

Д.К. Рябов<sup>1</sup>, Н.И. Колобнев<sup>1</sup>, А.Я. Кочубей<sup>1</sup>, А.В. Заводов<sup>1</sup>

## ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИСТОВ ИЗ СПЛАВА 1913 ПРИ ВВЕДЕНИИ СКАНДИЯ

Сплавы системы Al–Zn–Mg широко применяются в качестве конструкционных материалов в автомобилестроении, строительстве и авиационной технике. Скандий – редкоземельный металл, позволяющий модифицировать структуру полуфабрикатов путем эффективного подавления процессов рекристаллизации. Введение скандия в сплавы приводит к увеличению пределов прочности и текучести вследствие образования наноразмерных интерметаллидов Al<sub>3</sub>Sc. В статье рассмотрено влияние малой добавки скандия (не более 0,1% (по массе)) на механические свойства холоднокатаных листов из сплава 1913. Сплав 1913 – среднепрочный коррозионностойкий свариваемый сплав системы Al–Zn–Mg, дополнительно легированный медью для улучшения характеристик коррозионной стойкости под напряжением. Показано, что добавка скандия изменяет кинетику искусственного старения и ускоряет процесс распада пересыщенного твердого раствора, а также позволяет повысить предел прочности на 50 МПа в искусственно состаренном состоянии. Приведены результаты исследования комплекса механических свойств, включая трещиностойкость и малоцикловую усталость.

**Ключевые слова:** сплав 1913, скандий, термическая обработка, текстура, рекристаллизация.

Al–Zn–Mg alloys are widely used as structural materials for a large number of applications including automotive industry, building, and aeronautical engineering. Scandium is a rare-earth metal, which modifies a structure of semi-products because of affecting on recrystallization processes. Sc addition in alloys leads to increasing of ultimate tensile and yield strength because of Al<sub>3</sub>Sc intermetallics formation of nanoscale size. This paper describes the results of influence of small addition of scandium (not less than 0,1% wt.) on mechanical properties of cold-rolled sheets of 1913 alloy. It is a medium strength corrosion resistant weldable Al–Zn–Mg alloy with addition of Cu for improvement of stress corrosion resistance. It is shown that addition of Sc transforms a kinetics of artificial aging and accelerates a decomposition of oversaturated solid solution, and allows also to increase an ultimate tensile strength by 50 MPa in artificially aged temper. Results of mechanical tests including fracture toughness and low cycle fatigue tests are introduced.

**Keywords:** 1913 alloy, scandium, heat treatment, texture, recrystallization.

<sup>1</sup>Федеральное 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

Современный уровень развития техники и технологий требует разработки летательных аппаратов нового поколения. Для обеспечения весовой эффективности изделий перспективным направлением является замена клепаных конструкций на сварные [1–5]. Для сварных конструкций планера идеально подходят свариваемые алюминиевые сплавы системы Al–Zn–Mg(–Cu), которые свариваются всеми видами сварки и обладают высокой коррозионной стойкостью. Все алюминиевые сплавы в настоящее время обязательно легируют переходными металлами (ПМ). Малые добавки элементов, таких как Zr, Mn, Ti, Sc, Fe, Cr и других, позволяют существенно изменить свойства как самого сплава, так и полуфабриката, изготовленного из него [5–8]. Скандий является одним из самых эффективных модификаторов для алюминиевых сплавов, обеспечивающих измельчение структуры в полуфабрикате и упрочнение благодаря образованию частиц Al<sub>3</sub>Sc. Введение скан-

дия может повысить стойкость к коррозии под напряжением данных сплавов [7].

В ряде работ показано положительное влияние скандия на механические характеристики алюминиевых сплавов различных систем легирования [8–13]. Большой перспективой с точки зрения повышения служебных характеристик полуфабрикатов обладает совместное легирование скандием и цирконием. С учетом того, что алюминиевые сплавы остаются одними из самых востребованных конструкционных материалов для изделий авиационной техники и машиностроения остро стоит вопрос о разработке новых композиций для обеспечения повышенных характеристик усталостной прочности и коррозионной стойкости [2, 5, 14, 15].

