

УДК 669.715

*А.О. Кузнецов¹, М.С. Оглодков¹, А.А. Климкина¹***ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА СИСТЕМЫ Al–Mg–Si**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-3-9

Проведен аналитический обзор отечественной и зарубежной литературы в области алюминиевых высокотехнологичных коррозионностойких сплавов системы Al–Mg–Si. Выявлены основные тенденции развития в этом направлении и проведена оценка текущего уровня исследований. Исследовано влияние легирующих элементов на микроструктуру, механические и усталостные свойства сплава на основе системы Al–Mg–Si. Установлено положительное влияние добавок титана и циркония на микроструктуру, а также на механические характеристики.

Ключевые слова: *алюминиевые сплавы, микроструктура, механические свойства, легирующие элементы, листы, Al–Mg–Si.*

*A.O. Kuznetsov¹, M.S. Oglokov¹, A.A. Klimkina¹***THE INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION
ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF Al–Mg–Si ALLOY**

The analysis of Russian and foreign literature in aluminum high-end corrosion resistant alloys area was made. Base ways of development of these alloys are stated. Estimation of modern investigation level was made. The influence of alloying elements additions on microstructure, mechanical and fatigue properties of Al–Mg–Si alloy was investigated. It was found that Ti and Zr gives a positive effect for microstructure and mechanical properties.

Keywords: *aluminum alloys, microstructure, mechanical properties, alloying elements, sheets, Al–Mg–Si.*

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

Одной из главных задач авиационной промышленности является повышение эксплуатационной надежности конструкции летательного аппарата при возможном снижении трудо-, энерго- и финансовых затрат при его создании, что в значительной степени определяется применением новых высокотехнологичных материалов [1].

С целью повышения весовой эффективности конструкции фюзеляжа целесообразно применение новых алюминиевых сплавов, которые обладают достаточными характеристиками прочности в совокупности с повышенной коррозионной стойкостью и высокой технологичностью при сварке. Замена клепаных конструкций на сварные позволит в перспективе снизить массу элементов конструкции до 15% [2].

Сплавы системы Al–Mg–Si примечательны тем, что обладают хорошим сочетанием прочностных и коррозионных свойств, свариваемостью и пластичностью. Тенденции развития современного машиностроения требуют снижения общей массы конструкции для экономии топлива и увеличения грузоподъемности [3]. В связи с этим

сталь, традиционно применяемая для производства деталей и узлов, активно заменяется алюминиевыми сплавами. В связи с обострением проблемы коррозионной повреждаемости летательных аппаратов, увеличения затрат на ремонтные работы, внимание конструкторов все больше привлекают сравнительно дешевые коррозионностойкие высокотехнологичные алюминиевые сплавы системы Al–Mg–Si [4]. Сплавы системы Al–Mg–Si–Cu имеют наилучшие механические характеристики среди коммерческих сплавов серии 6000 и применяются для изготовления элементов конструкции самолетов [5]. Сплавы этой системы относятся к свариваемым и могут рассматриваться как перспективные сплавы для изготовления сварного фюзеляжа, что позволит повысить коррозионную стойкость и снизить массу конструкции [6].

В настоящее время сплавы на основе системы Al–Mg–Si вышли на первое место по мировому производству среди всех алюминиевых сплавов. На их долю приходится более 90% производства прессованных алюминиевых изделий [7]. Такое распространение авиалайнеров обусловлено возможностью их прессования со скоростями истечения до 50–70 м/мин. Сплавы системы Al–Mg–Si примечательны тем, что обладают хорошим сочетанием прочностных и коррозионных свойств, свариваемостью и пластичностью. Положительные результаты работ получены корпорацией Airbus для нижних панелей фюзеляжа, которые в настоящее время изготавливают из сплавов системы Al–Mg–Si–Cu (серии 6000) с использованием технологии лазерной сварки. Эти сплавы обладают повышенным пределом текучести в сравнении со сплавом 2024 (D16), что позволяет использовать их для нагруженных конструкций. Кроме того, сопротивление распространению усталостных трещин у сплавов системы Al–Mg–Si–Cu находится на уровне аналога, что позволяет применять их в изделиях авиационной техники.

