

ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ИЗДЕЛИЙ АТОМНОЙ ТЕХНИКИ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

© 2015

Е.М. Табакин, кандидат технических наук

Г.В. Мирошниченко, инженер

А.В. Каплин, инженер

С.А. Андреев, инженер

Государственный научный центр –

Научно-исследовательский институт атомных реакторов, Димитровград (Россия)

Ключевые слова: аргонодуговая сварка; лазерная сварка; радиоизотопные мишени; малогабаритные изделия; сварка в вакууме.

Аннотация: В статье приводятся способы и технологические приемы, позволяющие повысить качество сварных соединений малогабаритных изделий атомной техники, изготовленных из алюминиевых сплавов. Приведено описание типовых конструкций и размеров таких изделий. Представлена особенность сварки малогабаритных изделий атомной техники – образование выплеска. Описан эксперимент, при котором определяли температуру изделия в момент выплеска. Другие особенности сварки изделий из алюминиевых сплавов связаны с наличием оксидной пленки на их поверхностях. Это приводит к появлению дефектов, нарушающих сплошность сварных соединений. Рассмотрены способы и технологические приемы, позволяющие снизить вероятность образования выплеска при сварке торцовых и кольцевых швов. Установлено, что наиболее эффективным способом будет применение импульсной лазерной сварки. Для вывода оксидной пленки за рабочее сечение сварного шва предложено выполнять проточку в посадочном месте канавки. Установлено, что при сварке ампул с толщиной стенки до 1 мм наилучший эффект достигается при глубине канавки 1 мм. Для этой же цели применено специализированное сварочное оборудование – модулятор тока УДГИ-161. Экспериментально доказано, что при использовании УДГИ-161 количество оксидных включений и пор браковочного размера уменьшается в 2 раза. Установлена зависимость вылета изделия из цанги от качества сварного соединения. Рассмотрена возможность снижения роста пор при сварке алюминия за счет снижения времени нахождения в расплавленном состоянии при применении импульсной лазерной сварки. Представлено оборудование, позволяющее производить импульсную лазерную сварку в условиях вакуума.

Одним из важных направлений деятельности АО «ГНЦ НИИАР» является производство радиоизотопной продукции. Технология производства заключается в облучении стартового материала в ядерном реакторе с последующей его переработкой и извлечением необходимого изотопа.

Облучение, как правило, выполняется в специальных ампулах трубчатой конструкции. Условия эксплуатации таких изделий предполагают постоянное действие радиационного облучения, внутреннее и внешнее избыточные давления, достигающие значений 7 МПа и 0,4...0,7 МПа соответственно, наличие термических напряжений, физико-химическое взаимодействие продуктов деления с оболочкой и т. д. Исходя из условий эксплуатации, к качеству сварных соединений таких изделий предъявляются высокие требования по герметичности и сплошности [1; 5].

Перспективными материалами для изготовления облучательных ампул показали себя сплавы алюминия благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам. К числу таких свойств следует отнести достаточную прочность, высокую теплопроводность, пластичность, минимальное сечение захвата нейтронов, исключительную стойкость к взаимодействию большого числа химических элементов [2]. Эти преимущества алюминия как реакторного конструкционного материала позволяют обеспечить высокие значения потоков нейтронов на облучаемом материале и повысить эффективность облучения [3].

Склонность к образованию пор, наличие на поверхности оксидной пленки, особенности конструкций из-

делий активных зон атомных реакторов в совокупности с жесткими требованиями к качеству сварных соединений обуславливают сложность сварки изделий из алюминиевых сплавов.

Целью данной работы является повышение качества сварных соединений изделий атомной техники из алюминиевых сплавов.

Основная масса изделий, изготавливаемых из алюминиевых сплавов, представляет собой корпус в виде цилиндрической оболочки с размещенным внутри облучаемым материалом, герметизируемый по торцам сваркой [4]. Диаметр оболочек находится в пределах 12,0...38,0 мм, толщина стенок – от 0,6 до 2 мм, длина – от 100 до 1300 мм.

Типовыми конструкциями сварных соединений являются: стыко-замковые, торцовые кольцевые и торцовые точечные соединения (рис. 1) [1; 5].

