

УДК 621.791.763.2

*А. О. Коротеев, В. П. Куликов, А. Г. Лупачев, И. И. Цыганков*

**ТЕХНОЛОГИЯ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ТОНКОЛИСТОВЫХ КОРПУСНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Al-Mg-Cu С ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ**

UDC 621.791.763.2

*A. O. Koroteyev, V. P. Kulikov, A. G. Lupachev, I. I. Tsygankov*

**PULSE ARC WELDING TECHNOLOGY FOR THIN-SHEET CASING PRODUCTS MADE FROM AL-MG-CU ALUMINUM ALLOYS WITH RECIPROCATING FILLER WIRE FEED**

**Аннотация**

Исследованы особенности и эффективность применения для сварки трудно свариваемых алюминиевых сплавов Al-Mg-Cu технологий дуговой сварки с возвратно-поступательной подачей присадочной проволоки. Проведены механические испытания с целью оценки свойств соединений и возможностей использования рассматриваемой технологии для ремонта оболочковых корпусных изделий из листового алюминия толщиной 3 мм.

**Ключевые слова:**

перенос электродного металла, импульсно-дуговая сварка алюминиевых сплавов, управление источником питания для сварки, механические испытания сварных соединений.

**Abstract**

The features and efficiency of the application of arc welding technologies with reciprocating filler wire feed have been studied for welding hard-to-weld Al-Mg-Cu aluminum alloys. Mechanical tests have been carried out in order to assess the properties of welded joints and the possibilities of using the technology in question for repair of casing products made from 3mm thick sheet aluminum.

**Keywords:**

electrode metal transfer, pulse arc welding of aluminum alloys, welding power source control, mechanical tests of welded joints.

Алюминиевые сплавы, благодаря комплексу уникальных свойств, в последнее время получают все большее распространение для изготовления конструкций.

Высокие показатели коррозионной стойкости, удельной прочности и предела текучести, хорошая тепло- и электропроводность, широкие возможности для обработки материалов и элементов конструкций резанием и фрезерованием делают такие материалы трудно заменимыми во многих отраслях, начиная ав-

томобиле- и судостроением и заканчивая пищевой промышленностью [1–3].

Наибольшее распространение при изготовлении корпусных изделий получили термоупрочняемые сплавы системы легирования Al-Mg-Cu. Хорошие показатели прочности делают их применение наиболее эффективным в элементах конструкций, воспринимающих воздействие динамических и статических, а также знакопеременных нагрузок.

Вместе с тем такие материалы обладают худшей из всех распространен-



ных сплавов алюминия свариваемостью и в целом не рекомендуются для использования в качестве элементов сварных конструкций. Это обусловлено необратимыми процессами, происходящими в зоне термического влияния в основном металле рядом с линией сплавления, приводящими к разупрочнению отдельных участков, оплавлению границ зерен и последующему резкому снижению прочности соединения. Отдельные участки этих зон после охлаждения охрупчиваются, что приводит к возникновению локальных разрушений в виде трещин. Степень разупрочнения в этом случае связана с величиной тепловложения в основной металл, в связи с чем способы сварки с минимизацией размеров зоны термического влияния являются предпочтительными, однако в традиционном виде не позволяют обеспечить требуемый уровень равнопрочности соединения, что является одной из основных проблем [2, 3].

В последнее время часто возникает необходимость выполнения ремонтных работ корпусных изделий, изготовленных из сплавов Al-Mg-Cu, что вызывает острую необходимость решения ряда актуальных вопросов, связанных с разработкой технологии их сварки, обладающей необходимой степенью автоматизации, высокой производительностью и максимально возможными показателями качества и эксплуатационных свойств сварного соединения.

