наплавленного металла имеет дендритное строение и соответствует структуре доэвтектических силуминов. Микроструктура состоит из слабо разветвленных дендритов твердого раствора кремния и других легирующих элементов в алюминии и тройной эвтектики, расположенной по границам дендритных ячеек. Таким образом, при заварке дефекта формируется микроструктура, идентичная структуре отливки.

Ключевые слова: плазматрон, обратная полярность тока, плазменная сварка, плазменные технологии, высоконцентрированные источники энергии, литейные алюминиевые сплавы, сжатая дуга, катодная очистка, микротвердость, микроструктура, металлография.

D.S. Belinin¹, Yu.D. Schitsyn¹, R.G. Nikulin¹,
T.V. Olshanskaya¹, D.S. Zagrebina², M.V. Pichkalev³

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Vyatka Machine-Building Enterprise "AVITEK", Kirov, Russian Federation

³Perm Scientific Research Institute of Agriculture, PFIC,
Ural Branch of the RAS, Perm, Russian Federation

**PROSPECTS FOR THE USE OF A REVERSE POLARITY PLASMA ARC
FOR CORRECTING CASTING DEFECTS IN PRODUCTS MADE OF AK7CH ALLOY**

The paper presents the results of a study of the use of plasma welding at a current of reverse polarity as applied to the repair of casting defects in products made of AK7Ch aluminum alloy. The practical possibility of correcting casting defects of large-sized castings is shown. Comparative studies of the possibility of welding defects depending on the type of surface preparation have been carried out.

An assessment of the geometric and strength characteristics of the welding sites of defects has been carried out. It is shown that, depending on the parameters of the mode and the type of surface preparation, the dimensions of the thermal influence zone and the size of the chain of gas pores in the fusion zone change, and in both cases these values are within the tolerance limits regulated by OST. It is shown that the microhardness values of the main zones of repair sites have approximately equal values with a small discrepancy in the area of the thermal effect zone, which allows us to speak about the equal strength of the welded joint.

Studies of the microstructure of the obtained witness samples have been carried out. It was found that in both cases the structure of the deposited metal has a dendritic structure and corresponds to the structure of hypoeutectic silumins. The microstructure consists of weakly branched dendrites of a solid solution of silicon and other alloying elements in aluminum and a ternary eutectic located at the boundaries of dendritic cells. Thus, when welding a defect, a microstructure is formed that is identical to that of the casting.

Keywords: plasmatron, reverse polarity, plasma welding, plasma technologies, highly concentrated energy sources, cast aluminum alloys, compressed arc, cathodic cleaning, microhardness, microstructure, metallography.

Малая плотность при сравнительно высокой прочности, хорошая обрабатываемость режущим инструментом, высокая коррозионная стойкость обуславливают широкое применение алюминиевых сплавов в авиационной, ракетной, космической и других отраслях промышленности [1]. В зависимости от условий эксплуатации используются различные по составу и механическим свойствам алюминиевые сплавы, а конструктивные решения зачастую связаны со сваркой [2].

Ряд факторов значительно усложняют сварку алюминиевых сплавов: 1) высокая теплопроводность; 2) повышенная жидкотекучесть алюминия при высоких температурах; 3) наличие тугоплавкой оксидной пленки на поверхности изделия; 4) высокое сродство расплавленного алюминия к газам. Все эти факторы диктуют применение специальных технологических мер, что снижает производительность процесса сварки и повышает себестоимость изготовления продукции [3].

Стоит отметить, что исправление литейных дефектов изделий из алюминиевых сплавов также представляет значительную трудность. Сложность при ремонте дефектов отливок обусловлена, помимо металлургических особенностей сплавов, наличием напряженного состояния у отливки. Это означает, что при использовании сварки для подварки дефектного участка литой детали формирование и кристаллизация металла сварного соединения будут протекать в условиях приложения к металлу шва реактивных напряжений, обусловленных конфигурацией отливки. Доброкачественная отливка должна удовлетворять следующим требованиям: мелкозернистая равномерная плотная структура, отсутствие раковин, неметаллических включений, пор, трещин или внутренних напряжений. В процессе изготовления отливок из алюминиевых сплавов отмечается образование следующих дефектов: поверхностные и сквозные незаливки, газовые раковины, участки со шлаковыми включениями, рыхлоты, спаи, трещины, а также дефекты, выявленные при механической обработке отливок. Дефекты, возникающие в процессе изготовления отливок, подразделяются на неисправимые (брак) и исправимые, как правило с применением сварки. Образование дефектов при литье алюминиевых сплавов определяется химическим составом сплава, способом разлива, сложностью отливки и условиями кристаллизации (затвердева-

