

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕКСТУРЫ, МИКРОСТРУКТУРЫ И АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ В ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ ЛИСТОВ ИЗ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА 1420

© 2017 г. **Ф.В. Гречников, Я.А. Ерисов, С.В. Сурудин, М.С. Оглодков**

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

Самарский научный центр Российской академии наук (СамНЦ РАН)

Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ), г. Москва

Статья поступила в редакцию 26.04.17 г., доработана 16.06.17 г., подписана в печать 23.06.17 г.

Приведены результаты исследований формирования кристаллографической ориентации структуры и анизотропии свойств в процессе прокатки листов из алюминий-литиевого сплава 1420 системы Al–Mg–Li. Горячекатаные заготовки из сплава 1420 прокатывали в холодную с промежуточными закалками по следующему маршруту: 7,3 мм → 4,8 мм → 3,0 мм → 1,8 мм. После каждого прохода отбирались образцы для проведения механических испытаний и анализа структуры методами оптической микроскопии и дифрактометрии. Для листов всех рассматриваемых состояний характерна деформированная волокнистая структура и значительная анизотропия механических свойств. При этом максимальная пластичность наблюдается под углом 45° к направлению прокатки. Характер анизотропии свойств, сформированной на стадии горячей прокатки, не изменяется в процессе холодной прокатки. На всех этапах прокатки листы из сплава 1420 за счет сохранения нерекристаллизованной структуры обладают острой текстурой деформации. Так, в ходе анализа полюсных фигур и преимущественных ориентировок выявлено увеличение объемных долей ориентировок прокатки (типа латуни – медленное, а типа S – более быстрое) с ростом суммарных деформаций холодной прокатки. Ориентировки рекристаллизации (типа R) присутствуют в небольших количествах лишь после горячей прокатки. Объемная доля бестекстурной составляющей уменьшается с ростом суммарных деформаций. На основании полученных результатов исследований сделан вывод о том, что для уменьшения доли текстуры деформации и снижения анизотропии свойств в листах из сплава 1420 необходимо в первую очередь обеспечить протекание процессов рекристаллизации на стадии горячей прокатки с целью получения рекристаллизованной горячекатаной заготовки для последующей холодной прокатки.

Ключевые слова: прокатка, текстура, микроструктура, анизотропия свойств, алюминий-литиевый сплав 1420.

Гречников Ф.В. – докт. техн. наук, акад. РАН, проф., первый зам. председателя СамНЦ РАН (443001, г. Самара, Студенческий пер., 3А). E-mail: gretch@ssau.ru.

Ерисов Я.А. – канд. техн. наук, вед. инженер НИЛ-37 Самарского университета (443086, г. Самара, Московское шоссе, 34). E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru.

Сурудин С.В. – канд. техн. наук, инженер кафедры обработки металлов давлением (ОМД) Самарского университета. E-mail: innosam63@gmail.com.

Оглодков М.С. – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник ВИАМ (105005, г. Москва, ул. Радио, 17). E-mail: ogmih83@mail.ru.

Для цитирования: Гречников Ф.В., Ерисов Я.А., Сурудин С.В., Оглодков М.С. Исследование формирования текстуры, микроструктуры и анизотропии свойств в процессе прокатки листов из алюминий-литиевого сплава 1420 // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 6. С. 45–52. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-6-45-52.

Grechnikov F.V., Erisov Ya.A., Surudin S.V., Ogloodkov M.S.

Study of texture and microstructure formation and anisotropy of properties of aluminum-lithium alloy 1420 sheets when rolling

The article shows the evolution of the crystallographic texture and anisotropy of properties during the cold rolling of Al–Mg–Li aluminum-lithium alloy 1420 sheets. Hot-rolled 1420 alloy billets were rolled in a cold condition with intermediate quenching under the following schedule: 7,3 mm → 4,8 mm → 3,0 mm → 1,8 mm. After each pass samples are taken for mechanical testing and structure analysis using optical microscopy and diffractometry. Sheets in all the analyzed conditions characterize by a deformed fiber structure and a considerable anisotropy of mechanical properties. Maximum ductility is observed at 45° to the rolling direction. The nature of anisotropy formed during hot rolling does not change during the cold rolling process. Sheets made of 1420 alloy maintain non-

recrystallized structures and have a sharp deformation texture at all stages of rolling. Thus, pole figure and preferred orientation analysis revealed an increase in the volume ratio of rolling textures (slow for brass type and fast for *S* type) with the growing total cold rolling deformation. Recrystallization textures (*R* type) are present in small quantities only after hot rolling. The volume fraction of a textureless component decreases with the growth of deformation. The results obtained in the studies allow for the conclusion that first of all it is necessary to provide recrystallization in 1420 alloy sheets at the stage of hot rolling and obtain a recrystallized hot rolled billet for subsequent cold rolling in order to reduce the volume fraction of deformation texture and anisotropy of properties.

Keywords: rolling, texture, microstructure, anisotropy of properties, aluminum-lithium alloy 1420.

Grechnikov F.V. – Dr. Sci. (Eng.), Acad. of Russian Academy of Sciences, First deputy chairman of the Samara Scientific Center RAS (443001, Russia, Samara, Studencheskiy per., 3A). E-mail: gretch@ssau.ru.

