

УДК 621.791.754:669.715
DOI: 10.12737/24206

В.В. Овчинников¹, д.т.н., **А.М. Дриц**², к.т.н.,
И.А. Курбатова¹, к.т.н., **М.А. Гуреева**¹, к.т.н.
(¹ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»,
107023, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38;
²ЗАО «Алкоа-СМЗ», 123317, Москва, Краснопресненская набережная, д. 18)
E-mail: vikov1956@mail.ru

Технология сварки алюминиевого деформируемого сплава 1151

Представлены результаты исследований склонности к образованию горячих трещин при сварке сплава 1151 в сравнении со сплавами 1201 и 1460. Характерной особенностью сплава 1151 является возможность распространения горячих трещин, как по металлу шва, так и по зоне сплавления шва с основным металлом. Прочность сварных соединений сплава 1151, выполненных сваркой плавлением и сваркой трением с перемешиванием, превосходит прочность сплавов 1201 и 1460. Коррозионная стойкость сварных соединений сплава 1151 существенно превосходит коррозионную стойкость соединений сплава 1201.

Ключевые слова: аргонодуговая сварка; сварка трением с перемешиванием; деформируемые алюминиевые сплавы; сварные соединения; сварочная проволока; свариваемость; горячие трещины; испытания при повышенных температурах; показатели прочности; коррозия под напряжением.

V.V. Ovchinnikov¹, D. Eng., **A.M. Drits**², Can. Eng.,
I.A. Kurbatova¹, Can. Eng., **M.A. Gureeva**¹, Can. Eng.
(¹FSBEI HE "Moscow Polytechnic University", 38, Bolshaya Semyonovskaya Str., 107023, Moscow
²"Alcoa-SMZ", 18, Krasnopresnenskaya Embankment, Moscow 123317)

Technology in welding of wrought aluminum alloy 1151

The results of the investigations of susceptibility to hot cracks formation at welding of alloy 1151 in comparison with alloys 1201 and 1460 are shown. The character of alloy 1151 is a possibility of hot crack propagation both through a metal seam and through the area of a seam fusion with basic metal. The durability of welds of alloy 1151 carried out by fuse welding and friction welding with blending exceeds the durability of alloys 1201 and 1460. Corrosion resistance of welds of alloy 1151 exceeds considerably the corrosion resistance of compositions of alloy 1201.

Keywords: argon-arc welding; friction welding with blending; wrought aluminum alloys; welds; welding wire; weldability; hot cracks; tests at increased temperatures; durability indices; stress corrosion.

Свариваемый алюминиевый сплав 1151 относится к группе деформируемых термически упрочняемых материалов системы алюминий – медь – магний. Кроме указанных элементов сплав содержит марганец, титан, кобальт (табл. 1). Он предназначен для конструкций, работающих в условиях повышенных температур [1].

Известно, что при аргонодуговой сварке

вольфрамовым электродом существенную проблему представляет повышенная склонность сплава 1151 к образованию горячих трещин. Наличие таких дефектов затрудняет получение герметичных сварных соединений, что ограничивает применение сплава в конструкциях ответственного назначения [2].

В настоящей статье приведены результаты сравнительных исследований свариваемости

сплавов 1151, 1201 и 1460. В качестве критериев оценки свариваемости выбраны стойкость металла против образования горячих трещин, механические свойства соединений

при комнатной, пониженных и повышенных температурах, а также склонность металла к коррозионному растрескиванию под напряжением.

1. Химический состав исследуемых сплавов

Сплав	Легирующие элементы, % мас.									Примеси, % мас.	
	Cu	Mg	Li	Mn	Ti	V	Zr	Co	Be	Fe	Si
1151	5,41	1,79	–	0,42	0,093	0,01	–	0,035	0,003	0,20	0,03
1201	6,11	0,015	–	0,13	0,08	0,09	0,18	–	–	0,20	0,10
1460	2,92	0,06	1,92	0,08	0,1	0,01	0,1	–	–	0,20	0,15

Материалы и методы исследований. Для исследований использовали листы сплавов 1151, 1460 и 1201 толщиной 4 мм в состоянии после полной термической обработки, включающей закалку и искусственное старение. Механические свойства листов исследуемых сплавов приведены в табл. 2.