ния) сплава. Литейная микрорыхлота и вызванные ею участки нарушения герметичности отливки относятся к исправимым путем использования сварки дефектам. Кроме того, что микрорыхлота приводит к нарушению герметичности отливки, она может являться очагом зарождения трещины при механической обработке детали или в процессе ее эксплуатации. При затвердевании сплавов из-за растягивающих напряжений могут образовываться горячие трещины. Трещины проходят вдоль первично затвердевших кристаллов и могут принять сильно разветвленную форму. Образование трещин наиболее часто имеет место при изготовлении отливок сложной формы с наличием участков резкого изменения толщины детали. К таким отливкам относятся корпуса изделий спецназначения авиационной отрасли. При этом трещины располагаются в зоне изменения жесткости детали, т.е. перехода от меньшей толщины отливки к большей. Анализ зон образования дефектов при изготовлении отливок сложной формы показывает, что дефектные участки чаще располагаются в местах резкого изменения толщины детали. На долю дефектов, расположенных на плоских участках отливок, приходится примерно 20–22 % от общего количества дефектных зон [4, 5].

При разработке технологии ремонта литых деталей (отливок) из алюминиевых сплавов необходимо учитывать, что далеко не все алюминиевые литейные сплавы обладают удовлетворительной свариваемостью в условиях сварки плавлением.

Исследование свариваемости таких сплавов показало, что основные трудности их сварки заключаются в следующем: 1) склонность сплавов к образованию кристаллизационных трещин; 2) наличие пор и оксидных включений; 3) образование крупнозернистой структуры в шве, рекристаллизация и оплавление зерен в околошовной зоне; 4) возникновение напряжений и деформаций. На сегодняшний день для ремонта изделий из алюминиевых сплавов широко используются сварочные технологии. Наибольшее применение получили дуговые способы сварки: аргонодуговая сварка плавящимся и неплавящимся электродами [6]. Однако использование дуговых технологий сопряжено с рядом проблем: низкая производительность при сварке повышенных толщин; дефектность сварных швов; неравнопрочность сварных соединений и основного металла; трудности при изготовлении габаритных конструкций с различными

пространственными расположениями сварных швов; высокие требования к подготовке свариваемого металла; высокие требования к присадочному материалу; специальные требования к производственным условиям (температура, влажность, скорость движения воздуха и пр.) [7]. Кроме того, ряд трудностей возникает в монтажных условиях: при значениях толщины более 10–15 мм требуется предварительный прогрев зоны соединения; трудность качественной подготовки металла под сварку.

Другой, принципиально отличный путь преодоления указанных трудностей – это применение высококонцентрированных источников нагрева, из которых наиболее перспективным выглядит применение плазменной дуги обратной полярности.

Решить многие проблемы сварки алюминиевых сплавов позволяет плазменная сварка постоянным током обратной полярности [8]. Ряд преимуществ (высокий эффективный КПД нагрева, локальность нагрева, возможность активного управления мощностью дуги) обеспечивает повышение производительности процессов сварки в 2–3 раза; снижение затрат на механическую обработку при подготовке стыков под сварку и обработку швов после сварки в 3–5 раз; снижение расхода сварочных материалов в 3–5 раз; обеспечение возможности 100%-ной автоматизации процессов [9]. Кроме того, мощная катодная очистка металла в процессе плазменной сварки на обратной полярности обеспечивает хорошее смачивание и растекание жидкого металла без риска перегрева изделия в целом и как следствие – получение качественных сварных швов при снижении требований к подготовке металла под сварку [10–15]. При этом обеспечивается получение благоприятной структуры сварного шва без внутренних дефектов. Кроме того, сравнительная простота и невысокая стоимость оборудования для плазменной сварки позволяют легко встроиться в технологический процесс изготовления изделий из литейных алюминиевых сплавов и обеспечить повышение количества год-

ных изделий, получаемых с помощью литья. Однако в настоящее время комплексного исследования особенностей плазменной сварки литейных алюминиевых сплавов как альтернативы дуговой сварке толком не проводилось.

Из алюминиевых литейных сплавов изготавливают: корпуса компрессоров, блоки цилиндров двигателей внутреннего сгорания, другие детали сложной конфигурации. Силумины – основные литейные алюминиевые сплавы, некоторые марки которых следующие: АК12 (АЛ2), АК9ч (АЛ4), АК7ч (АЛ9) и др. Одним из основных легирующих элементов в этих сплавах является кремний. Наилучшими литейными свойствами обладают эвтектические сплавы, поэтому силумины обычно содержат от 5 до 14 % Si, т.е. на несколько процентов больше или меньше эвтектической концентрации [5].