Erisov Ya.A. – Cand. Sci. (Eng.), Senior engineer of NIL-37, Samara University (443086, Russia, Samara, Moskovskoe shosse, 34). E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru.

Surudin S.V. – Cand. Sci. (Eng.), Engineer, Department of metal forming processes, Samara University. E-mail: innosam63@gmail.com.

Oglodkov M.S. – Cand. Sci. (Eng.), Senior researcher, All-Russia Institute of Aviation Materials (105005, Russia, Moscow, Radio str., 17). E-mail: ogmih83@mail.ru.

Citation: Grechnikov F.V., Erisov Ya.A., Surudin S.V., Oglodkov M.S. Issledovanie formirovaniya tekstury, mikrostruktury i anizotropii svoystv v protsesse prokatki listov iz alyuminii-litievogo splava 1420. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 6. P. 45–52. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-6-45-52.

Введение

Анализ конструкций проектируемых самолетов на период до 2025 г. показывает, что объем применения алюминиевых сплавов не снижается, несмотря на рост использования композиционных материалов [1, 2]. Поэтому с точки зрения снижения массы конструкции летательных аппаратов представляют интерес алюминиевые сплавы, легированные литием, которые в сравнении с традиционными материалами обладают пониженной плотностью и повышенным модулем упругости [3–7]. Однако эти сплавы не нашли широкого применения из-за их пониженной технологичности при изготовлении полуфабрикатов [5–9], которая является следствием текстурообразования при прокатке и возникновения в связи с этим значительной анизотропии свойств, обуславливающей увеличение расхода металла, ограничение предельно допустимой деформации, искажение размеров детали и т.д. [10].

Известно, что основной причиной формирования в листах из алюминиевых сплавов неблагоприятной текстуры являются, как правило, нерациональные термомеханические режимы прокатки [10–13]. Так, в горячекатаных плитах из сплава В-1461 в большинстве случаев получается волокнистая, неоднородная по толщине структура, а в холоднокатаных листах — преимущественно нерекристаллизованная [14]. При такой структуре сохраняется анизотропия механических свойств как относительно направления прокатки, так и по толщине, что негативно сказывается на механических

свойствах, характеристиках вязкости разрушения и т.д.

Одним из решений данной проблемы является формирование в плитах и листах однородной структуры с равновероятным распределением зерен по кристаллографическим ориентациям (ослабление или отсутствие текстуры), что приводит к снижению анизотропии механических показателей. Например, в работах отечественных и зарубежных авторов определенное внимание уделяется созданию технологии изготовления и термической обработки плит и листов из Al–Li-сплавов 2195, В-1461 и 1424 с целью устранения текстуры [15–17].

При этом, если вопросам структуро- и текстурообразования при прокатке алюминий-литиевых сплавов последнего поколения (марки 1424 системы Al–Mg–Li, 1441 системы Al–Cu–Mg–Li, В-1461 системы Al–Cu–Li и др.) посвящено большое количество исследований [18–25], то опубликованных работ по сплаву II поколения типа 1420 практически нет [26, 27]. При этом сплав 1420 с плотностью 2,47 г/см³ является самым легким среди алюминиевых сплавов [28] и до сих пор широко применяется, в частности в конструкции ракетно-космической техники. Однако высокое содержание лития, характерное для него, приводит к значительному снижению технологичности и повышению анизотропии свойств в сравнении с другими алюминий-литиевыми материалами [7, 29].

С другой стороны, данный недостаток может стать преимуществом сплава 1420 в случае соз-

дания в листах при прокатке эффективной кристаллографической ориентации структуры, обеспечивающей интенсификацию процессов формообразования заготовок и повышение эксплуатационных характеристик изделий [10]. Как показано в работах [30, 31], создание рациональной кристаллографии структуры может изменить соотношение между деформациями в пользу той, увеличение которой приведет к повышению предельных возможностей листов в процессах обработки давлением.

В связи с этим цель настоящей работы — исследование формирования кристаллографической ориентации структуры и механических свойств в процессе прокатки листов из алюминий-литиевого сплава марки 1420.

Методика исследований

Исследования проводились на листах из алюминий-литиевого сплава 1420 следующего состава, мас. %:

Al.....	основа
Mg.....	5—6
Li.....	1,9—2,3
Si.....	0,1—0,3
Fe.....	до 0,3
Mn.....	до 0,3
Na.....	до 0,005
Zr.....	0,09—0,15
Ti.....	до 0,1

Они были изготовлены по следующей технологической схеме. Слиток размерами 260×1300 мм после гомогенизации ($t = 490 \div 510$ °С, $\tau = 24$ ч) и фрезеровки больших и малых граней (по 15 мм) прокатывали при температуре 360—390 °С до толщины $h = 7,3$ мм. Горячая прокатка проводилась в 2 этапа с промежуточным фрезерованием больших граней. Горячекатаную полосу разрезали на карточки, которые после предварительной закалки прокатывали в холодную с промежуточными закалками по следующему маршруту: 7,3 мм → 4,8 мм → 3,0 мм → 1,8 мм. Закалку для листов толщиной более 4 мм осуществляли с температуры 490—500 °С с охлаждением в воде, а с $h < 4$ мм — с 455—465 °С. Для исследования были отобраны образцы от горячекатаных листов толщиной 7,3 мм, а также от холоднокатаных и закаленных листов с $h = 4,8$ и 1,8 мм.