2. Механические свойства листов исследуемых сплавов при комнатной температуре

Сплав	Предел прочности σ_B , МПа	Относительный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
1151	448...463 455	315...319 316	17,5...20,4 19,1
1201	420...433 425	335...350 345	9,5...10,8 10,1
1460	556...568 560	465...480 470	6,5...7,8 7,0

Аргонодуговую сварку технологических проб типа «рыбий скелет», предназначенных для изучения образования горячих трещин, выполняли на режимах, представленных в табл. 3.

3. Режимы сварки образцов «рыбий скелет» без использования присадочной проволоки

Ток сварки I_{CB} , А		
Сплав 1151	Сплав 1201	Сплав 1460
160...165	175...180	145...150
<i>Примечание.</i> При сварке образцов «рыбий скелет» с присадочной проволокой сварочный ток увеличивали на 25... 30 А.		

Для оценки свойств сварных соединений при пониженных и повышенных температурах из исследуемых сплавов выполнялись стыковые соединения методом сварки трением с перемешиванием. Для сварки трением с перемешиванием (СТП) стыковых соединений применялся горизонтальный фрезерный станок Agile CS 1000 оснащенный специальным инструментом для СТП. Инструмент выполнен в виде державки со сменным наконечником, состоящим из заплечика и индентора, на

поверхности которого выполнена винтообразная канавка и лыски глубиной 0,3..0,4 мм. Индентор диаметром 4,5 мм имеет высоту 3,8 мм для гарантированного соединения свариваемых листов. Частоту вращения инструмента варьировали в пределах 720...900 об./мин, а скорость сварки – в пределах 200...250 мм/мин [3].

Листовые заготовки подвергались общему химическому травлению в щелочи с последующим осветлением в 30 %-ном растворе азотной кислоты. Непосредственно перед сваркой торцы свариваемых кромок у поверхности с лицевой и обратной стороны шва на расстоянии 15 мм от торцов зачищали шабером. Сварочная проволока подвергалась химическому травлению в щелочи с последующим осветлением в 30 %-ном растворе азотной кислоты.

Образцы из основного металла и сварных соединений для механических испытаний, испытания на усталость, металлографических исследований и коррозионных испытаний изготавливались в соответствии с ГОСТ 1497–84, ГОСТ 14019–68, ГОСТ 6996–66, ГОСТ 9.021–74, ГОСТ 9.019–74.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты экспериментов показали, что показатель склонности к горячему растрескиванию при сварке исследуемых сплавов без использования присадочной проволоки примерно одинаков и равен $A = 41...61\%$ (табл. 4).

4. Показатель горячеломкости, длина и характер распространения трещин при сварке листов из сплавов 1151, 1201 и 1460

Сплав	Проволока	Длина трещин, мм	Показатель горячеломкости A , %	Место расположения трещин
1151	Без присадки	$\frac{52...60}{55}$	$\frac{38...44}{41}$	Середина шва, зона сплавления
	Св1177	$\frac{9...21}{13}$	$\frac{6...18}{11}$	
	Св1201	$\frac{22...31}{26}$	$\frac{19...29}{25}$	Зона сплавления
1201	Без присадки	$\frac{32...64}{45}$	$\frac{26...56}{42}$	Середина шва
	Св1201	$\frac{26...45}{38}$	$\frac{19...35}{29}$	
1460	Без присадки	$\frac{79...90}{82}$	$\frac{58...66}{61}$	Середина шва
	Св1177	$\frac{22...30}{25}$	$\frac{19...29}{24}$	
	Св1201	$\frac{46...65}{55}$	$\frac{27...37}{32}$	

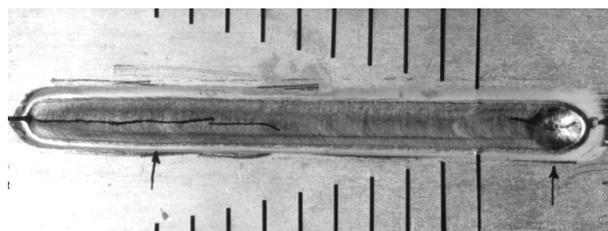
Установлено, что особенностью горячего растрескивания сплава 1151 является то, что магистральная трещина может образовываться как в центральном участке шва, так и в зоне сплавления (рис. 1, а, б). Трещины на образцах из сплавов 1201 и 1460 появляются только посередине шва (рис. 1, в, г).

