

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИСТОВ ИЗ СПЛАВА В-1461 НА КРИСТАЛЛОГРАФИЮ СТРУКТУРЫ И АНИЗОТРОПИЮ СВОЙСТВ

© 2015 г. Я.А. Ерисов, Ф.В. Гречников, М.С. Оглодков

Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ)
им. акад. С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

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

Статья поступила в редакцию 10.06.15 г., доработана 26.08.15 г., подписана в печать 31.08.15 г.

Приведены результаты исследования влияния режимов изготовления листов толщиной 1,5, 2,0 и 3,0 мм из Al–Li-сплава В-1461 на микроструктуру, кристаллографическую ориентацию и анизотропию свойств. Установлено, что для всех изученных образцов характерна деформированная структура, при этом листы толщиной 3,0 мм имеют частично рекристаллизованную структуру, толщиной 2,0 мм – нерекристаллизованную, а толщиной 1,5 мм – в основном рекристаллизованную. Преимущественной кристаллографической ориентировкой образцов толщиной 1,5 мм является [110](200), 2,0 мм – 110 и 3,0 мм – [210](110). Все листы независимо от толщины обладают незначительной анизотропией свойств, при этом для них характерны крайне низкие значения показателя анизотропии ($\mu < 0,4$). Это и определяет склонность алюминий-литиевых сплавов к преимущественному развитию деформации по толщине листа, приводящей к преждевременному его утонению и снижению допустимого формоизменения при вытяжке и обтяжке.

Ключевые слова: прокатка, термическая обработка, алюминий-литиевый сплав, В-1461, кристаллографическая ориентация, механические свойства, анизотропия, микроструктура.

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

Гречников Ф.В. – чл.-кор. РАН, докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой обработки металлов давлением СГАУ.
Тел.: (846) 337-53-81. Факс: (846) 337-82-79. E-mail: gretch@ssau.ru.

Оглодков М.С. – канд. техн. наук, стар. науч. сотр. НИЛ-37 СГАУ; ст. науч. сотр. ФГУП «ВИАМ» (105005, г. Москва, ул. Радио, 17). E-mail: ogmih83@mail.ru.

Для цитирования: 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.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-6-36-42.

Erisov Ya.A., Grechnivov F.V., Ogloodkov M.S.

The influence of fabrication modes of sheets of V-1461 alloy on the structure crystallography and anisotropy of properties

The results of studying the influence of manufacturing modes of sheets 1,5, 2,0 and 3,0 mm thick made of V-1461 Al–Li alloy on the microstructure, crystallographic orientation, and anisotropy of properties are presented. It is established that the deformed structure is characteristic of all studied samples, and sheets 3,0 mm thick have partially recrystallized structure, those 2,0 mm thick have unrecrystallized structure, and those 1,5 mm thick have mainly recrystallized structure. The preferential crystallographic orientation of the samples 1,5 mm thick is [110](200), that of samples 2,0 mm thick is 110, and that of 3,0 mm thick is [210](110). All the sheets possess insignificant anisotropy of properties irrespective of thickness, and extremely low anisotropy index ($\mu < 0,4$) is characteristic of them. These facts determine the liability of aluminum–lithium alloys to the preferential development of deformation over the sheet thickness, which leads to its premature thinning and lowers admissible forming in the course of drawing and stretching.

Keywords: rolling, thermal treatment, aluminum–lithium alloy, V-1461, crystallographic orientation, mechanical properties, anisotropy, microstructure.

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

Grechnikov F.V. – Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of the RAS, Head of Metal Forming Department of SSAU.
E-mail: gretch@ssau.ru.

Ogloodkov M.S. – Senior Researcher of NIL-37 of SSAU, Senior Researcher of All-Russia Institute of Aviation Materials (105005, Russia, Moscow, Radio str., 17). E-mail: ogmih83@mail.ru.

Citation: 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.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-6-36-42.