Для анализа микроструктуры изготовили шлифы продольного сечения образцов, которые подвергались последующему травлению в хлорном железе. Исследование проводили на оптическом микроскопе Axiovert-40MAT.

Текстурные измерения в виде построения полюсных фигур осуществляли на образцах, вырезанных из срединных плоскостей по толщине листа (по одному образцу на каждую толщину). Плоскость съемки полюсных фигур была параллельна плоскости прокатки. Текстуру в виде неполных полюсных фигур {111}, {200}, {220} и {311} исследовали методом «на отражение» с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 в CoK_α -излучении. Функцию распределения ориентировок (ФРО) рассчитывали по экспериментальным полюсным фигурам. По полученным ФРО рассчитывали обратные полюсные фигуры для трех взаимно перпендикулярных направлений в образце:

НН — направление нормали к плоскости прокатки;

НП — направление прокатки;

ПН — поперечное направление.

Из анализа сечений ФРО определяли преимущественные кристаллографические ориентировки и их объемные доли. Критерием адекватности выбора набора таких ориентировок являлся минимум величины среднеквадратичного отклонения между экспериментальной и рассчитанной по сумме отдельных ориентировок ФРО.

Для изучения анизотропии механических свойств (временного сопротивления разрыву (σ_b), предела текучести ($\sigma_{0,2}$) и относительного удлинения (δ)) вырезали по 3 образца на каждое направление под углами 0°, 45° и 90° к направлению прокатки. Размеры образцов выбирались по ГОСТ 11701-84 и ГОСТ 1497-84 в зависимости от толщины листа. Испытания проводили на электромеханической испытательной машине Zwick/Roell Z005 со скоростью растяжения 1 мм/мин. Также для оценки пластической анизотропии определяли коэффициент поперечной деформации (μ_{ij}), представляющий собой отношение логарифмической деформации по ширине образца к деформации по длине [10]. При этом поперечные деформации измеряли при помощи специальных экстензометров.

Результаты и их обсуждение

Как видно из приведенных на рис. 1 микроструктур, для листов всех рассматриваемых тол-

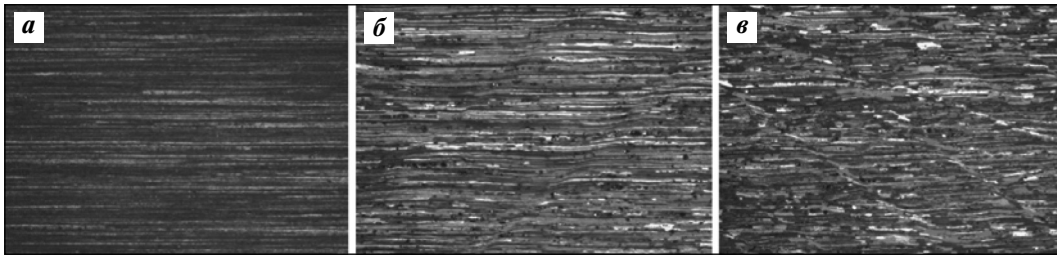


Рис. 1. Микроструктура листов толщиной $h = 7,3$ мм (а), 4,8 мм (б) и 1,8 мм (в)
Увеличение $100\times$

щин характерна деформированная волокнистая структура с вытянутыми вдоль направления прокатки зернами. Также можно наблюдать, как при холодной прокатке формируются полосы сдвига (скольжения), интенсивность которых увеличивается с ростом степени деформации.

В ходе анализа полюсных фигур (рис. 2) и преимущественных ориентировок (см. таблицу) выявляе-

но увеличение объемных долей ориентировок прокатки (типа латуни — медленное, а типа S — более быстрое) с ростом суммарной степени деформации холодной прокатки. Ориентировки рекристаллизации (типа R) присутствуют в небольших количествах лишь после горячей прокатки. Объемная доля бестекстурной составляющей уменьшается с увеличением суммарной деформации.

