

## РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СКАНДИЙСОДЕРЖАЩЕГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

В.Н. Баранов<sup>1</sup>, С.Б. Сидельников<sup>1</sup>, Е.Ю. Зенкин<sup>2</sup>, Д.С. Ворошилов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

<sup>2</sup>ОАО «РУСАЛ Братский алюминиевый завод», г. Братск, Россия

Показана актуальность работ, направленных на создание новых сплавов системы Al-Mg, легированных скандием, которые характеризуются выгодным сочетанием эксплуатационных и механических свойств, таких, как свариваемость, коррозионная стойкость и достаточная прочность. В промышленных условиях получены плоские слитки из экспериментального скандийсодержащего сплава размерами 560×1360×4520 мм. Для вырезанных из них заготовок с максимальной толщиной 40 мм были разработаны и опробованы режимы термообработки и листовой прокатки. В качестве оборудования для прокатки использовали стан ДУО 330 с гладкими валками с начальным диаметром 330 мм и шириной бочки 540 мм. В результате экспериментальных исследований, заключающихся в подготовке заготовок к прокатке (гомогенизационный отжиг и фрезерование граней), горячей прокатке при температуре 450 °С, холодной прокатке до толщины 3 мм и отжиге холоднодеформированных полуфабрикатов при температуре 350 °С в течение 3 часов, получены деформированные полуфабрикаты, изготовленные по различным схемам обжатий при прокатке и прошедшие термообработку. Максимальная степень суммарной деформации при прокатке заготовок до толщины 3 мм составила 92,5%, а вытяжка за проход изменялась от 1,04 до 1,2. С помощью универсальной испытательной машины LFM400 усилием 400 кН в соответствии с ГОСТ 1497-84 определены механические свойства деформированных и отожженных полуфабрикатов различной толщины из экспериментального сплава и установлены закономерности их изменения в зависимости от суммарной степени деформации при прокатке. Анализ механических свойств полученных полуфабрикатов показал, что уровень прочностных и пластических свойств достаточно высок, при этом временное сопротивление разрыву достигает для холоднодеформированных образцов 453-481 МПа, предел текучести металла 429-457 МПа, а относительное удлинение 3,8-5,0%. Применение отжига дало возможность повысить значения относительного удлинения до 14-16 % при достаточно высоких значениях предела текучести (до 277 МПа). Результаты проведенных исследований позволили разработать режимы литья, прокатки и отжига для получения полуфабрикатов из сплава системы Al-Mg, экономнолегированного скандием в пределах 0,10-0,14%, которые будут использоваться при освоении технологий обработки в промышленных условиях.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, скандий, прокатка, деформированные полуфабрикаты, механические свойства, усилие и момент прокатки.

**Баранов В.Н.** – канд. техн. наук, директор Института Цветных Металлов и Материаловедения ФГАОУ ВО СФУ (660025, г. Красноярск, просп. им. Газеты Красноярский рабочий, 95). E-mail: vnbar79@mail.ru.

**Сидельников С.Б.** – докт. техн. наук, проф., заведующий каф. ОМД Института Цветных Металлов и Материаловедения ФГАОУ ВО СФУ (660025, г. Красноярск, просп. им. Газеты Красноярский рабочий, 95). E-mail: sbs270359@yandex.ru.

**Зенкин Е.Ю.** - управляющий директор ОАО «РУСАЛ Братский алюминиевый завод» (665716, Иркутская область, г. Братск). Тел.: +7(3953) 49-26-50. E-mail: EvgeniyZenkin@rusal.com.

**Ворошилов Д.С.** – канд. техн. наук, доцент каф. ОМД Института Цветных Металлов и Материаловедения ФГАОУ ВО СФУ (660025, г. Красноярск, просп. им. Газеты Красноярский рабочий, 95). Тел.: (391) 206-37-31. E-mail: sibdrug@mail.ru.

