

УДК 669.14.018.8:669.715

В.В. Левчук¹, А.В. Трапезников¹, С.И. Пентюхин¹**КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ ЛИТЕЙНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-33-40

Рассмотрены коррозионностойкие литейные алюминиевые сплавы. Приведена информация об их механических характеристиках и свойствах, а также результаты экспериментов, которые проведены с алюминиевыми литейными сплавами с разным содержанием магния и добавочных легирующих элементов на коррозионную стойкость и их поведение в агрессивной среде. Описаны преимущества, недостатки и особенности уже существующих сплавов, а также выявлены пути их совершенствования. Особенно актуальна проблема низкой температуры эксплуатации существующих коррозионностойких алюминиевых литейных сплавов.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, магналии, коррозионная стойкость, межкристаллитная коррозия, литейные сплавы, легирующие элементы, примеси.

V.V. Levchuk¹, A.V. Trapeznikov¹, S.I. Pentyukhin¹**CORROSION-RESISTANT FOUNDRY ALUMINUM ALLOYS (review)**

Corrosion-resistant cast aluminum alloys are considered in the article. The information about their mechanical characteristics and properties is given. The article presents the results of experiments that were carried out with cast aluminum alloys with different magnesium content and additional alloying elements for corrosion resistance and their behavior in an aggressive environment. Advantages, disadvantages and peculiarities of already existing alloys are described, as well as ways to improve alloys. The problem of the low operating temperature of existing corrosion-resistant aluminum casting alloys is especially actual.

Keywords: aluminum alloys, magnaliums, corrosion resistance, intergranular corrosion, casting alloys, alloying elements, impurities.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Современные тенденции развития машиностроения предусматривают необходимость снижения металлоемкости, энергоемкости и массы металлических деталей, поэтому задача материаловедения состоит в разработке легких сплавов с необходимыми эксплуатационными характеристиками [1, 2].

Важно, чтобы при эксплуатации деталь не теряла свои свойства, особенно те, на которые может повлиять окружающая среда и условия, в которых она применяется. Агрессивная окружающая среда может пагубно сказаться на прочностных характеристиках детали. Таким образом, в современном мире разрабатываются материалы, которые будут обладать высокими показателями коррозионной стойкости. Сама по себе коррозия – это процесс, в ходе которого металл взаимодействует с окружающей средой. Это взаимодействие протекает либо путем непосредственного химического соединения (химическая коррозия), либо в результате деятельности образующихся на поверхности металла гальванических элементов (электрохимическая коррозия). Химическая коррозия – это процесс, при котором взаимодействует металлическая

поверхность и окружающая среда по механизму химических гетерогенных реакций. Процессы взаимодействия металла и атмосферы, а также различных водных сред (растворы щелочей, кислот, солей) относятся к электрохимической коррозии [3].

Коррозию также можно разделить на сплошную и местную.

Местная коррозия образуется отдельными участками на поверхности металла, при этом она бывает:

- пятнами, когда диаметр поражения больше глубины проникновения;
- язвами, когда диаметр поражения равен глубине проникновения;
- точечной (питтинговой), когда диаметр меньше глубины проникновения коррозии в металл;
- межкристаллитной, когда разрушение сосредоточено по границам кристалла; она вызывается разностью потенциалов между границей области и прилегающими зернами.

В современном мире актуальны сплавы с высокими коррозионными свойствами в различных средах. Такие сплавы могут быть широко применимы в разных средах и разных условиях. Их явным преимуществом является то, что они могут быть применимы без специальных защитных противокоррозионных покрытий. Повышения коррозионной стойкости в сплавах на основе алюминия можно добиться за счет уменьшения активности катодных примесей. На практике же к таким сплавам относятся сплавы системы Al–Mg с добавлением других элементов [4].

Выделим три группы коррозионностойких литейных алюминиевых сплавов: Al–Mg, Al–Mg–Si, Al–Mg–Zn, и рассмотрим каждую группу в отдельности и в сравнении друг с другом.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформированных полуфабрикатов и фасонных отливок из магниевых и алюминиевых сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [5].