### Материалы и методы

В качестве объекта исследований выбран отечественный алюминиевый сплав 1913 системы Al–Zn–Mg, дополнительно легированный медью

для улучшения стойкости к коррозионному растрескиванию. Исследования проводили на листах толщиной 1,5 мм, полученных в условиях металлургического производства ОАО «КУМЗ». Степень холодной деформации (при прокатке) составила 58%. В сплав введены марганец и цирконий в качестве элементов-антирекристаллизаторов. Исследовали два экспериментальных состава сплава: первый – с добавкой скандия в количестве 0,08% (по массе), второй – без скандия.

Металлографический анализ с применением светового микроскопа проводили на шлифах после травления реактивом Келлера в течение 45 с и осветления в концентрированном растворе азотной кислоты. Кроме того, проводили исследования в поляризованном свете после электролитического травления в 1,5%-ном растворе тетрафторобората водорода.

Испытания при растяжении проводили при комнатной температуре (по ГОСТ 1497–84) с применением универсальной сервогидравлической испытательной машины Zwick-Roell.

Термическую обработку листов из сплава 1913 проводили по результатам исследования кривых, полученных с помощью ДСК [16, 17], – при температуре 470°C, закалка в холодной воде.

### Результаты

Ряд литературных источников содержит информацию об уменьшении размера зерна в слитках и деформированных полуфабрикатах из алюминиевых сплавов различных систем легирования при введении скандия [6, 7, 12, 18]. Для установления влияния добавки скандия при совместном его введении с цирконием и марганцем были проведены микроскопические исследования. Сравнительный анализ микроструктуры листов из сплава 1913 (рис. 1) после закалки показал, что наличие антирекристаллизаторов в структуре сплава 1913 обеспечивает получение мелкого (средний размер 40 мкм) зерна (в направлении прокатки), что согласуется с данными из научно-технической литературы по исследованию алюминиевых сплавов тройной системы. Введение в сплав 1913 скандия практически полностью подавляет процессы рекристаллизации; при больших увеличениях можно заметить небольшие зародыши зерен, разделенные высокоугловыми границами.

Для выявления предпочтительной ориентировки зерен (текстуры) в листах из сплава 1913, содержащих скандий, проведены рентгеноструктурные исследования. В листах из сплава 1913 со скандием выявлено наличие ярко выраженной текстуры прокатки (110), [112] (рис. 2). Наличие текстуры в материале может быть причиной анизотропии механических свойств.

Ожидается, что листы с предпочтительной ориентировкой зерен будут обладать различными механическими свойствами в направлении деформации и поперек направления прокатки.

Механические свойства листов из сплава 1913 в зависимости от направления деформации, после закалки и искусственного двухступенчатого старения по режиму ТЗ, представлены в табл. 1.

В листах из сплава 1913, содержащего скандий, присутствует характерная обратная анизотропия по относительному удлинению, при этом, несмотря на наличие текстуры, анизотропия по пределам прочности и текучести практически отсутствует.

С целью исследования характера изменения механических свойств алюминиевых сплавов изучена кинетика одноступенчатого искусственного старения. Старение проводили в печах с принудительной конвекцией воздуха по различным режимам. В результате исследования установлены закономерности изменения механических свойств (рис. 3), которые опубликованы в работах [19, 20].

Аналогичные зависимости установлены для листов из сплава 1913 без скандия. Зависимости предела текучести листов из сплава 1913 без добавки скандия от температуры представлены графически в виде кривых (см. рис. 3).

Добавка скандия не изменяет характер распада твердого раствора. Наблюдается смещение положения максимума свойств в сторону коротких выдержек, при этом области одинакового уровня предела текучести несколько расширены в сторону более высоких температур. Полученные данные косвенно свидетельствуют о существенном влиянии скандия на распад твердого раствора, что подтверждается исследованиями стабильности пересыщенного твердого раствора листов из сплава 1913, содержащих скандий, при закалке [16].

Выявленные закономерности позволяют сделать вывод о целесообразности выбора других

Таблица 1

Механические свойства листов из сплава 1913

Свойства	Значения свойств для сплава 1913			
	без Sc		со Sc	
	Д*	П*	Д*	П*
$\sigma_b$ , МПа	435	435	465	468
$\sigma_{0,2}$ , МПа	355	357	385	385
$\delta$ , %	13,5	13,0	10,5	12,5

\* Направление вырезки образца.