*Baranov V.N., Sidelnikov S.B., Zenkin E.Yu., Voroshilov D.S.*

***Development regimes of obtaining deformed semi-finished products from experimental scandium containing aluminium alloy and research their mechanical properties***

The urgency of the works directed on creation of new alloys Al-Mg system is shown, alloyed with scandium, which are characterized by an advantageous combination of operational and mechanical properties, Such as weldability, corrosion resistance and sufficient strength. In industrial conditions, flat ingots were obtained from an experimental scandium-containing alloy with dimensions 560×1360×4520 mm. For billets cut from them with the maximum thickness 40 mm the heat treatment and sheet rolling regimes were developed and tested. As the equipment for rolling was used mill DUO 330 with smooth rolls with initial diameter 330 mm and barrel width 540 mm. As a result of experimental studies, consisting in the preparation of blanks for rolling (homogenization annealing and face milling), hot rolling at temperature 450 °C, cold rolling to thickness 3 mm and annealing of cold-deformed semi-finished products at a temperature of 350 °C within 3 hours, The deformed semi-finished products made on various schemes of reductions at rolling have been received and have passed heat treatment. Maximum total degree of deformation during rolling of billets to 3 mm thickness was 92,5%, and the draw ratio for the passage changed from 1,04 to 1,2. Using a universal test machine LFM400 with effort 400 kN in accordance with State Standard 1497-84 the mechanical properties of deformed and annealed semi-finished products from experimental alloy of various thicknesses were determined and the patterns of their changes depending on the total degree of deformation during rolling were established. Analysis of the mechanical properties of the semi-finished products showed that the level of strength and plastic properties is quite high, wherein the tensile strength reaches for cold-deformed samples 453-481 MPa, yield strength of metal 429-457 MPa, and the relative elongation 3,8-5,0%. The annealing application made it possible to increase the values of the relative elongation to 14-16 % at sufficiently high yield stress (to 277 MPa). The results of the conducted researches allowed to develop the regimes of casting, rolling and annealing for obtaining semi-finished products from the alloy system Al-Mg, economically alloyed with scandium within 0,10-0,14%, which will be used in the development of machining technologies in industrial conditions.

**Keywords:** aluminium alloys, scandium, rolling, deformed semi-finished products, mechanical properties, effort and rolling moment.

**Baranov V.N.** - Cand. Sci. (Eng.), Director of School of Non-Ferrous Metals and Material Science SFU (660025, Russia, Krasnoyarsk, ave. Imeni gazeti Krasnoyarskiy rabochiy, 95). E-mail: vnbar79@mail.ru.

**Sidelnikov S.B.** - Dr. Sci. (Eng.), professor, Head of Metal Forming Department of School of Non-Ferrous Metals and Material Science SFU (660025, Russia, Krasnoyarsk, ave. Imeni gazeti Krasnoyarskiy rabochiy, 95). E-mail: sbs270359@yandex.ru.

**Zenkin E.Yu.** - Managing Director «RUSAL Bratsk aluminium smelter» JSC (665716, Russia, Irkutsk region, Bratsk). Phone.: +7(3953) 49-26-50. E-mail: EvgeniyZenkin@rusal.com.

**Voroshilov D.S.** – Cand. Sci. (Eng.), Docent of Metal Forming Department of School of Non-Ferrous Metals and Material Science SFU (660025, Russia, Krasnoyarsk, ave. Imeni gazeti Krasnoyarskiy rabochiy, 95). Phone.: +7 (391) 206-37-31. E-mail: sibdrug@mail.ru.