Для снижения горячеломкости алюминиевых сплавов эффективно использование присадочных проволок регламентированного химического состава [4]. Для сплава 1151 были опробованы присадочные проволоки Св1201 и Св1177, отличающиеся по содержанию меди; кроме того, проволока Св1177 содержит дополнительно магний.

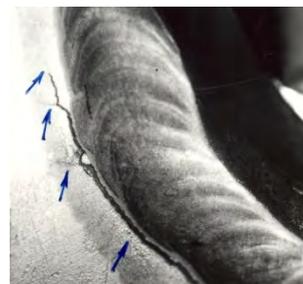
Анализ полученных результатов показал, что при сварке образцов сплава 1151 с использованием присадочной проволоки Св1177 характер распространения трещин неоднозначен. Трещина может располагаться как посередине шва, так и по зоне сплавления. В случае использования присадочной проволоки Св1201 при сварке образцов сплава 1151 трещина, как правило, наблюдается в зоне сплавления.

При сварке сплава 1201 (присадка Св1201) трещины выявлены только посередине шва. Аналогичный результат получен для сплава 1460 при использовании присадочных проволок Св1177 и Св1201.

Показатель склонности к образованию горячих трещин при сварке сплава 1151 с применением присадочной проволоки Св1177 снижается в среднем в 3 – 4 раза по сравнению со сваркой без присадки, в случае использования проволоки Св1201 – примерно в 2 раза (рис. 2).



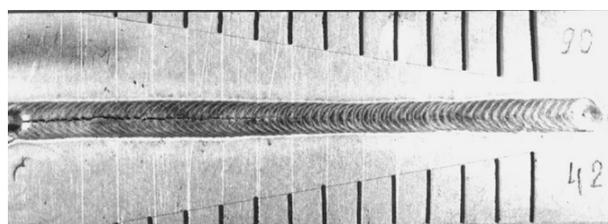
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Характер распространения горячих трещин при сварке образцов типа «рыбий скелет» исследуемых сплавов без использования присадочной проволоки:

а, б – сплав 1151; в – сплав 1201; г – сплав 1460

Полученные результаты свидетельствуют о том, что сплав 1151 весьма чувствителен к термическому воздействию сварки, что прояв-

ляется в оплавлении вторичных фаз и образовании хрупких прослоек вблизи зоны сплавления, где и наблюдается трещина (рис. 3).

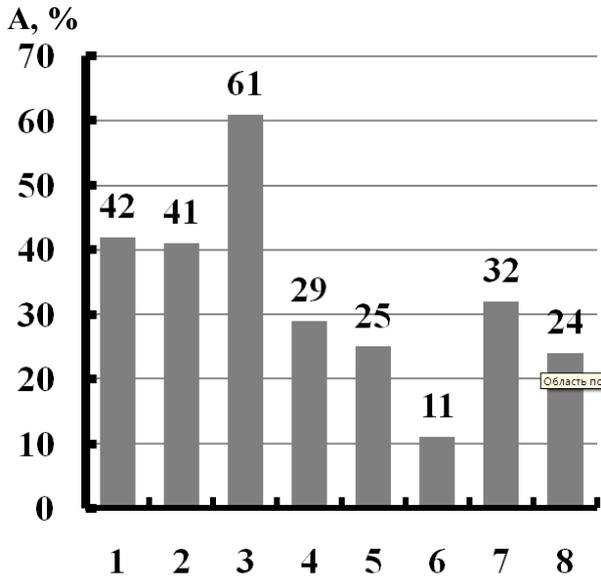


Рис. 2. Показатель *A* склонности к образованию горячих трещин в сварных соединениях исследуемых сплавов:

- 1 – сплав 1201, сварка без присадочной проволоки;
- 2 – сплав 1151, сварка без присадочной проволоки;
- 3 – сплав 1460, сварка без присадочной проволоки;
- 4 – сплав 1201, присадочная проволока Св1201;
- 5 – сплав 1151, присадочная проволока Св1201;
- 6 – сплав 1151, присадочная проволока Св1177;
- 7 – сплав 1460, присадочная проволока Св1201;
- 8 – сплав 1460, присадочная проволока Св1177

