

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

© 2018 г. **В.Н. Баранов, С.Б. Сидельников, Е.Ю. Зенкин, Д.С. Ворошилов**

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

ОАО «РУСАЛ Братский алюминиевый завод», г. Братск

Статья поступила в редакцию 08.06.17 г., доработана 28.08.17 г., подписана в печать 04.09.17 г.

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 ч, 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 с усилием 400 кН в соответствии с ГОСТ 1497-84 определены механические свойства деформированных и отожженных полуфабрикатов различной толщины из экспериментального сплава и выявлены закономерности их изменения в зависимости от суммарной степени деформации при прокатке. Установлено, что при прокатке полос из экспериментального скандийсодержащего алюминиевого сплава 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. Анализ механических свойств полученных полуфабрикатов показал, что уровень прочностных и пластических характеристик 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 относительное удлинение 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, магналии, скандий, легирование, плоские слитки, горячая и холодная прокатка, единичная вытяжка, деформированные полуфабрикаты, отжиг, механические свойства, прокатный стан, усилие и момент прокатки.

Баранов В.Н. — канд. техн. наук, директор Института цветных металлов и материаловедения (ИЦМиМ) СФУ (660025, г. Красноярск, пр-т Красноярский рабочий, 95). E-mail: vnbar79@mail.ru.

Сидельников С.Б. — докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой обработки металлов давлением ИЦМиМ СФУ. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Ворошилов Д.С. — канд. техн. наук, доцент той же кафедры ИЦМиМ СФУ. E-mail: sibdrug@mail.ru.

Зенкин Е.Ю. — управляющий директор ОАО «РУСАЛ Братский алюминиевый завод» (665716, Иркутская обл., г. Братск). E-mail: EvgeniyZenkin@rusal.com.

Для цитирования: Баранов В.Н., Сидельников С.Б., Зенкин Е.Ю., Ворошилов Д.С. Разработка режимов получения деформированных полуфабрикатов из экспериментального скандийсодержащего алюминиевого сплава и исследование их механических свойств // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2018. No. 2. С. 43–49.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-2-43-49.

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

Developing modes to obtain deformed semi-finished products from experimental scandium containing aluminum alloy and studying their mechanical properties

The paper demonstrates the urgency of studies focused on creating new Al-Mg alloys doped with scandium and featuring by an advantageous combination of operational and mechanical properties such as weldability, corrosion resistance and sufficient strength. In production conditions, 560×1360×4520 mm flat ingots were obtained from an experimental scandium-containing alloy. They were cut into billets with a maximum thickness of 40 mm and then heat treatment and sheet rolling modes were developed for them and tested. The DUO 330 mill with smooth rolls having an initial diameter of 330 mm and a barrel width of 540 mm was used as rolling equipment. Experimental studies consisting in blank preparation for rolling (homogenization annealing and face milling), hot rolling at 450 °C, cold rolling to a thickness of 3 mm and annealing of cold-deformed semi-finished products at 350 °C for 3 hours allowed making deformed semi-finished products by various drafting patterns at rolling that were subjected to heat treatment. The maximum total degree of deformation during billet rolling to the 3 mm thickness was 92,5 %, and the draw ratio per pass changed from 1,04 to 1,2. The LFM400 400 kN universal test machine as per GOST 1497-84 was used to determine mechanical properties of deformed and annealed semi-finished products of various thicknesses made of an experimental alloy and identify regularities of their changes depending on the total degree of deformation during rolling. It was found that when rolling strips of an experimental scandium-containing aluminum alloy the ultimate tensile strength and yield strength of the metal grow, and the percentage elongation decreases with an increase in the total degree of deformation. This corresponds to the general ideas of metal forming theory. The mechanical analysis of semi-finished products showed that the level of strength and plastic properties is quite high, wherein the ultimate tensile strength reaches 453–481 MPa, yield strength – 429–457 MPa, and percentage elongation – 3,8–5,0 % for cold-deformed samples. Annealing made it possible to increase percentage elongation values to 14–16 % at sufficiently high yield strength (up to 277 MPa). The results of the conducted studies were used to develop casting, rolling and annealing modes for making semi-finished products of the Al–Mg alloy sparingly doped with scandium within 0,10–0,14 % that will be used when mastering machining technologies in production.

Keywords: aluminum alloys, magnalium, scandium, doping, flat ingots, hot and cold rolling, single drawing, deformed semi-finished products, annealing, mechanical properties, rolling mill, rolling force and torque.

Baranov V.N. – Cand. Sci. (Eng.), Director, Institute of Non-Ferrous Metals and Material Science, Siberian Federal University (SibFU) (660025, Russia, Krasnoyarsk, Krasnoyarskiy rabochiy av., 95). E-mail: vnbar79@mail.ru.

