

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ И ОТЖИГА НА СВОЙСТВА ЛИСТОВЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО ДЕФОРМИРУЕМОГО СПЛАВА 1580

© 2020 г. И.Л. Константинов, В.Н. Баранов, С.Б. Сидельников,
Е.Ю. Зенкин, П.О. Юрьев, И.Н. Белоконова

Сибирский федеральный университет (СФУ), г. Красноярск

ОАО «РУСАЛ Братский алюминиевый завод», г. Братск

Статья поступила в редакцию 27.12.19 г., доработана 11.02.20 г., подписана в печать 14.02.20 г.

Аннотация: Проведено исследование технологичности и свойств листового проката, полученного из крупногабаритного слитка сплава 1580 с пониженным содержанием скандия в пределах его марки. Выполнена оценка технологичности обработки слитка при горячей и холодной прокатках, изучено влияние степени деформации и режимов отжига на свойства холоднокатаных полуфабрикатов из указанного сплава. В качестве объекта исследований выбран крупногабаритный слиток сечением 500×2100 мм из сплава 1580 с содержанием скандия 0,067 мас.%, полученный в промышленных условиях. Методика проведения работы включала несколько этапов прокатки и термообработки листовых полуфабрикатов на различных стадиях разработанного режима деформации металла и испытания механических свойств образцов из них на универсальной машине LFM 400 kN. Для выполнения исследований из слитка вырезали темплет размером $60 \times 500 \times 900$ мм, а из него получали заготовки под прокатку размерами $50 \times 180 \times 300$ мм, которые подвергали гомогенизационному отжигу по двухступенчатому режиму, разработанному ранее для данного сплава. В результате горячей прокатки отожженных заготовок при температуре их нагрева 450°C и суммарном относительном обжатии $\varepsilon_\Sigma = 84 \div 90\%$ получали листовые полуфабрикаты толщиной 5–8 мм. Далее, после их отжига при $t = 320^\circ\text{C}$ в течение 6 ч, с помощью холодной прокатки изготавливали тонколистовые полуфабрикаты толщиной от 2 до 6 мм. Выполнен анализ их механических свойств в деформированном и отожженном состояниях, который показал, что накопление суммарной степени деформации при холодной прокатке до $\varepsilon_\Sigma = 38\%$ обеспечивает у сплава 1580 рост прочностных свойств до $\sigma_{0,2} = 380$ МПа, а после этого интенсивность роста замедляется и при $\varepsilon_\Sigma = 60\%$ наблюдали $\sigma_{0,2} = 400$ МПа. Проведено также исследование влияния отжига при $t = 250 \div 350^\circ\text{C}$ на механические свойства листового проката. Установлено, что он приводит к снижению прочностных показателей и повышению пластичности, а максимальные значения условного предела текучести соответствуют температурам отжига $250\text{--}275^\circ\text{C}$ при достаточно высокой пластичности. В результате исследований установлено, что по прочностным свойствам листовой прокат из сплава 1580 с пониженным содержанием скандия превосходит полуфабрикаты из аналогичного по химическому составу, но без добавки скандия, сплава AW-5083 (США) на 10–15 %, а превышение по пластическим свойствам составляет 40–60 %.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, скандий, крупногабаритные слитки, горячая прокатка, холодная прокатка, листовый прокат, суммарное относительное обжатие, отжиг, механические свойства.

Константинов И.Л. — канд. техн. наук, доцент кафедры обработки металлов СФУ (660025, г. Красноярск, пр-т им. газеты Красноярский рабочий, 95). E-mail: ilcon@mail.ru.

Баранов В.Н. — канд. техн. наук, директор Института цветных металлов и материаловедения СФУ. E-mail: vnbar79@mail.ru.

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

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

Юрьев П.О. — инженер-исследователь научно-исследовательской части СФУ. E-mail: pashka_urew@mail.ru.

Белоконова И.Н. — аспирант кафедры обработки металлов давлением СФУ. E-mail: iribelokonova@gmail.com.

Для цитирования: Константинов И.Л., Баранов В.Н., Сидельников С.Б., Зенкин Е.Ю., Юрьев П.О., Белоконова И.Н. Влияние режимов прокатки и отжига на свойства листовых полуфабрикатов из алюминиевого деформируемого сплава 1580. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2020. No. 5. С. 63–69. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-5-63-69.