Обзор свойств сплавов системы Al–Mg

Сплавы системы Al–Mg условно делят на три группы: низколегированные – с содержанием магния <6% (по массе) (AMг5Mц (AL28)), среднелегированные – с 6,0–9,4% (по массе) Mg (AMг6л.ч. (AL23-1), AMг9л.ч. (AL311), VAL16), высоколегированные – с 9,5–13% (по массе) Mg (AL8, AMг10ч. (AL27-1)).

Основной проблемой магниевых сплавов является сравнительно невысокая рабочая температура – от 80 до 150°C. Низкая жаропрочность сплавов системы Al–Mg объясняется высоким коэффициентом диффузии магния. При длительном действии температур >80°C также образуются хрупкие частицы β-фазы (Al₃Mg₂), которые находятся по границам зерен твердого раствора, являясь концентраторами напряжений [6].

Главной целью многих работ являлось повышение температур эксплуатации коррозионностойких сплавов. Легирование марганцем и хромом повышает стабильность и термостабильность твердого раствора вследствие высокой акцепторной способности с атомами магния [7].

Помимо низкой жаропрочности магниевые сплавы склонны к естественному старению, что приводит к снижению пластичности сплавов и коррозии их под напряжением (КПН). Чем больше содержание магния в сплаве, тем эти недостатки более выражены. Стойкость к КПН повышают марганец и цирконий [8].

Для того чтобы избежать последствий естественного старения, исследователи разных стран при создании новых сплавов ограничивали содержание магния в них 10% (по массе). В целях повышения коррозионной стойкости под напряжением в новые сплавы вводили небольшие добавки переходных элементов, что способствует образованию частиц соединений типа Al₃Ti, Al₁₂Mg₂Cr₂, Al₁₂Mg₂Mn, располагающихся по

границам зерен прерывисто. Частицы соединений по отношению к зерну твердого раствора являются катодами, что препятствует развитию процессов коррозионного растрескивания под напряжением [9].

Проведена работа по исследованию изменения свойств при длительном естественном старении (в течение 11 лет), результаты которой представлены в табл. 1 [10]. Выяснилось, что сплавы, содержащие магния >8,8% (по массе), приобретают под влиянием естественного старения бóльшую склонность к межкристаллитной коррозии.

Таблица 1

**Влияние естественного старения на механические свойства
алюминий-магниевых сплавов различного состава**

Содержание магния, % (по массе)	После закалки				После закалки и естественного старения в течение 11 лет			
	σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ_5 , %	KCU_2 Дж/м ²	σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ_5 , %	KCU_2 Дж/м ²
	МПа				МПа			
1,3	120	75	17	21	120	75	–	–
3,3	145	85	5	22	130	80	6,5	14
5,3	155	110	5	18	175	100	6,0	14
7,2	185	135	4	16	205	125	5,0	14
9,0	215	145	7	17	245	145	7,0	16
10,7	350	185	20	14	305	235	2,0	10
12,4	370	195	20	25	390	345	1,3	–
13,6	295	205	10	15	400	355	0,5	3
14,4	345	215	9	8	390	355	0,6	2

Следует отметить, что присутствие небольшого количества меди, железа и кремния в сплавах типа магналий также тормозит развитие процессов межзеренного растрескивания, но такие добавки (или примеси) снижают общую коррозионную стойкость этих сплавов. В табл. 2 приведены механические свойства алюминий-магниевого сплава, содержащего примеси железа и кремния [10].

