

УДК 621.791

Д.К. Рябов¹, Н.И. Колобнев¹, А.О. Иванова¹

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК КОБАЛЬТА И СКАНДИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ПРОФИЛЕЙ ИЗ СРЕДНЕПРОЧНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al–Zn–Mg С ДОБАВКОЙ МЕДИ

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-1-1

Повышение служебных характеристик алюминиевых сплавов является актуальной задачей в связи с повышенными требованиями к весовой эффективности конструкций изделий авиационной техники и машиностроения. Одним из способов повышения прочности алюминиевых сплавов является легирование их элементами-модификаторами.

Приведены результаты исследований влияния скандия и кобальта на микроструктуру слитков и профилей из алюминиевого сплава типа 1913, а также показано их влияние на характеристики прочности при растяжении и коррозионной стойкости после полного цикла термической обработки.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 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») [1].

Ключевые слова: Al–Zn–Mg(–Cu), прессованные профили, слитки, микроструктура, кобальт, скандий.

Improvement of characteristics of aluminum alloys is a topical issue because of increasing requirements to weight efficiency of advanced structures for aeronautic and mechanical engineering. One of ways to improve strength of aluminum alloys is the alloying with elements, which modifies structure.

This paper deals with the results of research of the influence of scandium and cobalt on microstructure of ingots and extruded profiles of aluminum alloy of 1913 type as well as their influence on tensile strength and corrosion resistance after complete cycle of heat treatment.

Work is executed within implementation of the complex scientific direction 8.1 «High-strength welded aluminum and aluminum – lithium alloys with lower density and increased fracture toughness» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: Al–Zn–Mg(–Cu), extrusions, ingots, microstructure, alloying, cobalt, scandium.

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

Повышение весовой эффективности изделий авиационной техники и машиностроения является актуальной задачей и в основном решается благодаря внедрению в конструкцию изделий новых перспективных алюминиевых сплавов [1–3]. Повышающиеся требования к конструкционным материалам приводят к необходимости получения материалов с высокими удельными характеристиками, хорошей коррозионной стойкостью, высокой технологичностью и свариваемостью для создания легких сварных конструкций.

Сплавы системы Al–Zn–Mg, в том числе с добавкой меди, применяются в машиностроении и народном хозяйстве в связи с их высокими механическими свойствами и коррозионной стойкостью, а также удовлетворительной свариваемостью. Поиск новых составов и усовершенствование технологии изготовления полуфабрикатов при этом является перспективным направлением.

Для ряда металлических материалов перспективным направлением исследований является легирование их редкоземельными металлами, которые благодаря особому комплексу свойств и электронной структуре приводят к образованию различных фаз и формированию требуемой структуры в полуфабрикатах [4, 5].

Повышение прочности алюминиевых сплавов данной системы легирования возможно обеспечить путем введения в состав сплава элементов-модификаторов, таких как цирконий, скандий, титан и другие, что связано с изменением структуры металлов благодаря управлению процессами рекристаллизации и обеспечению формирования мелкозернистой структуры. Данные элементы малорастворимы в алюминии и склонны к образованию нерастворимых интерметаллидов в процессе литья и термической обработки. В структуре полуфабрикатов при этом формируются наноразмерные дисперсоиды, являющиеся естественной преградой для движения дислокаций, что способствует повышению их прочности. Кроме того, актуальным являются вопросы влияния данных добавок на усталостные и служебные характеристики, включая коррозионную стойкость и другие. Проведенные исследования показали, что ряд элементов, таких как железо и никель, при добавлении в расплав алюминия снижают трещиностойкость сплавов в связи с формированием грубых интерметаллидов, которые являются дополнительными концентраторами напряжений при проведении усталостных испытаний.

В данной работе проведено исследование влияния малых добавок кобальта и скандия (не более 0,8% (по массе)) на микроструктуру слитков, прессованных профилей и комплекс механических и коррозионных характеристик среднепрочного сплава системы Al–Zn–Mg(–Cu).