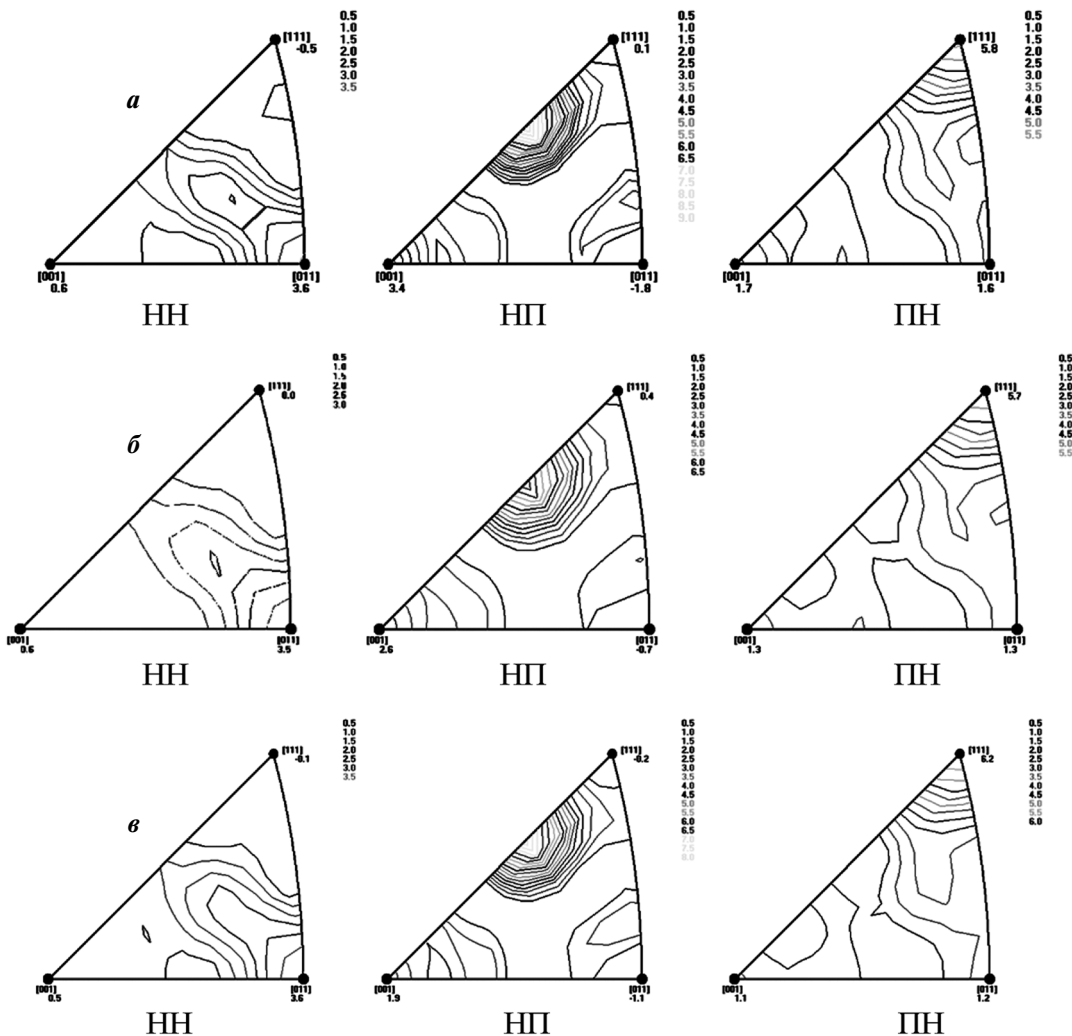


Рис. 2. Обратные полюсные фигуры для листов толщиной $h = 7,3$ мм (а), 4,8 мм (б) и 1,8 мм (в)

Преимущественные идеальные кристаллографические ориентировки листов из сплава 1420

Кристаллографическая ориентировка	Углы Эйлера			Объемная доля
	φ_1	Φ	φ_2	
Горячекатаный лист, $h = 7,3$ мм				
S_2'' (591)[1–12]	56	82	30	0,33
B_S (110)[1–12]	55	90	45	0,24
B_S (011)[2–11]	35	45	0	0,09
(765)[1–21]	27	62	50	0,07
R'' (358)[1–21]	39	35	30	0,06
B_{SRX}' (392)[7–37]	44	77	15	0,03
P' (110)[7–73]	18	90	45	0,03
Бестекстурная составляющая				0,15
Холоднокатаный лист, $h = 4,8$ мм				
S_2'' (186)[2–11]	29	54	10	0,30
B_S (110)[1–12]	55	90	45	0,24
S_2'' (592)[1–12]	56	80	30	0,17
B_S' (034)[2–11]	35	39	0	0,12
Cu'' (449)[–5–75]	85	30	45	0,10
Бестекстурная составляющая				0,07
Холоднокатаный лист, $h = 1,8$ мм				
S_2'' (681)[1–12]	55	82	35	0,43
B_S (011)[2–11]	35	45	0	0,37
S_1'' (385)[8–53]	22	58	20	0,13
Бестекстурная составляющая				0,07

Как видно из приведенных на рис. 3 результатов испытаний на растяжение, все исследуемые образцы характеризуются значительной анизотропией механических свойств. Наибольшую пластичность имеют образцы, вырезанные под углом 45° к направлению прокатки. Относительно равномерными свойствами обладает горячекатаный образец. Наибольшая плоскостная анизотропия относительного удлинения образцов толщиной 1,8 мм объясняется наличием полос сдвига, представляющих собой места локализованной деформации [6].