Традиционно, как и для подавляющего большинства конструкционных металлических материалов, сварка является основным способом создания неразъемных соединений из широкого круга алюминиевых сплавов. Наиболее распространенным из дуговых способов на сегодняшний день является сварка неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона. Этот способ, благодаря инертности защитной газовой среды, считается наиболее универсальным для большинства конструкционных материалов и сплавов цветных металлов и

позволяет получить сварное соединение высокого качества с минимальными потерями легирующих элементов, что обусловлено отсутствием окислительных газов в защитной атмосфере. Сварка может выполняться как с присадочным металлом, так и без него, но в подавляющем большинстве случаев – в ручном варианте. С одной стороны, это позволяет обеспечить высокое качество сварного соединения, т. к. скорость сварки невелика и за счет инертности атмосферы в зоне горения дуги отсутствуют не только нежелательные газовые примеси в виде окислительных активных газов из атмосферы и продуктов диссоциации паров воды с выделением свободного водорода, но и продукты металлургических процессов в виде окислов и неметаллических включений, являющихся распространенной причиной возникновения многих дефектов. С другой стороны, низкая скорость сварки приводит к существенному повышению трудоемкости выполнения сварного соединения, что делает этот способ непроектируемым и ограничивает его применение в промышленных масштабах. Кроме того, способ характеризуется достаточно большой зоной термического влияния, что, как было указано ранее, выступает нежелательным фактором при сварке рассматриваемых материалов.

Перспективным направлением развития технологических процессов применительно к рассматриваемым сплавам, чувствительным к термическому циклу сварки, является максимальное снижение тепловложения в основной металл.

На сегодняшний день большинство технологий сварки разработано для диапазона параметров режима, соответствующего переносу электродного металла с короткими замыканиями дугового промежутка. Современные подходы к процессам цифрового управления источниками питания, а также разработки в области дуговой сварки с управляемым переносом металла позво-



ляют осуществлять в реальном времени контроль за быстропротекающими процессами каплеобразования, контролировать и регулировать величину сварочного тока в момент короткого замыкания с целью минимизации разбрызгивания металла и снижения тепловложения. При этом для перехода жидкой капли расплавленного металла в сварочную ванну используется реверсивное движение присадочной проволоки в противоположном направлении с частотами около 70...80 Гц, что обеспечивает эффективное отделение капли даже в отсутствие горения дуги при коротком замыкании. Такая технология нашла применение в системе Fronius CMT и используется при сварке тонкостенных изделий. Вместе с тем практического применения технология на предприятиях Республики Беларусь не находит.

В статье приведены результаты исследований по разработке технологии автоматической сварки плавящимся электродом с реверсивной подачей при-

садочной проволоки элементов обечайки корпусных изделий, к которым предъявляются повышенные требования по обеспечению гарантированной защиты внутренней части от попадания брызг расплавленного металла и ограничению максимальной температуры нагрева внутренних поверхностей.

Химический состав свариваемого изделия представлен в табл. 1. Анализ проводился на оптико-эмиссионном спектрометре Solaris GNR SCP по результатам шести измерений.

Установлено, что сплав относится к системе легирования Al-Mg-Cu с незначительными добавками Si и Mn.

Для определения механических свойств материала корпуса изделия были проведены испытания на статическое растяжение на разрывной машине РГМ1000М. Установлено, что временное сопротивление разрыву образцов составляет ориентировочно 440...500 МПа (табл. 2).

Табл. 1. Химический состав корпуса исследуемого изделия

Номер измерения	Al	Cu	Mg	Mn	Si
1	93,57	3,90	1,87	0,31	0,08
2	93,16	3,94	2,10	0,31	0,18
3	93,22	3,99	1,96	0,33	0,16
4	93,11	3,92	2,45	0,36	0,04
5	93,11	3,79	2,66	0,32	0,32
6	93,29	3,93	1,98	0,34	0,13
Среднее	93,24	3,91	2,17	0,32	0,15

Табл. 2. Результаты механических испытаний на статическое растяжение элементов основного металла корпуса изделия

Образец	Размер образца, мм			Результат испытаний Разрушающая нагрузка / Временное сопротивление разрыву
	Ширина	Толщина	Площадь поперечного сечения	
О-1	10,8	2,2	23,76	11930 Н / 502,1 МПа
О-2	9,8	2,2	21,56	9560 Н / 443,4 МПа
О-3	11,2	2,2	24,64	11760 Н / 477,3 МПа



Для проведения экспериментальных исследований по разработке технологии сварки корпуса была разработана экспериментальная установка, включающая в себя сварочный робототехнологический комплекс FANUC, интегрированный с оборудованием Fronius CMT Trans Puls Synergic (TPS) 3200.