Influence of rolling and annealing modes on properties of semi-finished sheet products made of aluminum deformable alloy 1580

I.L. Konstantinov, V.N. Baranov, S.B. Sidelnikov, E.Yu. Zenkin, P.O. Yuryev, I.N. Belokonova

Siberian Federal University (SFU), Krasnoyarsk

RUSAL Bratsk Aluminum Plant, Bratsk

Received 27.12.2019, revised 11.02.2020, accepted for publication 14.02.2020

Abstract: The study covers the manufacturability and properties of sheet metal obtained from a large-sized ingot of Alloy 1580 with the low scandium content within its grade range. The ingot processability in hot and cold rolling was evaluated, and the influence of the degree of deformation and annealing conditions on the properties of cold-rolled semi-finished products made of the alloy under study was investigated. A large-sized commercially produced ingot with a cross section of 500×2100 mm of Alloy 1580 with a scandium content of 0.067 wt.% was selected as an object of research. The research methodology included several stages of rolling and heat treatment of semi-finished sheet products at various stages of the developed mode for metal deformation and mechanical testing of samples from them on the LFM 400 kN universal machine. For research, a $60 \times 500 \times 900$ mm template was cut from the ingot to make $50 \times 180 \times 300$ mm billets for rolling. Billets were subjected to homogenization annealing by the two-stage mode developed previously for this alloy. As a result of hot rolling of annealed billets at 450°C and a total relative compression $\varepsilon_{\Sigma} = 84\div 90\%$, 5–8 mm thick semi-finished sheet products were obtained. Further, after their annealing at $t = 320^\circ\text{C}$ for 6 hours, light-gauge semi-finished sheet products with a thickness of 2 to 6 mm were manufactured by cold rolling. They were subjected to mechanical analysis in the deformed and annealed states. The analysis of their mechanical properties in the deformed and annealed states was performed, which showed that the accumulation of the total degree of deformation during cold rolling up to 38 % provides the 1580 alloy with an increase in strength properties to $R_p = 380$ MPa, and after that the growth rate slows down and at $\varepsilon_{\Sigma} = 60\%$ $R_p = 400$ MPa. The effect of annealing at temperatures between 250°C and 350°C on the mechanical properties of sheet metal. It was found that it leads to a decrease in strength properties and an increase in ductility, and the maximum yield strengths correspond to annealing temperatures of $250\text{--}275^\circ\text{C}$ at a sufficiently high plasticity. As a result of studies, it was found that the strength properties of sheet metal from Alloy 1580 with a low scandium content exceed the strength properties of semi-finished products of Alloy AW-5083 (USA) having a similar chemical composition, but without the addition of scandium, by 10–15 %, and the excess in plastic properties is 40–60 %.

Keywords: aluminum alloys, scandium, large-sized ingots, hot rolling, cold rolling, sheet rolling, total relative compression, annealing, mechanical properties.

Konstantinov I.L. — Cand. Sci. (Eng.), associate prof., Department of metal forming of Siberian Federal University (SFU) (660025, Russia, Krasnoyarsk, Gazety Krasnoyarskii Rabochii pr., 95). E-mail: ilcon@mail.ru.

Baranov V.N. — Cand. Sci. (Eng.), director of the School of Non-Ferrous Metals & Materials Science, SFU. E-mail: vnbar79@mail.ru.

Sidelnikov S.B. — Dr. Sci. (Eng.), prof., head of the Department of metal forming, SFU. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Zenkin E.Yu. — managing director, RUSAL Bratsk Aluminum Plant (665716, Russia, Irkutsk region, Bratsk). E-mail: EvgeniyZenkin@rusal.com.

Yuryev P.O. — research engineer of the Research Department, SFU. E-mail: pashka_urew@mail.ru.

Belokonova I.N. — postgraduate student, Department of metal forming, SFU. E-mail: iribelokonova@gmail.com.