Коэффициенты поперечной деформации исследуемых образцов находятся в диапазоне 0,30–0,70, что характерно для алюминиевых сплавов в целом [10]. Как видно из результатов механических испытаний, все они характеризуются максимальным показателем μ_{ij} под углом 45° к направлению прокатки, т.е. характер анизотропии свойств, сформированный на стадии горячей прокатки, не

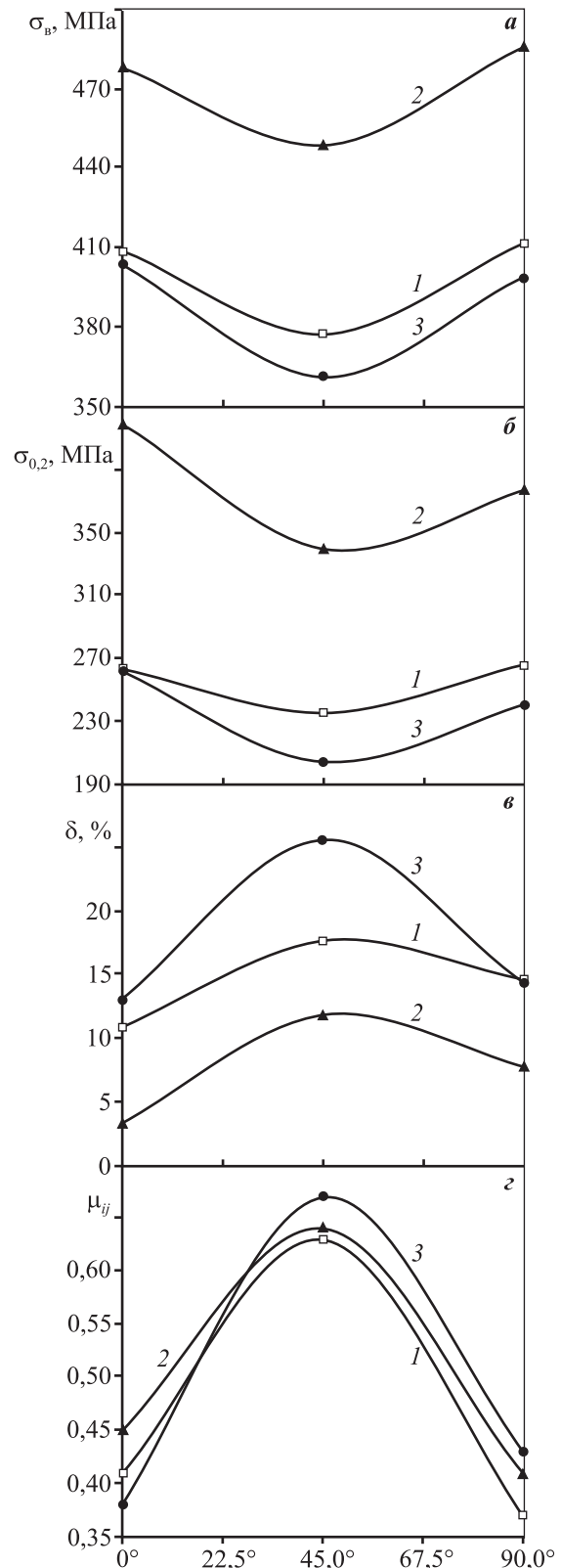


Рис. 3. Зависимость временного сопротивления разрыву (**а**), предела текучести (**б**), относительного удлинения (**в**) и коэффициентов поперечной деформации (**г**) от направления в плоскости листа $1 - h = 7,3$ мм; $2 - 4,8$ мм; $3 - 1,8$ мм

изменяется в процессе холодной прокатки, а только усугубляется. Это объясняется увеличением доли текстуры деформации с повышением степени обжатия (см. таблицу).

Заключение

На всех этапах прокатки листы из сплава 1420 за счет сохранения нерекристаллизованной структуры обладают острой текстурой деформации, которая определяет анизотропию свойств с максимумом показателя μ_{ij} под углом 45° к направлению прокатки. При этом выявлена четкая тенденция увеличения объемной доли ориентировок деформационного типа за счет уменьшения объемной доли ориентировок рекристаллизации и бестекстурной составляющей с ростом суммарных деформаций холодной прокатки.

Для уменьшения доли текстуры деформации и снижения анизотропии свойств в листах из сплава 1420 необходимо в первую очередь обеспечить протекание процессов рекристаллизации на стадии горячей прокатки с целью получения рекристаллизованной горячекатаной заготовки для последующей холодной прокатки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-48-630828 p_a.