Введение

Одной из приоритетных задач развития аэрокосмической отрасли является снижение веса конструкций летательных аппаратов и ракетно-космической техники. Поэтому создание новых материалов с пониженной плотностью, повышенными жесткостью и прочностью, а также с высокими ресурсными характеристиками при возможности изготовления из них широкой номенклатуры изделий является весьма актуальной задачей. С этой точки зрения представляют интерес алюминиевые сплавы, легированные литием, которые по сравнению с широко используемыми в аэрокосмической технике марками Д16, АК4-1, В95 и АМгб имеют пониженную на 7–13 % плотность при более высоких показателях модуля упругости, пределов прочности и текучести при комнатной и повышенной температурах (до 150 °С), а также сопротивления малоциклового усталости и коррозионной стойкости [1–4].

Однако широкое применение Al–Li-сплавов в конструкции летательных аппаратов сдерживается из-за их низкой технологичности при изготовлении полуфабрикатов, которая является следствием текстурообразования при прокатке, и возникновения значительной анизотропии свойств, обуславливающей повышенный расход металла, ограничение предельно допустимой деформации, искажение размеров деталей и т.д. [5, 6].

Исследования показывают, что основной причиной формирования в листах из алюминиевых сплавов неблагоприятной кристаллографической ориентации структуры являются, как правило, нерациональные термомеханические режимы прокатки [6–8]. Так, в горячекатаных плитах из сплава В-1461 в большинстве случаев формируется волокнистая, неоднородная по толщине структура, а в холоднокатаных листах — преимущественно нерекристаллизованная [9]. 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 свойств. Например, в работах отечественных и зарубежных авторов оп-

ределенное внимание уделяется созданию технологии изготовления и термической обработки плит и листов из Al–Li-сплавов с целью ослабления текстуры [10–12].

Альтернативным подходом к решению указанной задачи является не ослабление текстуры на стадии производства полуфабрикатов, а, наоборот, создание в листах эффективной кристаллографической ориентации структуры, обеспечивающей интенсификацию процессов формообразования заготовок и повышение эксплуатационных характеристик изделий [6, 13]. В частности, создание рациональной кристаллографии структуры может изменить соотношение между деформациями в пользу той, увеличение которой приведет к повышению предельных возможностей листов в процессах вытяжки, гибки и обтяжки [6].

Однако развитие данного направления сдерживается из-за отсутствия исследований по управлению формированием кристаллографической ориентации структуры при прокатке Al–Li-сплавов. В связи с этим в настоящей статье рассматриваются результаты анализа текстурного и структурного состояний, а также анизотропии механических свойств листов из алюминий-литиевого сплава В-1461, изготовленных в различных термомеханических условиях.

Методика исследований

Исследования проводили на листах из сплава В-1461, полученных по следующим термомеханическим режимам (химический состав изучаемых образцов приведен в табл. 1).

1. Лист толщиной $h = 3,0$ мм с технологической плакировкой. После гомогенизации ($t = 525\div 550$ °С) слиток сечением 225×950 мм прокатывали при температуре 440–460 °С до толщины 6,5 мм, затем горячекатаную полосу разрезали на «карточки». После предварительного отжига ($t = 435\div 450$ °С, $\tau = 1$ ч) карточки прокатывали в холодную до $h = 3,0$ мм без промежуточного отжига.

2. Лист толщиной 2,0 мм без плакировки. После гомогенизации (520–535 °С) слиток сечением 300×1100 мм прокатывали при $t = 440\div 460$ °С до толщины 6,5 мм сомоткой в рулон. После предварительного отжига (435–450 °С, 1 ч) рулон прокатывали в холодную до толщины 4,0 мм, проводили промежуточный отжиг (435–450 °С, 1 ч) и докатывали до $h = 2,0$ мм.

3. Лист толщиной 1,5 мм с технологической плакировкой. После двухступенчатой гомогенизации

Таблица 1
Химический состав исследуемых образцов из сплава В-1461

№ обр.	Содержание химических элементов, мас. %														
	Cu	Li	Mg	Zn	Zr	Sc	Si	Fe	Mn	Ti	Ni	Be	Na	Ce	Al
1	2,8	1,8	0,50	0,50	0,08	0,09	0,02	0,10	0,30	0,019	0,08	0,016	0,0011	0,028	Ост.
2	2,9	1,7	0,60	0,51	0,08	0,08	0,04	0,07	0,30	—	0,07	0,012	0,0009	0,028	Ост.
3	2,7	1,7	0,38	0,63	0,08	0,07	0,02	0,06	0,24	—	0,05	0,005	0,0010	0,030	Ост.