Sidelnikov S.B. – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Metal forming department, SibFU. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Voroshilov D.S. – Cand. Sci. (Eng.), Docent, Metal forming department, SibFU. E-mail: sibdrug@mail.ru.

Zenkin E.Yu. – Managing director, «RUSAL Bratsk aluminium smelter» JSC (665716, Russia, Irkutsk region, Bratsk). E-mail: EvgeniyZenkin@rusal.com.

Citation: Baranov V.N., Sidelnikov S.B., Zenkin E.Yu., Voroshilov D.S. Razrabotka rezhimov polucheniya deformirovannykh polufabrikatov iz eksperimental'nogo skandiisoderzhashchego alyuminievogo splava i issledovanie ikh mekhanicheskikh svoystv. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2018. No. 2. P. 43–49. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-2-43-49.

Введение

Алюминиевые сплавы системы Al–Mg — так называемые магналии — широко используются в промышленности, но при этом резерв повышения прочности традиционных материалов практически исчерпан. Поэтому для увеличения прочностных характеристик перспективным является их легирование малыми добавками редкоземельных (РЗМ) и переходных металлов [1, 2]. Сочетание свариваемости, коррозионной стойкости и достаточной прочности позволяет использовать листы из сплавов системы Al–Mg для обшивки корпусов морских судов, в автомобиле-, самолето- и ракетостроении, а также других областях промышленности. Во многом благодаря этому листы являются основным видом деформированных полуфабрикатов из магналиев. Учитывая, что технология прокатки, в частности сплавов АМг5 и АМг6, 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 материалов 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 со-

става сплавов и режимов их обработки и получены опытные партии литых и деформированных полуфабрикатов из них [22].

Цель настоящей работы состояла в определении возможности использования разработанного нового экономнолегированного скандийсодержащего сплава системы Al—Mg для производства плоского проката с требуемым уровнем механических и эксплуатационных свойств.

Методика проведения исследований

В условиях Братского алюминиевого завода были отлиты плоские слитки размерами 560×1360×4520 мм из экспериментального алюминиевого сплава системы Al—Mg, содержащего 94 % Al и 5 % Mg, в котором содержание скандия изменялось в пределах 0,10—0,14 %. От слитков были отрезаны темплеты для получения заготовок прямоугольной формы с фрезерованными гранями для прокатки (рис. 1, а).

Заготовки подвергались гомогенизационному отжигу по следующему режиму:

- нагрев в электропечи до 350 °С со скоростью 1,16 °С/мин;
- выдержка при этой температуре в течение 11 ч;
- повторный нагрев до 425 °С со скоростью 1,25 °С/мин;
- выдержка при этой температуре в течение 8 ч;
- охлаждение на воздухе.

С целью выбора оптимального режима прокатки варьировались исходные размеры заготовки и величины обжатий. Вместе с тем общая схема деформации включала горячую прокатку заготовки толщиной до 40 мм, нагретую до температуры 450 °С, 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 использовался стан ДУО 330, имеющий следующие технические характеристики:

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

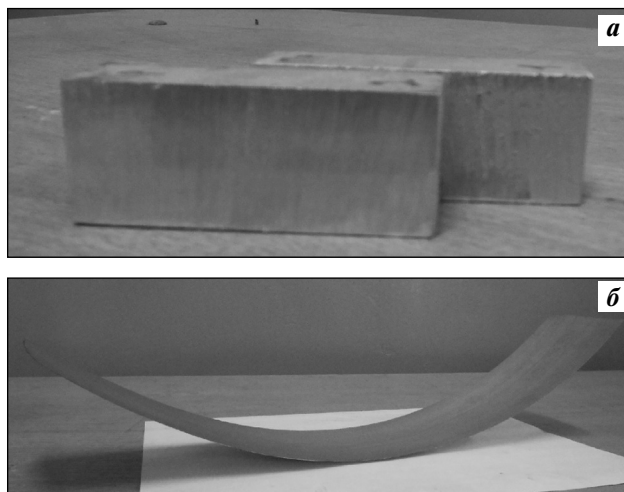


Рис. 1. Заготовки под прокатку (а) и прокатанная полоса (б) из экспериментального сплава

Механические свойства металла (временное сопротивление разрыву (σ_B), предел текучести ($\sigma_{0,2}$) и относительное удлинение (δ)) определяли на образцах из деформированных и отожженных полос.