Целью работы являлась разработка технологии исправления литейных дефектов изделия типа корпус (рис. 1) из сплава АК7Ч с помощью плазменной сварки на токе обратной полярности. Химический состав сплава представлен в табл. 1. Механические свойства приведены в табл. 2.

Отливки из сплава АК7Ч являются сложными пространственными конструкциями значительных габаритов (см. рис. 1, а), цикл производства таких изделий занимает достаточно много времени, а дефекты могут проявиться на любой стадии процесса начиная с извлечения отливки из формы и заканчивая этапами термической и механической обработки. Исправление дефектных участков с помощью сварки производится на всех деталях в местах, доступных для сварки и контроля. Границу дефекта выявляют визуально (см. рис. 1, б) или с помощью рентгеноконтроля. Форму разделки дефектного участка отливки выбирают в зависимости от вида дефекта (рис. 2). С помощью сварки можно устранить поверхностные и внутренние дефекты металлургического характера, а также механические повреждения и дефекты, выявленные при механической обработке (см. рис. 1, в).

Таблица 1

Химический состав сплава АК7ч по ГОСТ-1583–93, %

Al	Si	Mn	Fe	Cu	Pb	Mg	Be	Zn	Sn
Основа	6–8	До 0,5	0,5	До 0,2	До 0,05	0,25–0,45	До 0,1	До 0,3	До 0,01

Таблица 2

Механические свойства сплава АК7ч по ГОСТ-1583–93, %

Марка сплава	Вид ТО	σ_B , МПа	Δ , %	НВ
АК7Ч	T2	137	2	45
	T4	186	4	50

Примечание: σ_B – временное сопротивление разрыву, МПа; Δ – относительное удлинение, %; НВ – твердость по Бриннелю; T2 – отжиг; T4 – закалка.

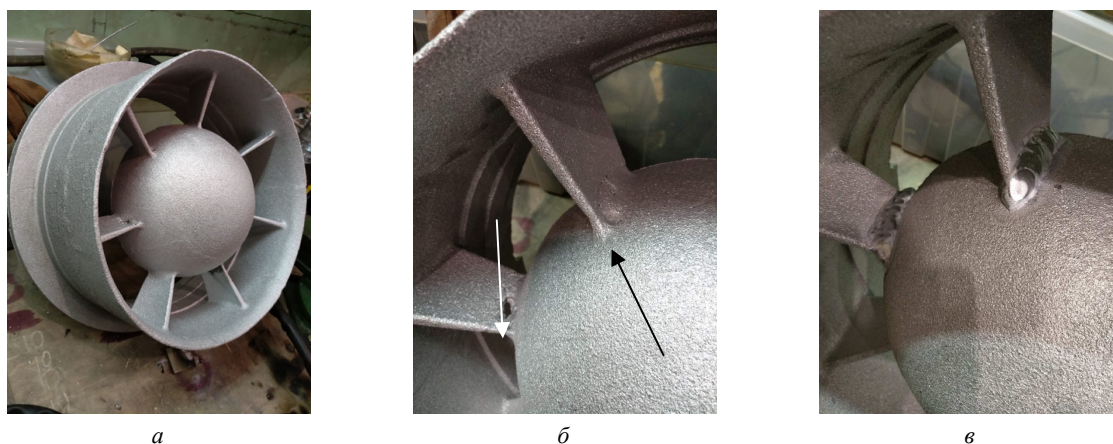


Рис. 1. Корпус направляющего аппарата из сплава АК7ч: а – внешний вид изделия; б – дефекты при переходе на различные по толщине части отливки; в – внешний вид исправленных с помощью плазменной сварки дефектов

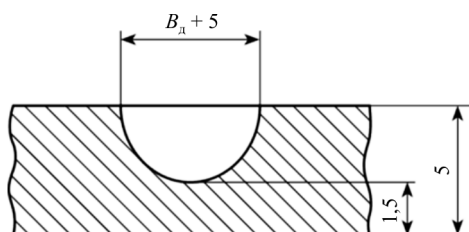


Рис. 2. Форма разделки для исправления дефектов в виде поверхностных незаливов, газовых раковин, шлаковых включений, рыхлот, спаев и трещин

Участок детали, подлежащий сварке, необходимо зачистить от литейной корки, оксидов, черноты и других загрязнений на расстоянии не менее 30 мм от границ разделки. В случае сквозных дефектов зачистку проводят с двух сторон, не допуская уменьшения толщины стенок отливки. При этом необходимо руководствоваться следующими положениями: а) глубина разделки дефекта должна превышать на 2–3 мм глубину залегания дефекта и быть на 5 мм больше ширины дефекта; б) дефекты, расположенные друг от друга на расстоянии не менее 50 мм, необходимо подготавливать отдельно. При расстоянии менее 50 мм производится сплошная разделка; в) разделку дефектного места следует выполнять до получения плавных очертаний и переходов. Переход от поверхности к основанию разделки должен быть плавным, без острых углов и заусенцев (см. рис. 2); г) при сквозных дефектах разделку следует вести до притупления, равного 2–3 или 1,5–2 мм; д) при сквозных разделках или возможности провала оставшейся стенки (менее 8 мм) в процессе заварки следует использовать подкладные приспособления.