Материалы и методы

В качестве объекта исследований выбран сплав типа 1913 системы Al–Zn–Mg(–Cu), легированный цирконием и марганцем. В базовую композицию сплава были введены скандий и кобальт в количестве не более 0,2% (по массе). Из полученных круглых слитков были отпрессованы профили с толщиной стенки 2 мм. Соотношение цинка к магнию составило 2,1. В соответствии с типовой ДСК-кривой для данного сплава [6] была выбрана температура нагрева под закалку (470°C), после чего профили подвергали старению по различным режимам на основании результатов работ [7, 8]: Т1 (одноступенчатый режим при температуре в интервале 100–125°C) и Т3 (двухступенчатый режим с высокотемпературной второй ступенью с целью повышения характеристик коррозионной стойкости).

Металлографический анализ слитков и профилей проводили с применением светового микроскопа после травления реактивом Келлера в течение 15 с и осветления в концентрированном растворе азотной кислоты. Исследования микроструктуры в поляризованной свете проводили после травления в 1,5%-ном растворе бороводородной кислоты при напряжении 15 В в течение 2 мин.

Испытания при растяжении проводили при комнатной температуре (по ГОСТ 1497–84) с применением универсальной сервогидравлической испытательной машины Zwick/Roell (испытывали по 10 образцов от одной выборки размером 10×20 мм).

Склонность профилей из исследуемых сплавов к межкристаллитной коррозии определяли по ГОСТ 9.021 в растворе II состава: 1 н. раствор NaCl+0,3% H₂O₂.

Испытания на расслаивающую коррозию проводились по ГОСТ 9.904–82 на плоских образцах размером 60×40 мм. Перед испытанием образцы травили в 10%-ном растворе едкого натра при температуре 60°C в течение 5 мин и осветляли в 30%-ном растворе азотной кислоты, после чего еще раз промывали и высушивали на воздухе.

Результаты

Широко применяемыми элементами-модификаторами для алюминиевых сплавов являются цирконий, марганец и хром. Их влияние на алюминиевые сплавы системы Al–Zn–Mg(–Cu) широко изучалось в работах [9–11].

Влияние скандия на структуру и свойства алюминиевых сплавов изучалось в работах [12–15], где показано, что скандий образует ультрадисперсную фазу, которая может выделяться в процессе распада пересыщенного твердого раствора с формированием когерентной границы раздела между матрицей и частицей, что приводит к некоторому повышению характеристик прочности. Особенно эффективно влияние скандия в сплавах системы Al–Mg, позволяющее добиться практически двукратного повышения предела текучести по сравнению с аналогичной характеристикой в базовых сплавах. Тем не менее, действие скандия на стабильность пересыщенного твердого раствора алюминия после закалки во многом схоже с действием циркония. Имеются данные о снижении устойчивости твердого раствора, что приводит к повышению критических скоростей охлаждения, а также об отсутствии влияния скандия на характеристики коррозионной стойкости [6].

Влияние кобальта на свойства алюминиевых сплавов достаточно мало изучено. В работах [16, 17] показано благоприятное воздействие кобальта на модифицирование структуры литейных алюминиевых сплавов типа силумин, а также на повышение характеристик коррозионной стойкости. С учетом высокой температуры плавления кобальта и его интерметаллида с алюминием следует ожидать повышения механических свойств при повышенных температурах.

С целью исследования влияния скандия и кобальта на структуру круглых слитков проводили металлографические исследования микрошлифов, вырезанных из центральной области слитка в районе донника. Микроструктура слитков представлена на рис. 1.

Базовая композиция сплава кристаллизуется с образованием дендритной структуры, средний размер дендритов составляет ~500 мкм. Из анализа структур сплавов с различными добавками видно, что скандий приводит к образованию равноосной недендритной структуры, что согласуется с данными о сильном модифицирующем действии скандия. При этом добавка кобальта исследуемой концентрации не оказывает существенного влияния на изменение структуры, что связано с высоким несоответствием решетки алюминия и интерметаллида на основе алюминия и кобальта. Размер литого зерна в сплаве, содержащем скандий, составил ~50 мкм. Формирование данной структуры возможно благодаря образованию мелких первичных частиц фазы Al₃Sc, в которой также может растворяться цирконий. Вследствие небольшого размера и правильной формы данные частицы являются предпочтительными местами для зарождения и кристаллизации зерен твердого раствора, что приводит к формированию такого типа структуры. Данная структура характерна для слитков из сплавов системы Al–Mg–Sc. В процессе литья промышленных слитков исследуемого сплава при введении скандия в состав сплава операцию модифицирования слитков с целью получения регламентированной мелкозернистой структуры можно не проводить.