Для сварки элементов рассматриваемого изделия использовались проволоки типа Св-АМг5 по ГОСТ 7871–75 (ER 5356 по AWS A5.10) и типа Св-АК5 по ГОСТ 7871–75 (ER 4043 по AWS A5.10). Химический состав проволок представлен в табл. 3. Выбор системы легирования проволок Al-Mg и Al-Si основан на положении о том, что

при сварке материалов повышенной прочности, склонных к возникновению трещин в металле шва и околошовной зоны, необходимо обеспечить максимальную пластичность наплавленного металла шва при соблюдении требуемого уровня прочности. При этом установлено, что для выполнения прихваток, особенно в случае, если они выполняются неплавящимся электродом в аргоне на предварительных операциях сборки изделий под автоматическую сварку, предпочтительным является использование проволок и присадочных прутков, легированных кремнием, что позволяет минимизировать вероятность возникновения трещин в кратере шва.

Табл. 3. Химический состав используемых проволок

Марка проволоки	Содержание элемента, %								
	Cu	Si	Mn	Fe	Zn	Be	Mg	Ti	Cr
Св-АМг5 (ГОСТ 7871–75)	0,05 max	0,4 max	0,5...0,8	0,40 max	0,2 max	0,002...0,005	4,8...5,8	0,1...0,2	–
ER 5356 (AWS A5.10)	0,10 max	0,25 max	0,05...0,20	0,40 max	0,10 max	0,0003 max	4,5...5,5	0,06...0,20	0,05...0,20
Св-АК5 (ГОСТ 7871–75)	0,2 max	4,5...6,0	–	0,6 max	0,1 max	–	–	0,1...0,2	–
ER 4043 (AWS A5.10)	0,30 max	4,5...6,0	0,05 max	0,80 max	0,10 max	0,0003 max	0,05 max	0,20 max	–

Исследуемый образец представлял собой корпус цилиндрической формы с кольцевым швом. Толщина корпуса – 3 мм. С технологической точки зрения и условий ремонта наиболее предпочтительным является сварка горизонтального шва (ось изделия располагается вертикально). Выбор пространственного положения сварки обусловлен отсутствием необходимости учета смены положения сварочной горелки относительно изделия и горизонта, что неизбежно потребовало бы корректировки значений параметров режима. В случае горизонтального шва перемещение горелки не связано с изменением пространственного положения сварного соединения, что существенно упрощает систему управле-

ния параметрами режима.

Одним из важнейших вышеописанных условий выполнения соединения являлось предотвращение попадания брызг расплавленного металла во внутреннюю полость корпуса. В связи с этим были рассмотрены два варианта технологии сварки: вариант с использованием подкладного кольца (остающаяся подкладка) из алюминиевых сплавов различной системы легирования и вариант технологии сварки без зазора.

Использование подкладного кольца при сварке алюминиевых сплавов является технологически эффективным способом обеспечения гарантированного проплавления кромок свариваемых деталей за счет несколько более высо-



ких значений силы сварочного тока и напряжения на дуге. Вместе с тем такая технология характеризуется повышенной трудоемкостью сборки изделия, необходимостью прихватки кольца к свариваемым кромок и большой вероятностью возникновения несплавлений в корневой части шва сварного соединения. Это обусловлено спецификой разрушения окисной пленки на поверхности алюминиевых сплавов и ориентацией оси сварочной дуги относительно стыка. В случае горения дуги между одной из кромок и присадочной проволокой разрушение пленки на поверхности подкладного кольца затруднено, происходит лишь эффект смачивания жидким алюминием этой поверхности без образования химических связей и объемного взаимодействия [4].