Литература

1. Гуреева М.А., Грушко О.Е., Овчинников В.В. Свариваемые алюминиевые сплавы в конструкциях транспортных средств // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. No. 3. С. 27—41.
2. Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970—2000 и 2001—2015 гг. // МиТОМ. 2001. No. 1. С. 5—9.
3. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник РАН. 2012. Т. 82. No. 6. С. 520.
4. Wanhill R.J.H. Status and prospects for aluminium-lithium alloys in aircraft structures // Int. J. Fatigue. 1994. Vol. 16(1). P. 3—20.
5. Хохлатова Л.В., Колобнев Н.И., Оглодков М.С., Михайлов Е.Д. Алюминиевые сплавы для самолетостроения // Металлург. 2012. No. 5. С. 31—35.
6. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.В., Антипов В.В. Перспективные алюминиевые сплавы для самолетных конструкций // Технология легких сплавов. 2007. No. 2. С. 35—38.
7. Elagin V.I., Zakharov V.V. Modern Al—Li alloys and prospects of their development // Metal Sci. Heat Treatment. 2013. Vol. 55. P. 184—190.
8. Il'in A.A., Zakharov V.V., Betsofen M.S., Osintsev O.E., Rostova T.D. Texture and anisotropy of the mechanical properties of an Al—Mg—Li—Zn—Sc—Zr alloy // Russ. Metallurgy. 2008. No. 5. P. 406—412.
9. Rioja R., Liu J. The evolution of Al—Li base products for aerospace and space applications // Metal. Mater. Trans. 2012. Vol. 43A. P. 3325—3337.
10. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов (резервы интенсификации). М.: Машиностроение, 1998.
11. Гречников Ф.В., Ерисов Я.А., Арьшенский Е.В. Проектирование технологических режимов прокатки листов и лент для вытяжки изделий с минимальным фестонообразованием // Вестник СамГТУ (НИУ). 2011. No. 2 (26). С. 158—167.
12. Aryshenskii E.V., Aryshenskii V.Y., Grechnikova A.F., Beglov E.D. Evolution of texture and microstructure in the production of sheets and ribbons from aluminum alloy 5182 in modern rolling facilities // Metal Sci. Heat Treatment. 2014. Vol. 56. Iss. 7-8. P. 347—352.
13. Aryshenskii E.V., Serebryany V.N., Tepterev M.S., Grechnikova A.F. Study of the laws of texture formation in the alloy 8011 during cold rolling and annealing // Phys. Metal Metallograph. 2015. Vol. 116. Iss. 9. P. 925—931.
14. Оглодков М.С., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Алексеев А.А., Лукина Е.А. Влияние термомеханической обработки на свойства и структуру сплава системы Al—Cu—Mg—Li—Zn // Авиационные материалы и технологии. 2010. No. 4. С. 7—11.
15. Hales S.J., Hafley R.A. Texture and anisotropy in Al-Li alloy 2195 plate and near-net-shape extrusions // Mater. Sci. Eng. A. 1998. Vol. 257. No. 1. P. 153—164.
16. Сетюков О.А., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Оглодков М.С. Влияние кристаллографических ориентировок на свойства плит из Al—Li сплавов В-1461 и 1424 // Технология легких сплавов. 2010. No. 1. С. 100—106.
17. Клочкова Ю.Ю., Грушко О.Е., Ланцова Л.П., Бурляева И.П. Освоение в промышленном производстве полуфабрикатов из перспективного алюминий-литиевого сплава В-1469 // Авиационные материалы и технологии. 2011. No. 1. С. 8-12.
18. Mizera J., Driver J.H., Jezierska 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.
19. Choia S.-H., Barlata F. Prediction of macroscopic aniso-

- ropy in rolled aluminum-lithium sheet // Scripta Mater. 1999. Vol. 41. No. 9. P. 981–987.
20. Фридляндер И.Н., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Рендикс К., Темпус Г. Развитие термически стабильного алюминиево-литиевого сплава 1424 для применения в сварном фюзеляже // МиТОМ. 2002. No. 1. С. 3–7.
 21. Милевская Т.В., Рушиц С.В., Ткаченко Е.А., Антонов С.М. Деформационное поведение высокопрочных алюминиевых сплавов в условиях горячей деформации // Авиационные материалы и технологии. 2015. No. 2 (35). С. 3–9.
 22. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Лукина Е.А., Бер Л.Б. Снижение анизотропии в листах Al–Mg–Li–Zn-сплава 1424 // Цвет. металлы. 2013. No. 3 (843). С. 78–81.
 23. Фридляндер И.Н., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Алексеев А.А., Лукина Е.А., Колесникова О.К. Конструкционный сплав 1424 пониженной плотности системы Al–Mg–Li–Zr–Sc для сварных и клепаных конструкций авиакосмической техники // Технология легких сплавов. 2002. No. 4. С. 20–23.
 24. Хохлатова Л.Б., Лукин В.И., Колобнев Н.И., Иода Е.Н., Базескин А.В., Лавренчук В.П., Кошкин В.В., Мезенцева Е.А. Перспективный алюминиево-литиевый сплав 1424 для сварных конструкций изделий авиакосмической техники // Сварочное пр-во. 2009. No. 3. С. 7–10.
 25. Ерисов Я.А., Гречников Ф.В., Оглодков М.С. Влияние режимов изготовления листов из сплава в-1461 на кристаллографию структуры и анизотропию свойств // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2015. No. 6. С. 36–42.
 26. Longzhou M., Jianzhong C., Xiaobo Z.A. Study on improving the cold-forming property of Al–Mg–Li alloy 01420 // Adv. Perform. Mater. 1997. Vol. 4. P. 105–114.
 27. Курских Ю.А., Москвичев Г.Г., Грушко О.Е., Винокуров Н.Д., Смаковская А.В. Исследование склонности сплава 01420 к образованию расслоений // Алюминиевые сплавы и специальные материалы: Тр. ВИАМ. Вып. 10. 1977. С. 13–15.
 28. Фридляндер И.И., Шамрай В.Ф., Ширяева Н.В. Фазовый состав и механические свойства сплавов алюминия с магнием и литием // Изв. АН СССР. Металлы. 1965. No. 2. С. 153–156.
 29. Федорова А.В., Москвичев Г.Г., Кондрашева Л.Н. Причины низкой технологичности сплава 01420 при прокатке и пути их устранения // Алюминиевые сплавы и специальные материалы: Тр. ВИАМ. Вып. 10. 1977. С. 16–18.
 30. Grechnikov F.V., Erisov Ya.A. Virtual material model with the given crystallographic orientation of the structure // Key Eng. Mater. 2016. Vol. 684. P. 134–142.
 31. Erisov Ya.A., Grechnikov F.V., Surudin S.V. Yield function of the orthotropic material considering the crystallographic texture // Struct. Eng. Mech. 2016. Vol. 58. Iss. 4. P. 677–687.

