

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ОБЖАТИЯ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ И ТЕМПЕРАТУРЫ ОКОНЧАТЕЛЬНОГО ОТЖИГА НА СВОЙСТВА И МИКРОСТРУКТУРУ ЛИСТОВ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al–Mg–Sc

© 2022 г. **Ф.В. Гречников**^{1,2}, **Я.А. Ерисов**¹, **С.В. Сурудин**¹, **В.А. Разживин**¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет (СНИУ) им. акад. С.П. Королева,
г. Самара, Россия

² Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СамНЦ РАН),
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 05.05.2022 г., доработана 24.05.2022 г., подписана в печать 30.05.2022 г.

Аннотация: Исследовано влияние степени обжатия при холодной прокатке (ϵ_h), а также температуры окончательного отжига листов, прокатанных с различной степенью обжатия, на микроструктуру и комплекс механических и технологических свойств холоднокатаных листов из алюминиевого сплава В-1579 системы Al–Mg–Sc. Установлено, что с ростом значений ϵ_h характер пластической анизотропии изменяется слабо, наблюдается увеличение пределов прочности и текучести и уменьшение относительного удлинения. При этом анизотропия пределов прочности и текучести практически отсутствует. С повышением степени обжатия до 30–40 % анизотропия относительного удлинения увеличивается – его значение в направлении прокатки уменьшается более интенсивно. Однако после прокатки с $\epsilon_h > 50$ % анизотропия относительного удлинения практически исчезает. Независимо от температуры отжига образцы, прокатанные с большей степенью обжатия, имеют более высокие прочностные характеристики. Установлено, что с ростом температуры отжига пределы прочности и текучести снижаются, а относительное удлинение возрастает. При этом разупрочнение при повышении температуры термообработки происходит более интенсивно для образцов, прокатанных с меньшим обжатием. После отжига для всех анализируемых режимов характер распределения показателей анизотропии в плоскости листа не уменьшается и соответствует деформационному типу текстур. Более того, значение коэффициента плоскостной анизотропии уменьшается по сравнению с холоднокатаным образцом. При этом технологические свойства образцов, прокатанных с большей степенью деформации, после отжига выше, чем у образцов, прокатанных с меньшим обжатием, независимо от температуры отжига.

Ключевые слова: алюминиевый сплав В-1579, холодная прокатка, степень обжатия, температура, окончательный отжиг, механические свойства, технологические свойства, микроструктура.

Гречников Ф.В. — докт. техн. наук, акад. РАН, зав. кафедрой обработки металлов давлением (ОМД), СНИУ (44086, г. Самара, ул. Лукачева, 47); гл. науч. сотрудник СамНЦ РАН (443001, г. Самара, Студенческий пер., 3А).
E-mail: gretch@ssau.ru.

Ерисов Я.А. — докт. техн. наук, профессор кафедры ОМД, СНИУ. E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru.

Сурудин С.В. — канд. техн. наук, доцент кафедры ОМД, СНИУ. E-mail: innosam63@gmail.com.

Разживин В.А. — аспирант, инженер кафедры ОМД, СНИУ. E-mail: vasia.razzhivin@yandex.ru.

Для цитирования: Гречников Ф.В., Ерисов Я.А., Сурудин С.В., Разживин В.А. Исследование влияния степени обжатия при холодной прокатке и температуры окончательного отжига на свойства и микроструктуру листов из сплава системы Al–Mg–Sc. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2022. Т. 28. № 4. С. 75–83. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-4-75-83.

Effect of reduction ratio during cold rolling and final annealing temperature on the properties and microstructure of Al–Mg–Sc alloy sheets

F.V. Grechnikov^{1,2}, **Ya.A. Erisov**¹, **S.V. Surudin**¹, **V.A. Razzhivin**¹

¹ Samara National Research University n.a. acad. S.P. Korolev (Samara University), Samara, Russia

² Samara Federal Research Center of Russian Academy of Science, Samara, Russia

Received 05.05.2022, revised 24.05.2022, accepted for publication 30.05.2022

Abstract: The study covers the effect of the reduction ratio during cold rolling (ϵ_h) and the final annealing temperature of sheets rolled with different reduction ratios on the microstructure and the complex of mechanical and processing properties of cold-rolled sheets made of the

V-1579 aluminum alloy of the Al–Mg–Sc system. It was established that as ε_n increases, the nature of plastic anisotropy changes slightly, and an increase in tensile strength and yield strength with a decrease in relative elongation is observed. In this case, the ultimate strength and yield strength anisotropy is practically absent. As the reduction ratio increases to 30–40 %, the relative elongation anisotropy increases, and its value in the rolling direction decreases more rapidly. However, after rolling with $\varepsilon_n > 50$ %, the relative elongation anisotropy practically disappears. Regardless of the annealing temperature, samples rolled with a higher reduction ratio have better strength properties. It was found that as the annealing temperature increases, the ultimate strength and yield strength decrease, and the relative elongation increases. In this case, softening with an increase in the annealing temperature occurs more intensively for samples rolled with a lower reduction. After annealing, the distribution nature of anisotropy indices in the sheet plane does not decrease and corresponds to the deformation type of textures for all analyzed modes. Moreover, the value of the in-plane anisotropy coefficient decreases in comparison with a cold-rolled sample. At the same time, processing properties of samples rolled with a higher degree of deformation after annealing are higher than those of samples rolled with a lower reduction, regardless of the annealing temperature.