Таблица 2

**Механические свойства сплава системы Al–Mg
при различном содержании железа, кремния и магния**

Химический состав, % (по массе)			Механические свойства		
Fe	Si	Mg	σ_b , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ_5 , %
0,10	0,10	8,90	280	150	12,5
0,10	0,12	12,20	375	190	21,0
0,11	0,10	14,80	230	–	17,5
0,10	0,07	10,50	370	175	26,5
0,37	0,22	10,30	330	175	17,5
0,38	0,07	10,50	370	175	24,5
0,10	0,34	11,30	290	170	13,0
0,37	0,37	10,40	270	165	10,5
0,11	0,26	10,80	305	170	16,5
0,22	0,29	10,70	305	170	15,6
0,21	0,11	10,40	375	175	26,0
0,17	0,36	10,20	275	165	11,0
0,54	0,15	10,70	360	185	20,5
0,55	0,29	10,40	320	170	17,0
0,52	0,37	11,10	295	170	15,5
0,54	0,47	10,90	280	180	10,0
0,39	0,49	11,10	265	165	9,5
0,25	0,48	10,60	245	160	7,5
0,12	0,47	10,70	245	165	7,0
0,75	0,14	11,70	345	190	13,5
0,77	0,52	11,10	210	160	2,5

Из данных табл. 2 следует, что лучшими механическими свойствами (при минимальном содержании примесей) обладают сплавы с содержанием магния 10,5% (по массе). При содержании магния 12,20% (по массе), показатель удлинения снизился, а показатель прочности остался высоким. Сплав с содержанием магния <9% (по массе) имеет относительно низкие механические свойства. При повышении содержания железа до 0,38% (по массе) немного снижается значение удлинения. Увеличение содержания кремния более негативно сказывается на механических свойствах. Это происходит, очевидно, потому что образуется соединение Mg_2Si вследствие большого сродства кремния к магнию. Количество этого соединения в сплаве пропорционально количеству процентной доли кремния в сплаве. Весь этот процесс выглядит следующим образом: Mg_2Si кристаллизуется в форме так называемого «китайского шрифта» и располагается по границам зерен, при этом нарушая связь зерен твердого раствора.

В работе [11] исследовано влияние на сплав системы Al–10,5% (по массе) Mg добавок молибдена, а также обработки фторцирконатом калия. При обработке K_2ZrF_6 и одновременном введении молибдена в количестве 0,1% (по массе) происходит значительное измельчение зерна сплава. Это ведет к увеличению числа интерметаллидов, что обеспечивает более мелкозернистую структуру, так как интерметаллиды являются центрами кристаллизации. Значения механических свойств при этом увеличиваются в ~1,5 раза.

В модифицированных сплавах, содержащих >9% (по массе) магния, воздействию межкристаллитной коррозии подвергается только верхний, поверхностный слой металла, и с течением времени коррозия не получает сильного развития. Особенно снижает развитие межкристаллитной коррозии комплексная модификация сплава молибденом и цирконием.

В немодифицированном сплаве одновременно происходят межкристаллитная коррозия (из-за выделения β -фазы), которая способствует разупрочнению сплава, и процесс естественного старения, который, наоборот, упрочняет сплав. В итоге прочность сплава даже уменьшается после 1000 сут коррозионных испытаний.

Преимущество модифицированных сплавов наблюдается не только по значениям предела прочности и склонности к межкристаллитной коррозии, но и по значению относительного удлинения. У модифицированных сплавов падение пластических свойств происходит после 500 сут коррозионных испытаний, в то время как у исходного сплава резкое ухудшение свойств наблюдается уже после 100 сут испытаний. Причем у модифицированных сплавов падение пластичности объясняется естественным старением (процесс охрупчивания), а не межкристаллитной коррозией.

В сплавах, содержащих <9% (по массе) магния, процесс межкристаллитной коррозии не получает сколько-нибудь заметного развития. Чем больше содержание магния, тем шире интервал кристаллизации. Из-за этого возникает литейная неоднородность, обнаруживаемая в виде пористости, усадочных рыхлот и оксидных включений в массивных частях отливок [12]. Литейная неоднородность ведет к ухудшению механических свойств на вырезанных из отливок образцах.

Кроме того, у высокомагниевого сплава предел текучести составляет только 50% от величины предела прочности. Это может привести к образованию закалочных трещин для сложных по конфигурации отливок. Для уменьшения склонности к образованию трещин необходимо закалять отливки в кипятке либо в подогретом до 50–60°C масле.