## Введение

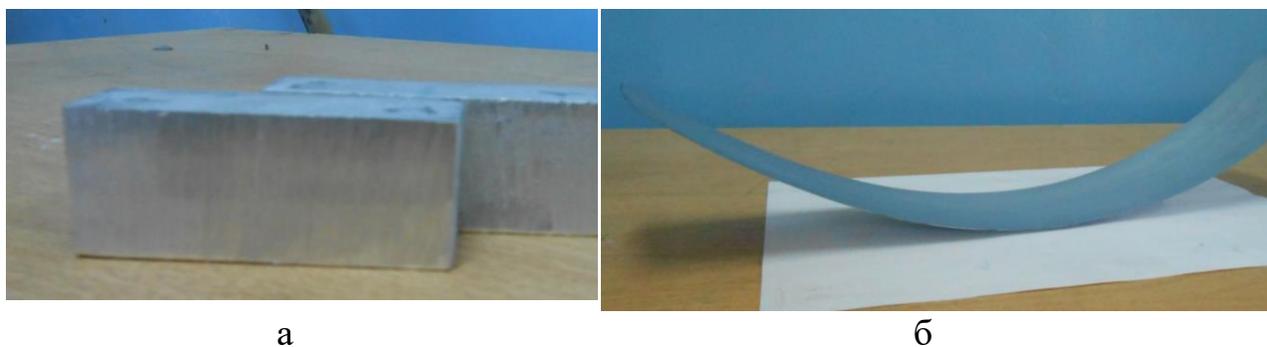
Алюминиевые сплавы системы алюминий-магний широко используются в промышленности, но при этом резерв повышения прочности традиционных сплавов практически исчерпан. Поэтому для повышения прочностных характеристик перспективным является их легирование малыми добавками редкоземельных (РЗМ) и переходных (ПМ) металлов [1, 2]. Сочетание свариваемости, коррозионной стойкости и достаточной прочности позволяют использовать листы из сплавов системы Al–Mg для обшивки корпусов морских судов, в автомобиле-, самолето- и ракетостроении, а также в других областях промышленности. Во многом благодаря этому листы являются основным видом деформированных полуфабрикатов из магниевых сплавов. Учитывая, что технология прокатки из них, в частности сплавов AMg5 и AMg6, достаточно хорошо изучена, она и была выбрана в качестве основы для экспериментальных исследований по получению листовых деформированных полуфабрикатов из нового сплава системы Al–Mg, экономнолегированного скандием с добавками, циркония, хрома и марганца.

Исследованиям в области создания таких сплавов и изучению свойств изделий, производимых из них, посвящено много научных публикаций, в том числе и зарубежных [3-21]. С целью более глубокого изучения

закономерностей формирования механических и эксплуатационных свойств изделий из алюминиевых сплавов системы Al–Mg, легированных скандием, сотрудниками компании «РУСАЛ» совместно с учеными института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета за последние годы проведен ряд экспериментальных исследований с варьированием химического состава сплавов и режимов их обработки, а также получены опытные партии литых и деформированных полуфабрикатов из них [22].

### **Методика проведения исследований**

В условиях Братского алюминиевого завода были отлиты плоские слитки размерами 560×1360×4520 мм из экспериментального алюминиевого сплава системы Al–Mg, в котором содержание скандия варьировалось в пределах 0,10-0,14%. От слитков были отрезаны темплеты, из которых изготовили заготовки прямоугольной формы с фрезерованными гранями для прокатки (рис. 1, а).



**Рис. 1. Заготовки под прокатку (а) и прокатанная полоса (б) из экспериментального сплава**

Заготовки подвергались гомогенизационному отжигу по следующему режиму: нагрев с печью при скорости  $1,16\text{ }^{\circ}\text{C}$  в минуту до  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; выдержка при этой температуре в течение 11 часов; повторный нагрев до температуры  $425\text{ }^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $1,25\text{ }^{\circ}\text{C}$  в минуту; выдержка при этой температуре в течение 8 часов; охлаждение на воздухе.

Каждую заготовку прокатывали по различным вариантам с изменением исходных размеров и величины обжатий, подбирая оптимальные режимы обработки. Вместе с тем общая схема деформации включала горячую прокатку заготовки толщиной до 40 мм, нагретую до температуры  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и холодную прокатку горячекатаной полосы до толщины 3 мм (рис. 1, б). Ширина заготовки изменялась от 120 до 200 мм. В качестве оборудования для прокатки использовали стан ДУО 330 (табл. 1). По ходу прокатки отбирали образцы для испытаний механических свойств и определяли временное сопротивление разрыву, предел текучести и относительное удлинение металла. Данные усредняли по результатам трех испытаний образцов различной толщины и вида обработки.

### **Результаты и их обсуждение**

Один из вариантов режимов обработки экспериментального сплава приведен в табл. 2. Анализируя результаты экспериментальных исследований деформационных и энергосиловых параметров, можно отметить следующее. Степень суммарной деформации при прокатке до

толщины 3 мм составила 92,5%. Вытяжка за проход изменялась от 1,04 до 1,2.