Из полученных слитков методом прямого прессования изготовлены профили, при этом технологические параметры прессования были идентичными для всех исследуемых сплавов, после чего проводили упрочняющую термическую обработку. Механические характеристики профилей (средние значения) при растяжении в продольном направлении представлены в табл. 1.

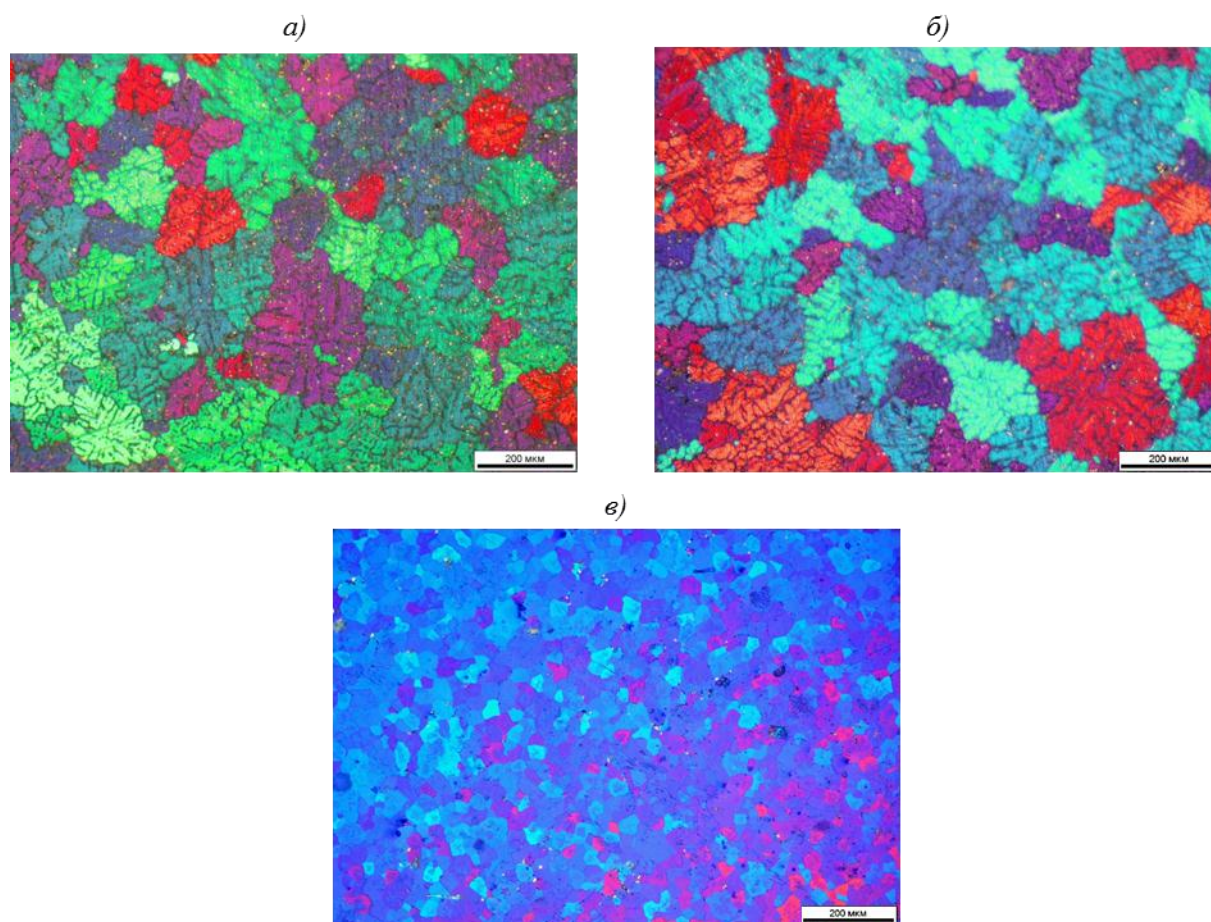


Рис. 1. Микроструктура слитков из сплавов системы Al-Zn-Mg(-Cu) без добавок (а), с добавкой кобальта (б) и скандия (в)