Keywords: V-1579 aluminum alloy, cold rolling, reduction ratio, temperature, final annealing, mechanical properties, processing properties, microstructure.

Grechnikov F.V. — Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of metal forming, Samara National Research University n.a. acad. S.P. Korolev (Samara University) (44086, Russia, Samara, Lukacheva str., 47); Chief researcher of Samara Federal Research Center of Russian Academy of Science (443001, Russia, Samara, Studencheskii per., 3A). E-mail: gretch@ssau.ru.

Erisov Ya.A. — Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of metal forming, Samara University. E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru.

Surudin S.V. — Cand. Sci. (Tech.), Associate prof., Department of metal forming, Samara University. Email: innosam63@gmail.com.

Razzhivin V.A. — Graduate student, Engineer, Department of metal forming, Samara University. E-mail: vasia.razzhivin@yandex.ru.

For citation: Grechnikov F.V., Erisov Ya.A., Surudin S.V., Razzhivin V.A. Effect of reduction ratio during cold rolling and final annealing temperature on the properties and microstructure of Al–Mg–Sc alloy sheets. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2022. Vol. 28. No. 4. P. 75–83 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-4-75-83.

Введение

В течение длительного времени в качестве конструкционного материала для изделий космической техники применяли и продолжают использовать термически неупрочняемый сплав АМгб системы Al–Mg, разработанный в 1950-х гг. под руководством С.М. Воронова и В.Н. Иорданского [1, 2]. Однако помимо преимуществ этот материал имеет значимый недостаток в виде низких прочностных свойств, в частности предела текучести, в отожженном состоянии. Нагартовка позволяет повысить прочность металла, но, как известно, эффект нагартовки устраняется под влиянием термического цикла сварки, и в зоне сварного шва прочность нагартованного металла приближается к его прочности в отожженном состоянии.

Возможность создания деформируемых сплавов системы Al–Mg с прочностью в отожженном состоянии, близкой к показателям наиболее распространенных термически упрочняемых алюминиевых сплавов в состоянии после упрочняющей термической обработки (ТО), появилась после того, как их стали легировать переходным металлом — скандием. Перспективность использования скандия в качестве легирующей добавки в деформируемые алюминиевые сплавы

была предсказана В.И. Елагиным в конце 1960-х — начале 1970-х гг. [3, 4].

Примерно в это же время легировать алюминиевые сплавы скандием предложил американский исследователь L.A. Willey [5], однако в США эти работы не получили продолжения. Влияние добавки скандия на структуру и свойства алюминия, а также фазовые взаимодействия в системе Al–Mg–Sc изучали в 1970-х гг. в ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова (г. Москва) [6–9]. Также созданием новых материалов системы Al–Mg–Sc занимались и другие организации: так, в институте «ВИАМ» (г. Москва) разработан термически неупрочняемый алюминиевый сплав марки В-1579, который имеет повышенные на 30–70 % показатели механических свойств при сохранении уровня свариваемости в сравнении с базовым сплавом АМгб [10].

В настоящее время интерес к сплавам системы Al–Mg–Sc не уменьшается, и продолжается их исследование и совершенствование. Одним из направлений повышения их свойств является легирование и другими редкоземельными металлами, например цирконием [11–13].

Большое количество работ посвящено исследованию

дованию влияния химического состава сплава системы Al—Mg—Sc и режимов его обработки на формирование мелкозернистой структуры и способности к сверхпластичности [14, 15]. При этом для измельчения зерна используются различные подходы, но основным является интенсивная пластическая деформация [16—18]. С развитием аддитивных технологий появилось большое количество работ по селективному лазерному сплавлению данных материалов [19—21].

Слабоизученной является проблема анизотропии свойств сплавов системы Al—Mg—Sc. Как известно, одним из недостатков любых алюминиевых сплавов является их низкая технологичность при формообразовании изделий, которая является следствием формирования текстуры при прокатке и возникновения значительной анизотропии свойств, что влечет за собой повышенный расход металла, ограничение предельно допустимой деформации, искажение размеров деталей и т.д. [22, 23].

Однако, создавая в листах эффективную анизотропию свойств, можно обеспечить интенсификацию процессов формообразования заготовок и повышение эксплуатационных характеристик изделий [22, 24]. В частности, создание рациональной анизотропии пластических свойств может изменить соотношение между деформациями в пользу той, увеличение которой приведет к повышению предельных возможностей листов в процессах вытяжки, гибки и обжатия [22].