For citation: Konstantinov I.L., Baranov V.N., Sidelnikov S.B., Zenkin E.Yu., Yuryev P.O., Belokonova I.N. Influence of rolling and annealing modes on properties of semi-finished sheet products made of aluminum deformable alloy 1580. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2020. No. 5. P. 63–69 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-5-63-69.

Введение

Алюминий-магниево-скандиевые сплавы относятся к термически неупрочняемым деформируемым сплавам. Однако в российских сплавах 1570 и 1580 этой системы добавками скандия обеспечивают повышение прочностных показателей по сравнению с обычными магниевыми [1–14]. Так, авторами [15] показано, что использование в конструкциях заготовок из сплава 1570 вместо сплава АМг6 позволяет снизить массу изделия более чем на 50 %. Однако высокая стоимость скандия ограничивает применение как сплава 1580, так и, особенно, сплава 1570. Поэтому важны исследования, направленные на изучение технологии изготовления

и свойств деформированных полуфабрикатов из сплавов, экономно легированных скандием, и на снижение их себестоимости. Результаты таких исследований применительно к получению листового проката, прутков и проволоки из этих сплавов изложены в статьях [16–20].

В сплаве 1580, который только в 2019 г. был включен в ГОСТ 4784-2019 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые», содержание скандия снижено, по сравнению со сплавом 1570, с 0,17–0,27, до 0,05–0,14 %, что делает его дешевле приблизительно в 2 раза. При этом по прочностным свойствам сплав 1580 мало уступает спла-

ву 1570. Следует также добавить, что и в рамках стандартного химического состава сплава 1580 есть резерв для экономии скандия, поэтому можно, не меняя марку сплава, использовать заготовки из него при содержании скандия, близком к его нижнему пределу. В качестве другого источника удешевления себестоимости продукции из сплава 1580 может быть максимальное утяжеление заготовки, т.е. в случае получения катаной продукции, например листов или плит, представляется целесообразным увеличение массы слитка. В настоящее время на отечественных заводах для изготовления плоского проката из алюминиевых сплавов в основном применяют слитки толщиной не более 300 мм, следовательно, экономически выгодно максимально повышать толщину слитков с учетом возможности литейного и прокатного оборудования конкретного предприятия.

Целью работы явилось исследование технологичности обработки и свойств плоского проката, полученного из крупногабаритного слитка сплава 1580 с пониженным содержанием скандия в пределах марки сплава. Для этого решались следующие задачи:

- оценка технологичности обработки слитка из сплава 1580 при горячей и холодной прокатках;
- исследование влияния степени деформации на свойства листового проката из сплава 1580 с пониженным содержанием скандия при холодной прокатке;
- изучение влияния режимов отжига на свойства холоднокатаного проката из сплава 1580.

Методика проведения исследований

В качестве заготовки для прокатки на одном из российских металлургических предприятий методом полунепрерывного литья был получен крупногабаритный слиток толщиной 500 мм из сплава, химический состав которого следующий, мас. %:

Si.....0,11	Zr.....0,07
Fe.....0,25	Sc.....0,067
Cu.....0,01	Ca.....0,0001
Mn.....0,51	Na.....0,0002
Mg.....5,10	Be.....0,0005
Cr.....0,10	Прочие:
Zn.....0,20	каждый.....0,05
Ti.....0,15	в сумме.....0,15
	Al.....ост.

Следует отметить, что содержание скандия в слитке, равное 0,067 мас.%, близко к нижней границе его интервала в марке сплава 1580, равной 0,05 мас.%, поэтому данный сплав можно считать сплавом 1580 с пониженным содержанием скандия в пределах марки сплава.

Размеры слитка составляли 500×2100×6000 мм, а его внешний вид представлен на рис. 1.