Еще одним преимуществом данной группы сплавов является их повышенная технологичность, что позволяет проводить операции гибки и холодной штамповки в состоянии поставки (Т) и исключить операции перезакалки собранных элементов конструкций, которые в настоящее время изготавливают из дюралюминов в отожженном состоянии из-за пониженной штампуемости листов из сплава D16ч.-Т.

Применение полуфабрикатов из нового высокотехнологичного сплава взамен сплавов типа D16ч. позволит повысить весовую эффективность элементов конструкции изделий авиационной техники благодаря повышенным механическим свойствам, а также за счет применения прогрессивных технологий лазерной сварки, что в совокупности с высокой коррозионной стойкостью позволит обеспечить надежную эксплуатацию воздушного судна.

В России разработками сплавов системы Al–Mg–Si активно занимается ФГУП «ВИАМ». В патенте [8] описан Al–Mg–Si–Cu сплав повышенной коррозионной стойкости, предназначенный для применения в качестве конструкционного материала в транспортном машиностроении, включая авиацию. Из предложенного сплава можно изготавливать различные элементы силового набора и обшивки фюзеляжа самолетных конструкций, в том числе сварные, а также сварные топливные баки и другие элементы автомобилей и железнодорожного транспорта. Техническим результатом предложенного изобретения является создание сплава с достаточно высоким уровнем прочности и пластичности, высоким сопротивлением всем видам коррозии, включая межкристаллитную. Во ФГУП «ВИАМ» также запатентован деформируемый сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него [9]. Изобретение относится к области металлургии сплавов, в частности – к деформируемым термически упрочняемым, высокотехнологичным, коррозионностойким и свариваемым сплавам на основе системы Al–Mg–Si и изделиям из них. Предложенный сплав и изделие, выполненное из него, содержат

следующие компоненты, % (по массе): (0,3–1,2) Mg, (0,3–1,7) Si, (0,15–1,1) Mn, (0,05–0,5) Ca, (0,0002–0,01) Na; по меньшей мере один металл, выбранный из группы, включающей медь, железо, цирконий и хром: 0,02–1,0; остальное – алюминий. Техническим результатом изобретения является разработка деформируемого сплава на основе системы Al–Mg–Si и изделия, выполненного из этого сплава, обладающие повышенной технологичностью при холодной штамповке путем выдавки и улучшенной обрабатываемостью резанием.

Корпорацией «ВСМПО-АВИСМА» изобретен способ производства прессованных изделий из алюминиевого сплава серии 6000. Техническим результатом изобретения является создание технологии производства прессованных полуфабрикатов из высоколегированного алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si, обладающего хорошими механическими, технологическими и коррозионными свойствами [10].

В открытой печати содержится информация о широких исследованиях поведения сплавов системы Al–Mg–Si в процессе термической обработки. Методами дифференциальной сканирующей калориметрии, просвечивающей электронной микроскопии исследованы мелкогабаритные частицы фаз, выделяющихся при старении сплава 6061. Выявлена последовательность образования фаз при старении [11]. С помощью атомной томографии, измерения твердости и электросопротивления исследован механизм искусственного старения сплава AA6061 в температурном диапазоне 150–250°C [12]. Проведены исследования сплавов системы Al–Mg–Si–Cu – в частности Q-фазы, определяющей особые свойства сплавов этой группы. Приводятся металлографические и кристаллографические исследования этой фазы. Рассмотрены другие метастабильные фазы с целью установления зависимости их возникновения от химического состава сплава [13]. Рассмотрено влияние избыточного количества кремния в сплаве системы Al–Mg–Si. В статье показано, что механизм выделения фаз не зависит от химического состава сплава, а прочность повышается пропорционально количеству фазы Mg₂Si [14].