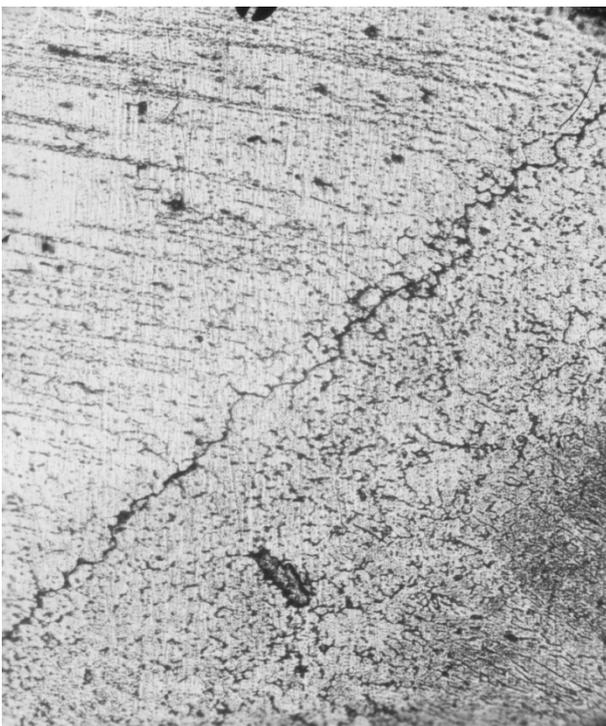


Рис. 3. Трещина в зоне сплавления сварного соединения сплава 1151 (×250)

Так как сплав 1151 является жаропрочным материалом, были проведены сравнительные испытания исследуемых сплавов и их сварных соединений при температурах 20...450 °С. Для определения прочности основного металла и сварных соединений испытывали плоские образцы без снятия выпуклости сварного шва.

Приведенные в табл. 5 результаты испытаний показывают, что прочность сплава 1151 при повышенных температурах (200...450 °С) на 35...40 МПа выше по сравнению со сплавом 1201. При повышенных температурах (более 300 °С) прочность сплава 1151 превосходит прочность сплава 1460, который разработан в качестве сплава для изготовления узлов, работающих при пониженных температурах [5].

5. Механические свойства листов алюминиевых сплавов при испытании образцов на растяжение (длительность выдержки при температуре испытаний – 30 мин)

Наименование механических свойств	Температура испытания, °С	Направление вырезки образца – долевое		
		Сплав 1151	Сплав 1201	Сплав 1460
Предел прочности σ_B , МПа	20	463,1	425,4	559,3
	200	388,5	344,2	458,4
	300	293,2	135,4	155,7
	350	168,4	38,5	95,4
	400	63,3	21,3	25,6
	450	43,5	12,8	11,8
Относительный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	20	318,1	345,2	469,5
	200	288,4	286,4	384,6
	300	253,3	244,9	265,2
	350	123,2	92,3	78,9
	400	47,0	27,2	22,6
	450	23,1	–	–
Относительное удлинение δ , %	20	19,2	10,1	7,0
	200	21,6	12,3	9,5
	300	15,5	13,4	10,1
	350	20,3	15,3	12,2
	400	28,6	20,2	13,4
	450	78,2	–	–

Примечание. Приведены средние данные по результатам испытаний 10 образцов.

У сварных соединений сплава 1151 (табл. 6) этот показатель при тех же условиях испытания на 20...30 МПа выше, чем у соединений сплава 1201. Во всех случаях, независимо от температуры испытания, разрушение образцов происходило по зоне сплавления. Полученные данные свидетельствуют о том, что в сварных конструкциях, эксплуатируемых длительное время при повышенных температурах, целе-

сообразнее использовать сплав 1151.

Важно отметить, что сварные соединения сплава 1151, полученные сваркой трением с перемешиванием, обладают прочностью, превышающей прочность соединений, полученных сваркой плавлением (аргонодуговая сварка) при повышенных температурах (табл. 7).

6. Прочность основного металла и сварных соединений сплавов 1151, 1201 и 1460 при различных температурах нагрева

Сплав	Образец	σ_B , МПа при		
		20 °С	200 °С	300 °С
1151	Основной металл	<u>442...444</u> 443	<u>367...377</u> 372	<u>158...162</u> 160
	Сварное соединение (ААрДЭС)	<u>350...378</u> 363	<u>305...318</u> 311	<u>156...173</u> 165
	Сварное соединение (СТП)	<u>408...416</u> 410	<u>337...348</u> 342	<u>162...178</u> 170
1201	Основной металл	<u>406...413</u> 409	<u>330...343</u> 338	<u>115...125</u> 120
	Сварное соединение (ААрДЭС)	<u>329...346</u> 336	<u>277...291</u> 286	<u>120...157</u> 144
	Сварное соединение (СТП)	<u>312...336</u> 321	<u>257...277</u> 265	<u>110...118</u> 115
1460	Основной металл	<u>558...561</u> 559	<u>422...435</u> 428	<u>126...133</u> 130
	Сварное соединение (ААрДЭС)	<u>310...335</u> 322	<u>268...281</u> 275	<u>110...127</u> 118
	Сварное соединение (СТП)	<u>425...465</u> 437	<u>332...356</u> 341	<u>130...167</u> 152