Таблица 1

Механические свойства прессованных профилей после старения по различным режимам

Сплав	Режим термической обработки	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
		МПа		
Al-Zn-Mg(-Cu)	T1	485	430	13,0
	T3	440	385	11,0
Al-Zn-Mg(-Cu)+Co	T1	480	430	11,0
	T3	440	390	9,0
Al-Zn-Mg(-Cu)+Sc	T1	525	465	14,0
	T3	470	415	12,5

Повышение прочности наблюдается только в сплаве, в который был введен скандий, что соответствует данным о влиянии скандия на повышение механических свойств благодаря выделению наноразмерных интерметаллидов типа $Al_3(Sc, Zr)$. Добавка кобальта не привела к заметному изменению механических свойств. Это может быть связано с тем, что фаза, содержащая кобальт, выделяется в достаточно грубой форме, что приводит к некоторому снижению уровня относительного удлинения.

Необходимо отметить, что прирост прочности составляет до 40 МПа при искусственном старении на максимальную прочность. Однако после старения по режимам перестаривания разница между прочностью базового сплава и сплава, содержащего скандий, сокращается. Это связано со снижением устойчивости пересыщенного твердого раствора вследствие введения скандия за счет инициации распада пересыщенного

твердого раствора на межфазной границе. Аналогичные эффекты были обнаружены на листах из сплава 1913 [18, 19]. В связи с этим для разработки промышленных режимов упрочняющей термической обработки необходимо уточнять продолжительность выдержки при искусственном старении с целью обеспечения требуемого уровня механических характеристик.

Исследование микроструктуры (рис. 2) показало, что в процессе прессования и термической обработки формируется вытянутая структура, характерная для прессованных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. После введения скандия структура становится более «деформированной», толщина волокон сужается, что говорит о сопротивлении процессам рекристаллизации и миграции границ в процессе механической и термической обработки. Утонение структуры, вероятнее всего, и привело к повышению механических свойств наравне с формированием дисперсных частиц интерметаллидов.