В статье [15] исследованы морфология и кристаллическая структура выделяющихся фаз в сплаве Al–(1–2)% Mg₂Si методом просвечивающей электронной микроскопии. В исследовании разработана модель на основе классической теории зародышеобразования, роста и объединения для описания развития частиц выделяющихся фаз в сплавах типа Al–Mg–Si. Данные, получаемые по этой модели, хорошо соотносятся с результатами экспериментов.

Из анализа научно-технических литературных данных можно сделать вывод, что основными тенденциями развития высокотехнологичных алюминиевых сплавов являются:

- повышение прочностных характеристик при добавлении меди, магния, цинка, а также переходных и редкоземельных металлов;
- повышение характеристик пластичности при легировании микродобавками элементов и контроля содержания интерметаллидных фаз, а также благодаря улучшению технологического процесса;
- повышение коррозионной стойкости при добавлении цинка;
- повышение технологичности путем введения в расплав магния и кремния в определенном соотношении; повышение характеристик свариваемости за счет подбора оптимального химического состава.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 8.1. «Высокопрочные свариваемые алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности с повышенной вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [16].

Материалы и методы

Объектом исследования служили холоднокатаные листы толщиной 3 мм из алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si, изготовленные во ФГУП «ВИАМ». Основные легирующие компоненты опытных плавок приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав опытных плавок

Условный номер состава	Mg	Si	Cu	Zn	Mn	Zr	Cr	Ti	Ni	V	Fe
1	0,8	1	0,7	-	+	+	-	-	-	-	+
2	0,8	1	0,7	-	+	-	+	+	+	-	+
3	0,8	0,8	0,7	0,5	+	-	+	+	-	-	+
4	0,8	0,8	0,7	0,5	+	+	+	+	-	+	+

Примечание. Al – основа.

Из заготовок листов на шлифовальном станке Teqramin-20 изготовлены микрошлифы и исследована их микроструктура на микроскопе Olympus GX51.

Определение температур фазовых превращений в сплавах проведено методом дифференциальной сканирующей калориметрии по МИ 1.2.030–2011.

Механические свойства при статическом растяжении определяли на образцах, вырезанных в продольном направлении в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84.

Результаты и обсуждение

Выбор экспериментальных составов свариваемого высокотехнологичного коррозионностойкого алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si осуществляли на основании проведенного аналитического обзора научно-технической литературы, поиска и анализа существующих исследований в области алюминиевых высокотехнологичных сплавов. Наиболее интенсивно разработки таких сплавов ведутся в России, США, Китае и Японии, при этом области применения высокотехнологичных алюминиевых сплавов разнообразны, в связи с чем к материалам предъявляются различные требования по механическим и физическим характеристикам.

На основании анализа последних исследований в области алюминиевых высокотехнологичных сплавов выбраны четыре экспериментальных состава свариваемого высокотехнологичного коррозионностойкого алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si.

Проведен расчет шихтового состава, выплавлены слитки свариваемого высокотехнологичного коррозионностойкого алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si экспериментальных составов.

По результатам теплофизических исследований – фазовых превращений при нагреве слитков методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) – выбран режим гомогенизационного отжига, обеспечивающий растворение легкоплавких эвтектик.

Исследована макро- и микроструктура слитков в литом и гомогенизированном состояниях; установлено, что в литом состоянии микроструктура дендритная, типичная для сплавов системы Al–Mg–Si, и представляет собой зерна твердого раствора с выделением по границам фаз, которые практически полностью растворяются в твердом растворе при гомогенизации.

Исследования химического состава фаз методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) в экспериментальных составах алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si показали, что структура негомогенизированных слитков представляет собой алюминиевый твердый раствор с равномерно распределенными включениями интерметаллидных фаз.