Таблица 1 – Технические характеристики листопркатного стана ДУО 330

Наименование параметра	Величина
Мощность электродвигателя, кВт	90
Напряжение питания сети трехфазное, В	380
Частота тока, Гц	50
Ширина бочки валков, мм	520
Диаметр валков, мм	330
Максимальный развод валков, мм	70
Частота вращения валков, об/мин	10
Максимальное усилие прокатки, МН	1,55
Максимальный момент прокатки, МН·м	0,82

Таблица 2 – Параметры прокатки экспериментального сплава

Номер прохода	$\lambda_{ед}$	Температура, °С	Сопротивление деформации, МПа	Усилие прокатки, МН	Момент прокатки, МН·м
1	1,02	450	276,8	0,45	0,042
2	1,03	426	282,9	0,47	0,050
3	1,03	402	290,1	0,50	0,063
4	1,04	378	295,4	0,51	0,063
5	1,04	354	300,5	0,51	0,064
6	1,04	332	305,3	0,50	0,064
7	1,04	312	309,9	0,50	0,064
8	1,04	292	314,3	0,50	0,063
9	1,04	274	318,4	0,50	0,063
10	1,05	257	322,4	0,50	0,062
11	1,05	241	326,1	0,50	0,062
12	1,05	226	330,4	0,50	0,065
13	1,06	212	333,9	0,50	0,064
14	1,06	199	337,3	0,50	0,064
15	1,06	187	340,6	0,50	0,063
16	1,07	176	343,7	0,50	0,063
17	1,07	165	346,8	0,50	0,062
18	1,08	156	349,9	0,50	0,061
19	1,09	148	353,3	0,51	0,063
20	1,10	140	356,7	0,52	0,063
21	1,11	134	360,3	0,54	0,059
22	1,12	129	363,8	0,56	0,058
23	1,14	124	367,6	0,59	0,058
24	1,16	120	371,9	0,63	0,056
25	1,21	117	377,1	0,68	0,057

26	1,12	20	387,3	0,188	0,030
27	1,14	20	401,2	0,190	0,031
28	1,14	20	415,3	0,207	0,033
29	1,14	20	450,1	0,215	0,034

Анализ деформационных и энергосиловых параметров прокатки показал, что значения усилий и моментов прокатки не достигают допустимых величин, поэтому прокатка при таких режимах обжатий осуществима без получения брака по трещинам. Полученные полосы толщиной 3 мм отжигали при температуре 350 °С и времени выдержки 3 час.

Исследования механических свойств металла после прокатки и отжига методом растяжения проводили на испытательной машине LFM400 усилием 400 кН в соответствии с ГОСТ 1497-84. Результаты испытаний механических свойств образцов различной толщины в деформированном и отожженном состоянии приведены в табл.3.

Таблица 3 – Механические свойства образцов листового проката из экспериментального сплава

Номер образца	Толщина, мм	Состояние	Механические свойства		
			$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
1	10	горячедеформированное	369	266	15
2	3	холоднодеформированное	481	457	3,8
3	3	отожженное	380	264	16
4	8	горячедеформированное	372	280	15
5	3	холоднодеформированное	466	436	4,5
6	3	отожженное	386	276	15
7	6	горячедеформированное	387	312	12
8	3	холоднодеформированное	453	429	5
9	3	отожженное	390	277	14

Закономерности изменения механических свойств деформированных полуфабрикатов при прокатке приведены на рис. 2, 3.

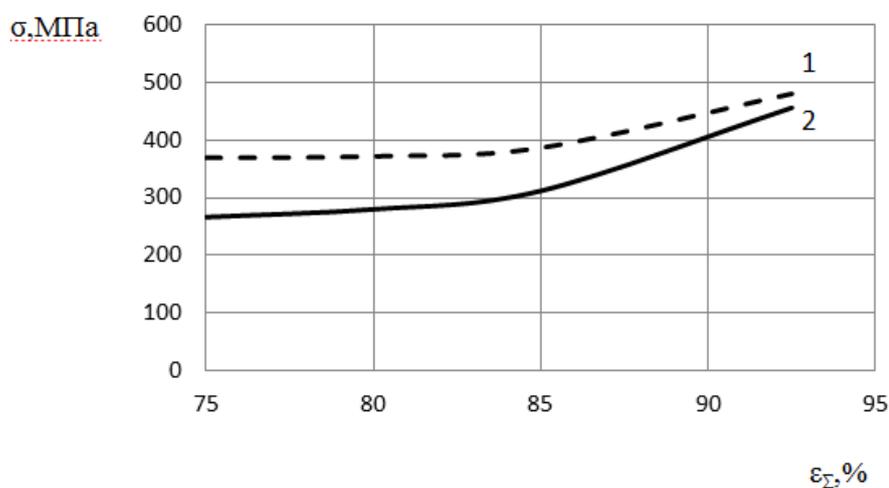


Рис. 2. Влияние степени деформации на прочностные свойства деформированных полуфабрикатов из опытного сплава: 1 – временное сопротивление разрыву, 2 – предел текучести