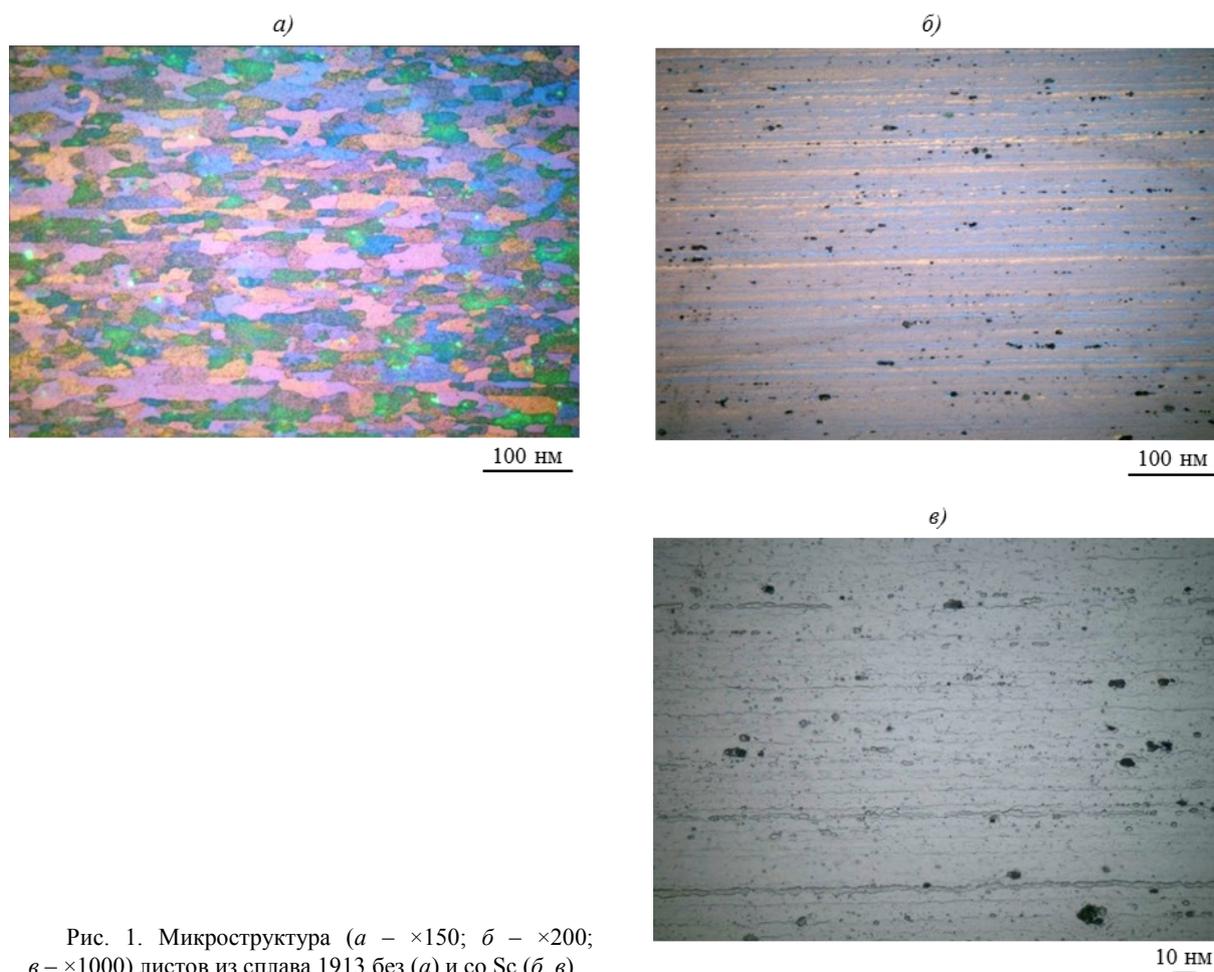


Рис. 1. Микроструктура (*a* –  $\times 150$ ; *b* –  $\times 200$ ; *c* –  $\times 1000$ ) листов из сплава 1913 без (*a*) и со Sc (*b*, *c*)