В ходе исследования фазового состава определили, что все образцы характеризуются наличием типичной для сплавов этой системы фазы Al_2Si . В негомогенизированном состоянии во всех сплавах зафиксировано наличие фазы типа $AlCu$, которая в ходе гомогенизации полностью растворяется в матрице сплава. Структура гомогенизированных слитков характеризуется наличием в алюминиевом твердом растворе неравновесной фазы типа $AlFeMn$. Марганец в расплаве компенсирует вредное воздействие железа, изменяя морфологию железистой фазы с игольчатой на скелетообразную, не снижающую пластичности сплава.

Из гомогенизированных слитков свариваемого высокотехнологичного коррозионностойкого алюминиевого сплава системы $Al-Mg-Si$ всех четырех экспериментальных составов изготовлены листы толщиной 3,0 мм. Для оценки влияния отдельных легирующих компонентов на микроструктуру листы подвергали термообработке по одинаковому режиму для всех составов.

Структура листов толщиной 3,0 мм представляет собой твердый раствор алюминия и строчечные включения интерметаллидных фаз. В процессе термической обработки (закалка+искусственное старение) происходит растворение эвтектической составляющей в твердом растворе с последующим выделением дисперсных фаз при старении (дисперсионное упрочнение). В структуре также наблюдаются выделившиеся дисперсные включения.

Из анализа микроструктуры, сравнив попарно составы 1 и 2, а также 3 и 4, можно сделать вывод о том, что титан и цирконий являются эффективными измельчителями зерна. Титан, являясь инокулятором, создает в сплаве дополнительные центры рекристаллизации, вследствие чего увеличивается количество зародышей, и, как следствие, уменьшается размер конечного зерна. Титан как модификатор имеет большое практическое значение, так как оказывает сильное воздействие на структуру, в то же время являясь довольно экономичным. Добавка циркония приводит к образованию циркониевых дисперсоидов (Al_3Zr) в сплаве, которые способствуют уменьшению скорости миграции границы зерна ввиду того, что представляют барьеры для движения дислокаций.

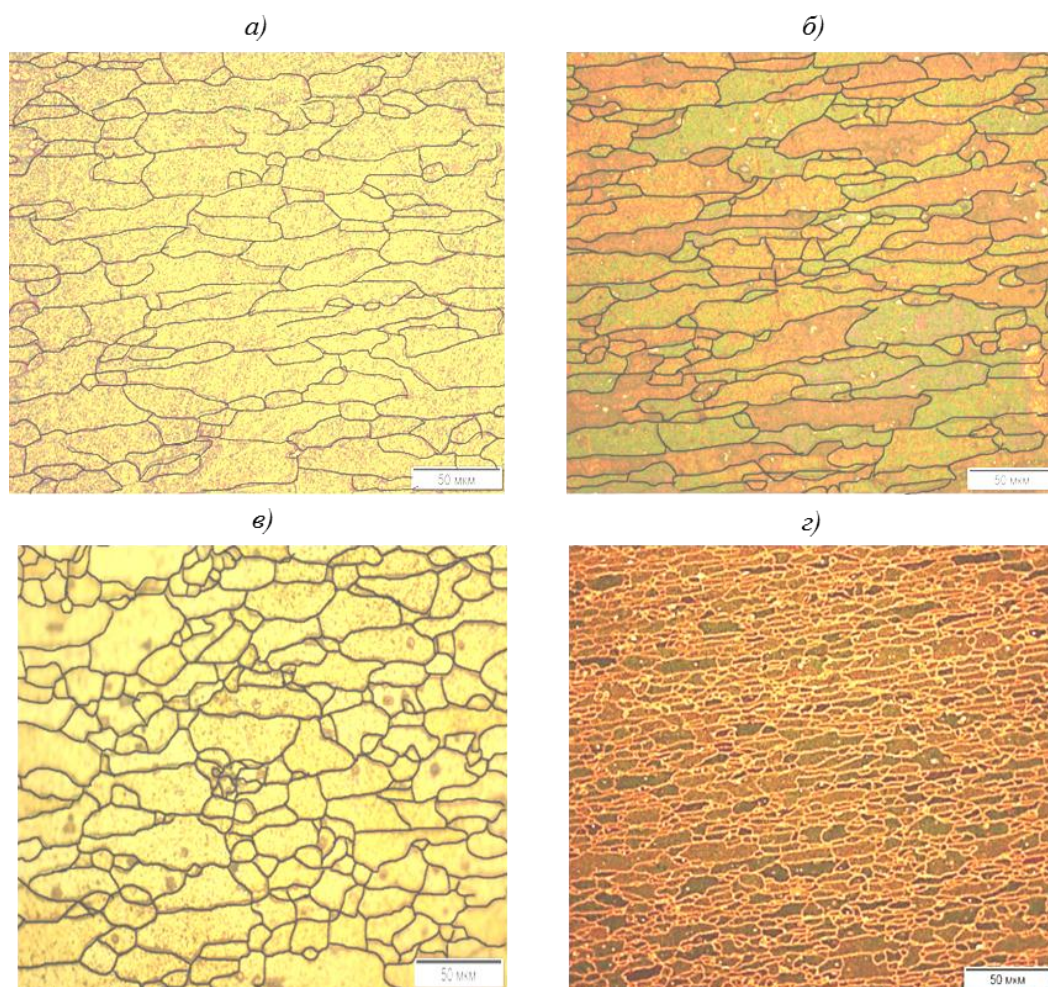
Главная задача исследования – установление влияния наличия или отсутствия легирующих элементов в сплаве на механические свойства конечных полуфабрикатов. Результаты испытаний по определению механических свойств приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения механических свойств листов четырех составов в сравнении с традиционными сплавами системы $Al-Mg-Si$