Одной из особенностей сварки малогабаритных изделий атомной техники является высокая вероятность образования выплесков расплавленного металла сварочной ванны при выполнении кольцевых швов. Например, при использовании аргонодуговой сварки неплавящимся электродом (АДС) происходит разогрев и рост давления газа, находящегося во внутреннем объеме. Это, в свою очередь, приводит к появлению выплесков металла, свищей, газовых полостей и других дефектов, нарушающих герметичность и сплошность сварных соединений [6; 7].

Для измерения температуры в свободном объеме изделия, при которой происходит выплеск, был проведен эксперимент. Образец из сплава алюминия АД1

диаметром 6,0 мм с толщиной стенки 0,5 мм со стыко-замковой конструкцией сварного соединения устанавливался в цапгу сварочного вращателя. Термопару помещали в отверстие заглушки на максимально возможную глубину, не нарушая герметичности корпуса. Режимы сварки определялись экспериментально с учетом выполнения требований к форме сварного соединения. В результате установлено, что в момент выплеска металла температура внутри корпуса составляет $(510 \pm 15)^\circ\text{C}$.

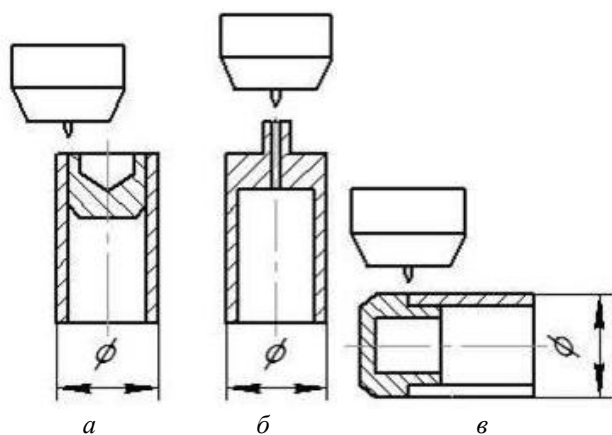


Рис. 1. Конструкции сварных соединений герметизирующих узлов:

a – торцовое кольцевое; *б* – торцовое точечное; *в* – стыко-замковое

Для того чтобы снизить вероятность образования выплесков, были разработаны способы сварки и технологические приемы, позволяющие снизить температуру и, соответственно, давление газа во внутреннем объеме.

Разработанный на предприятии способ дуговой сварки неплавящимся электродом в среде защитного газа оплавлением торца получил большое распространение при герметизации малогабаритных изделий атомной техники. В процессе сварки изделие и сварочная горелка остаются неподвижными и часть пробки совместно с торцом корпуса оплавляется [7]. Шов формируется в полусфере, опирающуюся на оплавляемую

поверхность [8]. Ограничением применения предложенного способа является то, что формирование сварного соединения возможно только для изделий диаметром менее 12 мм.

В некоторых случаях выполнение сварных соединений осуществляется без применения заглушек (рис. 1 в). При такой конструкции сварного соединения значительно упрощается операция подготовки изделия под сварку [9]. Однако для обеспечения требуемой формы сварного шва необходимо определить соотношения диаметра и толщины стенки свариваемого торца оболочки. Установлено, что для такой конструкции качественное формирование сварного соединения происходит при отношении толщины кромки к диаметру корпуса не менее 0,3 ($c/d > 0,3$), при этом максимальный диаметр не должен превышать 8 мм. К преимуществам данного способа сварки можно отнести пониженное тепловое воздействие на свариваемое изделие (рис. 2).

При сварке кольцевых соединений выплеск происходит в момент замыкания сварного шва, когда температура в корпусе максимальна [10]. Исходя из этого, было предложено производить остановку перед замыканием кольцевого шва, а завершить процесс сварки после остывания изделия. Экспериментально доказано, что применение аргонодуговой сварки кольцевым швом с остановкой позволяет снизить тепловое воздействие и вероятность образования выплеска. Максимальная температура внутри корпуса изделия на окончании процесса сварки не превышала $430...450^\circ\text{C}$.

Значительно снизить тепловое воздействие на изделие возможно с применением импульсной лазерной сварки [11]. Были проведены эксперименты, показывающие, что максимальный разогрев детали в непосредственной близости от сварного шва после сварки не превышает 100°C .

Таким образом, из рассмотренных вариантов и технологических приемов снижения вероятности образования выплесков наиболее эффективным следует считать применение лазерной сварки в импульсном режиме (рис. 2).