Несмотря на перечисленные недостатки, сплавы системы Al–Mg имеют значительные преимущества. Помимо общей высокой коррозионной стойкости, превышающей коррозионную стойкость всех остальных групп алюминиевых сплавов, высоколегированные

магналии имеют довольно высокие механические свойства. У сплава АЛ8 (из основных легирующих элементов содержит только магний в количестве от 9,3 до 10,0% (по массе)) – $\sigma_B \geq 285$ МПа, $\delta \geq 9\%$.

Высокая общая коррозионная стойкость обусловлена образованием плотной оксидной пленки, интенсивно растущей в течение первых 500 сут. Далее скорость окисления стабилизируется [11].

Среди сплавов данного типа сплав АМг5Мц обладает практически самой высокой коррозионной стойкостью. Повышенная стойкость объясняется присутствием марганца, благотворно влияющего на коррозионные свойства чистого алюминия и некоторых алюминиевых сплавов. Механические свойства сплава можно повысить на 20–30 МПа, введя 0,1–0,2% циркония. Значительное повышение свойств также наблюдается при использовании шихты повышенной чистоты.

Сплав АМг5Мц не обнаруживает склонности к КПН при комнатной и повышенной до 100°C температурах и выдержке в течение длительного времени (до 1000 ч). Но при сравнительно кратковременной выдержке при температуре >100°C сплав показывает резкое ухудшение работоспособности в коррозионной среде, что делает невозможным его применение при повышенных температурах.

Сплавы, содержащие <6% (по массе) магния, как и сплав АМг5Мц, имеют невысокие прочностные свойства. Повышение содержания магния ведет к повышению прочности, поэтому разработанных малолегированных сплавов не так много.

Сплавы АЛ23-1 и АЛ23, содержащие магний в количестве от 6 до 7% (по массе), применяются в литом и закаленном состоянии. В закаленном состоянии эти сплавы не склонны к межкристаллитной коррозии. По значениям предела прочности они находятся между сплавами АМг5Мц и АЛ8.

Высокопрочные сплавы АМг10, АМг10ч. в закаленном состоянии имеют предел прочности >320 МПа и относительное удлинение >12%. Наличие в сплавах бериллия, титана и циркония (по сравнению со сплавом АЛ8) уменьшает склонность к коррозионному растрескиванию (КР).

Изучалась склонность к КР под действием нагрева с целью определения температур, при которых в течение длительного времени сплавы АЛ8, АМг10ч. и АМг5Мц способны сохранять сопротивление КПН, а также для установления допустимости кратковременного нагревания деталей из этих сплавов в процессе их изготовления (например, при пропитке, нанесении защитных покрытий и пр.) [11]. Образцы из этих сплавов подвергали старению при 70, 100, 125, 150°C в течение 1–1000 ч в зависимости от температуры нагрева, а затем испытывали под напряжениями, равными 0,8–0,9 от уровня напряжений, при которых не происходит КР, определенного для исходного состояния.

Установлено, что для сплава АМг5Мц КПН не уменьшается при нагревах до 100°C в течение длительного промежутка времени и допускаются кратковременные нагревы до 150°C без потери работоспособности в коррозионной среде. Для сплавов АЛ8, АМг10ч. нагревы >80°C недопустимы. Сплав АМг10ч., структура которого стабилизируется дополнительным легированием, имеет более высокую стойкость к КПН. Устойчивость твердого раствора сплава АМг5Мц выше, чем у сплавов с 10% (по массе) магния, поэтому сплав АМг5Мц более стоек к коррозионному растрескиванию.

Современный сплав, при разработке которого обобщили исследования и опыт работы с магналиями, – это сплав ВАЛ16 [5, 13]. Он содержит от 7,5 до 8,5% (по массе) магния и легирован марганцем, хромом, титаном, цирконием и бериллием. Следовательно, механические и коррозионные свойства сплава ВАЛ16 немного превышают

свойства сплава АМгбл. Однако по жаропрочности и температуре эксплуатации он превосходит остальные магналии. При использовании термостабилизирующего отжига температура эксплуатации сплава ВАЛ16 составляет 140°C длительно и 150°C кратко-временно.