Исследования показывают, что основной причиной формирования в листах из алюминиевых сплавов неблагоприятной анизотропии свойств являются, как правило, нерациональные термомеханические режимы прокатки [25, 26]. В связи с этим в настоящей работе исследовано влияние степени обжатия при холодной прокатке и температуры окончательного отжига на анизотропию механических характеристик, технологические свойства и микроструктуру листов из сплава системы Al—Mg—Sc.

Методика исследования

Исследования проводили на горячекатаных и отожженных заготовках из сплава В-1579 толщиной 4,2 мм, химический состав которого приведен в табл. 1. Горячую прокатку литых заготовок осуществляли при температуре 400 °С, после чего их подвергали отжигу при $t = 360$ °С в течение 3 ч.

Холодная прокатка и окончательный отжиг производились по режимам, приведенным на рис. 1. Прокатка осуществлялась с равными обжатиями по проходам (0,1—0,3 мм) на лабораторном одно-клетьевом двухвалковом реверсивном стане 300 («DIMA Maschinen», Германия), а отжиг — в лабораторной печи ПЛ 20/12,5 (Россия). По завершении этих процессов отбирались образцы для определения механических свойств, коэффициентов поперечной деформации, микроструктуры, а также для проведения технологических испытаний.

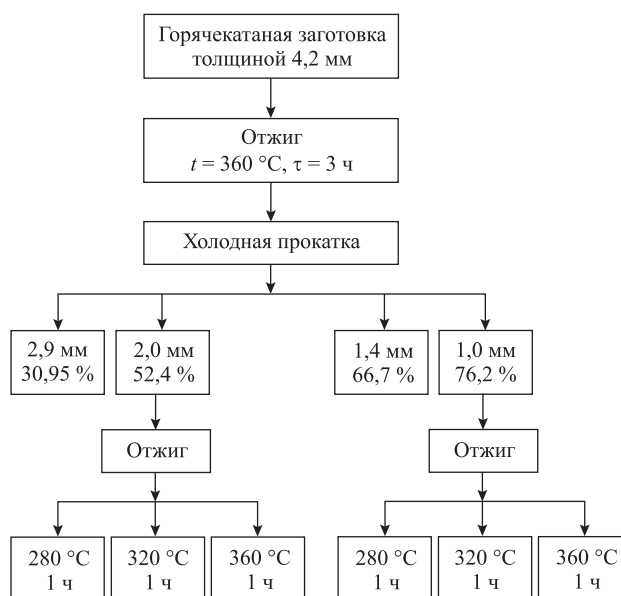


Рис. 1. Маршруты прокатки и отжига

Fig. 1. Rolling and annealing routes

Таблица 1. Химический состав сплава В-1579

Table 1. Chemical composition of V-1579 alloy

Содержание элементов, %									Примеси, %, не более		
Al	Mg	Sc	Mn	Zr	Zn	Cr	Fe	Ni	Cu	Si	Ti
Основа	5,3	0,2	0,6	0,1	0,6	0,07	0,13	0,1	0,1	0,03	0,02

Для изучения анизотропии механических свойств (предела прочности (σ_b), предела текучести ($\sigma_{0,2}$) и относительного удлинения (δ)) образцы вырезали в трех направлениях под углами 0° , 45° и 90° к направлению прокатки (по 3 образца на каждое из них). Размеры образцов соответствовали ГОСТ 11701-84. Испытания проводили на электро-механической испытательной машине Testometric FS150AX (Англия); скорость растяжения составляла 5 мм/мин.

Для оценки анизотропии определяли коэффициенты поперечной деформации (показатели анизотропии — μ), представляющие собой отношение логарифмической деформации по ширине к деформации по длине образца при его испытании на растяжение, взятое со знаком минус [22]. Определение значений μ осуществляли при помощи бесконтактной системы измерения деформаций Vic-3D.

Кроме того, рассчитывали среднее в плоскости листа значение показателей анизотропии:

$$\mu_{\text{ср}} = \frac{\mu_0 + 2\mu_{45} + \mu_{90}}{4},$$

где μ_0 , μ_{45} и μ_{90} — значения μ вдоль (0°), под углом 45° к направлению прокатки и вдоль поперечного направления (90°) соответственно.

Для оценки величины анизотропии в плоскости листа вычисляли показатель плоскостной анизотропии:

$$\Delta\mu = \frac{\mu_0 - 2\mu_{45} + \mu_{90}}{2}.$$

Также $\Delta\mu$ характеризует склонность металла к формированию фестонов при вытяжке под углами 0° и 90° ($\Delta\mu > 0$) и 45° ($\Delta\mu < 0$) к направлению прокатки [22].

Испытания на технологические свойства проводили на машине ZWICK/ROELL BUP 200 (Австрия). Определяли глубину лунки по Эриксену (ГОСТ 10510-80), предельный коэффициент отбортовки (ISO 16630) и максимальную высоту стаканчика при вытяжке (DIN EN ISO 20482).