Помимо высокой склонности к образованию выплесков при герметизации ампул существует опасность образования пор и оксидных включений в сварном шве [12; 13]. Известно, что полностью избавиться от оксидной пленки на поверхности алюминиевых

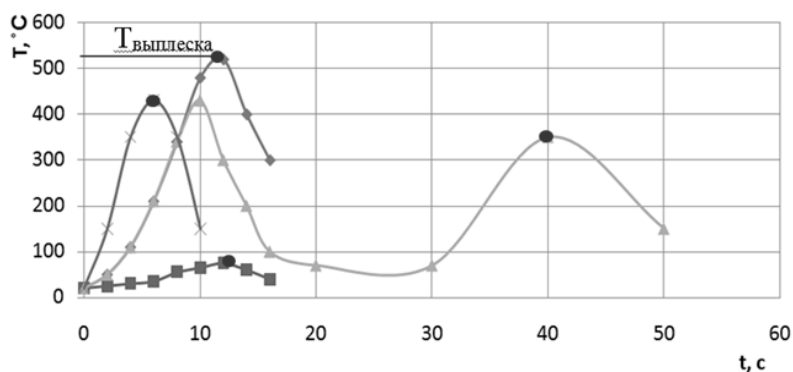


Рис. 2. Изменение температуры при герметизации капсулы источника способами:
 ■ – лазерной импульсной сварки, × – АДС оплавлением торца, ◆ – АДС кольцевым швом,
 ▲ – АДС кольцевым швом с остановкой; ● – завершение процесса сварки

сплавов практически невозможно из-за высокой скорости ее образования. Так как при сварке разрушение оксидной пленки на закрытых поверхностях стыковых соединений затруднено [14; 15], была разработана конструкция стыко-замкового кольцевого соединения с применением канавки, выполненной на посадочном месте заглушки (рис. 3 а). Наличие такой канавки позволяет вытеснить неразрушенную оксидную пленку за рабочее сечение сварного шва (рис. 3 б). Было установлено, что с наибольшей вероятностью такого эффекта при сварке ампул с толщиной стенки до 1 мм можно достичь при глубине канавки b , равной 1 мм (рис. 3 в). Изменение глубины канавки в большую сторону может привести к нарушению формы сварного шва. Такая конструкция сварного соединения применима и при лазерной сварке, и при АДС.

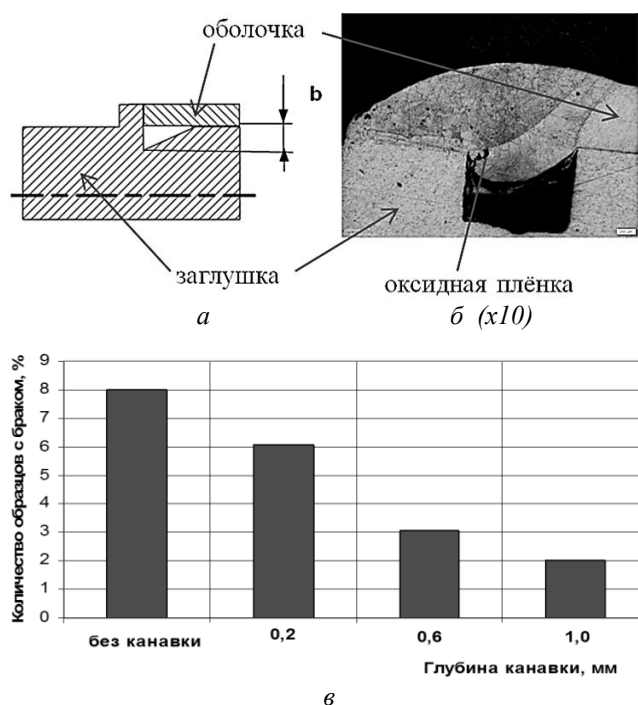


Рис. 3. Стыко-замковое соединение с канавкой:

а – конструкция соединения;

б – макроструктура соединения с канавкой (АДС);

в – влияние глубины канавки на количество дефектов

Для уменьшения влияния оксидной пленки на качество сварных соединений разработано оборудование УДГИ-161 – модулятор сварочного тока. Модулятор предназначен для дуговой сварки неплавящимся электродом деталей малой толщины из алюминия и его сплавов переменным прямоугольным током с программируемым алгоритмом его изменения.