Наиболее эффективным способом является сварка встык без зазора. Возникающие при этом трудности, связанные с невозможностью контроля глубины проплавления, компенсируются цифровым управлением источником питания, позволяющим отслеживать по изменению длины дуги моменты превышения проплавления и компенсировать это снижением скорости подачи присадочной сварочной проволоки [4].

Сварка осуществлялась в автоматическом режиме с использованием системы СМТ в двух вариантах технологии – в стандартном и импульсном режимах.

Перед экспериментальными работами по сварке корпуса выполнялась его резка. Важный вопрос в этом случае – выбор места реза. Существует два подхода к этой проблеме: резка по основному металлу корпуса и по ранее выполненному шву заводского соединения (если оно имеется и работы производятся в ремонтных целях). На взгляд авторов, наиболее предпочтительной является резка по шву заводского соединения, если таковое имеется. Это позволя-

ет использовать эффект наплавленных кромок при сварке. При этом присадочный металл, отличающийся по химическому составу от основного материала на линии сплавления, контактирует с так называемым переходным слоем, что позволяет несколько снизить вероятность возникновения трещин и повысить эксплуатационные характеристики сварного соединения.

Свариваемые кромки подготавливались механическим способом при помощи зачистных шлифовальных машинок и металлических щеток для уменьшения толщины окисной пленки, а также для снижения количества загрязнений в ней. Перед сваркой выполнялись обезжиривание кромок при помощи растворителя, протирка и сушка.

Внешний вид сварного соединения, полученного по разрабатываемой технологии, а также образцов для проведения испытаний на статическое растяжение и статический изгиб представлен на рис. 1–3.

Целью механических испытаний была оценка прочностных и пластических свойств сварного соединения. Испытания на статическое растяжение проводились в соответствии с СТБ ЕН 895–2002. Для проведения испытаний использовалась разрывная машина РГМ 1000 М1 с компьютерной системой регистрации параметров и построением диаграммы растяжения.

Результаты испытаний сварных соединений, полученных с применением предлагаемой разрабатываемой технологии и заводских соединений, представлены в табл. 4–6 и на рис. 4.

Механические испытания на статический изгиб проводились в соответствии с СТБ ЕН 910–2002. Образцы изгибались в направлении лицевой поверхности наплавленного металла шва (тип образца – FBB). Результаты испытаний представлены в табл. 6.





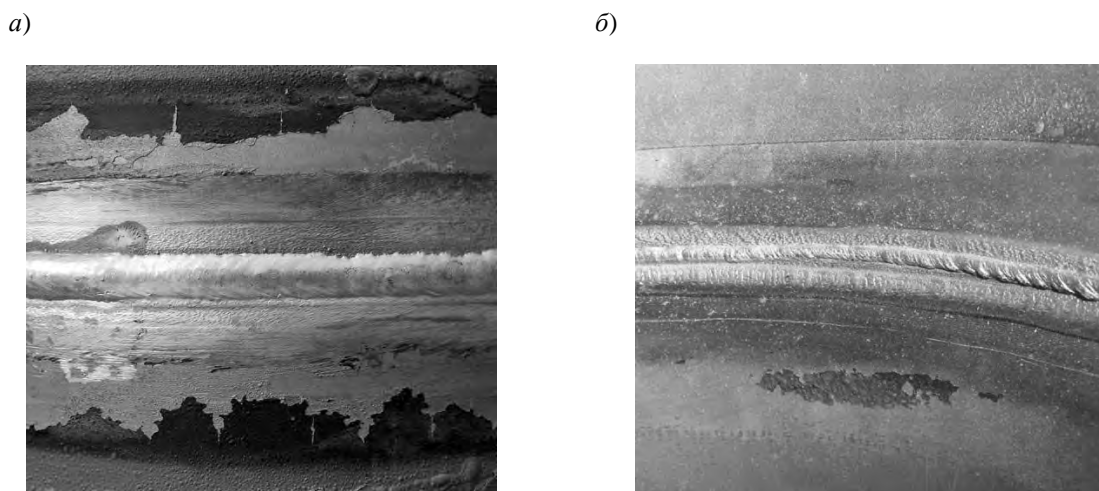


Рис. 1. Внешний вид сварного соединения: *а* – наружная поверхность шва; *б* – внутренняя поверхность шва (по краям обратного валика наблюдаются валики заводского сварного соединения)