Анализ микроструктуры предварительно подготовленных шлифов поперечного сечения листов осуществляли на оптическом микроскопе Axio Vert. A1 Mat («Carl Zeiss», Германия) с увеличением $500\times$. Обработку полученных изображений микроструктуры выполняли в специализированном программном комплексе SIAMS 800 (Россия). Также проводили измерения микротвердости на

микротвердомере Matsuzawa MMT-X (Япония) при увеличении $400\times$ и нагрузке 300 г.

Результаты и их обсуждение

Влияние степени обжатия

В табл. 2 и 3 показаны результаты оценки анизотропии механических свойств холоднокатаных образцов из сплава В-1579, прокатанных с различной степенью обжатия (ϵ_h). Как видно, с ее увеличением наблюдается рост пределов прочности и текучести и снижение относительного удлинения. При этом анизотропия σ_b и $\sigma_{0,2}$ практически отсутствует (наблюдаемый разброс их значений находится в доверительном интервале измеренных характеристик). С увеличением степени обжатия до 30–40 % анизотропия относительного удлинения возрастает — значение δ в направлении прокатки уменьшается более интенсивно. Однако после прокатки с $\epsilon_h > 50$ % анизотропия этого показателя практически исчезает.

Анализ приведенных данных показал, что характер пластической анизотропии с ростом степени обжатия изменяется слабо. Минимальное

Таблица 2. Механические свойства прокатанных образцов из сплава В-1579 в зависимости от степени обжатия

Table 2. Mechanical properties of rolled V-1579 alloy samples depending on reduction ratio

ϵ_h , %	Угол вырезки образцов, град	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
0	0	365,1	194,8	18,9
	45	392,2	211,9	18,6
	90	400,2	219,2	14,6
30,9	0	463,3	189	4,3
	45	419,7	230,1	12
	90	429,6	266	10,85
52,4	0	441,3	315,5	3,2
	45	433,8	261,3	3,9
	90	466,8	335,6	8,3
66,7	0	507,3	391,9	7,8
	45	491	391	7,23
	90	457,6	403,3	4,99
76,2	0	537,5	489,4	5,4
	45	544,4	464,7	7,4
	90	543,4	464,2	5,7

Таблица 3. Показатели анизотропии в зависимости от степени обжатия образцов из сплава В-1579 при холодной прокатке

Table 3. Anisotropy indices depending on the reduction ratio of V-1579 alloy samples during cold rolling

$\varepsilon_h, \%$	Угол вырезки образцов, град	μ	$\mu_{\text{ср}}$	$\Delta\mu$
0	0	0,288	0,431	-0,179
	45	0,521		
	90	0,395		
30,9	0	0,280	0,471	-0,158
	45	0,550		
	90	0,504		
52,4	0	0,285	0,413	-0,088
	45	0,457		
	90	0,452		
66,7	0	0,316	0,478	-0,105
	45	0,531		
	90	0,535		
76,2	0	0,206	0,413	-0,138
	45	0,481		
	90	0,481		

значение показателя анизотропии во всех случаях соответствует направлению прокатки. В целом плоскостная анизотропия с увеличением обжатия снижается, но при $\varepsilon_h > 50 \%$ начинается ее рост. Во всех случаях величина $\Delta\mu < 0$, что свидетельствует о деформационном типе текстур и должно приводить при вытяжке к образованию фестонов под углом 45° .

Исходя из величин показателей анизотропии менее 0,5, что характерно для большинства алю-

миниевых сплавов, можно говорить о низких деформационных возможностях данного материала.

Влияние степени обжатия на технологические свойства оценивалось только по глубине лунки (испытание по методу Эриксона). Испытание на вытяжку и отбортовку не проводилось из-за низкой пластичности холоднокатаного материала. В целом с ростом степени обжатия глубина лунки уменьшается с 2,2 до 1,3 мм, что свидетельствует о снижении деформационных возможностей материала. При этом в начале процесса глубина лунки уменьшается более интенсивно, а при $\varepsilon_h > 65 \%$ — незначительно.

Как видно из рис. 2, с увеличением степени обжатия микроструктура сплава В-1579 почти не изменяется. В структуре присутствуют фазы — предположительно интерметаллиды типа Al_3Sc и AlMn (Ni, Fe), доля которых составляет около 18,3 % и практически не изменяется в ходе прокатки.

Микротвердость с ростом степени обжатия увеличивается практически линейно — с 125 до 145 HV, что согласуется с общим изменением механических свойств и, очевидно, происходит только за счет нагартовки матрицы.

Влияние температуры отжига

В табл. 4 и 5 приведены механические свойства и показатели анизотропии холоднокатаных листов из сплава типа В-1579, прокатанных с различной степенью обжатия (52,4 и 76,2 %) и отожженных при различной температуре ($t_{\text{отж}} = 280, 320$ и 360°C).