Примечание. ААрДЭС – автоматическая аргонодуговая сварка неплавящимся электродом с присадочной проволокой; СТП – сварка трением с перемешиванием.

7. Механические свойства сварных соединений сплава 1151 при различных температурах испытаний

Температура испытания, °С	Особенность испытания	ААрДЭС		СТП	
		σ_B , МПа	$K_{пр}$	σ_B , МПа	$K_{пр}$
20	Время достижения температуры – 15 мин; выдержка – 15 мин	363,0	0,82	410,1	0,92
200		343,2	0,90	387,1	0,96
300		203,5	0,72	220,6	0,76
350		144,6	0,94	153,8	1,0
400		63,4	1,0	63,4	1,0
450		43,2	1,0	43,2	1,0

Примечание. $K_{пр}$ – коэффициент прочности сварного соединения (отношение предела прочности сварного соединения к пределу прочности основного металла при температуре испытаний).

Для комплексной оценки сварных соединений сплава 1151 проводили изучение их склонности к коррозионному растрескиванию под напряжением при заданной растягивающей нагрузке в 3 %-ном растворе хлористого натрия [6]. Образцы основного металла испытывали при нагрузке, равной $0,75 \sigma_{0,2}$, а сварных соединений – при 160 Н/мм^2 . Результаты испытаний приведены в табл. 8.

8. Стойкость против коррозионного растрескивания под напряжением основного металла и сварных соединений сплавов 1151, 1201 и 1460

Сплав	Образец	Нагрузка, Н/мм ²	Длительность, сутки
1151	Основной металл	217,5	<u>18...55</u> 38
	Сварное соединение ААрДЭС	160,0	<u>4...29</u> 22
	Сварное соединение СТП	160,0	<u>18...44</u> 31
1201	Основной металл	207,0	<u>42...97</u> 53
	Сварное соединение ААрДЭС	160,0	<u>4...8</u> 6
	Сварное соединение СТП	160,0	<u>8...19</u> 13
1460	Основной металл	352	<u>38...85</u> 47
	Сварное соединение ААрДЭС	160,0	<u>7...15</u> 9
	Сварное соединение СТП	160,0	<u>11...27</u> 18

Установлено, что среднее время до разрушения в коррозионной среде сплавов 1151 и 1201 составляет соответственно 38 и 53 суток. У сварных соединений сплава 1151 (присадка Св1177) долговечность составляет в среднем 22 суток, в то время как у соединений сплава 1201 (присадка Св1201) этот показатель примерно в четыре раза меньше. При одинаковой нагрузке (160 Н/мм^2) образцы сварных соединений сплава 1151 менее склонны к коррозии под напряжением по сравнению со сплавами 1201 и 1460.

Результаты испытаний на склонность сплава 1151 и его сварных соединений к межкристаллитной коррозии [7] приведены в табл. 9.

В результате испытаний установлен специфический характер разрушения сварных соединений сплава 1151 после коррозионных

испытаний. Соединения сплава 1151 разрушаются как по шву и ЗТВ, так и по основному металлу. Соединения же сплавов 1201 и 1460 – преимущественно по зоне сплавления и ЗТВ.

9. Результаты испытаний на склонность сплава 1151 и его сварных соединений к межкристаллитной коррозии

Основной металл, сварное соединение	Толщина, мм	Вид сварки	Склонность к МКК в растворе 3 % NaCl + 1 % HCl	
			Глубина, мм (max)	Характер коррозии
Лист	4,0	–	0,08	МКК
Лист + лист		ААрДЭС; Св1177	0,49	МКК + РК
Лист + лист		СТП	0,38	МКК + РК

Примечания: МКК – межкристаллитная коррозия (избирательная коррозия по границам зерен или околোগраничным участкам); РК – расслаивающая коррозия (результат быстрого разведания границ или элементов структуры, выгнутых параллельно поверхности изделия).