Заварку дефектов выполняли с использованием оборудования для плазменной сварки цветных металлов, разработанного на кафедре СПМ и ТМ ПНИПУ. Плазматрон обеспечивает устойчивую

работу на токах прямой и обратной полярности в широком диапазоне изменения параметров процесса сварки (рис. 3) [16].

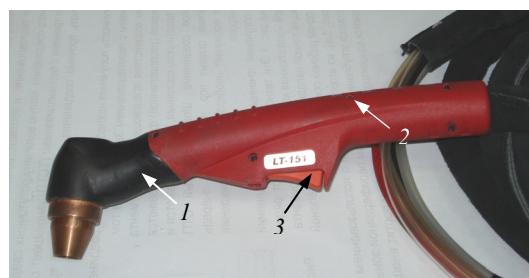


Рис. 3. Плазменная горелка для сварки цветных металлов: 1 – плазматрон; 2 – ручка; 3 – кнопка «Пуск»

Были опробованы следующие варианты заварки дефектов: плазменная сварка на токе обратной полярности без предварительной подготовки поверхности; плазменная сварка на токе обратной полярности с использованием повышенной погонной энергии и предварительной подготовкой поверхности. Толщина металла в зоне расположения дефектов составляла 12 мм.

Стоит отметить, что в обоих случаях предварительный подогрев изделия и последующая термообработка изделия не проводились.

Основные технологические параметры процесса плазменной сварки приведены в табл. 3.

Далее было проведено металлографическое исследование полученных образцов-свидетелей (рис. 4).

При анализе макроструктуры установлено, что дефектов и несплавлений на образцах не присутствует. Исключение составляют лишь цепочки пор на границах сплавления основного и наплавленного металлов. Величина пор колеблется от 0,3 мм в случае с подготовкой поверхности (образец № 2) до 1 мм в случае с неподготовленной поверхностью (образец № 1).

Стоит отметить, что величины пор в обоих случаях укладываются в требования ОСТа и, как следствие, являются допустимыми. В работах [17–19] рассматривается такой фактор свариваемости алюминиевых и магниевых сплавов, как пористость. Авторы отмечают, что в металле шва наблюдают по крайней мере два вида пористости: мелкую, расположенную произвольно по всему сечению шва, и крупную, расположенную по центру шва или по линии сплавления. Известен также главный виновник пористости – водород.

Причинами появления пористости являются различная растворимость водорода в твердом и жидком металлах и высокая скорость затвердевания сварочной ванны. Для их предотвращения имеются следующие возможности: уменьшить поступление водорода в сварочную ванну, замедлить скорость кристаллизации металла. Эти возможности технолог может реализовать за счет тщательной очистки основного и присадочного металлов, осушки защитного газа, использования предварительного подогрева изделия.

Таблица 3

Технологические параметры плазменной сварки

Характеристика режима	Ток дуги, А	Расход защитного газа, л/мин	Расход плазмообразующего газа, л/мин	Диаметр плазмообразующего сопла, мм	Диаметр защитного сопла, мм
Сварка по неподготовленной поверхности	120	10	5	4	18
Сварка по подготовленной поверхности	160	7	5	5	18