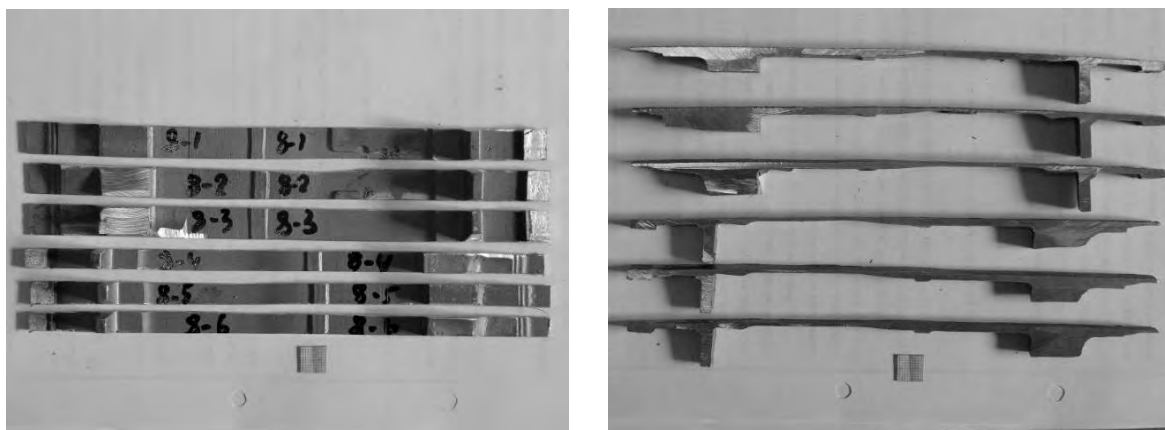


Рис. 2. Внешний вид образцов для проведения механических испытаний с заводским сварным соединением

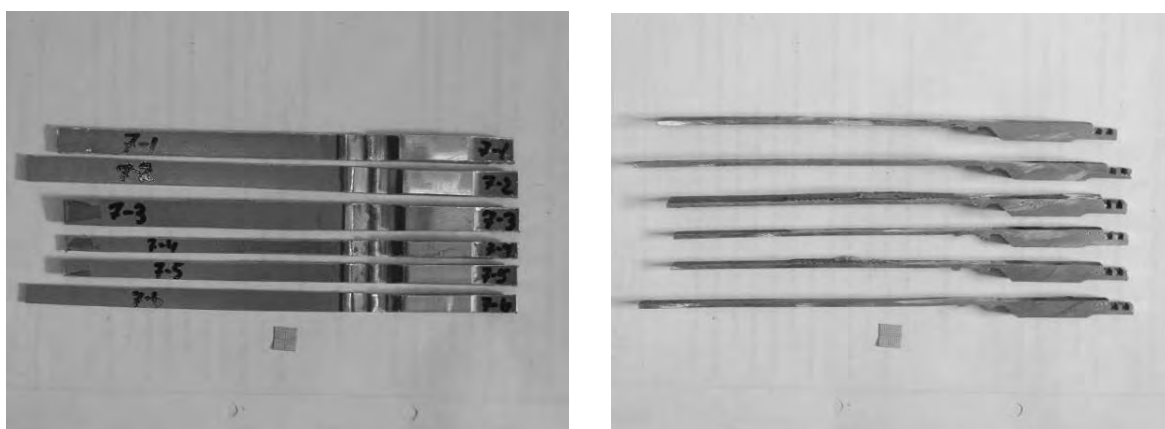


Рис. 3. Внешний вид образцов для проведения механических испытаний со сварным соединением, полученным с использованием предлагаемой технологии ремонта