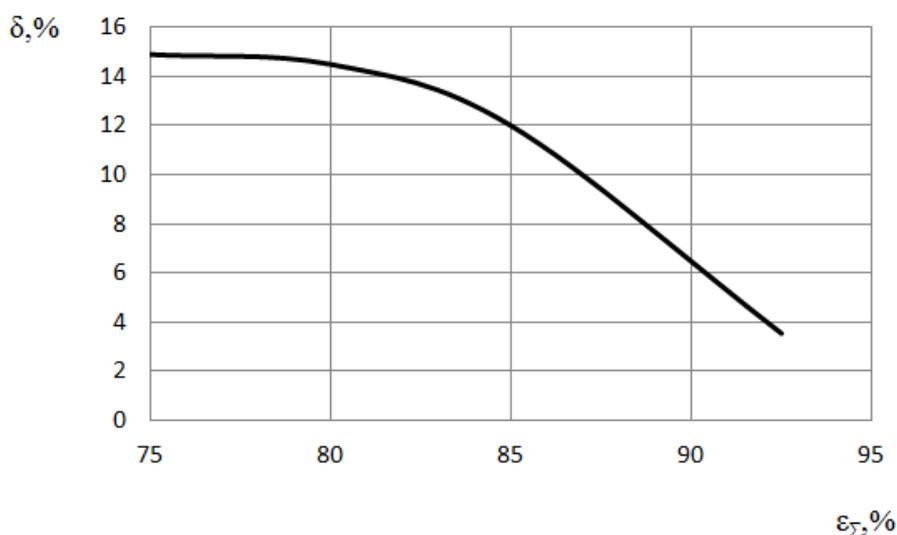


Рис. 3. Влияние степени деформации на пластические свойства деформированных полуфабрикатов из опытного сплава

Анализ механических свойств полученных полуфабрикатов показывает, что уровень прочностных и пластических свойств достаточно

высок, при этом временное сопротивление разрыву достигает для холоднодеформированных образцов 453-481 МПа, предел текучести металла 429-457 МПа, а относительное удлинение 3,8-5,0%.

Видно, что с увеличением суммарной степени деформации временное сопротивление разрыву и предел текучести металла растут, а относительное удлинение снижается, что соответствует общим представлениям теории обработки металлов давлением.

Применение отжига после холодной прокатки дало возможность получить хорошие пластические свойства металла (значения относительного удлинения увеличиваются и достигают 14-16%) при достаточно высоких значениях предела текучести (до 277 МПа).

Такой уровень механических свойств позволяет изготавливать деформированные полуфабрикаты в виде листового проката из слитков экспериментального сплава с достаточно низким содержанием скандия для нужд судостроения и автомобильной промышленности.

### **Заключение**

Таким образом, проведенные исследования позволили разработать режимы литья, прокатки и отжига для получения полуфабрикатов из нового сплава системы Al-Mg, содержащего скандий в сравнительно небольших количествах (0,10-0,14%), и получить данные по уровню и закономерностям изменения механических свойств в зависимости от суммарной степени

деформации при получении листового проката в различном состоянии (горяче-, холоднодеформированном и отожженном). Применение таких сплавов даст возможность снизить себестоимость продукции, сохранив при этом высокие эксплуатационные характеристики и требуемые прочностные свойства металла. Эти данные будут использоваться при освоении технологий литья и обработки этих сплавов в промышленных условиях.

Статья подготовлена с использованием результатов работ, выполненных в ходе проекта 03.G25.31.0265 «Разработка экономнолегированных высокопрочных Al-Sc сплавов для применения в автомобильном транспорте и судоходстве» в рамках Программы реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства, утвержденных постановлением Правительства РФ от 9 апреля 2010г. №218.