Из слитка со стороны литниковой части был вырезан темплет (рис. 2) с размерами 60 мм (в на-



Рис. 1. Внешний вид крупногабаритного промышленного слитка толщиной 500 мм из сплава 1580

Fig. 1. Appearance of 500 mm thick large-sized commercial ingot of Alloy 1580

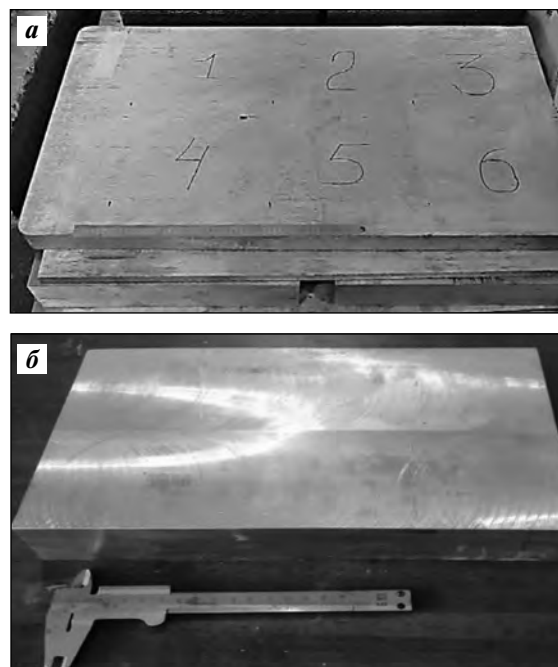


Рис. 2. Внешний вид темплета, вырезанного из промышленного крупногабаритного слитка (а), и заготовки для листовой прокатки (б) из сплава 1580

Fig. 2. Appearance of a template cut from the large-sized commercial ingot (a) and sheet rolling blank (б) of Alloy 1580

правлении длины слитка), 500 мм (в направлении высоты слитка) и 900 мм (в направлении ширины слитка: от края слитка к его середине), предназначенный для получения заготовок под горячую прокатку. Внешний вид темплета показан на рис. 2, а. Из него вырезали заготовки под прокатку, размеры которых после фрезеровки были 50×180×300 мм (рис. 2, б). Размер 300 мм соответствовал поперечному направлению литья и направлению прокатки. Заготовки подвергали гомогенизационному отжигу по двухступенчатому режиму: при температуре нагрева $t = 360^\circ\text{C}$ в течение $\tau = 6$ ч и при $t = 425^\circ\text{C}$, $\tau = 12$ ч. Для термообработки использовали печь марки PP 20/65, обеспечивающую равномерный нагрев партии заготовок благодаря горизонтальной циркуляции внутренней атмосферы.

После отжига проводилась горячая прокатка трех заготовок до толщины 8 мм и одной заготовки — до 5 мм. Для прокатки использовали двухвалковый прокатный стан 330×520. Перед прокаткой заготовки нагревали до температуры 450°C , задавали в валки поперек направления литья, осуществляли 2 прохода, затем опять помещали в печь, а следующие проходы проводили после подогрева до $t = 450^\circ\text{C}$ вплоть до достижения заданных толщин. Температуру нагрева заготовок перед прокаткой выбирали исходя из данных, приведенных в работах [19, 20]. Единичные обжатия за проход составляли 2–4 %, суммарная степень деформации — 84 и 90 %, что соответствовало конечной толщине горячего проката 8 и 5 мм. После горячей прокатки заготовки отжигали ($t = 320^\circ\text{C}$, $\tau = 6$ ч), затем подвергали холодной прокатке по двум вариантам обработки:

— заготовки толщиной 8 мм прокатывали до толщин 6, 5 и 4 мм, что обеспечивало степень суммарной деформации при холодной прокатке (ϵ_Σ), соответственно, 25, 38 и 50 %;

— заготовку толщиной 5 мм прокатывали до толщины 2 мм, т.е. $\epsilon_\Sigma = 60$ %.

Для холодной прокатки использовали двухвалковый листопрокатный стан 200×400 марки LS 400 AUTO фирмы «Mario Di Maio» (Италия). Из полученных полос изготавливали образцы для испытания механических свойств по ГОСТ 1497-84 с помощью универсальной испытательной машины «Walter + Bai AGLFM 400 kN» («Walter + Bai AG», Швейцария). Вырезку образцов выполняли поперек направления прокатки. Перед испытаниями образцы отжигали в печи PP 20/65 при температу-

рах 250, 275, 300 и 350°C в течение 3 ч. При испытаниях на одну экспериментальную точку бралось 3 образца. Полученные результаты подвергали статистической обработке.