В целом независимо от температуры отжига образцы, прокатанные с большей степенью обжатия, имеют более высокие прочностные характеристики. С ростом $t_{\text{отж}}$ происходят уменьшение пределов

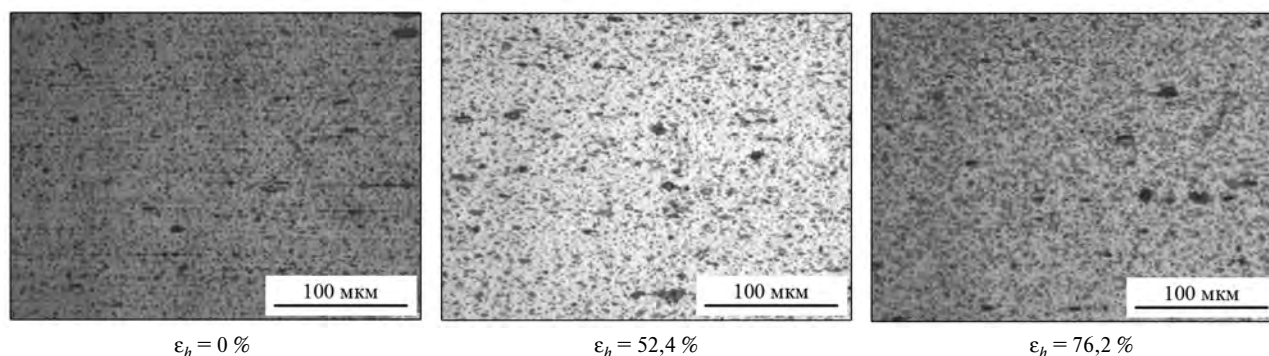


Рис. 2. Микроструктура образцов после холодной прокатки с различной степенью обжатия ($\times 500$)

Fig. 2. Microstructure of samples after cold rolling with different reduction ratios ($\times 500$)

Таблица 4. Влияние температуры окончательного отжига на механические свойства образцов из сплава В-1579

Table 4. Effect of final annealing temperature on mechanical properties of V-1579 alloy samples

ϵ_h , %	$t_{\text{отж}}$, °C	Угол вырезки образцов, град	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
52,4	280	0	399,9	304,3	13,5
		45	390,6	298,4	18
		90	413,4	319,3	14,8
	320	0	405,2	305,4	14
		45	391,4	303	16,1
		90	391	294	14,6
	360	0	363,4	264,9	13
		45	358,9	260	20,3
		90	370,1	272,4	15,8
76,2	280	0	398	324,9	11
		45	426,1	360,1	15,4
		90	446,7	371,7	13,5
	320	0	334,4	321,7	12,4
		45	387,7	318,7	17,1
		90	424,2	347,7	15,1
	360	0	449	340,1	16,2
		45	403,9	315,7	20,7
		90	432	333,8	19,3

прочности и текучести и увеличение относительного удлинения. При этом разупрочнение протекает более интенсивно для образцов, прокатанных с меньшим обжатием.

Кроме того, для данных образцов анизотропия механических свойств в плоскости листа практически отсутствует, так же как и у холоднокатаных. Однако после отжига образцов, прокатанных с обжатием 76,2 %, появляется ярко выраженная анизотропия характеристик с максимумом пределов прочности и текучести в поперечном направлении.

После отжига для всех анализируемых режимов характер распределения показателей анизотропии в плоскости листа не уменьшается и соответствует деформационному типу текстур. Более того, после отжига значение коэффициента плоскостной анизотропии уменьшается по сравнению с холоднокатаным образцом. При этом чем больше была степень обжатия, тем меньше значение $\Delta\mu$. С другой

Таблица 5. Влияние температуры окончательного отжига образцов из сплава В-1579 на показатели анизотропии

Table 5. Effect of final annealing temperature of V-1579 alloy samples on anisotropy indices

ϵ_h , %	$t_{\text{отж}}$, °C	Угол вырезки образцов, град	μ	$\mu_{\text{ср}}$	$\Delta\mu$
52,4	280	0	0,273	0,450	-0,199
		45	0,550		
		90	0,429		
	320	0	0,266	0,433	-0,144
		45	0,505		
		90	0,455		
	360	0	0,280	0,440	-0,124
		45	0,501		
		90	0,473		
76,2	280	0	0,299	0,489	-0,224
		45	0,601		
		90	0,455		
	320	0	0,272	0,488	-0,201
		45	0,588		
		90	0,504		
	360	0	0,331	0,510	-0,246
		45	0,633		
		90	0,442		

стороны, если для образцов, прокатанных с $\epsilon_h = 52,4$ %, с повышением температуры отжига величина $\Delta\mu$ возрастает, оставаясь в области отрицательных значений, то для образцов, подвергнутых деформации с $\epsilon_h = 76,2$ %, она уменьшается.

В целом большими деформационными возможностями обладает материал после прокатки со степенью 52,4 % и отжига, так как у него наиболее высокие значения показателей анизотропии.