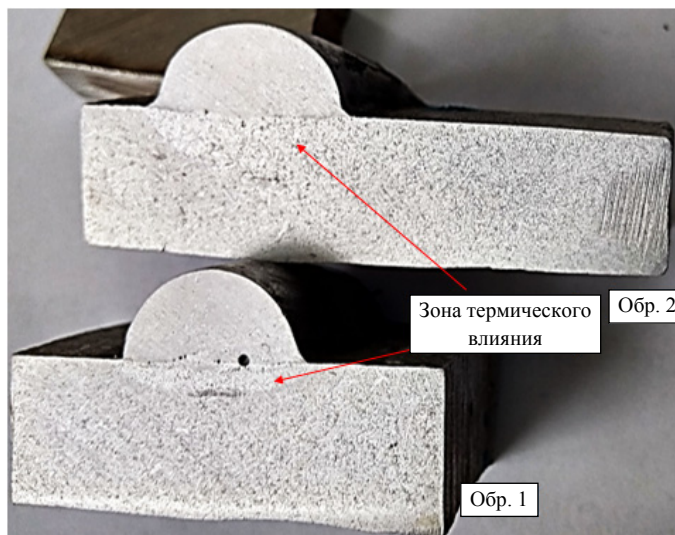


Рис. 4. Макроструктура образцов-свидетелей из сплава АК7С

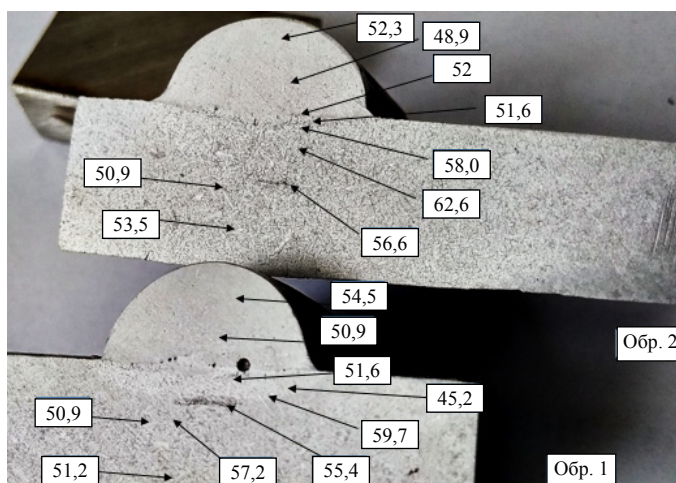


Рис. 5. Распределение микротвердости по сечению

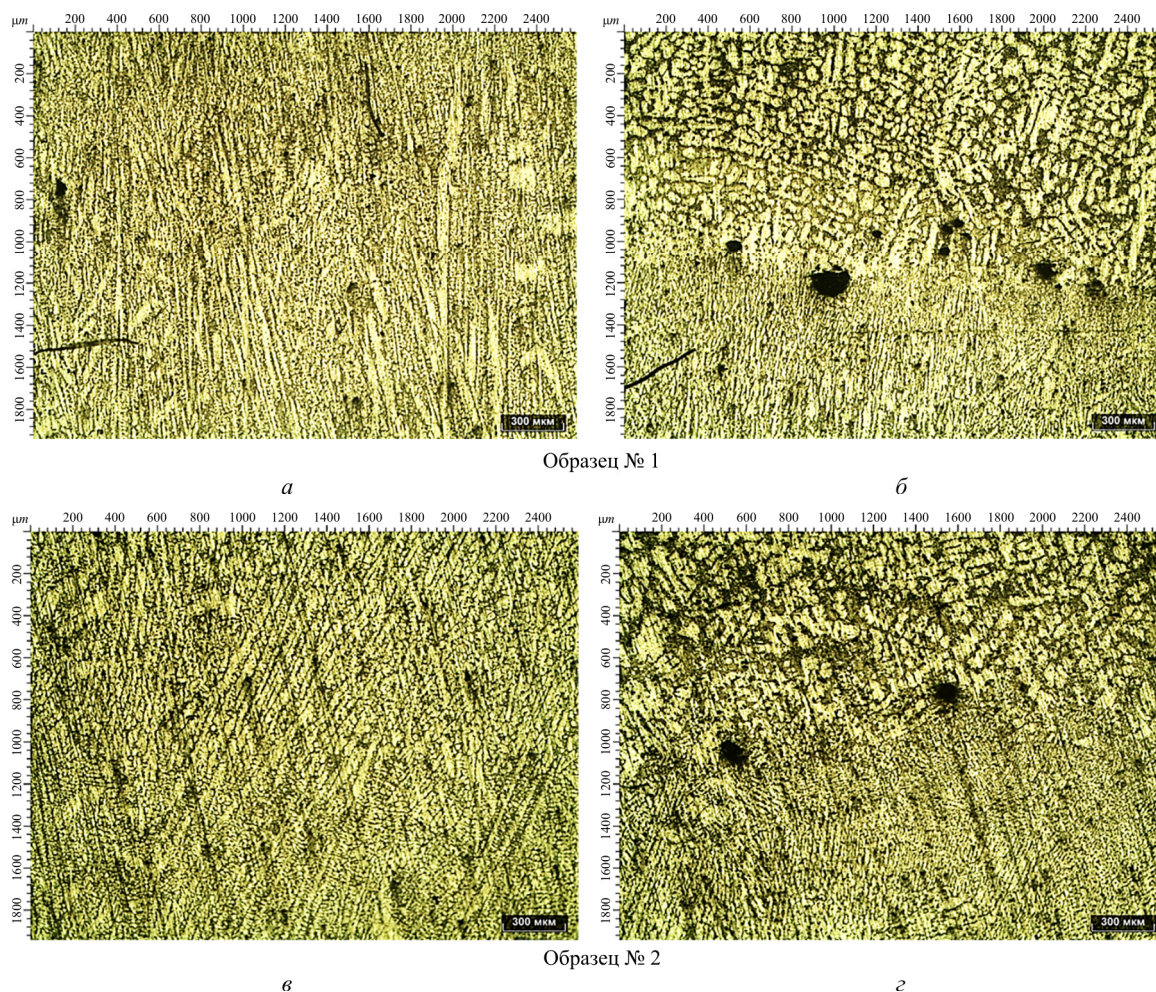


Рис. 6. Микроструктура зон наплавки (а, в) и околошовной зоны (б, г) образцов-свидетелей

Трещин и других видимых дефектов наплавленного металла не обнаружено.

Механические характеристики основных зон приведены в табл. 2. Установлено, что микротвердость основных зон имеет примерно равные значения (рис. 5) с небольшим расхождением в области зоны термовлияния, что позволяет говорить о равнопрочности места заварки с основным материалом.

Далее был проведен анализ микроструктуры полученных образцов-свидетелей (рис. 6).

На рис. 6 показана микроструктура заварки дефекта по неподготовленной (см. рис. 6, а) и подготовленной (см. рис. 6, в) поверхностям при увеличении $\times 200$. В обоих случаях структура наплавленного металла имеет дендритное строение и соответствует структуре доэвтектических силуминов. Микроструктура состоит из слабо разветвленных дендритов $\alpha(\text{Al})$ -твердого раствора кремния и других легирующих элементов в алюминии и тройной эвтектики ($\alpha(\text{Al}) + \text{Si} + \text{Mg}_2\text{Si}$), расположенной по границам дендритных ячеек. Таким образом, при заварке дефекта формируется микроструктура, идентичная структуре отливки.

В околошовной зоне (см. рис. 6, б, г) структура имеет также дендритное строение с различной дисперсностью при переходе к основному металлу. Причем заварка дефекта на большем токе (образец № 2) способствует более плавному изменению дисперсности дендритов при переходе к основному металлу (см. рис. 6, г). Также в ходе анализа макроструктуры подтверждено наличие цепочки газовых пор в околошовной зоне, других дефектов не обнаружено.

Таким образом, в обоих случаях структура места заварки представляет собой дендритную структуру различной дисперсности, подобную структуре основного литого материала АК7ч, и можно говорить о том, что в обоих случаях плазменная сварка обеспечивает качественное формирование сварного шва.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Показана возможность проведения ремонта литейных дефектов изделий из алюминиевых сплавов типа АК7ч с помощью плазменной сварки на токе обратной полярности. Причем заварку де-