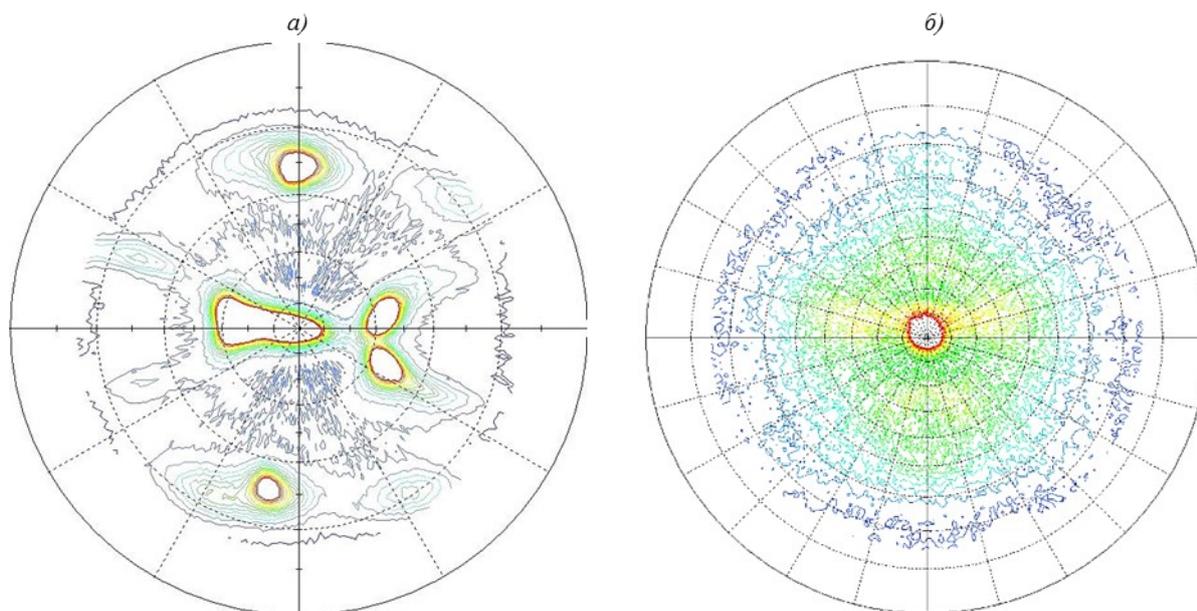


Рис. 2. Полюсные фигуры листов из сплава 1913 со Sc (*a*) и без него (*b*) в рефлексe {220}

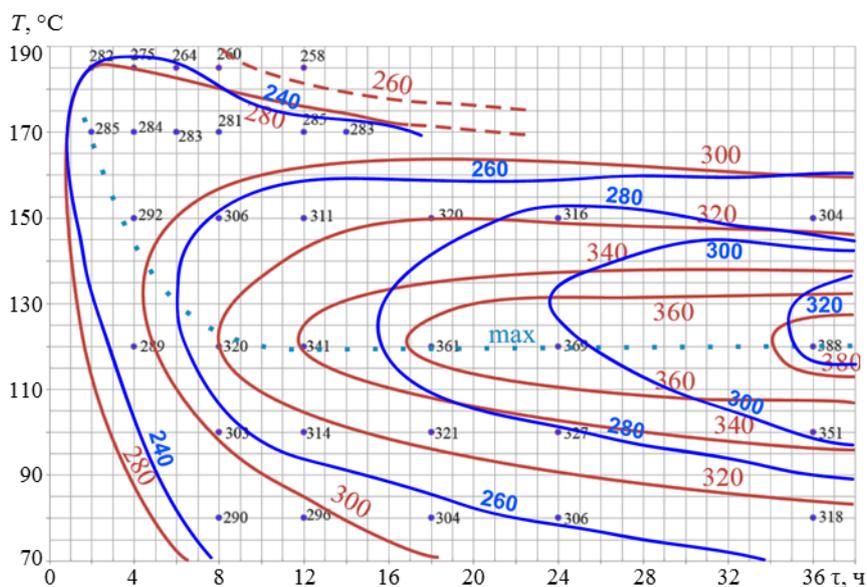


Рис. 3. Зависимости предела текучести листов из сплава 1913 без добавки Sc (синие линии) и со Sc (красные линии) от температурно-временных параметров старения