Магналии, не содержащие в своем составе бериллия, необходимо плавить под защитным покровным флюсом. Это связано с большим сродством магния к кислороду, чем у алюминия, что и предотвращает окисление расплава. Оксидная пленка, присутствующая во время плавки алюминий-магниевых сплавов, не справляется с защитой расплава от насыщения водородом, являющегося вредной примесью [14]. Добавление до 0,1% (по массе) бериллия замедляет окисление, уменьшая скорость диффузии ионов. Таким образом, химический состав сплавов АМг10ч. и ВАЛ16 позволяет проводить бесфлюсовую плавку [15].

Обзор свойств сплавов системы Al–Zn–Mg

Сплавы системы Al–Zn–Mg можно разделить на несколько групп: с упрочняющей фазой T ($Al_2Mg_2Zn_3$) – сплав АЦ4Мг (АЛ24); с содержанием цинка до 3% (по массе) и магния >7% (по массе) – сплавы Х250, 40В (США); с содержанием цинка >5% (по массе) – сплав ВАЛ12. Чем больше цинка в сплаве, тем выше его прочность. Так, у сплава ВАЛ12, отлитого в кокиль, самая высокая прочность среди литейных алюминиевых сплавов – более 540 МПа. Однако сплавы, содержащие большое количество цинка, имеют склонность к межкристаллитной коррозии под напряжением.

Благодаря высокой растворимости цинка, а также его соединений с алюминием и магнием, сплавы системы Al–Zn–Mg имеют особенность – они могут становиться прочнее при заливке формы и дальнейшем остывании, т. е. в ходе естественного старения. Сплавы также способны упрочняться в ходе термической обработки, но и без нее сплавы имеют высокие механические свойства. Сплавы, которые содержат 1% (по массе) цинка, предрасположены к старению, которое приводит к ухудшению их коррозионных и механических свойств. Добавление в сплав небольших количеств марганца повышает его механические свойства и устойчивость к коррозии. Так, содержание марганца до 0,5% (по массе) способствует уменьшению размера зерна, а >1% (по массе) ведет к увеличению хрупкости сплава, поэтому оптимальное содержание марганца в сплавах этой системы – от 0,2 до 0,5% (по массе). Добавление в сплав небольшого количества титана (также как и марганца) способствует уменьшению зерна, а значит, и улучшению механических свойств сплава. Из-за образования фазы Mg_2Si добавление кремния в сплав пагубно сказывается на механических свойствах сплава и ведет к его охрупчиванию [16].

Сплавы ВАЛ12 и АЛ24 отличаются от других высокими механическими свойствами и небольшим объемным изменением в процессе эксплуатации. Они могут длительно использоваться при температуре до 200 и 150°C соответственно. Но эти сплавы не имеют должной коррозионной стойкости, а также у них пониженные литейные свойства [11]. Особенность сплава АЛ24 в том, что благодаря оптимальному содержанию цинка и магния рабочая температура (150°C) этого сплава является самой высокой из всех сплавов этой системы.

Обзор свойств сплавов системы Al–Mg–Si

Наличие кремния в сплаве уменьшает способность к образованию трещин, а также повышает его жаропрочность. В настоящее время технически невозможно повысить жаропрочность таких сплавов, так как в их структуре присутствует кремний в

свободном состоянии, который способствует уменьшению чувствительности к образованию трещин, повышению жаропрочности, а также увеличению жидкотекучести и плотности литья.

Так, особенностью сплава АЛ29 является то, что он может применяться в различных климатических условиях, а отливки из него могут эксплуатироваться без термообработки. У этого сплава хорошая коррозионная стойкость, но для улучшения характеристик его анодируют в хромовой кислоте. По механическим свойствам сплав АЛ29 превосходит сплав АЛ13, но отличается тем, что содержит больше магния и меньше примесей [17].