Результаты и их обсуждение

Результаты испытаний механических свойств на растяжение холоднокатаных образцов из сплава 1580 приведены на рис. 3. Анализ полученных зависимостей показал, что накопление суммарной степени деформации при холодной прокатке до $\epsilon_\Sigma = 38$ % обеспечивает у сплава 1580 рост предела текучести металла до $\sigma_{0,2} = 380$ МПа, а после этого интенсивность роста замедляется и при $\epsilon_\Sigma = 60$ % этот параметр составляет 400 МПа. Особенно следует отметить у сплава 1580 высокий уровень условного предела текучести в нагартованном состоянии.

Учитывая, что при высоких прочностных свойствах пластичность этого сплава составляет 5–6 %, следующим этапом работы явилось исследование влияния температуры отжига в диапазоне $t = 250\div 350^\circ\text{C}$ на механические свойства проката из сплава 1580, полученного холодной прокаткой. Изменения механических свойств листового проката ($\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести, δ — относительное удлинение), полученных при различном суммарном относительном обжатии, в зависимости от температуры отжига показаны на рис. 4.

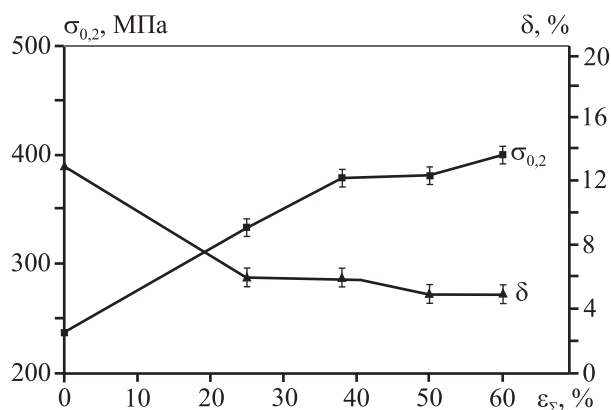


Рис. 3. Зависимость механических свойств листового проката из сплава 1580 в холоднодеформированном состоянии от суммарного относительного обжатия

Fig. 3. Dependence of Alloy 1580 rolled sheet mechanical properties in the cold-deformed state on the total percentage reduction