Результаты и их обсуждение

Один из вариантов режимов обработки опытного сплава приведен в табл. 1. Анализируя результаты экспериментальных исследований деформационных и энергосиловых параметров, можно отметить следующее. Степень суммарной деформации при прокатке до толщины 3 мм составила $\varepsilon_{\Sigma} = 92,5$ %. Вытяжка за проход изменялась в пределах $\lambda_{\text{ед}} = 1,04 \div 1,2$.

Анализ деформационных и силовых параметров прокатки показал, что значения усилий и моментов прокатки не достигают допустимых величин, поэтому прокатка при таких режимах обжатий осуществима при заданной энергосиловой нагрузке используемого оборудования. Полученные полосы толщиной 3 мм отжигались при температуре 350 °С и времени выдержки 3 ч.

Исследования механических свойств металла после прокатки и отжига методом растяжения проводились на испытательной машине LFM400 усилием 400 кН в соответствии с ГОСТ 1497-84. Результаты испытаний механических свойств образцов различной толщины в деформированном и отожженном состояниях приведены в табл. 2.

Закономерности изменения механических свойств деформированных полуфабрикатов при прокатке показаны на рис. 2.

Таблица 1

Параметры прокатки экспериментального сплава

Номер прохода	Единичный коэф. вытяжки $\lambda_{ед}$	Температура образца t , °C	Сопротивление деформации σ_s , МПа	Усилие прокатки P , МН	Момент прокатки M , 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

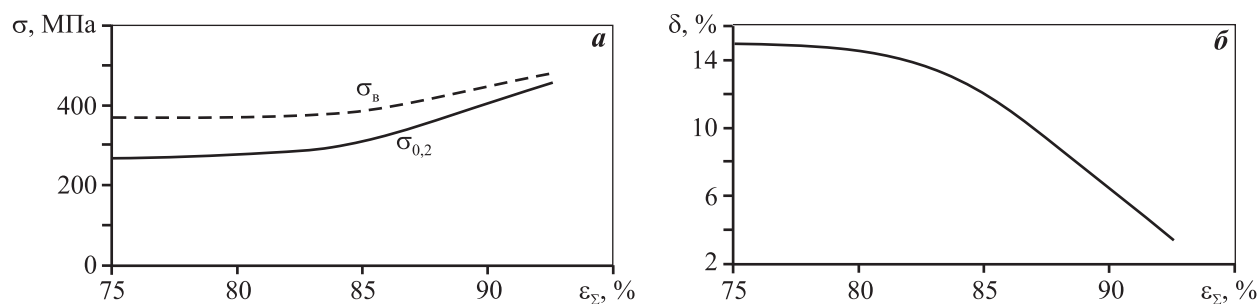


Рис. 2. Влияние степени деформации на прочностные (а) и пластические (б) свойства деформированных полуфабрикатов из опытного сплава

Таблица 2

Механические свойства образцов листового проката из экспериментального сплава

№ образца	Толщина, мм	Состояние	Механические свойства		
			σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
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

Анализ механических свойств полученных полуфабрикатов показал, что уровень прочностных и пластических характеристик достаточно высок: временное сопротивление разрыву достигает для холоднодеформированных образцов $453 \div 481$ МПа, предел текучести металла — $429 \div 457$ МПа, а относительное удлинение — $3,8 \div 5,0$ %. Разница в прочностных свойствах прокатанных образцов (см. табл. 2) обусловлена применением различных величин единичных вытяжек при прокатке и, соответственно, различным упрочнением металла в процессе холодной деформации.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

— при прокатке полос из экспериментального скандийсодержащего алюминиевого сплава 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 (относительное удлинение увеличивается и достигает $14\text{—}16$ %) при достаточно высоких значениях предела текучести (до 277 МПа);

— достигнутый 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 изготовления полуфабрикатов из нового сплава системы Al—Mg, содержащего скандий в сравнительно небольших количествах ($0,10\text{—}0,14$ %), и определить уровень и закономерности изменения механических свойств в зависимости от суммарной степени деформации при получении листового проката в различных состояниях (горяче-, холоднодеформированном и отожженном). Применение таких сплавов даст возможность снизить себестоимость продукции, сохранив при этом высокие эксплуатационные характеристики и требуемые прочностные свойства металла. Полученные данные будут востребованы 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 2010 г. № 218.