фекта можно проводить как по неподготовленной, так и по полностью подготовленной поверхности. В обоих случаях структура наплавленного металла имеет дендритное строение, соответствует структуре доэвтектических силуминов и является идентичной структуре отливки.

2. Установлено, что при заварке дефектов на повышенном токе наблюдается уменьшение размера газовых пор, располагающихся в виде цепочки на границе сплавления. При этом в обоих случаях величина газовых пор находится в пределах допуска.

3. При технологии ремонта с использованием повышенной погонной энергии и подготовкой поверхности формируется более мелкодисперсная структура переходной зоны с более плавным переходом к основному металлу. Кроме того, использование повышенной погонной энергии позволяет снизить риск общего перегрева изделия, что дает возможность использования данной технологии применительно к уже термообработанным деталям.

4. Проведенные исследования микротвердости основных зон позволяют говорить о получении равнопрочного и бездефектного сварного соединения в обоих случаях.

Список литературы

1. Рабкин Д.М., Игнат'ев В.Г., Довбищенко И.В. Дуговая сварка алюминия и его сплавов. – М.: Машиностроение, 1982. – 95 с.
2. Сидорец В.Н., Бушма А.И., Хаскин В.Ю. Лазерно-микроплазменная сварка алюминиевых сплавов // Збірник наукових праць наук. – 2012. – № 3–4. – С. 26–31.
3. Сравнительный анализ качества тонкостенных сварных соединений из алюминиевых сплавов, выполненных ручной и полуавтоматической аргонодуговой сваркой / Ю.П. Аганаев, Б.Д. Лыгденов, Н.Г. Бильтриков, Д.Ж. Байдаев, Д.С. Фильчаков // Ползуновский альманах. – 2014. – № 2. – С. 63–67.
4. Гуреева М.А., Овчинников В.В., Минаков И.Н. Металловедение: макро- и микроструктуры литейных алюминиевых сплавов. – М.: Юрайт, 2019. – 254 с.
5. Гиннэ С.В., Наумов С.Б. Материаловедение: учеб. пособие / СибГУ им. М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2017. – 198 с.
6. Гуревич С.М. Справочник по сварке цветных металлов / под ред. В.Н. Замкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наукова думка, 1990. – 512 с.
7. Щицын Ю.Д. Плазменная сварка алюминиевых сплавов // Вестник Пермского государственного технического университета. Сварка. – 2002. – С. 231–245.
8. Николаев В.А., Фридляндер И.Н., Арбузов Ю.П. Свариваемые алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1990. – 296 с.
9. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А., Щицын В.Ю. Возможности плазменной обработки металлов током обратной полярности // Сварка и диагностика. – 2009. – № 2. – С. 42–45.