Результаты влияния температуры окончательного отжига на технологические характеристики (табл. 6) хорошо согласуются с полученными данными при механических испытаниях и показателями анизотропии. Так, с увеличением температуры отжига деформационные возможности материала возрастают, что сопровождается ростом глубины лунки (h_3), высоты стаканчика при вытяжке (h_b) и коэффициента отбортовки (K_0). При этом технологические свойства образцов, прока-

Таблица 6. Влияние температуры окончательного отжига холоднокатаных образцов на технологические свойства

Table 6. Effect of the final annealing temperature of rolled samples on processing properties

ε_h , %	$t_{\text{отж}}$, °C	h_3 , мм	h_B , мм	K_0
52,4	280	3,45	4	1,18
	320	3,46	4,8	1,20
	360	4,47	5,6	1,25
76,2	280	4,27	10,8	—
	320	4,33	11	—
	360	4,02	10,1	—

Таблица 7. Влияние температуры окончательного отжига холоднокатаных образцов на долю фаз в их структуре

Table 7. Effect of the final annealing temperature of cold-rolled samples on the proportion of phases

ε_h , %	$t_{\text{отж}}$, °C	Содержание фаз, %
52,4	280	19,44
	320	26,61
	360	25,22
76,2	280	23,64
	320	22,99
	360	24,07

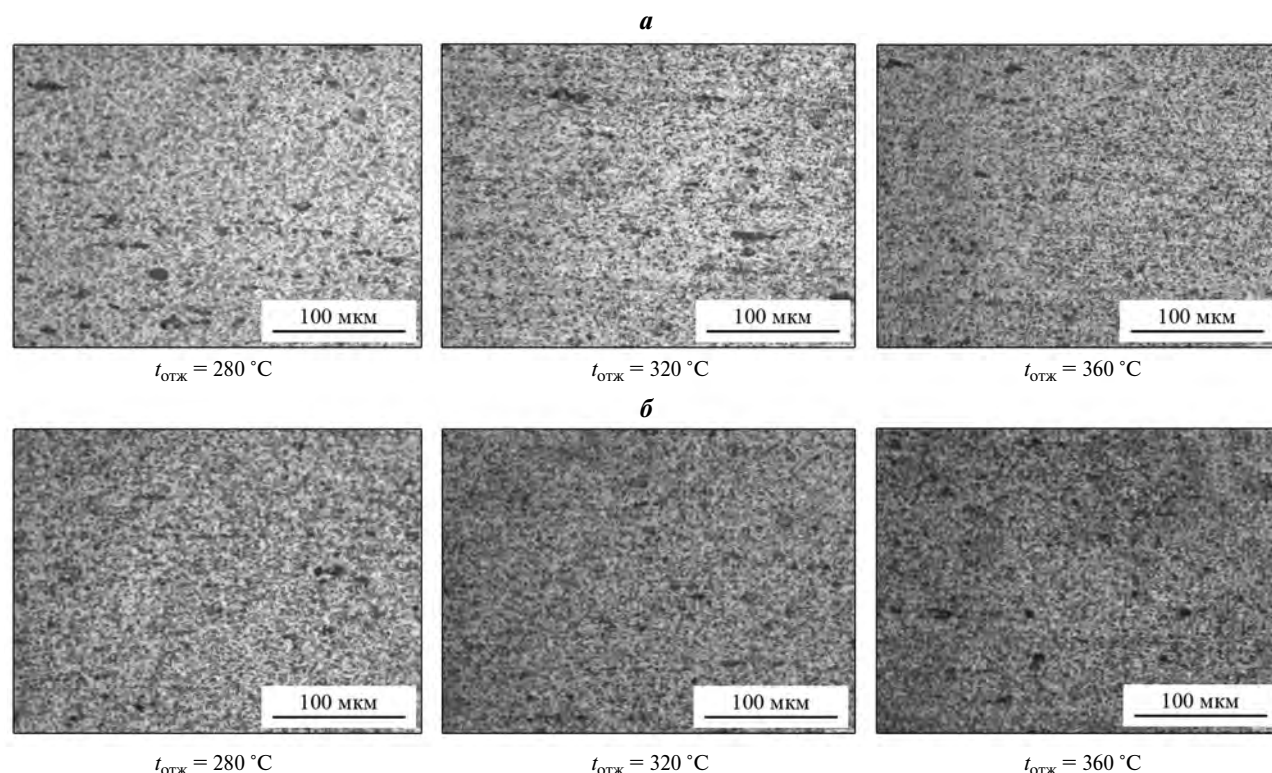


Рис. 3. Микроструктура холоднокатаных и отожженных образцов ($\times 500$)

а – обжатие при прокатке 52,4 %; **б** – 76,2 %

Fig. 3. Microstructure of cold-rolled and annealed samples ($\times 500$)

а – 52.4 % reduction during rolling; **б** – 76.2 % reduction during rolling

танных с большей степенью деформации, после отжига выше, чем у прокатанных с меньшим обжатием, независимо от температуры отжига.

Необходимо отметить, что исследуемые режимы прокатки и отжига не обеспечивают достаточных деформационных возможностей материала для осуществления вытяжки. Так, в ходе вытяж-

ки образцов во всех случаях наблюдается отрыв дна стаканчика. Однако он происходит на разной глубине, что позволяет косвенно оценить способность к вытяжке.