References

1. Gureeva M.A., Grushko O.E., Ovchinnikov V.V. Svarivaemye alyuminievye splavy v konstruksiyakh transportnykh sredstv [Welded aluminium alloys in the construction of vehicles]. Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii. 2009. No. 3. P. 27–41.
2. Fridlyander I.N. Alyuminievye splavy v letatel'nykh apparatakh v periody 1970–2000 i 2001–2015 gg. [Aluminum alloys in aircraft in periods of 1970–2000 and 2001–2015]. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2001. No. 1. С. 5–9.
3. Kablov E.N. Materialy i khimicheskie tekhnologii dlya aviatsionnoi tekhniki [Materials and chemical technologies for aircraft engineering]. Vestnik Rossiiskoi akademii nauk. 2012. Vol. 82. No. 6. P. 520.
4. Wanhill R.J.H. Status and prospects for aluminium-lithium alloys in aircraft structures. Int. J. Fatigue. 1994. Vol. 16(1). P. 3–20.
5. Khokhlatova L.V., Kolobnev N.I., Oglodkov M.S., Mikhailov E.D. Alyuminievye splavy dlya samoletostroeniya [Aluminum alloys for aircraft construction]. Metallurg. 2012. No. 5. P. 31–35.
6. Kolobnev N.I., Khokhlatova L.V., Antipov V.V. Perspektivnye alyuminievye splavy dlya samoletnykh konstruksii [Perspective aluminum alloys for aircraft structures]. Tekhnologiya legkikh splavov. 2007. No. 2. P. 35–38.
7. Elagin V.I., Zakharov V.V. Modern Al–Li alloys and prospects of their development. Metal Sci. Heat Treatment. 2013. Vol. 55. P. 184–190.
8. P'in A.A., Zakharov V.V., Betsofen M.S., Osintsev O.E., Rosstova T.D. Texture and anisotropy of the mechanical properties of an Al–Mg–Li–Zn–Sc–Zr alloy. Russ. Metallurgy. 2008. No. 5. P. 406–412.
9. Rioja R., Liu J. The evolution of Al–Li base products for aerospace and space applications. Metal. Mater. Trans. 2012. Vol. 43A. P. 3325–3337.
10. Grechnikov F.V. Deformirovanie anizotropnykh materialov (rezervy intensivatsii) [Deformation of anisotropic materials (reserves of intensification)]. Moscow: Mashinostroenie. 1998.
11. Grechnikov F.V., Erisov Ya.A., Aryshenskii E.V. Proektirovanie tekhnologicheskikh rezhimov prokatki listov i lent dlya vytyazhki izdelii s minimal'nyim festonoobrazovaniem [Designing of technological modes for rolling sheets and tapes for drawing products with minimal fes-