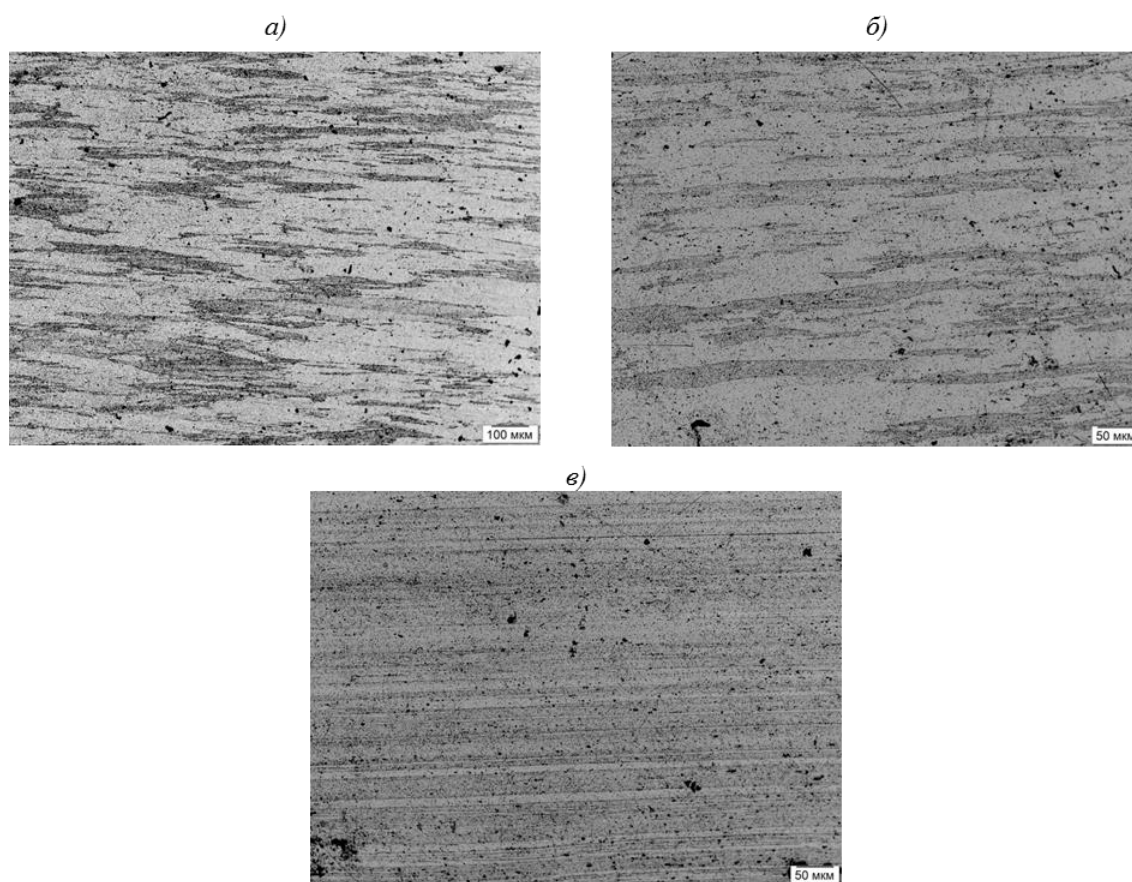


Рис. 2. Микроструктура профилей из сплавов системы Al-Zn-Mg(-Cu) без добавок (а), с добавкой кобальта (б) и скандия (в)

С целью исследования влияния добавок на коррозионную стойкость профилей проводили испытания с определением склонности к расслаивающей (РСК) и межкристаллитной (МКК) коррозии. Известно, что сплавы данной группы склонны к расслаивающей коррозии, особенно после старения по режимам, обеспечивающим максимальную прочность. При повышении длительности и температуры на второй ступени старения уменьшается склонность к расслаивающей коррозии, однако и снижаются механические свойства вследствие коагуляции упрочняющих фаз ($MgZn_2$). Результаты испытаний на МКК и РСК приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики коррозионной стойкости прессованных профилей

Сплав	Режим термической обработки	РСК, балл	МКК, мм
Al-Zn-Mg(-Cu)	T1	5	0,12
	T3	2	0
Al-Zn-Mg(-Cu)+Co	T1	4-5	0,09
	T3	2	0
Al-Zn-Mg(-Cu)+Sc	T1	7	0,12
	T3	3	0

Наблюдается некоторое повышение склонности к расслаивающей коррозии в сплаве, содержащем скандий, в особенности после старения на максимальную прочность, что может быть связано с формированием тонкой слоистой структуры, в которой процессы расслаивания проходят легче в сравнении с более грубой структурой, сформировавшейся в сплавах с добавкой кобальта и без нее. Полученные в результате испытаний данные о некотором снижении коррозионной стойкости при введении скандия могут являться результатом изменения структуры, а не действием электрохимических процессов между матрицей и частицами Sc.

При этом уровень склонности к расслаивающей коррозии после старения по режиму T3 находится на приемлемом уровне, что позволяет применять данный материал в зонах с повышенной коррозионной опасностью. Необходимо отметить, что влияние скандия на повышение прочности обеспечило уровень свойств после старения по режиму T3, аналогичный прочности базового сплава без добавки скандия после старения на максимальную прочность. Дополнительное легирование кобальтом приводит к некоторому повышению характеристик стойкости к РСК и МКК в состоянии T1, однако полученные данные могут являться следствием малой статистики по результатам коррозионных испытаний.

Обсуждение и заключения

Дополнительное легирование скандием сплава системы Al-Zn-Mg с малой добавкой меди привело к существенному изменению литой структуры с образованием равноосных зерен. Добавка кобальта не оказывает никакого влияния на размер литого зерна, что говорит о слабом его действии в качестве элемента-модификатора.