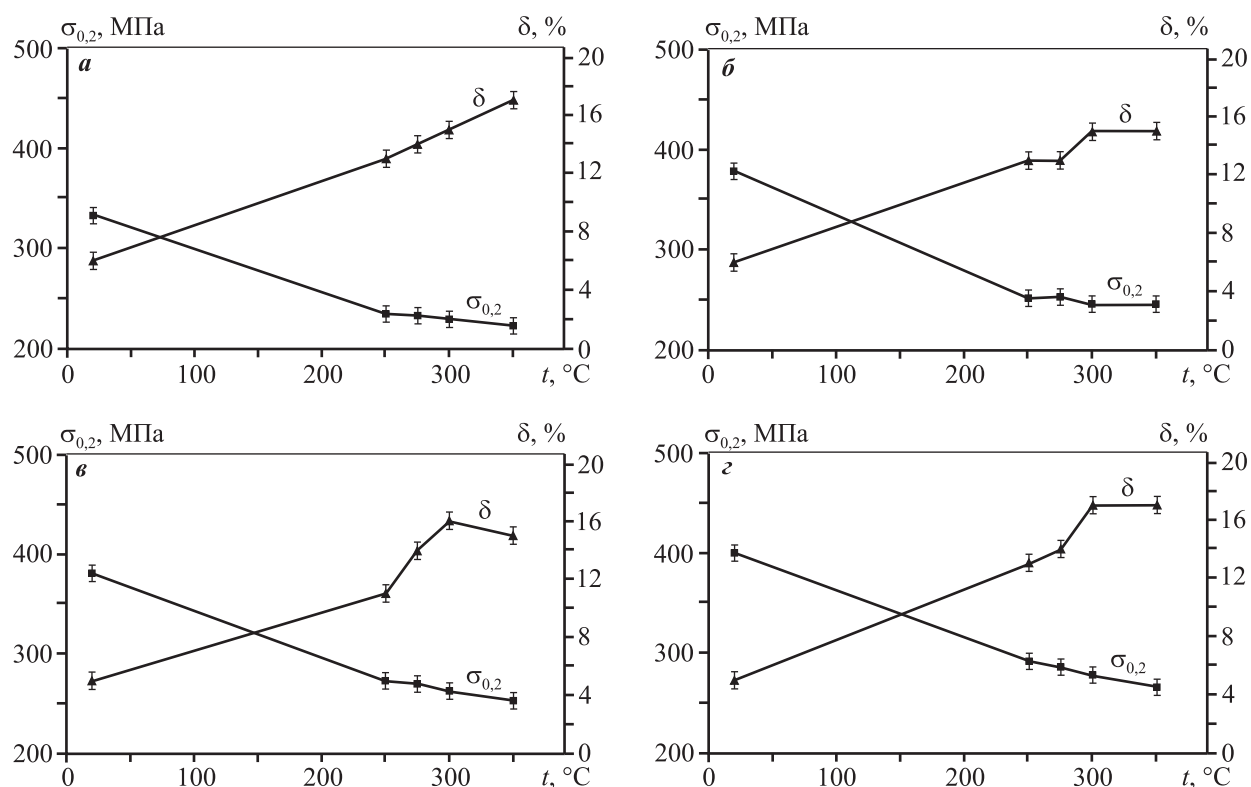


Рис. 4. Зависимость механических свойств листового проката из сплава 1580 от температуры отжига при различном суммарном относительном обжатии
 ϵ_{Σ} , %: а – 25, б – 38, в – 50, г – 60

Fig. 4. Dependence of Alloy 1580 rolled sheet mechanical properties in the cold-deformed state on annealing temperature at the total percentage reduction
 ϵ_{Σ} , %: а – 25, б – 38, в – 50, г – 60

Из представленных на рис. 4 зависимостей следует, что для всего исследованного интервала относительных обжатий отжиг приводит к снижению прочностных свойств и повышению пластичности листового проката. При этом максимальные значения условного предела текучести соответствуют температурам отжига 250–275 °C при достаточно высокой пластичности (относительное удлинение выше 12 %).

Близким аналогом сплава 1580 является сплав AW-5083 (США), не содержащий скандия, со следующим химическим составом [21, 22], мас. %:

Cr.....	0,05–0,25	Ti	< 0,15
Cu.....	< 0,10	Zn	< 0,25
Fe.....	< 0,40	Другие	
Mg	4,0–4,9	элементы	< 0,15
Mn	0,4–1,0	Al.....	ост.
Si.....	< 0,40		

Полуфабрикаты из этого сплава в состоянии Н24 (нагартованное со степенью деформации 50 % и частично отожженное) имеют следующие механические свойства: $\sigma_{0.2} = 250$ МПа и $\delta = 10$ %. У листовых полуфабрикатов из исследуемого сплава после холодной прокатки со степенью деформации $\epsilon_{\Sigma} = 50$ % и отжига при температуре 275 °C указанные свойства составляют $\sigma_{0.2} = 270$ МПа и $\delta = 14$ %, а после холодной прокатки при $\epsilon_{\Sigma} = 60$ % наблюдали $\sigma_{0.2} = 285$ МПа и $\delta = 14$ %. Эти данные подтверждают факт, что даже минимальное (в пределах марки сплава 1580) содержание скандия позволяет повышать механические свойства листового проката из него по сравнению с близкими по химическому составу магналиями.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных работ по исследованию технологичности обработки крупногабаритного слитка из сплава 1580 с пони-

женным содержанием скандия, а также изучению свойств прокатанных из него листовых полуфабрикатов были получены следующие результаты:

— крупногабаритный слиток из сплава 1580 с пониженным содержанием скандия в пределах марки сплава обладает хорошей технологичностью при прокатке, что позволяет деформировать его без трещин как при горячей, так и при холодной прокатке с суммарным относительным обжатием, соответственно, 88 и 60 %;

— максимальное повышение прочностных свойств холоднокатаных листовых полуфабрикатов из сплава 1580, полученных с суммарным относительным обжатием в диапазоне 25–60 %, наблюдается после отжига в интервале температур 250–275 °С в течение 3 ч;

— прочностные свойства листового проката из исследуемого сплава с пониженным содержанием скандия превышают подобные характеристики полуфабрикатов из аналогичного по химическому составу, но без добавки скандия, сплава AW-5083 (США) на 10–15 %, а превышение по пластическим свойствам составляет 40–60 %.