- ton formation]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*. 2011. No. 2 (26). P. 158–167.
12. *Aryshenskii E.V., Aryshenskii V.Y., Grechnikova A.F., Beglov E.D.* Evolution of texture and microstructure in the production of sheets and ribbons from aluminum alloy 5182 in modern rolling facilities. *Metal Sci. Heat Treatment*. 2014. Vol. 56. Iss. 7-8. P. 347–352.
 13. *Aryshenskii E.V., Serebryany V.N., Tepterev M.S., Grechnikova A.F.* Study of the laws of texture formation in the alloy 8011 during cold rolling and annealing. *Phys. Metal Metallograph*. 2015. Vol. 116. Iss. 9. P. 925–931.
 14. *Oglodkov M.S., Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I., Alekseev A.A., Lukina E.A.* Vliyanie termomekhanicheskoi obrabotki na svoistva i strukturu splava sistemy Al–Cu–Mg–Li–Zn [The effect of thermomechanical processing on the properties and structure of alloy Al–Cu–Mg–Li–Zn]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2010. No. 4. P. 7–11.
 15. *Hales S.J., Hafley R.A.* Texture and anisotropy in Al–Li alloy 2195 plate and near-net-shape extrusions. *Mater. Sci. Eng. A*. 1998. Vol. 257. No. 1. P. 153–164.
 16. *Setyukov O.A., Kolobnev N.I., Khokhlatova L.B., Oglodkov M.S.* Vliyanie kristallograficheskikh orientirovok na svoistva plit iz Al–Li splavov V-1461 i 1424 [Influence of crystallographic orientations on the properties of plates of Al–Li alloys V-1461 and 1424]. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2010. No. 1. P. 100–106.
 17. *Klochkova Yu.Yu., Grushko O.E., Lantsova L.P., Burlyaeva I.P.* Osvoenie v promyshlennom proizvodstve polufabrikatov iz perspektivnogo alyuminiiliteviyogo splava V-1469 [The development in industrial production of semi-finished products from advanced Al–Li alloy V-1469]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2011. No. 1. P. 8–12.
 18. *Mizeraa J., Driviera J.H., Jezierskab 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.
 19. *Choia S.-H., Barlata F.* Prediction of macroscopic anisotropy in rolled aluminum–lithium sheet. *Scripta Mater*. 1999. Vol. 41. No. 9. P. 981–987.
 20. *Fridlyander I.N., Hohlatova L.B., Kolobnev N.I., Rendiks K., Tempus G.* Razvitie termicheski stabil'nogo alyuminievo-liteviyogo splava 1424 dlya primeneniya v svarnom fyuzelyazhe. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2002. No. 1. P. 3–7.
 21. *Milevskaya T.V., Rushits S.V., Tkachenko E.A., Antonov S.M.* Deformatsionnoe povedenie vysokoprochnykh alyuminievykh splavov v usloviyakh goryachei deformatsii [Deformation behavior of high-strength aluminum alloys under conditions of hot deformation]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2015. No. 2 (35). P. 3–9.
 22. *Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Лукина Е.А., Бер Л.Б.* Snizhenie anizotropii v listakh Al–Mg–Li–Zn-splava 1424 [Reduction of anisotropy in Al–Mg–Li–Zn-alloy sheets 1424]. *Tsvet. metallurgy*. 2013. No. 3 (843). P. 78–81.
 23. *Fridlyander I.N., Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I., Alekseev A.A., Lukina E.A., Kolesnikova O.K.* Konstruktsionnyi splav 1424 ponizhennoi plotnosti sistemy Al–Mg–Li–Zr–Sc dlya svarnykh i klepanykh konstruktsii aviakosmicheskoi tekhniki [Constructional alloy 1424 of reduced density of the Al–Mg–Li–Zr–Sc system for welded and riveted structures of aerospace engineering]. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2002. No. 4. P. 20–23.
 24. *Khokhlatova L.B., Lukin V.I., Kolobnev N.I., Ioda E.N., Bazeskin A.V., Lavpenchuk V.P., Koshkin V.V., Mezentseva E.A.* Perspektivnyi alyuminievo-liteviy splav 1424 dlya svarnykh konstruktsii izdelii aviakosmicheskoi tekhniki [Prospective aluminum–lithium alloy 1424 for welded structures of aerospace products]. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2009. No. 3. P. 7–10.
 25. *Erisov Ya.A., Grechnikov F.V., Oglodkov M.S.* Vliyanie rezhimov izgotovleniya listov iz splava v-1461 na kristallografiyu struktury i anizotropiyu svoistv [The influence of the production modes of sheets of the alloy V-1461 on the crystallography of the structure and the anisotropy of the properties]. *Izvestiya vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2015. No. 6. P. 36–42.
 26. *Longzhou M., Jianzhong C., Xiaobo Z.A.* Study on improving the cold-forming property of Al–Mg–Li alloy 01420. *Adv. Perform. Mater*. 1997. Vol. 4. P. 105–114.
 27. *Kursikov Yu.A., Moskvichev G.G., Grushko O.E., Vinokurov N.D., Smakovskaya A.V.* Issledovanie sklonnosti splava 01420 k obrazovaniyu rassloenii [Study of the propensity of the alloy 01420 to form bundles]. In: *Alyuminievye splavy i spetsial'nye materialy: Trudy VIAM*. 1977. No. 10. P. 13–15.
 28. *Fridlyander N.I., Shamrai V.F., Shiryayeva N.V.* Fazovyi sostav i mekhanicheskie svoistva splavov alyuminiya s magniym i litiym [Phase composition and mechanical properties of aluminum alloys with magnesium and lithium]. *Izv. AN SSSR. Metallurgy*. 1965. No. 2. P. 153–156.
 29. *Fedorova A.V., Moskvichev G.G., Kondrasheva L.N.* Prichiny nizkoi tekhnologichnosti splava 01420 pri prokatke i puti ikh ustraneniya [The reasons for the low processability of the 01420 alloy during rolling and the way to eliminate them]. *Alyuminievye splavy i spetsial'nye materialy: Trudy VIAM*. 1977. No. 10. P. 16–18.
 30. *Grechnikov F.V., Erisov Ya.A.* Virtual material model with the given crystallographic orientation of the structure. *Key Eng. Mater*. 2016. Vol. 684. P. 134–142.
 31. *Erisov Ya.A., Grechnikov F.V., Surudin S.V.* Yield function of the orthotropic material considering the crystallographic texture. *Struct. Eng. Mech*. 2016. Vol. 58. Iss. 4. P. 677–687.