Кроме того, даже по полученным образцам можно судить о фестонообразовании в процессе вытяжки — по искажению формы фланца. Так, при

вытяжке холоднокатаных со степенью деформации 76,2 % и отожженных образцов формируются явно выраженные фестоны под углом 45° к направлению прокатки. По образцам после прокатки с $\epsilon_h = 52,4$ % определить характер фестонобразования не удалось из-за малости глубины стаканчика.

Как видно из рис. 3, с увеличением температуры отжига растет доля фаз в структуре. При этом более интенсивное их выделение происходит после прокатки с меньшим обжатием (табл. 7).

Заключение

Установлено, что с ростом степени обжатия при холодной прокатке листов из сплава В-1579 характер пластической анизотропии изменяется слабо и соответствует деформационному типу микроструктуры. Окончательный отжиг холоднокатаных листов из сплава В-1579 независимо от температуры не приводит к рекристаллизации микроструктуры. Скорее всего, присутствие выделений вторичной фазы Al_3Sc сдерживает протекание процесса рекристаллизации. Несмотря на это, с увеличением температуры отжига деформационные возможности материала растут, что подтверждается технологическими испытаниями. При этом технологические свойства образцов, прокатанных с большей степенью деформации до отжига, выше, чем у образцов, прокатанных с меньшим обжатием, независимо от температуры отжига.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10340).

Acknowledgments. The research was funded by the grant of the Russian Science Foundation (Project № 20-79-10340).

Литература/References

1. Елагин В.И. Научные труды С.М. Воронова по алюминиевым сплавам и их роль в современном металлостроении. В кн.: *Металловедение и технология легких сплавов*. М.: ВИЛС, 2001. С. 5—15.
Elagin V.I. Scientific works of S.M. Voronov on aluminum alloys and their role in modern metal science. In: *Metallovedeniye i tekhnologiya legkikh splovov*. Moscow: VILS, 2001. P. 5—15 (In Russ.).
2. Кондратьева Н.Б., Золоторевский Ю.С. Сплавы алюминия с магнием (магналий). В кн.: *Промышленные алюминиевые сплавы*: Справ. изд. (ред. Алиев С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М. и др.). 2-е изд. перераб. и доп. М.: Металлургия, 1984. С. 37—51.
Kondratieva N.B., Zolotarevsky Yu.S. Alloys of aluminum with magnesium (magnium). In: *Promyshlennyye alyuminiyevyye splavy*: Handbook (Eds. Aliyev S.G., Altman M.B., Ambartsumyan S.M. et al.). Moscow: Metallurgiya, 1984. P. 37—51 (In Russ.).
3. Елагин В.И. О легировании деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами. В кн.: *Металловедение сплавов легких металлов*. М.: Наука, 1970. С. 51—59.
Elagin V.I. On alloying wrought aluminum alloys with transition metals. In: *Metallovedeniye splovov legkikh metallov*. Moscow: Nauka, 1970. P. 51—59 (In Russ.).
4. Елагин В.И. Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами. М.: Металлургия, 1975.
Elagin V.I. Alloying of wrought aluminum alloys with transition metals. Moscow: Metallurgiya, 1975 (In Russ.).
5. Willey L.A. Aluminum—scandium alloy: Pat. No. 3619181 (US). 1971.
6. Дриц М.Е., Каданер Э.С., Добаткина Т.В., Туркина Н.И. О характере взаимодействия скандия с алюминием в богатой алюминием части системы Al—Sc. *Изв. АН СССР. Металлы*. 1973. No. 4. С. 213—217.
Drits M.E., Kadaner E.S., Dobatkina T.V., Turkina N.I. On the nature of the interaction of scandium with aluminum in the aluminum-rich part of the Al—Sc system. *Izv. AN SSSR. Metall.* 1973. No. 4. P. 213—217 (In Russ.).
7. Дриц М.Е., Туркина Н.И., Каданер Э.С., Добаткина Т.В. Структура и механические свойства сплавов алюминий—скандий. В кн.: *Редкие металлы в цветных сплавах*. М.: Наука, 1975. С. 160—167.
Drits M.E., Turkina N.I., Kadaner E.S., Dobatkina T.V. Structure and mechanical properties of aluminum-scandium alloys. In: *Redkie metally v tsvetnykh splavakh*. Moscow: Nauka, 1975. P. 160—167 (In Russ.).
8. Туркина Н.И., Кузьмина В.И. Фазовые взаимодействия в системе Al—Mg—Sc. *Изв. АН СССР. Металлы*. 1976. No. 4. С. 208—212.
Turkina N.I., Kuzmina V.I. Phase interactions in the Al—Mg—Sc system. *Izv. AN SSSR. Metall.* 1976. No. 4. P. 208—212 (In Russ.).
9. Каданер Э.С., Туркина Н.И. Характер взаимодействия редкоземельных металлов с алюминием в двойных и тройных системах. В кн.: *Проблемы металлостроения цветных сплавов*. М.: Наука, 1978. С. 71—76.
Kadaner E.S., Turkina N.I. The nature of the interaction of rare earth metals with aluminum in binary and ternary systems. In: *Problemy metallovedeniya tsvetnykh splovov*. Moscow: Nauka, 1978. P. 71—76 (In Russ.).
10. Рябов Д.К., Вахромов Р.О., Иванова А.О. Влияние малых добавок элементов с высокой растворимостью