Сплав	Состав	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %
		МПа		
1	$(Al-Mg-Si)+Cu, Mn, Zr; Mg/Si=0,8$	375	330	8,5
2	$(Al-Mg-Si)+Cu, Zn, Mn, Cr, Ti, Ni; Mg/Si=0,8$	410	370	8,0
3	$(Al-Mg-Si)+Cu, Zn, Mn, Cr, Ti; Si/Mg=0,8$	400	360	9,5
4	$(Al-Mg-S)+Cu, Mn, Zr, Cr, V; Si/Mg=0,8$	410	360	11,5
6013	$(Al-Mg-Si)+Cu, Zn, Mn, Cr, Ti; Si/Mg=0,8$	400	355	10,0
AB	$(Al-Mg-Si)+Cu, Mn, Ti, Cr, Zn; Mg/Si=0,8$	420	330	13,0

Анализ результатов проведенных исследований показал, что добавка хрома и титана позволяет значительно улучшить механические характеристики сплава. Введение переходных металлов (Mn, Cr, V) приводит к эффективному упрочнению за счет выделения дисперсных частиц при распаде твердого раствора, а также препятствует процессу рекристаллизации. Из анализа свойств можно также сделать вывод о том, что цирконий положительно влияет на величину относительного удлинения сплава. Повышение механических характеристик с добавкой титана и циркония связано с модифицирующим эффектом, а именно с измельчением зерна, что видно на рисунке.



Характерное изображение микроструктуры листов из сплава системы Al–Mg–Si после термической обработки и травления составов 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г)

Проведены также испытания по определению величины скорости роста трещин усталости – СРТУ (по характеристике трещиностойкости в соответствии с требованиями ГОСТ 25.506 и ОСТ1 90268) всех экспериментальных составов. Значения СРТУ (dI/dN) для листов при $\Delta K=18,6 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения характеристики СРТУ (dI/dN) для листов четырех экспериментальных составов

Условный номер состава	СРТУ: dI/dN при $\Delta K=18,6 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$
1	2,9
2	1,92
3	1,11
4	0,59

Анализ полученных в ходе испытаний образцов данных позволяет сделать вывод о том, что добавки хрома и титана, так же как и добавки циркония и ванадия, позволяют значительно улучшить характеристики трещиностойкости. Причиной этого может быть образование компактных мелкодисперсных фаз в процессе термообработки. Равномерное распределение упрочняющих фаз наряду с небольшим размером зерна позволяет обеспечить получение высокой стойкости к распространению усталостных трещин.