(на первой — температура была на 70–100 °С ниже температуры неравновесного солидуса, а на второй — на 20–30 °С ее выше) слиток сечением 300××1100 мм прокатывали в горячую в 2 этапа (с повышением температуры прокатки на 40–60 °С по достижении промежуточной толщины) до $h = 6,5$ мм со смоткой в рулон. После предварительного отжига (435–450 °С, 1 ч) рулон прокатывали в холодную до толщины 4,0 мм, проводили промежуточный отжиг (435–450 °С, 1 ч) и докатывали до $h = 1,5$ мм.

После холодной прокатки все листы (независимо от режима) подвергались окончательной термической обработке — закалке с охлаждением в воду. Нагрев до 530–533 °С производился в селитровой ванне.

Для анализа микроструктуры из полученных листов ($h = 1,5, 2,0$ и $3,0$ мм) изготавливались шлифы поперечного к направлению прокатки (НП) сечения образцов, которые подвергались последующему травлению в хлорном железе. Исследование проводилось на инвертированном оптическом микроскопе с программно-аппаратным комплексом Leica Q550MW («Leica Microsystems GmbH», Германия).

Текстурные измерения в виде построения полюсных фигур осуществлялись на закаленных образцах, вырезанных из листов, в срединных плоскостях по толщине листа. Плоскость съемки полюсных фигур была параллельна плоскости прокатки. Текстура в виде неполной полюсной фигуры (200) была исследована методом «на отражение» с использованием рентгеновского дифрактометра D/MAX-2500 («Rigaku», Япония) в CoK_α -излучении. Измеряли по одному образцу каждой толщины.

Для изучения анизотропии механических свойств образцы вырезались в 3 направлениях под углами $\alpha = 0, 45$ и 90° к НП (по 3 образца на каждое направление) согласно методике, изложенной в [6]. Размеры образцов выбирались по ГОСТ 11701-84 и ГОСТ 1497-84 [14, 15] в зависимости от толщины

листа. Испытания проводились на электромеханической испытательной машине LFMZ-250 («Walter + Bai AG», Швейцария); скорость растяжения составляла 1 мм/мин.

Для оценки анизотропии использовался коэффициент поперечной деформации (μ), представляющий собой отношение логарифмической деформации по ширине (e_b) к деформации по длине (e_l) образца [6]:

$$\mu = -e_b/e_l.$$

При этом значения показателя μ изменяются от 0 до 1. При равенстве приращений деформаций по ширине и толщине металл изотропен ($\mu = 0,5$). Определение поперечных деформаций для вычисления показателей анизотропии осуществлялось при помощи специальных экстензометров.

Результаты и их обсуждение

Как видно из приведенных на рис. 1 микроструктур, для листов всех 3 рассматриваемых толщин (1,5, 2,0 и 3,0 мм) характерна деформированная структура: наблюдаются вытянутые вдоль НП зерна (увеличение $200\times$), видны полосы скольжения внутри отдельных зерен ($500\times$). При этом листы с $h = 3,0$ мм имеют частично рекристаллизованную структуру, с $h = 2,0$ мм — нерекристаллизованную, а с $h = 1,5$ мм — преимущественно рекристаллизованную.

Отсутствие рекристаллизации в образце толщиной 2 мм объясняется особенностями технологии прокатки. В данном случае степень деформации при холодной прокатке листов наименьшая по сравнению с другими образцами, поэтому и рекристаллизация в них практически не протекает.

На дифрактограммах (рис. 2) всех 3 образцов наблюдается «фон», что свидетельствует о высокой плотности дислокаций. При этом лист толщиной 2,0 мм обладает более высокой плотностью по сравнению с остальными.