Легирование кобальтом не приводит к повышению прочностных свойств исследуемого сплава при растяжении, при этом несколько снижается относительное удлинение по сравнению с аналогичной характеристикой базового сплава, что может быть связано с наличием в структуре крупных интерметаллидов на основе алюминия и кобальта. Введение скандия обеспечивает повышение прочностных характеристик на 30–40 МПа, при этом уровень относительного удлинения также повышается. Повышение прочности при введении скандия наиболее сильно проявляется при старении на максимальную прочность. Однако в сплаве со скандием при обработке по режиму T3 наблюдается большее разупрочнение в сравнении с режимом T1, по-видимому, вследствие снижения стабильности пересыщенного твердого раствора.

Введение кобальта способствует некоторому снижению склонности к межкристаллитной коррозии профилей в состоянии T1. Добавка скандия приводит к некоторому повышению склонности к расслаивающей коррозии в состоянии T1, что может быть связано с изменением структуры профилей.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н. *Авиакосмическое материаловедение* // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
3. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.09.2015).
5. Каблов Е.Н., Логунов А.В., Сидоров В.В. Микролегирование РЗМ – современная технология повышения свойств литейных жаропрочных никелевых сплавов // *Перспективные материалы*. 2001. №1. С. 23–34.
6. Рябов Д.К., Колобнев Н.И., Махсидов В.В., Фомина М.А. О стабильности пересыщенного твердого раствора листов сплава 1913 при закалке // *Металлургия машиностроения*. 2012. №3. С. 30–33.
7. Рябов Д.К., Колобнев Н.И., Самохвалов С.В., Махсидов В.В. Влияние предварительного естественного старения на свойства сплава 1913 в искусственно состаренном состоянии // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №2. С. 8–11.
8. Рябов Д.К., Колобнев Н.И., Самохвалов С.В., Вахромов О.В. Изменение механических и коррозионных свойств сплава 1913 при искусственном старении // *Вопросы материаловедения*. 2013. №4 (76). С. 24–29.
9. Елагин В.И. *Легирование деформированных алюминиевых сплавов переходными металлами*. М.: *Металлургия*, 1975. 321 с.
10. Фридляндер И.Н. *Высокопрочные деформируемые алюминиевые сплавы*. М.: *Оборонгиз*, 1960. 290 с.
11. Фридляндер И.Н. *Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы*. М.: *Металлургия*, 1979. 208 с.
12. Berezina A.L., Kolobnev N.I., Molebny O.A., Rud A.D., Shmatko O.A. Effect of Sc, Zr on the Al–Cu–Li alloys structure and properties in the dependence of Cu concentration // *Proceeding of the International Coonference «Light Alloys and Composites»*. Poland. Zakopane. 1999. P. 147–155.
13. Захаров В.В., Ростова Т.Д. Упрочнение алюминиевых сплавов при легировании их скандием // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2013. №12 (702). С. 24–29.
14. Yin Z., Yang L., Pan Q., Jiang F. // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2001. V. 11. P. 822–825.
15. Wloka J., Virtanen S. Influence of scandium on the pitting behaviour of Al–Zn–Mg–Cu alloys // *Acta Materialia*. V. 55 (2007). P. 6666–6672.
16. Nwambu C.N., Nnuka E.E., Odo J.U., Nwoye C.I., Nwakpa S.O. Effect of molybdenum and cobalt addition on structure and mechanical properties of aluminium-12,5% silicon alloy // *International Journal of Engineering Science Invention*. 2014. V. 3. Issue 4. P. 20–24.
17. Sani A.S., Aliyu I., Polycarp E. Effect of chromium and cobalt additions on the corrosion resistance of aluminium silicon iron alloy (Al–Si–Fe) // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2012. V. 3. Issue 12. P. 1–10.
18. Рябов Д.К., Колобнев Н.И., Кочубей А.Я., Заводов А.В. Изменение механических свойств листов из сплава 1913 при введении скандия // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №4. С. 3–8.
19. Ryabov D., Kolobnev N., Samohvalov S. Effect of scandium addition on mechanical properties and corrosion resistance of medium strength Al–Zn–Mg(–Cu) alloy // *Materials Science Forum*. 2014. V. 794–796. P. 241–246.