Литература

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы — материалы современных и высоких технологий будущего //

- Труды ВИАМ: Электрон. науч. журн. 2013. No. 2. С. 1.
- Горбунов Ю.А. Роль и перспективы редкоземельных металлов в развитии физико-механических характеристик и областей применения деформируемых алюминиевых сплавов // Журн. СФУ. Сер. Техника и технологии. 2015. Т. 8. No. 5. С. 636—645.
 - Malopheyev S., Kulitskiy V., Kaibyshev R. Deformation structures and strengthening mechanisms in an Al—Mg—Sc—Zr alloy // J. Alloys and Compnd. 2017. Vol. 698. P. 957—966.
 - Kang W., Li H.Y., Zhao S.X., Han Y., Yang C.L., Ma G. Effects of homogenization treatments on the microstructure evolution, microhardness and electrical conductivity of dilute Al—Sc—Zr—Er alloys // J. Alloys and Compnd. 2017. Vol. 704. P. 683—692.
 - Roumina R., Sinclair C.W. Recovery kinetics in the presence of precipitates: The softening response of an Al—Mg—Sc alloy // Acta Mater. 2010. Vol. 58. P. 111—121.
 - Krug M.E., Werber A., Dunand D.C., Seidman D.N. Core—shell nanoscale precipitates in Al—0,06at.%Sc microalloyed with Tb, Ho, Tm or Lu // Acta Mater. 2010. Vol. 58. P. 134—145.
 - De Luca A., Dunand D.C., Seidman D.N. Mechanical properties and optimization of the aging of a dilute Al—Sc—Er—Zr—Si alloy with a high Zr/Sc ratio // Acta Mater. 2016. Vol. 119. P. 35—42.
 - Riddle Y.W., Sanders Jr. T.H. A study of coarsening, recrystallization, and morphology of microstructure in Al—Sc—(Zr)—(Mg) alloys // Metal. Mater. Trans. A. 2004. Vol. 35A. P. 341—350.
 - Zhu H., Dahle A.K., Ghosh A.K. Effect of Sc and Zn Additions on microstructure and hot formability of Al—Mg sheet alloys // Metal. Mater. Trans. A. 2009. Vol. 40A. P. 598—608.
 - Shi C., Zhang L., Wu G., Zhang X., Chen A., Tao J. Effects of Sc addition on the microstructure and mechanical properties of cast Al—3Li—1,5Cu—0,15Zr alloy // Mater. Sci. Eng. 2017. Vol. A680. P. 232—238.
 - 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 // Mater. Sci. Eng. 2017. Vol. A685. P. 367—376.
 - Mondol S., Alamb T., Banerjee R., Kumar S., Chattopadhyay K. Development of a high temperature high strength Al alloy by addition of small amounts of Sc and Mg to 2219 alloy // Mater. Sci. Eng. 2017. Vol. A687. P. 221—231.
 - Li M., Pan Q., Shi Y., Sun X., Xiang H. High strain rate superplasticity in an Al—Mg—Sc—Zr alloy processed via simple rolling // Mater. Sci. Eng. 2017. Vol. A687. P. 298—305.
 - Buranova Yu., Kulitskiy V., Peterlechner M., Mogucheva A., Kaibyshev R., Divinski S.V., Wilde G. Al₃(Sc, Zr) — based precipitates in Al—Mg alloy: Effect of severe deformation // Acta Mater. 2017. Vol. 124. P. 210—224.
 - Иброхимов С.Ж., Эшов Б.Б., Ганиев И.Н., Иброхимов Н.Ф. Влияние скандия на физико-химические свойства сплава АМг4 // Изв. Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. No. 4. С. 256—260.
 - Иброхимов С.Ж., Эшов Б.Б., Ганиев И.Н. Окисление твердого алюминиево-магниевого сплава АМг4, легированного скандием // Докл. АН Респ. Таджикистан. 2013. Т. 56. No. 6. С. 472—475.
 - 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.
 - Филатов Ю.А. Деформируемые сплавы на основе системы Al—Mg—Sc // МиТОМ. 1996. No. 6. С. 33—36.
 - Филатов Ю.А. Деформируемые Al—Mg—Sc-сплавы и возможные области их применения // Перспект. материалы. 1996. No. 5. С. 45—49.
 - Кузнецов Г.М., Побежимов П.П., Нефедова Л.П., Белов Е.В. Особенности формирования структуры и свойств литейных Al—Mg-сплавов, легированных скандием // МиТОМ. 1996. No. 6. С. 30—32.
 - 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 СС-СР. 1973. No. 4. С. 213—217.
 - Якимвыюк 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. тез. докл. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2016. С. 262—263.

