

Научная статья
УДК 620.182
DOI: 10.34759/vst-2022-3-253-259

ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦА СПЛАВА АД0 В ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ ОТ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ

Сергей Васильевич Воронин¹, Константин Константинович Чаплыгин² ✉

^{1,2}Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва
(Самарский университет),
Самара, Россия
¹voronin@ssau.ru
²chapkostya96@mail.ru ✉

Аннотация. Рассмотрена зависимость изменения интерференционной картины на поверхности образца алюминиевого сплава АД0 от степени деформации. Изготовлен образец с уменьшающейся, вдоль оси растяжения, площадью поперечного сечения для нагружения его частей на различную степень деформации. Произведено растяжение образца до достижения усилия предела текучести в наименьшем по площади сечении образца. Рассчитаны локальные степени деформации участков образца, и установлена зависимость изменения интерференционной картины микроструктуры поверхности образца от величины степени деформации.

Ключевые слова: анизотропия механических свойств, цветное пленочное травление, поляризационная микроскопия, определение кристаллографической ориентации

Для цитирования: Воронин С.В., Чаплыгин К.К. Зависимость интерференционной картины микроструктуры поверхности образца сплава АД0 в поляризованном свете от степени деформации // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 3. С. 253-259. DOI: 10.34759/vst-2022-3-253-259

Original article

INTERFERENCE PATTERN DEPENDENCE ON THE DEFORMATION DEGREE OF THE AD0 ALLOY SAMPLE SURFACE MICROSTRUCTURE IN POLARIZED LIGHT

Sergei V. Voronin¹, Konstantin K. Chaplygin² ✉

^{1,2}Samara National Research University named after academician S.P. Korolev (Samara University),
Samara, 443086, Russia
¹voronin@ssau.ru
²chapkostya96@mail.ru ✉

© Воронин С.В., Чаплыгин К.К., 2022

Abstract

Based on the previously developed technique for determining the crystallographic orientation in polarized light, the authors propose evaluating the change in the interference pattern after the sample loading. For this purpose, a sample with decreasing cross-sectional area along the tension axis was fabricated, for loading its parts on various degree of deformation. The sample was being stretched until the yield stress was reached in the smallest section of the sample. After stretching, the local degrees of deformation of the sample sections were calculated. Three main sections with deformations of 1.5%, 5.5% and 17.5% were identified.

Metallographic section, subjected to electrolytic etching for the surface observing by the polarizing microscopy, was fabricated from each section. As was established earlier, three basic colors, namely blue, brown and yellow, which volume fractions changed depending of the deformation degree, were being observed on the sample.

The dependence of microstructure interference pattern on the degree of deformation was determined in the course of the studies for the AD0 alloy microstructure. It has been established that with an increase in the degree of deformation, the volume fraction of blue and yellow grains increases. The volume fraction of brown grains decreases, which can be explained by the fact that these grains correspond to the [110] crystallographic direction, which is more amenable to plastic deformation in the FCC lattice.

It should be noted that the volume fraction of blue and yellow grains increases by 25% at a deformation of 5.5%, while that of brown grains decreases by 44%. At the degree of deformation of 17.5%, the volume fraction of brown grains becomes smaller by another 17% compared to the 5.5%, while the volume fraction of blue and yellow grains slightly increases by 4 and 6%, respectively.

The authors propose employing the obtained dependencies to control the anisotropy and degree of deformation in the production of aluminum parts and products, as well as the express method for controlling the crystallographic orientation.

Keywords: anisotropy of mechanical properties, color film etching, polarizing microscopy, crystallographic orientation determining

For citation: Voronin S.V., Chaplygin K.K. Interference Pattern Dependence on the Deformation Degree of the AD0 Alloy Sample Surface Microstructure in Polarized Light. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 253-259. DOI: 10.34759/vst-2022-3-253-259

Введение

К числу основных технологических процессов при изготовлении авиационных деталей относятся процессы обработки металлов давлением (ОМД). При ОМД в металле формируется текстура деформации [1]. Текстурированность, возникающая в металле, оказывает значительное воздействие на анизотропию свойств готовых изделий и заготовок. Это может повлиять на конечные характеристики детали в процессе эксплуатации [2–5], например, такие как различие физико-механических свойств металла в объеме материала [6], разнотолщинность при некоторых процессах ОМД [7–9], электро- и теплопроводность, коррозионная стойкость.

Для определения анизотропии наиболее распространенными являются методы растяжения образцов во взаимно перпендикулярном направлении, осадка и исследование степени бочкообразования вдоль радиальных направлений образца [10, 11]. Однако это методы разрушающего

контроля, они требуют затрат материала на испытания.

Одним из перспективных методов контроля степени анизотропии является микроструктурный анализ текстурированности материала в процессе его формовки [12–14]. Текстура металла – это преимущественная ориентация зерен кристаллических решеток в поликристалле [15]. Исследования влияния кристаллографической ориентации на физико-механические свойства металлов [16, 17] и определение зависимости механических свойств металлов и сплавов от анизотропии при деформации [18] являются востребованными при создании авиационных деталей для самолетов нового поколения. Несмотря на широкое применение композиционных материалов в конструкции самолета, на текущий момент одним из самых распространенных авиационных материалов остается алюминий.