10. Щицын Ю.Д. Плазменные технологии в сварочном производстве: учеб. пособие / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2004. – Ч. 1. – 73 с.

11. Плазменная сварка алюминиевых сплавов повышенных толщин / Ю.Д. Щицын, И.Л. Синани, Д.С. Белинин, П.С. Кучев, В.Ю. Щицын // Тяжелое машиностроение. – 2014. – № 1. – С. 27–31.

12. Редчиц А.В., Овчинников В.В. Повышение энергетической эффективности плазменной сварки // Сварочное производство. – 2004. – № 8. – С. 21–23.

13. Plasma welding of aluminium alloys / Yu.D. Shcitsin, V.Yu. Shcitsin, H. Herold, W. Weingart // Welding International. – 2003. – No. 17 (10). – P. 825–832.

14. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А., Щицын В.Ю. Возможности плазменной обработки металлов током обратной полярности // Сварка. Диагностика. – 2009. – № 2. – С. 42–45.

15. Shitsyn Yu.D., Belinin D.S., Neulybin S.D. Plasma surfacing of high-alloy steel 10Cr₁₈Ni₈Ti on low-alloy steel 09Mg₂Si // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, no. 20. – P. 41103–41109.

16. Плазменная поверхностная закалка стали 38x2н2ма на токах прямой и обратной полярности / Ю.Д. Щицын, Д.С. Белинин, С.Д. Неулыбин, И.Л. Синани, С.А. Терентьев, В.С. Верхорунов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т. 19, № 3. – С. 100–113.

17. Никифоров Г.Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. – М.: Машиностроение, 1972. – 352 с.

18. Никифоров Г.Д., Махортова А.Г. Условия возникновения пор при сварке алюминия и его сплавов // Сварочное производство. – 1961. – № 3. – С. 8–11.

19. Перегуда В.Л., Рабкин М.Д. О некоторых причинах снижения качества сварных соединений алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка. – 1983. – № 5. – С. 66–69.

References

1. Rabkin D.M., Ignat'ev V.G., Dovbishchenko I.V. Dugovaia svarka aliuminiia i ego splavov [Arc welding of aluminum and its alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 95 p.
2. Sidorets V.N., Bushma A.I., Khaskin V.Iu. Lazerno-mikroplazmennai svarka aliuminievykh splavov [Laser microplasma welding of aluminum alloys]. Zbirnik naukovikh prats' nauk, 2012, no. 3–4, pp. 26–31.
3. Aganaev Iu.P., Lygdenov B.D., Bil'trikov N.G., Baidaev D.Zh., Fil'chakov D.S. Sravnitel'nyi analiz kachestva tonkostennykh svarnykh soedinenii iz aliuminievykh splavov, vpol-nennykh ruchnoi i poluavtomaticheskoi argonodugovoi svarkoi. Polzunovskii al'manakh, 2014, no. 2, pp. 63–67.
4. Gureeva M.A., Ovchinnikov V.V., Minakov I.N. Metallovedenie: makro- i mikrostruktury liteinykh aliuminievykh splavov [Metallurgy: macro- and microstructures of cast aluminum alloys]. Moscow: Iurait, 2019, 254 p.
5. Ginne S.V., Naumov S.B. Materialovedenie [Materials Science]. SibGU imeni M.F. Reshetneva. Krasnoirsk, 2017, 198 p.
6. Gurevich S.M. Spravochnik po svarke tsvetnykh metallov [Guide to welding of non-ferrous metals]. Ed. V.N. Zamkova. 2nd. Kiev: Naukova dumka, 1990, 512 p.

7. Shchitsyn Iu.D. Plazmennaya svarka aluminievyykh splavov [Plasma welding of aluminum alloys]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Svarka*, 2002, no. 1, pp. 231–245.

8. Nikolaev V.A., Fridliander I.N., Arbutov Iu.P. Svarivaemye aluminievye splavy [Weldable aluminum alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 296 p.