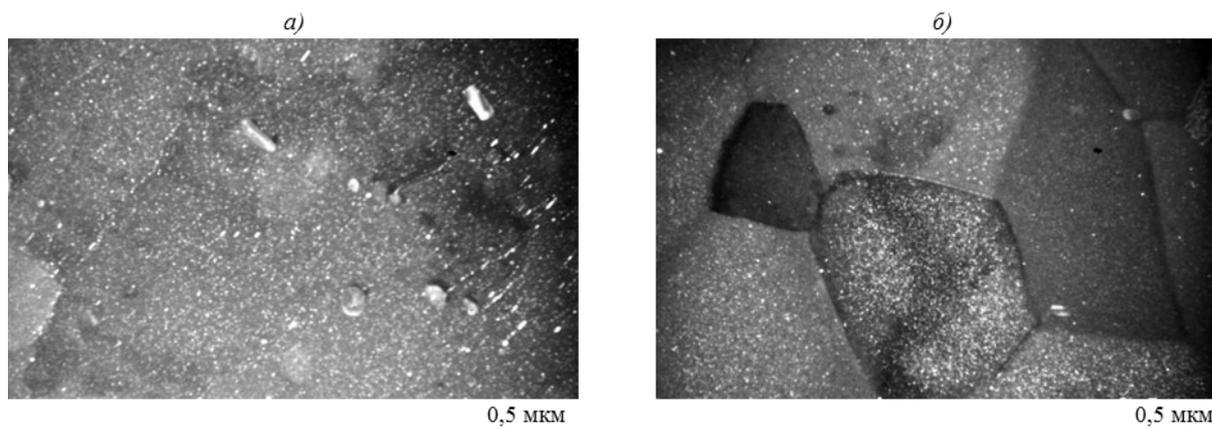


Рис. 4. Изображение структуры листов из сплава 1913 без Sc (а) и со Sc (б) в рефлексе η'-фазы

Таблица 2

Механические характеристики листов из сплава 1913 (средние значения)

Свойства	Значения свойств для сплава 1913					
	без Sc			со Sc		
	ДП*	ПД*	Анизотропия, %	ДП*	ПД*	Анизотропия, %
$\sigma_b$ , МПа	440	442	0	485	480	0
КСУ, кДж/м <sup>2</sup>	304	282	7	271	214	21
КСТ, кДж/м <sup>2</sup>	168	152	10	156	127	19
$K_{IC}$ , МПа $\sqrt{м}$ (при $B=400$ мм)	118	115	0	115	105	10
МЦУ: $N$ , цикл (при $\sigma_{max}=157$ МПа; $f=40$ Гц; $K_I=2,6$ )	110	106	4	122	112	8

\* Направление вырезки образца.

температурно-временных параметров искусственного старения для материала, имеющего в своем составе скандий. Увеличение продолжительности выдержки при старении может привести к большой степени разупрочнения при применении режимов, обеспечивающих перестаривание, что в конечном итоге полностью нивелирует положительные эффекты от введения скандия.

На основании установленных зависимостей разработаны режимы искусственного старения листов из сплава 1913 двух составов (без и со Sc), обеспечивающие некоторую степень перестаривания [21]. Температура второй ступени старения находится в интервале 145–160°C. Длительность выдержки на второй ступени для сплава 1913, содержащего скандий, сокращена на 2 ч с целью обеспечения повышенных характеристик коррозионной стойкости (ввиду воздействия скандия, приводящего к усиленному распаду пересыщенного твердого раствора).

Листы из сплава 1913 состарены по разработанным режимам, после чего проведены исследования тонкой структуры с применением просвечивающего электронного микроскопа (рис. 4).

Старение сплава 1913, содержащего скандий, обеспечивает более интенсивный распад твердого раствора, приводящий к повышению плотности выделений, и, как следствие, высокие значения механических свойств листов. При этом размер упрочняющих фаз в листах из сплава 1913 двух составов (без и со Sc) соизмерим.

С целью исследования анизотропии по характеристикам усталости и трещиностойкости, проведены испытания листов из сплава 1913, результаты которых (средние значения) приведены в табл. 2.