Положительный эффект импульсного режима АДС при использовании модулятора достигается за счет колебания расплава сварочной ванны. В результате таких колебаний оксидная пленка заворачивается в спираль или принимает компактную форму (рис. 4).

Была проведена сравнительная оценка качества швов, выполненных АДС в импульсном режиме с использованием модулятора УДГИ-161 и стационарной

дугой переменного прямоугольного тока. Анализ результатов показал снижение примерно в 2 раза количества оксидных включений и пор браковочного размера при использовании модулятора тока.

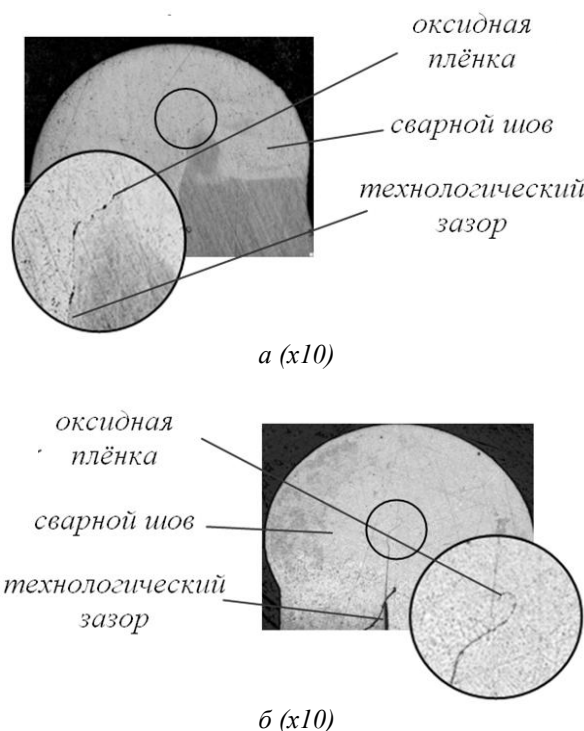


Рис. 4. Макроструктура торцового сварного соединения:

а – АДС переменным прямоугольным током;

б – АДС модулятором в импульсном режиме

Поскольку алюминий и его сплавы обладают высокой теплопроводностью, значительное влияние на формирование сварного шва оказывает отвод тепла от изделия в процессе сварки медной зажимной цангой [16]. Изменить это влияние можно вылетом изделия из цанги h . При аргонодуговой сварке на одних и тех же режимах уменьшение величины вылета приводит к непроплавлению, а при больших – к нарушению формы шва, наплывам. Исследования влияния вылета изделий из цанги выполняли для ампул диаметром 12 и 16 мм (рис. 5). Конструкция сварного соединения – стыко-замковое.

Ограничение роста пор при сварке алюминия достигается за счет уменьшения нахождения сварочной ванны в расплавленном состоянии [14; 17]. Как показали исследования, кратковременный импульсный цикл при лазерной сварке, равный 4 мс, сокращает рост пор до размеров меньше предельно допустимых. Исследование сварного шва на электронном микроскопе при увеличении $\times 10000$ показало наличие мелких пор, размер которых не превышал 1 мкм.

В ряде случаев в атомной технике сварку изделий необходимо проводить в условиях вакуума [18]. Для этих целей на предприятии была разработана установка импульсной лазерной сварки в условиях вакуума [19]. Такое оборудование было использовано при изготовлении ампул, предназначенных для накопления

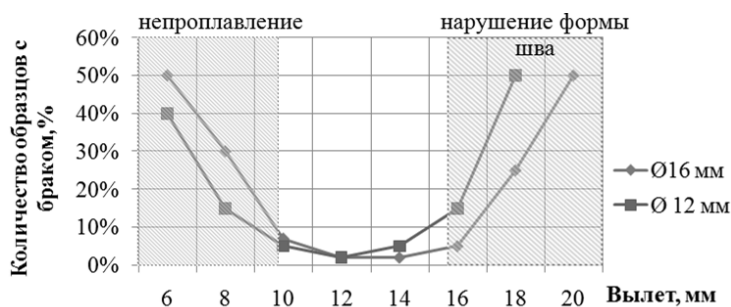


Рис. 5. Зависимость качества сварных соединений от величины вылета изделия из цанги для изделий диаметром 12 и 16 мм

радиоизотопа Мо-99 при облучении в активных зонах реакторов. Ампула представляет собой изделие плоской конструкции в виде конверта габаритными размерами 200x60 мм, состоящее из двух оболочек (стенок) из сплава алюминия АД1, толщиной 0,25 мм и расположенным между ними сердечником из алюминий-вольфрамовой композиции толщиной 2 мм (рис. 6).