References

- 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]. *Trudy VIAM: Elektronnyi nauchnyi zhurnal*. 2013. No. 2. P. 1.
- Gorbunov Yu.A. Rol' i perspektivy redkozemel'nykh metallov v razvitiy fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik i oblastei primeneniya deformiruemyykh alyuminievyykh

- splavov [The role and prospects of rare earth metals in the development of physical-mechanical characteristics and applications of deformable aluminum alloys]. *Journ SFU. Tekhnika i tekhnologii*. 2015. Vol. 8. No. 5. P. 636 — 645.
3. Malopheyev S., Kulitskiy V., Kaibyshev R. Deformation structures and strengthening mechanisms in an Al—Mg—Sc—Zr alloy. *J. Alloys and Compnd*. 2017. Vol. 698. P. 957—966.
 4. Kang W., Li H.Y., Zhao S.X., Han Y., Yang C.L., Ma G. Effects of homogenization treatments on the microstructure evolution, microhardness and electrical conductivity of dilute Al—Sc—Zr—Er alloys. *J. Alloys and Compnd*. 2017. Vol. 704. P. 683—692.
 5. Roumina R., Sinclair C.W. Recovery kinetics in the presence of precipitates: The softening response of an Al—Mg—Sc alloy. *Acta Mater*. 2010. Vol. 58. P. 111—121.
 6. Krug M.E., Werber A., Dunand D.C., Seidman D.N. Core—shell nanoscale precipitates in Al—0,06at.%Sc microalloyed with Tb, Ho, Tm or Lu. *Acta Mater*. 2010. Vol. 58. P. 134—145.
 7. De Luca A., Dunand D.C., Seidman D.N. Mechanical properties and optimization of the aging of a dilute Al—Sc—Er—Zr—Si alloy with a high Zr/Sc ratio. *Acta Mater*. 2016. Vol. 119. P. 35—42.
 8. Riddle Y.W., Sanders Jr. T.H. A study of coarsening, recrystallization, and morphology of microstructure in Al—Sc—(Zr)—(Mg) alloys. *Metal. Mater. Trans. A*. 2004. Vol. 35A. P. 341—350.
 9. Zhu H., Dahle A.K., Ghosh A.K. Effect of Sc and Zn Additions on microstructure and hot formability of Al—Mg sheet alloys. *Metal. Mater. Trans. A*. 2009. Vol. 40A. P. 598—608.
 10. Shi C., Zhang L., Wu G., Zhang X., Chen A., Tao J. Effects of Sc addition on the microstructure and mechanical properties of cast Al—3Li—1,5Cu—0,15Zr alloy. *Mater. Sci. Eng*. 2017. Vol. A680. P. 232—238.
 11. Pedro Henrique R. Pereiraa, 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. *Mater. Sci. Eng*. 2017. Vol. A685. P. 367—376.
 12. Mondol S., Alamb T., Banerjee R., Kumar S., Chattopadhyay K. Development of a high temperature high strength Al alloy by addition of small amounts of Sc and Mg to 2219 alloy. *Mater. Sci. Eng*. 2017. Vol. A687. P. 221—231.
 13. Li M., Pan Q., Shi Y., Sun X., Xiang H. High strain rate superplasticity in an Al—Mg—Sc—Zr alloy processed via simple rolling. *Mater. Sci. Eng*. 2017. Vol. A687. P. 298—305.
 14. Buranova Yu., Kulitskiy V., Peterlechner M., Mogucheva A., Kaibyshev R., Divinski S.V., Wilde G. Al₃(Sc, Zr) — based precipitates in Al—Mg alloy: Effect of severe deformation. *Acta Mater*. 2017. Vol. 124. P. 210—224.
 15. Ibrokhimov S.Zh., Eshov B.B., Ganiev I.N., Ibrokhimov N.F. Vliyanie skandiya na fiziko-khimicheskie svoistva splava AMg₄ [Influence scandium on the physicochemical properties of the alloy AMg₄]. *Izvestiya Samarskogo nauchno-tsentra RAN*. 2014. Vol. 16. No. 4. P. 256—260.
 16. Ibrokhimov S.Zh., Eshov B.B., Ganiev I.N. Okislenie tverdogo alyuminievo-magnievogo splava AMg₄, legirovannogo skandiem [Oxidation of a hard aluminum-magnesium alloy AMg₄, alloyed with scandium]. *Doklady AN Respubliki Tadjikistan*. 2013. Vol. 56. No. 6. P. 472—475.
 17. Filatov Yu.A. Razlichnye podkhody k realizatsii uprochnyayushchego effekta ot dobavki skandiya v deformiruemyykh 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*. 1996. No. 6. P. 30—32.
 21. Drita M.E., Kadaner E.S., Dobatkina T.V., Turkina N.I. O kharaktere vzaimodeystviya skandiya s alyumi-niem v bogatoi alyumi-niem 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]. In: *Tsvetnyye metally i mineraly 2016*. Krasnoyarsk: Nauchno-innovatsionniy tsentr, 2016. P. 262—263.