Работа выполнена по проекту 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 № 218 от 9 апреля 2010 г., а также в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (номер проекта FSRZ-2020-0013).

Acknowledgements: *The research was conducted under Project 03.G25.31.0265 «Development of Sparingly-Doped High-Strength Al–Sc Alloys for Road and Marine Transport Applications» as part of the Program for Implementing Integrated Projects on Establishing High-Technology Production approved by Regulation of the Government of the Russian Federation № 218 dated April 9, 2010, and as part of the government science task for Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Siberian Federal University» (Project № FSRZ-2020-0013).*

Литература/References

1. Филатов Ю.А. Алюминиевые сплавы системы Al–Mg–Sc для сварных и паяных конструкций. *Цвет. металлы*. 2014. No. 1. С. 80–86.
Filatov Yu.A. Al–Mg–Sc aluminium alloys for welded and brazed structures. *Tsvetnye Metally*. 2014. No. 1. P. 80–86 (In Russ.).
2. Бронз А.В., Ефремов В.И., Плотников А.Д., Чернявский А.Г. Сплав 1570С — материал для герметичных конструкций перспективных многоразовых изделий РКК «Энергия». *Косм. техника и технологии*. 2014. No. 4. С. 62–67.
Bronz A.V., Efremov V.I., Plotnikov A.D., Chernyavskii A.G. Alloy 1570C — a material for hermetic structures of the perspective reusable products of RSC «Energia». *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2014. No. 4. P. 62–67 (In Russ.).
3. Филатов Ю.А., Плотников А.Д. Структура и свойства деформированных полуфабрикатов из алюминиевого сплава 01570С системы Al–Mg–Sc для изделия РКК «Энергия». *Технол. легких сплавов*. 2011. No. 2. С. 15–26.
Filatov Yu.A., Plotnikov A.D. Structure and properties of deformed semi-finished products from aluminum alloy 01570C of the Al–Mg–Sc system for the RSC «Energia» product. *Tekhnologiya legkikh spлавov*. 2011. No. 2. P. 15–26 (In Russ.).
4. Shi Chunchang, Zhang Liang, Wu Guohua, Zhang Xiaolong, Chen Antao, Tao Jiashen. Effects of Sc addition on the microstructure and mechanical properties of cast Al–3Li–1.5Cu–0.15Zr alloy. *Mater. Sci. Eng.* 2017. Vol. A687. P. 232–238.
5. Pereira Pedro Henrique R., Wang Ying Chun, Huang Yi, Langdon Terence G. 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.
6. 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.
7. Malopheyev S., Kulitskiy V., Kaibyshev R. Deformation structures and strengthening mechanisms in an Al–Mg–Sc–Zr alloy. *J. Alloys Compd.* 2017. Vol. 698. P. 957–966.
8. Li Mengjia, Pan Qinglin, Shi Yunjia, Sun Xue, Xiang Hao. High strain rate superplasticity in an Al–Mg–Sc–Zr alloy processed via simple rolling. *Mater. Sci. Eng.* 2017. Vol. A687. P. 298–305.
9. Buranova Yu., Kulitskiy V., Peterlechner M., Mogucheva A., Kaibyshev R., Divinski S., Wilde G. Al₃(Sc, Zr) — based precipitates in Al–Mg alloy: Effect of severe deformation. *Acta Mater.* 2017. Vol. 124. P. 210–224.
10. Zhemchuzhnikova D., Kaibyshev R. Effect of grain size on cryogenic mechanical properties of an Al–Mg–Sc alloy. *Adv. Mater. Res.* 2014. Vol. 922. P. 862–867.
11. Marquis E.A., Seidman E.A. Nanoscale structural evolu-