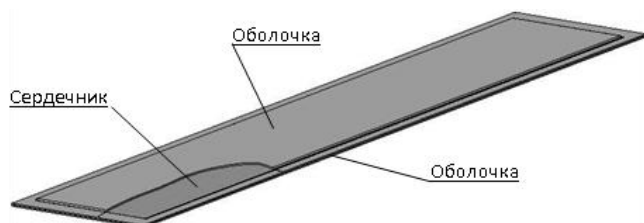


Рис. 6. Внешний вид ампулы плоской конструкции

Перед сваркой в камере создается разряжение до $P=1 \times 10^{-2}$ мм рт. ст. Сварка изделия выполняется по периметру стенок оболочки до полной ее герметизации. Таким образом, после изъятия изделия из камеры за счет разницы давления внутри и снаружи изделия происходит прижатие стенок конверта к сердечнику и создается плотный контакт между ними. В этом случае обеспечивается безопасность эксплуатации ампулы в условиях высоких тепловых нагрузок [20].

Все представленные разработки были успешно внедрены в производство для выпуска изделий радионуклидной продукции медицинского и общепромышленного назначения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Из рассмотренных вариантов и технологических приемов снижения вероятности образования выплесков при герметизации малогабаритных изделий атомной техники из алюминиевых сплавов наиболее эффективным следует считать применение лазерной сварки в импульсном режиме.

Для вывода оксидных пленок из рабочей части стыко-замкового сварного соединения предложено выполнять проточку в посадочном месте заглушки. Для изделий с толщиной стенки до 1 мм наибольшего эффекта удается достичь при глубине канавки 1 мм. Превышение указанного размера может привести к нарушению формы шва.

Установлено, что снижение вероятности образования пор при импульсной лазерной сварке тонкостенных малогабаритных изделий из сплавов алюминия достигается за счет снижения времени нахождения сварочной ванны в расплавленном состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Кн. 1 / под ред. Ф.Г. Решетникова. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.
2. Полосков С.И., Ковешников С.П., Павлов В.Ф., Таран В.И. Особенности сварки алюминиевых сплавов стабилизированной дугой обратной полярности // Труды НИКИМТ. Т. 2. Сварка в атомной промышленности и энергетике. М.: ИздАТ, 2002. С. 266–280.
3. Ма Б.М. Материалы ядерных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1987. 194 с.
4. Производство изотопов / отв. ред. В.В. Бочкарев. М.: Атомиздат, 1973. 597 с.
5. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Кн. 2 / под ред. Ф.Г. Решетникова. М.: Энергоатомиздат, 1995. 336 с.
6. Зинковский В.И., Табакин Е.М., Фролов С.А. Сварка малогабаритных источников нейтронного излучения из калифорния // Сварка и смежные технологии: сб. докладов Всерос. научно-техн. конф. М., 2000. С. 220–225.
7. Казаков Ю.В., Костюченко Н.А., Каплин А.В., Андреев С.А. Технология дуговой сварки малогабаритных изделий атомной техники в среде повышенного давления защитного газа // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства: труды IV междунар. научно-техн. конф. (Резниковские чтения). Ч. 2. Тольятти, 2015. С. 73–80.
8. Табакин Е.М., Иванович Ю.В., Каплин А.В. Способ дуговой сварки : патент РФ на изобретение № 2533616, заяв. 11.04.2013, опубл. 22.09.2014.
9. Зинковский В.И., Крылов Е.А., Акулышев А.С. Технологические особенности дистанционной сборки малогабаритных источников нейтронного излучения из калифорния-252 : препринт / НИИАР-31. М., 1983. 16 с.
10. Иванович Ю.В., Табакин Е.М., Казаков Ю.В. Способы предотвращения образования дефектов в сварных швах корпусов малогабаритных источников ио-