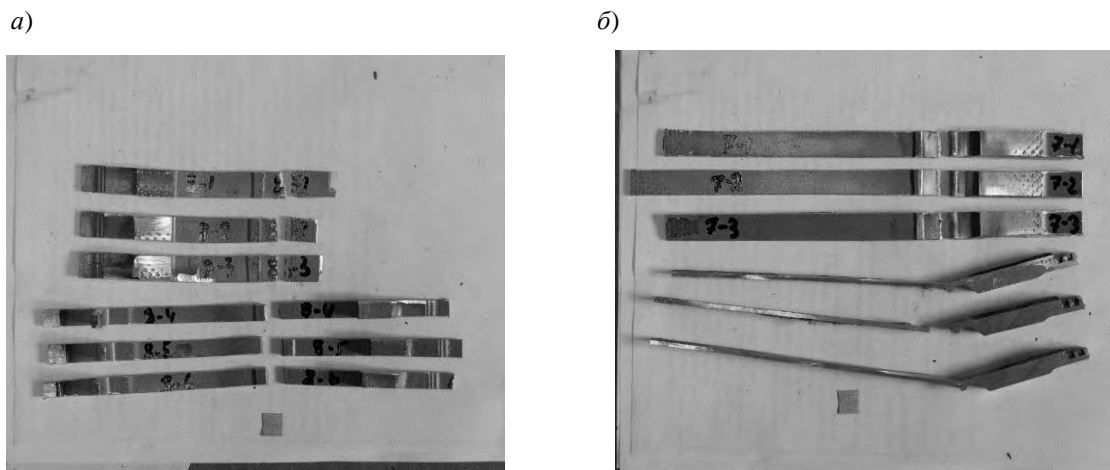


Рис. 4. Внешний вид образцов после проведения механических испытаний на статическое растяжение и статический изгиб: *а* – испытания заводского сварного соединения; *б* – испытания соединения, полученного по предлагаемой технологии

Табл. 4. Результаты механических испытаний на статическое растяжение образцов, сваренных по предлагаемой технологии

Образец	Размер образца, мм			Результат испытаний Разрушающая нагрузка / Временное сопротивление разрыву Место разрыва образца
	Ширина	Толщина	Площадь поперечного сечения	
7-1	11,5	2,0	23,0	9670 Н / 420,4 МПа (Н/мм <sup>2</sup> ) ЗТВ
7-2	11,5	2,0	23,0	8750 Н / 380,4 МПа (Н/мм <sup>2</sup> ) ЗТВ
7-3	12,1	2,0	24,2	8780 Н / 362,2 МПа (Н/мм <sup>2</sup> ) ЗТВ

Табл. 5. Результаты механических испытаний на статическое растяжение заводского сварного соединения

Образец	Размер образца, мм			Результат испытаний Разрушающая нагрузка / Временное сопротивление разрыву Место разрыва образца
	Ширина	Толщина	Площадь поперечного сечения	
8-1	12,0	2,51	30,1	14230 Н / 472,4 МПа (Н/мм <sup>2</sup> ) ЗТВ
8-2	11,0	2,5	27,5	12260 Н / 445,8 МПа (Н/мм <sup>2</sup> ) ЗТВ
8-3	11,9	2,5	29,7	13700 Н / 460,5 МПа (Н/мм <sup>2</sup> ) ЗТВ

Табл. 6. Результаты механических испытаний на статический изгиб

Образец (тип)	Размер образцов для испытаний			
	Ширина образца, мм	Толщина образца, мм	Угол загиба, град	Тип испытания
7-4	7,3	2,0	15	FBB
7-5	8,8	2,0	15	FBB
7-6	8,6	2,0	15	FBB
8-4	7,6	2,5	10	FBB
8-5	7,7	2,5	10	FBB
8-6	7,8	2,5	10	FBB

### Выводы

По результатам проведения механических испытаний образцов, вырезанных из корпуса изделия, на статическое растяжение и статический изгиб установлено следующее.