### **Список используемой литературы**

1. *Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В.* Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и высоких технологий будущего // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ». 2013. No. 2.
2. *Горбунов Ю.А.* Роль и перспективы редкоземельных металлов в развитии физико-механических характеристик и областей применения деформируемых алюминиевых сплавов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2015. Т. 8. № 5. С. 636 – 645.

3. *S. Malopheyev, V. Kulitskiy, R. Kaibyshev.* Deformation structures and strengthening mechanisms in an Al-Mg-Sc-Zr alloy // *Journal of Alloys and Compounds.* 2017. 698. P. 957–966.
4. *W. Kang, H.Y. Li, S.X. Zhao, Y. Han, C.L. Yang, G. Ma.* Effects of homogenization treatments on the microstructure evolution, microhardness and electrical conductivity of dilute Al-Sc-Zr-Er alloys // *Journal of Alloys and Compounds.* 2017. Vol. 704. P. 683–692.
5. *R. Roumina, C.W. Sinclair.* Recovery kinetics in the presence of precipitates: The softening response of an Al–Mg–Sc alloy // *Acta Materialia.* 2010. 58. P. 111-121.
6. *Matthew E. Krug, Alexandra Werber, David C. Dunand, David N. Seidman.* Core–shell nanoscale precipitates in Al–0.06 at.% Sc microalloyed with Tb, Ho, Tm or Lu. // *Acta Materialia.* 2010. 58. P. 134-145.
7. *Anthony De Luca, David C. Dunand, David N. Seidman.* Mechanical properties and optimization of the aging of a dilute Al-Sc-Er-Zr-Si alloy with a high Zr/Sc ratio // *Acta Materialia.* 2016. 119. P. 35-42.
8. *Y.W. Riddle, T.H. Sanders Jr.* A Study of coarsening, recrystallization, and morphology of microstructure in Al-Sc-(Zr)-(Mg) alloys // *Metallurgical and materials transactions A.* 2004. Vol. 35A. P. 341-350.
9. *H. Zhu, A.K. Dahle, A.K. Ghosh.* Effect of Sc and Zn Additions on Microstructure and Hot Formability of Al-Mg Sheet Alloys // *Metallurgical and materials transactions A.* 2009. Vol. 40A. P. 598-608.

10. *C. Shi, L. Zhang, G. Wu, X. Zhang, A. Chen, J. Tao.* Effects of Sc addition on the microstructure and mechanical properties of cast Al-3Li-1.5Cu-0.15Zr alloy // *Materials Science & Engineering.* 2017. A680. P. 232–238.
11. *Pedro Henrique R. Pereira, Ying Chun Wang, Yi Huang, Terence G. Langdon.* Influence of grain size on the flow properties of an Al-Mg-Sc alloy over seven orders of magnitude of strain rate // *Materials Science & Engineering.* 2017. A685. P. 367–376.
12. *S. Mondol, T. Alamb, R. Banerjee, S. Kumar, K. Chattopadhyay.* Development of a high temperature high strength Al alloy by addition of small amounts of Sc and Mg to 2219 alloy // *Materials Science & Engineering.* 2017. A687. P. 221–231.
13. *M. Li, Q. Pan, Y. Shi, X. Sun, H. Xiang.* High strain rate superplasticity in an Al–Mg–Sc–Zr alloy processed via simple rolling // *Materials Science & Engineering.* 2017. A687. P. 298–305.
14. *Yu. Buranova, V. Kulitskiy, M. Peterlechner, A. Mogucheva, R. Kaibyshev, S.V. Divinski, G. Wilde.* Al<sub>3</sub>(Sc, Zr) - based precipitates in AlMg alloy: Effect of severe deformation // *Acta Materialia.* 2017. 124. P. 210–224.
15. *Иброхимов С.Ж., Эшов Б.Б., Ганиев И.Н., Иброхимов Н.Ф.* Влияние скандия на физико-химические свойства сплава АМг4 // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* 2014. Т. 16. No. 4. С. 256–260.