- в алюминии на микроструктуру слитков и холоднокатанных листов из сплава системы Al—Mg—Sc. *Труды ВИАМ: Эл. науч.-техн. журн.* 2015. No. 9. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.05.2017).
- Ryabov D.K., Vakhromov R.O., Ivanova A.O. Influence of small additives of elements with high solubility in aluminum on the microstructure of ingots and cold-rolled sheets from an alloy of the Al—Mg—Sc system. *Trudy VIAM: Electronic journal.* 2015. No. 9. Art. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (accessed: 05.15.2017) (In Russ.).
11. Kendig K.L., Miracle D.B. Strengthening mechanisms of an Al—Mg—Sc—Zr alloy. *Acta Mater.* 2002. Vol. 50 (16). P. 4165—4175.
 12. Ocenasek V., Slamova M. Resistance to recrystallization due to Sc and Zr addition to Al—Mg alloys. *Mater. Charact.* 2001. Vol. 47 (2). P. 157—162.
 13. Shen J., Chen B., Wan J., Shen J., Li J. Effect of annealing on microstructure and mechanical properties of an Al—Mg—Sc—Zr alloy. *Mater. Sci. Eng. A.* 2022. Vol. 838. Art. 142821.
 14. Lee S., Utsunomiya A., Akamatsu H., Neishi K., Furukawa M., Horita Z., Langdon T.G. Influence of scandium and zirconium on grain stability and superplastic ductilities in ultrafine-grained Al—Mg alloys. *Acta Mater.* 2002. Vol. 50 (3). P. 553—564.
 15. Gholinia A., Humphreys F.J., Prangnell P.B. Production of ultra-fine grain microstructures in Al—Mg alloys by conventional rolling. *Acta Mater.* 2002. Vol. 50 (18). P. 4461—4476.
 16. Akamatsu H., Fujinami T., Horita Z., Langdon T.G. Influence of rolling on the superplastic behavior of an Al—Mg—Sc alloy after ECAP. *Scripta Mater.* 2001. Vol. 44 (5). P. 759—764.
 17. Sitdikov O., Sakai T., Avtokratova E., Kaibyshev R., Tsuzaki K., Watanabe Y. Microstructure behavior of Al—Mg—Sc alloy processed by ECAP at elevated temperature. *Acta Mater.* 2008. Vol. 56 (4). P. 821—834.
 18. Mathew R.T., Singam S., Ghosh P., Masa S.K., Prasad M.J.N.V. The defining role of initial microstructure and processing temperature on microstructural evolution, hardness and tensile response of Al—Mg—Sc—Zr (AA5024) alloy processed by high pressure torsion. *J. Alloys Compd.* 2022. Vol. 901. Art. 163548.
 19. Li R., Wang M., Yuan T., Song B., Chen C., Zhou K., Cao P. Selective laser melting of a novel Sc and Zr modified Al—6.2 Mg alloy: Processing, microstructure, and properties. *Powder Technol.* 2017. Vol. 319. P. 117—128.
 20. Ren Y., Dong P., Zeng Y., Yang T., Huang H., Chen J. Effect of heat treatment on properties of Al—Mg—Sc—Zr alloy printed by selective laser melting. *Appl. Surf. Sci.* 2022. Vol. 574. Art. 151471.
 21. Zhu Y., Zhao Y., Chen B. A study on Sc- and Zr-modified Al—Mg alloys processed by selective laser melting. *Mater. Sci. Eng. A.* 2022. Vol. 833. Art. 142516.
 22. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов (Резервы интенсификации). М.: Машиностроение, 1998.
Grechnikov F.V. Deformation of anisotropic materials (Reserves of intensification). Moscow: Mashinostroyeniye, 1998 (In Russ.).
 23. Mizera J., Driver J.H., Jezierski E., Kurzydowski K.J. Studies of the relationship between the microstructure and anisotropy of the plastic properties of industrial aluminum-lithium alloys. *Mater. Sci. Eng. A.* 1996. Vol. 212. No. 1. P. 94—101.
 24. Dittenber D.B., Ganga Rao H.S.V. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Pt. A: Appl. Sci. Manufact.* 2012. Vol. 43. No. 8. P. 1419—1429.
 25. Choia S.-H., Barlat F. Prediction of macroscopic anisotropy in rolled aluminum-lithium sheet. *Scripta Mater.* 1999. Vol. 41. No. 9. P. 981—987.
 26. Longzhou M., Jianzhong C., Xiaobo Z.A. A study on improving the cold-forming property of Al—Mg—Li alloy 01420. *Adv. Perform. Mater.* 1997. Vol. 4. P. 105—114.