С целью повышения температуры эксплуатации разработан сплав АЛ22, который содержит большое количество магния – от 10,5 до 13% (по массе), что позволяет применять его в закаленном состоянии. Для того чтобы улучшить его прочностные и литейные свойства сплав легируют добавками титана и бериллия. По жаропрочности, прочности и технологическим характеристикам сплав АЛ22 превосходит сплав АЛ13. Для достижения максимальной прочности сплава, магния в нем должно быть 13% (по массе) – верхний предел, а кремния – минимальное количество. Пониженная пластичность является самым большим недостатком группы сплавов этой системы. Для того чтобы отливать детали сложной формы необходимо содержание магния по нижнему пределу, а кремния – по верхнему.

Заключения

За последние годы в области литейного производства появились новые современные технологии, которые касаются как самих методов литья, так и получаемых сплавов. В данной статье рассмотрены литейные сплавы на основе алюминия, имеющие хорошие параметры коррозионной стойкости; приведены механические характеристики и свойства некоторых сплавов, рассмотрены их достоинства и недостатки, а также поставлены задачи на перспективу. В первую очередь, это повышение температуры эксплуатации группы алюминиевых литейных коррозионностойких сплавов без потери свойств, а самое главное – коррозионной стойкости. Современные сплавы, относящиеся к этой группе, могут сохранять свои свойства до 150°C (ВАЛ16). Актуальной задачей в настоящее время является создание алюминиевого литейного сплава с повышенными коррозионной стойкостью и температурой эксплуатации, но сплав с повышением температуры не должен терять свои механические и коррозионные свойства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
2. Дуюнова В.А., Волкова Е.Ф., Уридия З.П., Трапезников А.В. Динамика развития магниевых и литейных алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 225–241. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-225-241.
3. Побежимов П.П., Нефедова Л.П., Белов Е.В. Металлургия коррозионностойких алюминиевых сплавов и отливок. М.: Metallurgia, 1989. 150 с.
4. Алюминий. Металловедение, обработка и применение алюминиевых сплавов. Пер. с англ. / под ред. А.Т. Туманова, Ф.И. Квасова, И.Н. Фридляндера. М.: Metallurgia, 1972. 664 с.
5. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

6. Томашов Н.Д., Чернова Г.П. Теория коррозии и коррозионностойкие конструкционные сплавы. М.: Металлургия, 1986, 358 с.
7. Гончаренко Е.С., Мельников А.В., Черкасов В.В., Вертоградский В.А. Влияние режимов закалки на структуру и свойства сплава системы Al–Mg // Металловедение и термическая обработка металлов. 1997. №6. С. 13–16.
8. Илларионов Э.И., Колобнев Н.И., Горбунов П.З., Каблов Е.Н. Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2001. 192 с.
9. Колобнев И.Ф. Жаропрочность литейных алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1973. 320 с.
10. Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1971. Т. 4: Промышленные алюминиевые сплавы. 450 с.
11. Постников Н.С. Коррозионностойкие алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1976. 300 с.
12. Белоусов Н.Н., Егорова В.А. Новое в теории и практике литейного производства. М.: Машгиз, 1957. 55 с.
13. Лебедев В.М., Корнышева И.С., Гончаренко Е.С. и др. Современные литейные алюминиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2002. №2. С. 64–70.
14. Постников Н.С., Черкасов В.В. Прогрессивные методы плавки и литья алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1974. 224 с.
15. Гончаренко Е.С., Трапезников А.В., Огородов Д.В. Литейные алюминиевые сплавы (к 100-летию со дня рождения М.Б. Альтмана) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №4. Ст. 02. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 20.06.2018.) DOI: 10.18566/2307-6046-2014-0-4-2-2.
16. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Антипов В.В. и др. Влияние коррозионной среды на скорость роста трещины усталости в алюминиевых сплавах // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №3. Ст. 05. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения 20.06.2018).
17. Фридляндер И.Н. Алюминий и его сплавы. М.: Знание, 1965. 620 с.