Заключения

На основании обзора научно-технической литературы выявлены тенденции развития алюминиевых высокотехнологичных сплавов и выбраны экспериментальные составы сплавов системы Al–Mg–Si.

Исследования микроструктуры выбранных сплавов показали, что титан и цирконий являются модификаторами структуры, уменьшают зерно, что приводит к повышению предела текучести. Введение переходных металлов (Mn, Cr, V) приводит к эффективному упрочнению, вероятно, за счет выделения дисперсных частиц при распаде твердого раствора, а также препятствует процессу рекристаллизации. Наличие Cr, Mn, Cu видоизменяет фазу Al–Fe–Cr, имеющую морфологию в виде иголок, в наиболее благоприятную.

Установлено, что состав 4 (содержащий Ti, Zr, V, Mn, Cr) обладает наилучшими механическими свойствами, что связано с небольшим размером зерна, дисперсным упрочнением за счет введения переходных металлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. *Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник.* 2008. №3. С. 2–14.
2. Каблов Е.Н. *России нужны материалы нового поколения // Редкие земли.* 2014. №3. С. 8–13.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. *Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Авиационные материалы и технологии.* 2013. №S2. С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2013-0-s2-3-10.
4. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. *Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // Авиационные материалы и технологии.* 2015. №2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
5. Каблов Е.Н. *Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии.* 2016. № 2 (14). С. 16–21.
6. Клочков Г.Г., Грушко О.Е., Попов В.И., Овчинников В.В., Шамрай В.Ф. *Структура, технологические свойства и свариваемость листов из сплава В-1341 системы Al–Mg–Si // Авиационные материалы и технологии.* 2011. №1. С. 3–8.
7. Воронков В.И., Потапенко К.Е., Петров П.А., Выдумкина С.В. *Получение уточненных данных по сопротивлению пластической деформации при горячей объемной штамповке алюминиевых сплавов АД35 и АД31 // Авиационные материалы и технологии.* 2017. №1 (46). С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-3-10.
8. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него: пат. 2215055 Рос. Федерация. №2001133680; заявл. 17.12.01; опубл. 27.10.03.
9. Деформируемый сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из этого сплава: пат. 2255133 Рос. Федерация. №2003136632; заявл. 19.12.03; опубл. 27.06.05.
10. Способ производства прессованных изделий из алюминиевого сплава серии 6000: пат. 2542183 Рос. Федерация. №2013131745; заявл. 09.07.13; опубл. 20.02.15.
11. Edwards G.A., Stiller K., Dunlop G.L., Couper M.J. *The precipitation sequence in Al–Mg–Si alloys // Acta Materialia.* 2010. Vol. 46. P. 3893–3904.
12. Pogatscher S., Antrekowitsch H., Leitner H. et al. *Mechanisms controlling the artificial aging of Al–Mg–Si Alloys // Acta Materialia.* 2011. Vol. 59. P. 3352–3363.
13. Chakrabarti D.J., Laughlin D.E. *Phase relations and precipitation in Al–Mg–Si alloys with Cu additions // Progress in Materials Science.* 2004. Vol. 49. P. 389–410.
14. Gupta A.K., Lloyd D.J., Court S.A. *Precipitation hardening in Al–Mg–Si alloys with and without excess Si // Materials Science and Engineering.* 2001. Vol. A316. P. 11–17.
15. Jacobs M.H. *The structure of the metastable precipitates formed during ageing of an Al–Mg–Si alloy // Philosophical Magazine.* 1972. Vol. 26 (1). P. 1–13.
16. 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.