- низирующих излучений // Сварка и диагностика. 2011. № 3. С. 43–47.
11. Технологические процессы лазерной обработки / под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
 12. Сварка в машиностроении. Т. 2 : справочник / под ред. А.И. Акулова. М.: Машиностроение, 1978. 463 с.
 13. Сварка и свариваемые материалы. Т. 1 : справочник / под ред. Э.Л. Макарова. М.: Metallurgiya, 1991. 526 с.
 14. Никифоров Г.Д. Metallurgiya сварки плавлением алюминиевых сплавов. М.: Машиностроение, 1972. 264 с.
 15. Банов М.Д., Казаков Ю.В., Козулин М.Г., Короткова Г.М., Корягин К.Б. Сварка и резка материалов. 6-е изд. М.: Академия, 2007. 400 с.
 16. Зинковский В.И., Шпак И.К. Качество сварных швов при герметизации трансурановых радионуклидов // Обзор. НИИАР. М.: ЦНИИатоминформ, 1989. 23 с.
 17. Редчиц В.В., Лебедев Г.Т., Вакс И.А. Оценка эффективности мер предупреждения пор в швах активных металлов при сварке плавлением различными способами // Сварочное производство. 1979. № 10. С. 12–15.
 18. Череватенко Г.А., Чистов Е.Д., Кодюков В.М. Радионуклидные источники в радиационной технике. М.: Энергоатомиздат, 1989. 279 с.
 19. Каплин А.В., Назаров А.Н., Мирошниченко Г.В., Костюченко Н.А., Табакин Е.М. Установка для импульсной лазерной сварки в условиях вакуума : патент РФ на полезную модель № 138245, заявл. 26.09.2013, опубл. 10.03.2014.
 20. Табакин Е.М., Иванович Ю.В., Каплин А.В., Андреев С.А., Назаров А.Н. Сварка изделий из перспективных конструкционных материалов исследовательских ядерных реакторов // Новые материалы для инновационного развития атомной энергетики: тезисы докладов науч. конф. Димитровград, 2014. С. 86–88.
 21. Zinkovskiy V.I., Tabakin E.M., Frolov S.A. Welding of californium small-sized neutron irradiation sources. *Sbornik докладov Vserossiyskoy nauchno-tekhn. konf. «Svarka i smezhnie tekhnologii»*. Moscow, 2000, pp. 220–225.
 22. Kazakov Yu.V., Kostyuchenko N.A., Kaplin A.V., Andreev S.A. The technology of arc welding of small-sized components for nuclear plants under the shielding gas high-pressure. *Trudy IV mezhdunarodnoy nauchno-tekhn. konf. «Teplofizicheskie i tekhnologicheskie aspekti povsheniya effektivnosti mashinostroitel'nogo proizvodstva» (Reznikovskie chteniya)*. Togliatti, 2015, vol. 2, pp. 73–80.
 23. Tabakin E.M., Ivanovich Yu.V., Kaplin A.V. *Sposob dugovoy svarki* [Arc welding method]. Patent RF, no. 2533616, 2013.
 24. Zinkovskiy V.I., Krylov E.A., Akulyshv A.S. Technological characteristics of distance mounting of californium-252 small-sized neutron irradiation sources. Moscow, 1983, 16 p. (In Russian, unpublished).
 25. Ivanovich Yu.V., Tabakin E.M., Kazakov Yu.V. Methods to prevent the defects formation in the welded joints of bodies of small-sized neutron irradiation sources. *Svarka i diagnostika*, 2011, no. 3, pp. 43–47.
 26. Grigor'yants A.G., ed. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoy obrabotki* [Technological processes of laser treatment]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2006, 664 p.
 27. Akulov A.I., ed. *Svarka v mashinostroyeni. Spravochnik* [Welding in machine engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1978, vol. 2, 463 p.
 28. Makarov E.L., ed. *Svarka i svarivaemiy materialy. Spravochnik* [Welding and welded materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991, 526 p.
 29. Nikiforov G.D. *Metallurgiya svarki plavleniem alyuminievikh splavov* [Aluminum alloys fuse welding metallurgy]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1972, 264 p.
 30. Banov M.D., Kazakov Yu.V., Kozulin M.G., Korotkova G.M., Koryagin K.B. *Svarka i rezka materialov* [Welding and cutting of materials]. 6th ed. Moscow, Akademiya Publ., 2007, 400 p.
 31. Zinkovskiy V.I., Spak I.K. Welded seams quality when sealing transuranic radionuclides. *Obzor. NIIAR*. Moscow, TsNIAtominform Publ., 1989, 23 p.
 32. Redchits V.V., Lebedev G.T., Vaks I.A. Assessment of efficiency of measures for pores prevention in the seams of active metals when using various types of fuse welding. *Svarochnoye proizvodstvo*, 1979, no. 10, pp. 12–15.
 33. Cherevatenko G.A., Chistov E.D., Kodyukov V.M. *Radionuklidnye istochniki v radiatsionnoy tekhnike* [Radionuclide sources in radiation machines]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1989, 279 p.
 34. Kaplin A.V., Nazarov A.N., Miroshnichenko G.V., Kostyuchenko N.A., Tabakin E.M. *Ustanovka dlya impulsnoy lazernoy svarki v usloviyakh vakuuma* [Plant for pulse laser welding under vacuum conditions]. Patent RF, no. 138245, 2013.
 35. Tabakin E.M., Ivanovich Yu.V., Kaplin A.V., Andreev S.A., Nazarov A.N. Welding of advanced structural materials of components for research nuclear reactors. *Tezisy докладov nauch. konf. «Noviy materialy dlya innovatsionnogo razvitiya energetiki»*. Dimitrovgrad, 2014, pp. 86–88.