Листы из сплава 1913, содержащего скандий, обладают повышенной (на 40 МПа) прочностью при растяжении. Однако вследствие наличия в листах предпочтительной ориентировки зерен

имеется анизотропия по характеристикам ударной вязкости, которая достигает 21%. Выявлена тенденция к повышению характеристик трещиностойкости в направлении ДП, что связано с характерной волокнистостью структуры листов из сплава 1913 из-за блокирования процесса рекристаллизации скандием. Скандий несколько снижает характеристики трещиностойкости в направлении ПД в сравнении с листами из сплава 1913, в котором отсутствовала добавка скандия, что требует проведения дополнительных работ по оптимизации режимов термической обработки и изготовления листов. При этом уровень малоциклового усталости листов из сплава 1913 повышается при введении скандия. Уровень анизотропии по МЦУ находится на низком уровне, что свидетельствует о меньшей чувствительности данной характеристики к наличию текстуры в материале. Кроме того, повышение значений малоциклового усталости связано, вероятно, с повышенным уровнем механических свойств листов из сплава 1913.

#### Обсуждение и заключения

Показано, что введение скандия в среднепрочный сплав системы Al–Zn–Mg–(Cu) позволяет повысить уровень механических свойств (на 30–40 МПа) в зависимости от режима искусственного старения. Добавка скандия усиливает распад твердого раствора, что приводит к смещению максимума механических свойств в сторону более коротких выдержек. Это необходимо учитывать при разработке режимов искусственного старения.

Введение скандия в алюминиевые сплавы позволяет подавить процессы рекристаллизации при обработке на твердый раствор, что способствует образованию текстуры в листах и обеспечивает обратную анизотропию по уровню относительного удлинения и прямую анизотропию – по характеристикам ударной вязкости и трещиностойкости, которая достигает 21%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
2. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 167–182.
3. Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л. и др. Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства. К.: Наукова думка. 1992.
4. Алюминиевые сплавы /В кн. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди. Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2012. С. 143–156.
5. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. № 3. С. 2–14.
6. Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М. и др. Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник. М.: Металлургия. 1984. 527 с.
7. Елагин В.И. Легирование деформированных алюминиевых сплавов переходными металлами. М.: Металлургия. 1975. 321 с.
8. Елагин В.И., Захаров В.В., Дриц А.М. Структура и свойства сплавов системы Al–Zn–Mg. М.: Металлургия 1982. 222 с.
9. Mukhopadhyay A.K., Prasad K.S., Vikas Kumar et al. Key Microstructural Features Responsible for Improved Stress Corrosion Cracking Resistance and Weldability in 7xxx Series Al Alloys Containing Micro/Trace Alloying Additions /Proceedings of the 10-th International Conference on Aluminium Alloys. Vancouver. 2006. P. 315–320.
10. Ying Deng, Zhimin Yin, Kai Zhao et al. Effects of Sc and Zr microalloying additions and aging time at 120°C

- on the corrosion behaviour of an Al–Zn–Mg alloy //Corrosion Science. 2012. V. 65. P. 288–298.
11. Marlauda T., Deschamps A., Bleya F. et al. Influence of alloy composition and heat treatment on precipitate composition in Al–Zn–Mg–Cu alloys //Acta Materialia. 2010. V. 58. №1. P. 248–260.
  12. Liang Zou, Qing-lin Pan, Yun-bin He, Chang-Zhen Wang. Effect of minor Sc and Zr addition on microstructures and mechanical properties of Al–Zn–Mg–Cu alloys //Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2006. №10. P. 340–344.
  13. Liang Zou, Qing-Lin Pan, Yun-Bin He et al. Microstructures and tensile properties of Al–Zn–Cu–Mg–Zr alloys modified with scandium //Materials Science. 2008. №44. P. 120–125.
  14. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
  15. Григорьев М.В., Антипов В.В., Вахромов Р.О. и др. Структура и свойства слитков из сплава системы Al–Cu–Mg с микродобавками серебра //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 3–6.
  16. 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.
  17. Лощинин Ю.В., Пахомкин С.И., Фокин А.С. Влияние скорости нагревания при исследовании фазовых превращений в алюминиевых сплавах методом ДСК //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 3–6.
  18. Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Королькова И.Г., Болотова М.Н. Исследование совместного влияния скандия и хрома на структуру и механические свойства алюминия и его сплавов с магнием //Материаловедение и термическая обработка. 2008. №3. С. 115–119.
  19. Рябов Д.К., Колобнев Н.И. Изменение механических свойств сплава 1913 при двухступенчатом искусственном старении //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 3–7.
  20. 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.
  21. 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.