Угол загиба образцов, содержащих элементы сварного шва, выполненного по заводской технологии сварки (образцы 8-4, 8-5, 8-6), составил 10 град (см. табл. 6). При этом разрушение происходит по зоне сплавления шва с основным металлом без видимого развития трещины,

скачкообразно и носит хрупкий характер, что свидетельствует о его чрезвычайно низкой пластичности.

При испытании на статический изгиб образцов, содержащих элементы шва, полученного по разрабатываемой технологии, угол загиба составил 15 град. При этом внутренняя поверхность шва (обратная сторона валика шва) не удалялась с целью имитации реальных условий выполнения сварного соединения (рис. 5). Разрушение происходит с момента возникновения трещины и её распространения по сечению образца.

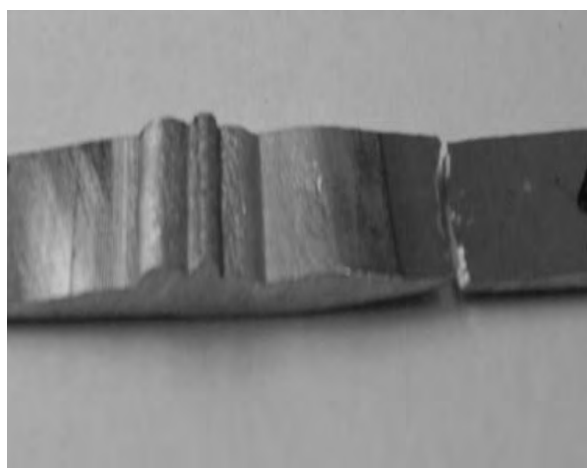


Рис. 5. Образец после испытаний на статическое растяжение

Наиболее вероятной причиной такого характера разрушения является концентрация напряжений по линии

сплавления со стороны незачищенного обратного валика шва.

При испытании на статическое





растяжение элемента изделия, содержащего сварной шов без удаления выпуклости с обратной стороны валика, выполненный по разрабатываемой технологии, установлено, что разрушение происходит по основному металлу в удалении от зоны сварки, что свидетельствует о достаточной прочности полученного соединения применительно к реальным условиям эксплуатации (см. рис. 5).

Временное сопротивление разры-

ву образцов, содержащих элементы сварного шва, выполненного по разрабатываемой технологии, при испытаниях на статическое растяжение составило 360...420 МПа. Разрушение происходит по линии сплавления.

На основании проведенных исследований разработана технология сварки, обеспечивающая отсутствие перегрева тонкостенных обечаек и исключая попадание брызг расплавленного металла внутрь изделия.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Куликов, В. П.** Технология сварки плавлением и термической резки: учебник / В. П. Куликов. – Минск : Новое знание; Москва : ИНФРА-М, 2016. – 463 с.: ил.
2. **Никифоров, Г. Д.** Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов / Г. Д. Никифоров. – Москва: Машиностроение, 1972. – 264 с.
3. **Фролов, В. В.** Дуговая сварка алюминия / В. В. Фролов. – Харьков: Технология, 2003. – 92 с.
4. **Цыганков, И. И.** Особенности формирования обратного валика стыкового сварного соединения на тонкостенных корпусах конусно-цилиндрической формы из сплавов системы Al-Mg-Cu / И. И. Цыганков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 174.

*Статья сдана в редакцию 20 марта 2020 года*

**Артур Олегович Коротеев**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-298-45-49-70.

**Валерий Петрович Куликов**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

**Александр Григорьевич Лупачев**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

**Игорь Иванович Цыганков**, Белорусско-Российский университет.

**Artur Olegovich Koroteyev**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-298-45-49-70.

**Valery Petrovich Kulikov**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.

**Alexander Grigoryevich Lupachev**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

**Igor Ivanovich Tsygankov**, Belarusian-Russian University.