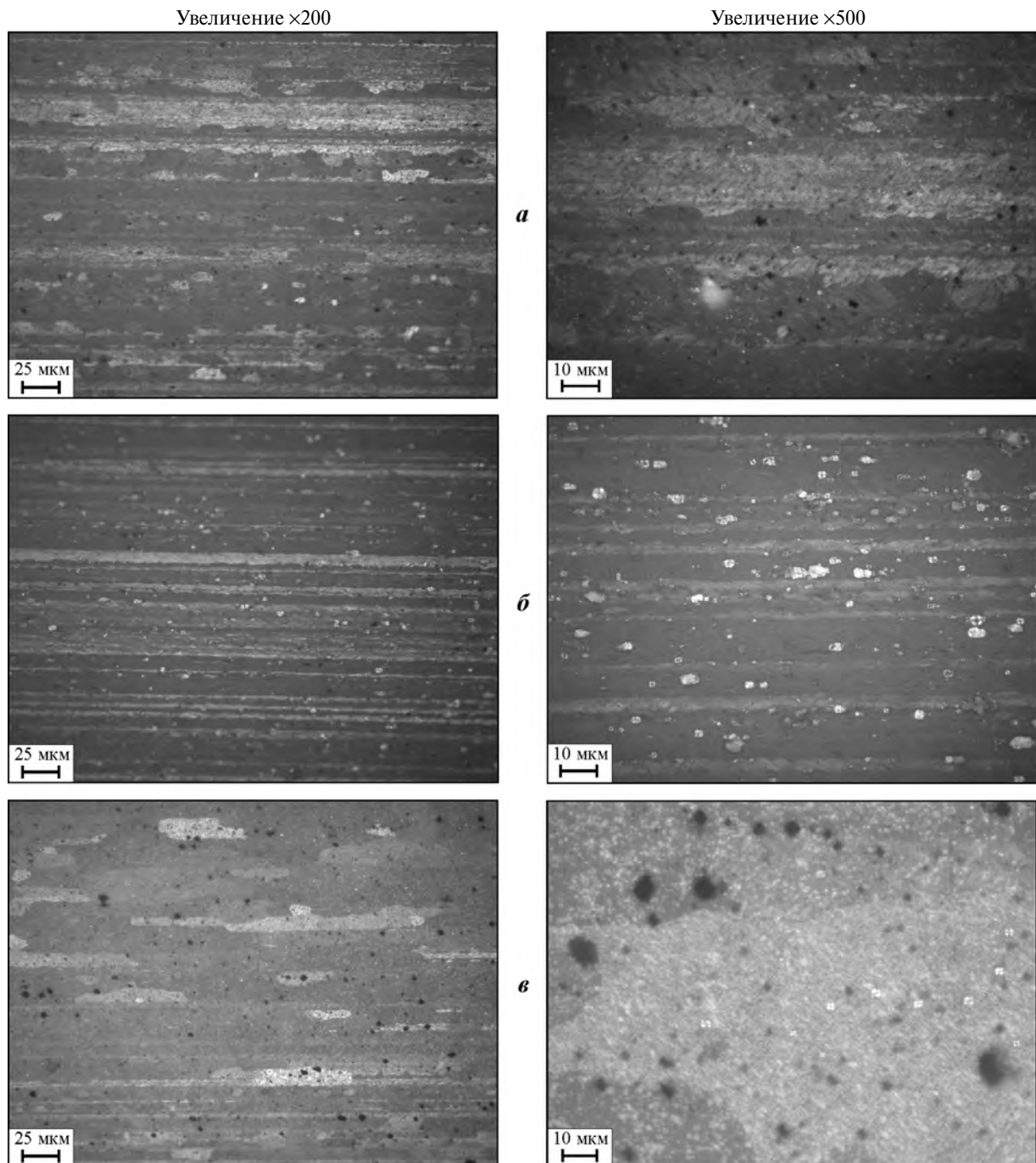


Рис. 1. Микроструктуры листов из В-1461 толщиной 3,0 (а), 2,0 (б) и 1,5 мм (в)

Пики на прямых полюсных фигурах (рис. 3) образцов толщиной 1,5 и 3,0 мм свидетельствуют о наличии рекристаллизованных зерен, которые в образце с $h = 2,0$ мм отсутствуют. По полюсным фигурам были определены преимущественные кристаллографические ориентировки.