9. Shchitsyn Iu.D., Kosolapov O.A., Shchitsyn V.Iu. Vozmozhnosti plazmennoi obrabotki metallov tokom obratnoi poliarnosti [Possibilities of plasma treatment of metals with reverse polarity current]. *Svarka i diagnostika*, 2009, no. 2, pp. 42–45.

10. Shchitsyn Iu.D. Plazmennyye tekhnologii v svarochnom proizvodstve [Plasma technologies in welding production]. *Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. Perm'*, 2004, part 1, 73 p.

11. Shchitsyn Iu.D., Sinani I.L., Belinin D.S., Kuchev P.S., Shchitsyn V.Iu. Plazmennaya svarka aluminievyykh splavov po-vyshennykh tolshchin [Plasma welding of high thickness aluminum alloys]. *Tiazheloe mashinostroenie*, 2014, no. 1, pp. 27–31.

12. Redchits A.V., Ovchinnikov V.V. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti plazmennoi svarki [Improving the energy efficiency of plasma welding]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2004, no. 8, pp. 21–23.

13. Shchitsyn Yu.D., Shchitsyn V.Yu., Herold H., Weingart W. Plasma welding of aluminium alloys. *Welding International*, 2003, no. 17 (10), pp. 825–832.

14. Shchitsyn Iu.D., Kosolapov O.A., Shchitsyn V.Iu. Vozmozhnosti plazmennoi obrabotki metallov tokom obratnoi poliarnosti [Possibilities of plasma treatment of metals with reverse polarity current]. *Svarka. Diagnostika*, 2009, no. 2, pp. 42–45.

15. Shchitsyn Yu.D., Belinin D.S., Neulybin S.D. Plasma surfacing of high-alloy steel 10Cr18Ni8Ti on low-alloy steel 09Mg2Si. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 20, pp. 41103–41109.

16. Shchitsyn Iu.D., Belinin D.S., Neulybin S.D., Sinani I.L., Terent'ev S.A., Verkhorubov V.S. Plazmennaya poverkhnostnaya zakalka stali 38Kh2N2MA na tokakh priamo i obratnoi poliarnosti [Plasma surface hardening of 38Cr2Ni2MoA steel with forward and reverse polarity currents]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 100–113.

17. Nikiforov G.D. Metallurgiya svarki plavle-niem aluminievyykh splavov [Fusion welding metallurgy of aluminum alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1972, 352 p.

18. Nikiforov G.D., Makhortova A.G. Usloviya vozniknoveniya por pri svarke aluminii i ego splavov [Conditions of pores in welding aluminum and its alloys]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1961, no. 3, pp. 8–11.

19. Pereguda V.L., Rabkin M.D. O nekotorykh prichinakh snizheniya kachestva svarykh soedinenii aluminievyykh splavov [Some causes of decreasing quality of welded joints of aluminum alloys]. *Avtomaticheskaya svarka*, 1983, no. 5, pp. 66–69.

Получено 18.02.2021

Опубликовано 29.03.2021

Сведения об авторах

Белинин Дмитрий Сергеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: 5ly87@mail.ru.

Щицын Юрий Дмитриевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, завкафедрой сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: shicin@pstu.ru.

Никулин Роман Германович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: nikromonger.ro@gmail.com.

Ольшанская Татьяна Васильевна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: tvob66@rambler.ru.

Загребин Дмитрий Сергеевич (Киров, Россия) – инженер-конструктор, технолог 3-й категории Вятского машиностроительного предприятия «АВИТЕК», e-mail: zagrebin@laserintech.ru.

Пичкалев Максим Вячеславович (Пермь, Россия) – научный сотрудник лаборатории прецизионных технологий в сельском хозяйстве Пермского научно-исследовательского института сельского хозяйства ПФИЦ Уральского отделения РАН, e-mail: pniish@rambler.ru.

About the authors

Dmitry S. Belinin (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production, Metrology and Material Technology, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: 5ly87@mail.ru.

Yuri D. Shchitsyn (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Welding Production, Metrology and Material Technology, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: shicin@pstu.ru.

Roman G. Nikulin (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Production, Metrology and Material Technology, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: nikromonger.ro@gmail.com.

Tatyana V. Olshanskaya (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Material Technology, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: tvob66@rambler.ru.

Dmitry S. Zagrebin (Kirov, Russian Federation) – Design Engineer, Technologist of the 3rd category, Vyatka Machine-Building Enterprise "AVITEK", e-mail: zagrebin@laserintech.ru.

Maxim V. Pichkalev (Perm, Russian Federation) – Researcher, Laboratory of Precision Technologies in Agriculture, Perm Research Institute of Agriculture, PFIC, Ural branch of the RAS, e-mail: pniish@rambler.ru.