REFERENCES

1. Reshetnikov F.G., ed. *Razrabotka, proizvodstvo i ekspluatatsiya teplovydelyayushchikh elementov energeticheskikh reaktorov* [Development, production and operation of heat-generating elements of power reactors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995, vol. 1, 320 p.
2. Poloskov S.I., Koveshnikov S.P., Pavlov V.F., Taran V.I. Special aspects of aluminum alloys welding using the balanced arc of reversed polarity. *Trudy NIKIMT. T. 2. Svarka v atomnoy promyshlennosti i energetike*. Moscow, Izdat Publ., 2002, pp. 266–280.
3. Ма В.М. *Materialy yadernikh energeticheskikh ustanovok* [Materials for nuclear power plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 194 p.
4. Bochkarev V.V., ed. *Proizvodstvo izotopov* [Isotopes production]. Moscow, Atomizdat Publ., 1973, 597 p.
5. Reshetnikov F.G., ed. *Razrabotka, proizvodstvo i ekspluatatsiya teplovydelyayushchikh elementov energeticheskikh reaktorov* [Development, production and operation of heat-generating elements of power reactors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995, vol. 2, 336 p.

**SPECIAL ASPECTS OF WELDING OF ALUMINUM ALLOYS COMPONENTS
FOR NUCLEAR PLANTS**

© 2015

E.M. Tabakin, candidate of technical sciences

G.V. Miroshnichenko, engineer

A.V. Kaplin, engineer

S.A. Andreev, engineer

State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors, Dimitrovgrad (Russia)

Keywords: argon-arc welding; laser welding; radioisotopic targets; small-sized components; welding in vacuum.

Abstract: The article presents the techniques and processing technologies that allow improvement of quality of welded joints of small-sized aluminum alloys components for nuclear plants. The authors give the description of standard designs and sizes of such components and show the characteristic feature of welding of small-sized components for nuclear plants – the splash formation. The article describes an experiment when the component temperature was measured during the splash. Other features of welding of aluminum alloys components are concerned with the presence of oxide film on their surfaces. It causes the defects disturbing the welded joints continuity. The authors considered the methods and processing technology that allow reduction of the probability of splash formation during the welding of edge and girth seams. The application of pulse laser welding was considered to be the most effective method. To remove the oxide film out of the throat area, the authors suggested making a cavity in the groove mounting seat. The authors found out that the best effect when welding the ampoules with a wall thickness of 1 mm is achieved in case of the groove depth of 1 mm. UDMI-161 slope controller, a special-purpose welding equipment, was used for the same purpose. The authors proved experimentally that, when using the UDMI-161, the number of oxide inclusions and pores of rejection size is reduced by half. The experiment determined the dependence of the component extension out of the collet insert on the quality of welded joint. The authors considered the possibility of reducing the growth of pores when welding aluminum through the molten state time reduction when using pulse laser welding. The article presents the equipment allowing to perform pulse laser welding under vacuum conditions.