Ввиду размытости полюсной фигуры листа с $h = 1,5$ мм по ней сложно сделать вывод о текстуре

листа, но из дифрактограммы следует, что плоскость прокатки совпадает с кристаллографической плоскостью (200), а направление прокатки — с [110], т.е. в данном образце преобладает ориентировка [110](200).

В листе с $h = 2,0$ мм плоскость прокатки близка к кристаллографической плоскости (110), а направление — к [110], т.е. преобладает ориентировка

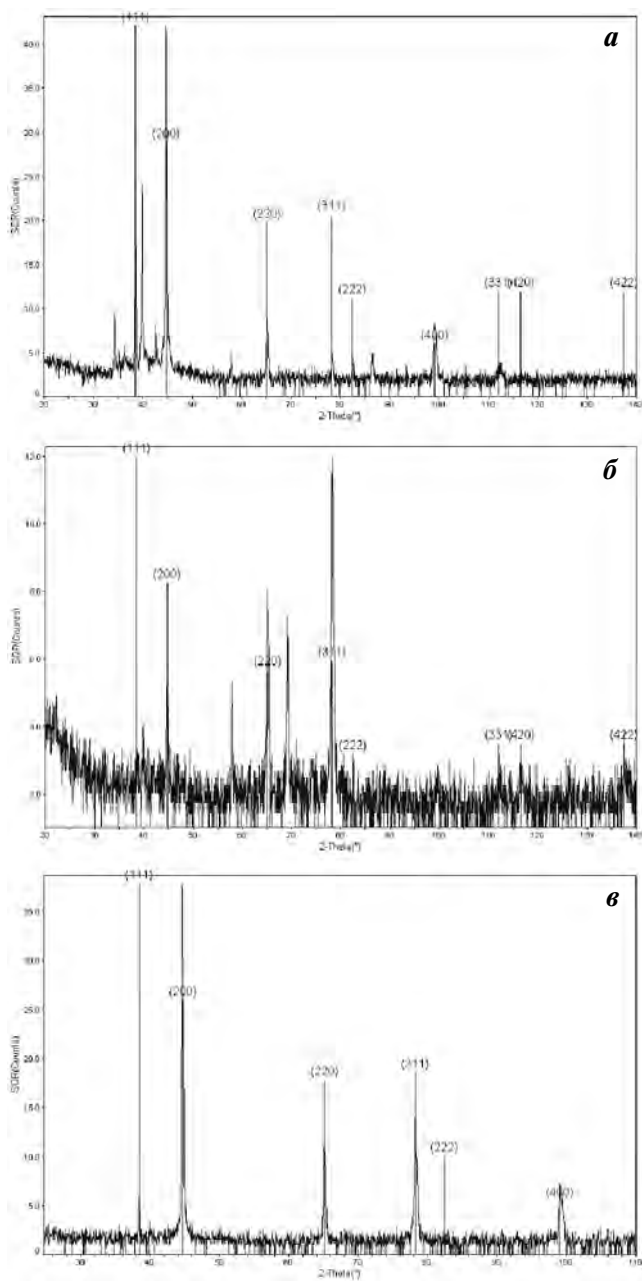


Рис. 2. Дифрактограммы листов из сплава В-1461 толщиной 3,0 (а), 2,0 (б) и 1,5 мм (в)

110. В образце с $h = 3,0$ мм плоскость прокатки также совпадает с кристаллографической плоскостью (110), а направление — с [210], т.е. преобладает ориентировка [210](110).