- tion of Al_3Sc precipitates in Al (Sc) alloys. *Acta Mater.* 2001. Vol. 49. No. 11. P. 1909–1919.
12. Fuller C.B., Seidman D.N. Temporal evolution of the nanostructure of Al(Sc,Zr) alloys: Part II Coarsening of $\text{Al}_3(\text{Sc}_{1-x}\text{Zr}_x)$ precipitates. *Acta Mater.* 2005. Vol. 53. No. 20. P. 5415–5428.
 13. Ryset J., Ryum N. Scandium in aluminum alloys. *Int. Mater. Rev.* 2005. Vol. 50. No. 1. P. 19–44.
 14. Rusakov G.M., Illarionov A.G., Loginov Y.N., Lobanov M.L., Redikul'tsev A.A. Interrelation of crystallographic orientations of grains in aluminum alloy AMg6 under hot deformation and recrystallization. *Met. Sci. Heat Treat.* 2015. Vol. 56. No. 11–12. P. 650–655.
 15. Яшин В.В., Арышенский В.Ю., Латушкин И.А., Тенгерева В.С. Обоснование технологии изготовления плоского проката из алюминиевых сплавов системы Al–Mg–Sc для аэрокосмической промышленности. *Цвет. металлы.* 2018. No. 7. С. 75–82.
Yashin V.V., Aryshenskii V.Yu., Latushkin I.A., Tepterev V.S. Substantiation of a manufacturing technology of flat rolled products from Al–Mg–Sc based alloys for the aerospace industry. *Tsvetnye Metally.* 2018. No. 7. P. 75–82 (In Russ.).
 16. Довженко Н.Н., Рушниц С.В., Довженко И.Н., Юрьев П.О. Исследование деформационного поведения алюминиевого сплава P-1580, экономнолегированного скандием, при горячей деформации. *Цвет. металлы.* 2019. No. 9. С. 80–86.
Dovzhenko N.N., Rushits S.V., Dovzhenko I.N., Yur'ev P.O. Understanding the behaviour of aluminium alloy P-1580 sparingly doped with scandium under hot deformation. *Tsvetnye Metally.* 2019. No. 9. P. 80–86 (In Russ.).
 17. Сидельников С.Б., Якивчук О.В., Баранов В.Н., Зенкин Е.Ю., Довженко И.Н. Разработка, моделирование и исследование технологии получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из алюминивно-магниевого сплава с низким содержанием скандия. *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2019. No. 6. С. 51–59.
Sidelnikov S.B., Yakivchuk O.V., Baranov V.N., Zenkin E.Yu., Dovzhenko I.N. Development, modeling and research of technology for producing longish deformed semi-finished products from aluminum-magnesium alloys with low scandium contents. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Universities' Proceedings Non-Ferrous Metallurgy).* 2019. No. 6. P. 51–59 (In Russ.).
 18. Baranov V.N., Zenkin E.Yu., Konstantinov I.L., Sidelnikov S.B. The research of the cold rolling modes for plates of aluminum alloy sparingly doped with scandium. *Non-Ferr. Met.* 2019. No. 2. P. 48–52.
 19. Baranov V., Sidelnikov S., Zenkin E., Frolov V., Voroshilov D., Yakivchuk O., Konstantinov I., Sokolov R., Belokonova I. Study of strength properties of semi-finished products from economically alloyed high-strength aluminium-scandium alloys for application in automobile transport and shipbuilding. *Open Eng.* 2018. No. 8. P. 69–76.
 20. Mann V.Kh., Sidelnikov S.B., Konstantinov I.L., Baranov V.N., Dovzhenko I.N., Voroshilov D.S., Lopatina E.S., Yakivchuk O.V., Belokonova I.N. Modeling and investigation of the process of hot rolling of large-sized ingots from aluminum alloy of the Al–Mg system, economically alloyed by scandium. *Mater. Sci. Forum.* 2019. Vol. 943. P. 58–65.
 21. Дриц А.М., Овчинников В.В. Сварка алюминиевых сплавов. М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2017.
Drits A.M., Ovchinnikov V.V. Aluminum alloy welding. Moscow: Publ. Ruda i Metally, 2017 (In Russ.).
 22. Европейская металлургическая компания. URL: https://emk24.ru/wiki/alyuminiy_i_ego_splavy/splav_aw_5083_3_3547_4370953 (дата обращения: 23.11.2019).
European metallurgical company. URL: https://emk24.ru/wiki/alyuminiy_i_ego_splavy/splav_aw_5083_3_3547_4370953 (accessed: 23.11.2019).