16. *Иброхимов С.Ж., Эшов Б.Б., Ганиев И.Н.* Окисление твёрдого алюминиево-магниевого сплава  $AlMg_4$ , легированного скандием // Доклады академии наук республики Таджикистан. 2013. Т. 56. No. 6. С. 472–475.
17. *Филатов Ю.А.* Различные подходы к реализации упрочняющего эффекта от добавки скандия в деформируемых сплавах на основе системы  $Al-Mg-Sc$  // ВИЛС: Технология легких сплавов. 2009. No. 3. С. 42–45.
18. *Филатов Ю.А.* Деформируемые сплавы на основе системы  $Al-Mg-Sc$  // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1996. No. 6. С. 33-36.
19. *Филатов Ю.А.* Деформируемые  $Al-Mg-Sc$  сплавы и возможные области их применения // *Перспективные материалы*. 1996. No. 5. С. 45-49.
20. *Кузнецов Г.М., Побежимов П.П., Нефедова Л.П., Белов Е.В.* Особенности формирования структуры и свойств литейных  $Al-Mg$ -сплавов, легированных скандием // *Металловедение и термическая обработка металлов / ВИАМ*. 1996. No. 6.
21. *Дриц М.Е., Каданер Э.С., Добаткина Т.В., Туркина Н.И.* О характере взаимодействия скандия с алюминием в богатой алюминием части системы // *Изв. АН СССР*. 1973. No. 4. С. 213–217.
22. *Якивьяк О.В., Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Фролов В.Ф., Крохин А.Ю., Безруких А.И., Фролов В.А.* Исследование технологичности обработки и свойств проката из алюминиевых сплавов системы  $Al-Mg$ , экономно легированных скандием // *Цветные металлы и минералы 2016: Сб. тезисов докладов*. – Красноярск. 2016. С. 262-263.

## References

1. *Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V.* Redkie metally i redkozemel'nye elementy – materialy sovremennykh i vysokikh tekhnologii budushchego [Rare metals and rare-earth elements – materials for modern and future high technologies]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Trudy VIAM»*. 2013. No. 2
2. *Gorbunov Yu.A.* Rol' i perspektivy redkozemel'nykh metallov v razvitii fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik i oblastei primeneniya deformiruemykh alyuminievykh splavov [The role and prospects of rare earth metals in the development of physical-mechanical characteristics and applications of deformable aluminum alloys]. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies* 5 – 2015. Vol. 8. No. 5. P. 636 – 645.
3. *S. Malopheyev, V. Kulitskiy, R. Kaibyshev.* Deformation structures and strengthening mechanisms in an Al-Mg-Sc-Zr alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. 698. P. 957–966.
4. *W. Kang, H.Y. Li, S.X. Zhao, Y. Han, C.L. Yang, G. Ma.* Effects of homogenization treatments on the microstructure evolution, microhardness and electrical conductivity of dilute Al-Sc-Zr-Er alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 704. P. 683–692.

5. *R. Roumina, C.W. Sinclair.* Recovery kinetics in the presence of precipitates: The softening response of an Al–Mg–Sc alloy. *Acta Materialia*. 2010. 58. P. 111-121.
6. *Matthew E. Krug, Alexandra Werber, David C. Dunand, David N. Seidman.* Core–shell nanoscale precipitates in Al–0.06 at.% Sc microalloyed with Tb, Ho, Tm or Lu. *Acta Materialia*. 2010. 58. P. 134-145.
7. *Anthony De Luca, David C. Dunand, David N. Seidman.* Mechanical properties and optimization of the aging of a dilute Al-Sc-Er-Zr-Si alloy with a high Zr/Sc ratio. *Acta Materialia*. 2016. 119. P. 35-42.
8. *Y.W. Riddle, T.H. Sanders Jr.* A Study of coarsening, recrystallization, and morphology of microstructure in Al-Sc-(Zr)-(Mg) alloys. *Metallurgical and materials transactions A*. 2004. Vol. 35A. P. 341-350.
9. *H. Zhu, A.K. Dahle, A.K. Ghosh.* Effect of Sc and Zn Additions on Microstructure and Hot Formability of Al-Mg Sheet Alloys. *Metallurgical and materials transactions A*. 2009. Vol. 40A. P. 598-608.
10. *C. Shi, L. Zhang, G. Wu, X. Zhang, A. Chen, J. Tao.* Effects of Sc addition on the microstructure and mechanical properties of cast Al-3Li-1.5Cu-0.15Zr alloy. *Materials Science & Engineering*. 2017. A680. P. 232–238.
11. *Pedro Henrique R. Pereira, Ying Chun Wang, Yi Huang, Terence G. Langdon.* Influence of grain size on the flow properties of an Al-Mg-Sc alloy over seven orders of magnitude of strain rate. *Materials Science & Engineering*. 2017. A685. P. 367–376.