При испытании на растяжение определялись временное сопротивление (σ_B), предел текучести ($\sigma_{0,2}$) и показатель анизотропии (μ). Как видно из приведенных в табл. 2 результатов, закаленные листы из Al—Li-сплава В-1461 обладают незначительной анизотропией свойств. Однако малые значения $\mu < 0,4$

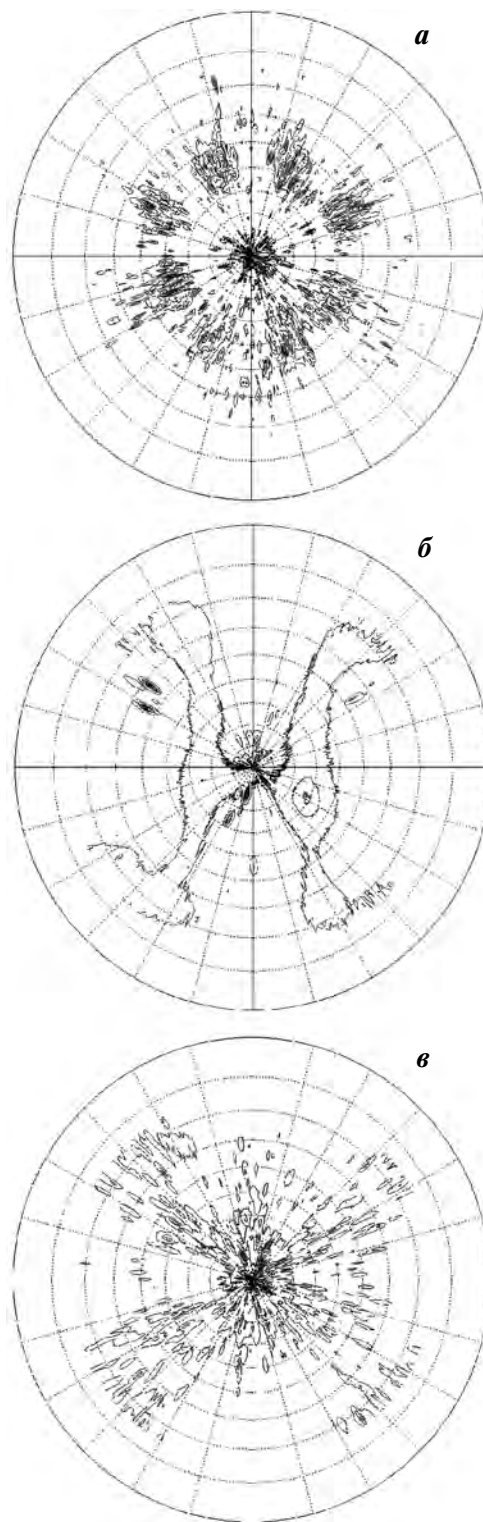


Рис. 3. Прямые полюсные фигуры (200) листов из сплава В-1461 толщиной 3,0 (а), 2,0 (б) и 1,5 мм (в)

свидетельствуют о крайне низких деформационных возможностях проката (невысокая степень вытяжки, отбортовки и т.д.).

Таблица 2
Анизотропия механических свойств листов
из сплава В-1461

<i>h</i> , мм	α , град	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	μ
3,0	0	514,58	552,32	0,38
	45	443,19	511,89	0,35
	90	483,87	537,63	0,34
2,0	0	497,99	547,92	0,33
	45	410,11	467,67	0,37
1,5	0	469,62	499,98	0,36
	45	429,02	491,48	0,36
	90	461,59	518,48	0,35

Заключение

Как показали проведенные исследования, в листах из Al—Li-сплава В-1461 преобладают кристаллографические ориентировки с низкими значениями показателя анизотропии ($\mu < 0,4$). Это обстоятельство в конечном итоге и определяет склонность данных материалов к преимущественному развитию деформации по толщине листа, приводящей к преждевременному его утонению и снижению допустимого формоизменения при вытяжке и обтяжке.

Литература

1. Фридляндер И.Н., 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.
2. Starke E.A., Staley J.T. Application of modern aluminum alloys to aircraft // Progress Aerospace Sci. 1996. Vol. 32. P. 131—172.
3. Wanhill R.J.H. Status and prospects for aluminium-lithium alloys in aircraft structures // Int. J. Fatigue. 1994. Vol. 16(1). P. 3—20.
4. Гуреева М.А., Грушко О.Е., Овчинников В.В. Свариваемые алюминиевые сплавы в конструкциях транспортных средств // Заготовительные пр-ва в машиностроении. 2009. No. 3. С. 11—21.
5. Mizeraa J., Drivera 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.
6. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных ма-

териалов (Резервы интенсификации). М.: Машиностроение, 1998.