Выводы:

1. Склонность к образованию горячих трещин при сварке сплавов 1151, 1201 и 1460 находится на одном уровне и оценивается по пробе «рыбий скелет» показателем примерно 40 %. Горячеломкость швов на сплаве 1151 может быть в 3 – 5 раз снижена при сварке с использованием присадочной проволоки Св1177. Характерной особенностью сплава 1151 является то, что горячие трещины при сварке могут распространяться как по металлу шва, так и по зоне сплавления с основным металлом.

2. Прочность основного металла и сварных соединений сплава 1151 при повышенных температурах (200 и 300 °С) в условиях медленного нагрева до температуры испытаний соответственно на 35...40 и 20...25 МПа выше аналогичных характеристик сплавов 1201 и 1460, а также их соединений.

3. Коррозионная стойкость под напряжением в 3 %-ном растворе хлористого натрия сварных соединений сплава 1151, выполненных аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом, по показателю долговечности выше, чем у соединений сплавов 1201 и 1420.

4. Прочность и коррозионная стойкость соединений сплава 1151 при повышенных температурах (200 и 300 °С), выполненных сваркой трением с перемешиванием, превосходит аналогичные показатели соединений, полученных аргонодуговой сваркой вольфрамо-

вым электродом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лужников, Л.П. Деформируемые алюминиевые сплавы для работы при повышенных температурах. – М.: Металлургия, 1965. – 290 с.
2. Овчинников, В.В., Манаков, И.Н., Курбатова, И.А. Свариваемость литейного сплава ВAl14 с деформируемыми сплавами 1151 и М40 // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015.– №11. – С. 7–12.
3. Овчинников, В.В., Дриц, А.М., Гуреева, М.А., Малов, Д.В. Влияние размера зерна в исходной структуре сплава 1565ч на структуру и свойства соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием // Электроталлургия. – 2016. – №7. – С. 17–26.
4. Овчинников, В.В. Научные технологии сварки в производстве объектов транспорта из алюминиевых сплавов // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – №5(59). – С.3–9.
5. Дриц, А.М., Овчинников, В.В. Результаты исследований свариваемости высокопрочных сплавов системы Al–Cu–Li–Mg, легированных серебром, скандием, цирконием // Технология легких сплавов. – 2011. – №1. – С.29–38.
6. Методика контроля МК 18-35-70. Испытание полуфабрикатов из деформируемых алюминиевых и магниевых сплавов на коррозию под напряжением при заданной растягивающей нагрузке. – М.: ВИЛС, 1970. – 14 с.
7. ГОСТ 9.019-74 (ИСО-8591-89). Единая система защиты от коррозии и старения. Сплавы алюминиевые и магниевые. Методы ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание. – Введ. 01.01.75.

REFERENCES

1. Luzhnikov, L.P. *Wrought Aluminum Alloys for Operation at Increased Temperatures*. – М.: Metallurgy, 1965. – pp. 290.
2. Ovchinnikov, V.V., Manakov, I.N., Kurbatova, I.A. Weldability of castable alloy of VAL14 with wrought alloys 1151 and M40 // *Blanking Production in Mechanical Engineering*. – 2015.– №11. – pp. 7–12.
3. Ovchinnikov, V.V., Drits, A.M., Gureeva, M.A., Malov, D.V. Impact of grain size in initial structure of alloy 1565ch upon structure and properties of joints made by friction welding with blending // *Electrometallurgy*. – 2016. – №7. – pp. 17–26.
4. Ovchinnikov, V.V. High technologies of welding in manufacturing aluminum alloy transport objects // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – №5(59). – pp.3–9.
5. Drits, A.M., Ovchinnikov, V.V. Results in weldability investigations of high-strength alloys of Al–Cu–Li–Mg system alloyed with silver, scandium, zirconium // *Light Alloy Technology*. – 2011. – №1. – pp. 29–38.
6. *Procedure of Control MK 18-35-70*. Tests of semi-products made of wrought aluminum and magnesium alloys for corrosion under stress at specified tensile load. – М.: VILS, 1970. – pp. 14.
7. SSR 9.019-74 (ISO-8591-89). Uniform System of Protection against Corrosion and Ageing. Aluminum and Magnesium Alloys. Methods of Rapid Corrosion Cracking Tests. – Introd. 01.01.75.

Рецензент д.т.н. С.И. Феклистов