12. S. Mondol, T. Alamb, R. Banerjee, S. Kumar, K. Chattopadhyay. Development of a high temperature high strength Al alloy by addition of small amounts of Sc and Mg to 2219 alloy. *Materials Science & Engineering*. 2017. A687. P. 221–231.
13. M. Li, Q. Pan, Y. Shi, X. Sun, H. Xiang. High strain rate superplasticity in an Al–Mg–Sc–Zr alloy processed via simple rolling. *Materials Science & Engineering*. 2017. A687. P. 298–305.
14. Yu. Buranova, V. Kulitskiy, M. Peterlechner, A. Mogucheva, R. Kaibyshev , S.V. Divinski, G. Wilde. Al<sub>3</sub>(Sc, Zr) - based precipitates in AlMg alloy: Effect of severe deformation. *Acta Materialia*. 2017. 124. P. 210–224.
15. Ibrokhimov S.Zh., Eshov B.B., Ganiev I.N., Ibrokhimov N.F. Vliyanie skandiya na fiziko-khimicheskie svoistva splava AMg<sub>4</sub> [Influence scandium on the physicochemical properties of the alloy AMg<sub>4</sub>]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2014. Vol. 16. No. 4. P. 256–260.
16. Ibrokhimov S.Zh., Eshov B.B., Ganiev I.N. Okislenie tverdogo alyuminievo-magnievogo splava AMg<sub>4</sub>, legirovannogo skandiem [Oxidation of a hard aluminum-magnesium alloy AMg<sub>4</sub>, alloyed with scandium]. *Doklady akademii nauk respubliki Tadjikistan*. 2013. Vol. 56. No 6. P. 472–475.
17. Filatov Yu.A. Razlichnye podkhody k realizatsii uprochnyayushchego effekta ot dobavki skandiya v deformiruemykh splavakh na osnove sistemy Al–Mg–Sc [Various approaches to realization of the strengthening effect resulted from scandium addition made to wrought Al–Mg–Sc system based alloys]. *VILS: Tekhnologiya legkikh splavov*. 2009. No. 3. P. 42–45.

18. *Filatov Yu.A.* Deformiruemye splavy na osnove sistemy Al-Mg-Sc [Wrought Al-Mg-Sc system base alloys]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 1996. No. 6. P. 33-36.
19. *Filatov Yu.A.* Deformiruemye Al-Mg-Sc splavy i vozmozhnye oblasti ikh primeneniya [Deformable Al-Mg-Sc alloys and possible areas of their application]. *Perspektivnye materialy*. 1996. No. 5. P. 45-49.
20. *Kuznetsov G.M., Pobezhimov P.P., Nefedova L.P., Belov E.V.* Osobennosti formirovaniya struktury i svoystv liteinykh Al-Mg-splavov, legirovannykh skandiem [Features of the formation of the structure and properties of cast Al-Mg alloys doped with scandium]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov / VIAM*. 1996. No. 6.
21. *Drits M.E., Kadaner E.S., Dobatkina T.V., Turkina N.I.* O kharaktere vzaimodeistviya skandiya s alyuminiem v bogatoi alyuminiem chasti sistemy [On the nature of the interaction of scandium with aluminum in the aluminum-rich part of the system]. *Izv. AN SSSR*. 1973. No. 4. P. 213–217.
22. *Yakiv'yuk O.V., Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Frolov V.F., Krokhin A.Yu., Bezrukikh A.I., Frolov V.A.* Issledovanie tekhnologichnosti obrabotki i svoystv prokata iz alyuminievykh splavov sistemy Al-Mg, ekonomno legirovannykh skandiem [Research of manufacturability of processing and properties of hire from aluminum alloys of system Al-Mg, economically alloyed with scandium]. *Tsvetnye metally i mineraly 2016: Sb. tezisov dokladov. – Krasnoyarsk*. 2016. P. 262-263.