7. Choia S.-H., Barlat F. Prediction of macroscopic anisotropy in rolled aluminum-lithium sheet // Scripta Mater. 1999. Vol. 41. No. 9. P. 981—987.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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 // Технол. легких сплавов. 2010. No. 1. С. 100—106.
12. Клочкова Ю.Ю., Грушко О.Е., Ланцова Л.П., Буряева И.П., Овсянников Б.В. Освоение в промышленном производстве полуфабрикатов из перспективного алюминий-литиевого сплава В-1469 // Авиационные материалы и технологии. 2011. No. 1. С. 8—12.
13. Dittenber D.B., GangaRao 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.
14. ГОСТ 11701-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент. М.: Изд-во стандартов, 1991.
15. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Изд-во стандартов, 1997.

References

1. Fridlyander I.N., Shamrai V.F., Shiryayeva N.V. Fazoviy sostav i mekhanicheskie svoistva splavov alyuminiya s magniemi i litiem [The phase composition and mechanical properties of aluminum alloys with magnesium and lithium]. Izv. AN SSSR. Metalli. 1965. No. 2. P. 153—156.
2. Starke E.A., Staley J.T. Application of modern aluminum alloys to aircraft. Progress Aerospace Sci. 1996. Vol. 32. P. 131—172.
3. Wanhill R.J.H. Status and prospects for aluminium-lithium alloys in aircraft structures. Int. J. Fatigue. 1994. Vol. 16(1). P. 3—20.
4. Gureeva M.A., Grushko O.E., Ovchinnikov V.V. Svarivayemiy alyuminievyye splavi v konstrukciyah transportnih

- sredstv [Welding aluminum alloys in transport design]. *Zagotovitelnie proizvodstva v mashinostroenii*. 2009. No. 3. P. 11—21.
5. Mizeraa J., Drivera 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.
 6. Grechnikov F.V. Deformirovanie anizotropnykh materialov: Rezervy intensivifikatsii [Deformation of Anisotropic Materials: Intensification Reserves]. Moscow: Mashinostroenie, 1998.
 7. Choia S.-H., Barlat F. Prediction of macroscopic anisotropy in rolled aluminum-lithium sheet. *Scripta Mater.* 1999. Vol. 41. No. 9. P. 981—987.
 8. 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.
 9. Oglodkov M.S., Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I. Vliyanie termomekhanicheskoi obrabotki na svoistva i strukturu splava sistemi Al—Cu—Mg—Li—Zn [The influence of thermo-mechanical treatment on properties and structure of Al—Cu—Mg—Li—Zn alloy]. *Aviatsionnie materialy i tekhnologii*. 2010. No. 4. P. 7—11.
 10. 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.
 11. Setykov O.A., Kolobnev N.I., Khokhlatova L.B., Oglodkov M.S. Vliyanie kristallograficheskikh orientirovok na svoistva plit iz Al—Li splavov [The influence of the crystallographic orientations on the properties of plates from Al-Li alloys]. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2010. No. 1. P. 100—106.
 12. Klochkova Yu.Yu., Grushko O.E., Lantsova L.P., Burlyaeva I.P., Ovsyannikov B.V. Osvoenie v promyshlennom proizvodstve polufabrikatov iz perspektivnogo alyuminii-litievogo splava V-1469 [The assimilation for industrial production of semi-finished products from advanced aluminum-lithium alloy V-1469]. *Aviatsionnie materialy i tekhnologii*. 2011. No. 1. P. 8—12.
 13. Dittenber D.B., GangaRao 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.
 14. GOST 11701-84. Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie tonkikh listov i lent [Metals. Test Methods on Tension of Thin Sheets and Strips]. Moscow: Izd-vo standartov, 1991.
 15. GOST 1497-84. Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie [Metals. Test Methods on Tension]. Moscow: Izdatelstvo standartov, 1997.