Перспективным методом определения кристаллографической ориентации можно считать определение механических свойств с помощью поляризационной микроскопии [19]. При осуществлении данного метода подготовленная поверхность материала исследуется посредством металлографического микроскопа с применением поляризационного света. В поляризованном свете на поверхности металла наблюдается интерференционная картина. Это происходит из-за эффекта двойного лучепреломления падающего света, одновременно отражающегося от оксидной пленки и частично проходящего через нее и отражающегося от поверхности самого металла, из-за чего свет на выходе приобретает различную длину волны [20]. Длина волны отраженного света, а соответственно, и цвета на поверхности зерен зависит от их кристаллографической ориентации, которая, в свою очередь, влияет на анизотропию механических свойств металла по разным направлениям. Однако ранее данная зависимость определялась только на отожженном материале, т.е. без напряжений, возникающих из-за деформации. Поэтому целью данной работы являлась апробация методики определения кристаллографической ориентации зерен в поляризованном свете для оценки текстурованности, возникающей при различных степенях деформации.

Материалы и методы

Для определения механических свойств были изготовлены стандартные образцы на растяжение по ГОСТ 1497 «МЕТАЛЛЫ. Методы испытания на растяжение» [21] из алюминиевого сплава АД0, выбранного с целью исключения влияния различных фаз и примесей, поскольку сплав является технически чистым.

После изготовления образцы были подвергнуты отжигу в муфельной электрической печи ЭКПС-10 при температуре 380°C в течение

25 мин [22] для снятия нагартовки, которая могла повлиять на результаты испытаний. Испытания на растяжение производились на разрывной машине ИР 5113-100. Начальные размеры образцов представлены в табл. 1.

По результатам испытаний были получены диаграммы растяжения образцов, с помощью которых рассчитаны значения нагрузок в необходимых точках, по которым в дальнейшем можно рассчитать нагрузки временного сопротивления разрыву и предела текучести (табл. 2).

Был изготовлен образец с уменьшающейся площадью поперечного сечения вдоль оси растяжения. В максимальном сечении образец имел ширину 28 мм, в минимальном — 18 мм. Толщина образца постоянная и равная 8 мм. Данные параметры рассчитывались исходя из величин усилий, представленных в табл. 2. Подобная форма образца необходима для того, чтобы при растяжении на образце одновременно были достигнуты: в минимальном сечении — величина усилия временного сопротивления разрыву, в максимальном — усилия предела текучести. Благодаря этому возможно отследить изменение структуры в ходе пластической деформации. После изготовления образец был размечен рисками с интервалом 5 мм. Конечный вид образца представлен на рис. 1.

Расчет локальной степени деформации

С помощью нанесенных при разметке рисок производились расчеты локальных степеней деформаций образца. Значения площади поперечного сечения образца по длине рабочей зоны представлены в табл. 3.

После измерений исходных расстояний между рисками, толщины и ширины образца по всем выбранным сечениям на испытательной машине ИР 5113-100 производилось нагружение образца до достижения ранее экспериментально оп-

Таблица 1

Геометрические размеры образцов на растяжение

Номер образца	Ширина a_0 , мм	Толщина b_0 , мм	Длина рабочей части l_0 , мм	Начальная площадь поперечного сечения F_0 , мм ²
1	27,8	8,1	70	224
2	27,9	8,1	70	225
3	27,7	8,0	70	221

Таблица 2

Механические свойства сплава АД0, полученные по результатам испытаний на растяжение

Номер образца	Нагрузка предела текучести, Н	Нагрузка предела временного сопротивления разрыву, Н	Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ_5 , %
1	5434	13310	59	24	50,0
2	6461	14940	66	29	50,0
3	7370	14660	68	33	47
Среднее значение	6422	14403	64	29	49

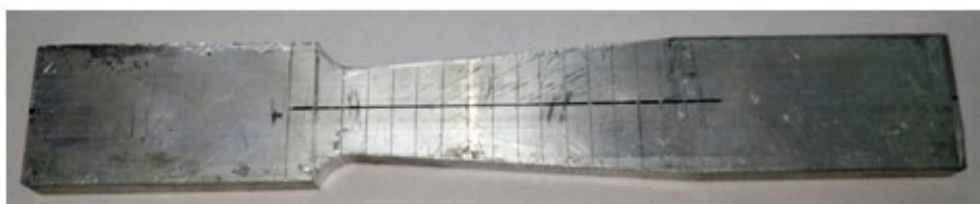


Рис. 1. Образец с переменной площадью поперечного сечения по длине после нанесения необходимой разметки и маркировки

Таблица 3

Значения площади поперечного сечения образца

Расстояние от края рабочей зоны, мм	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Площадь сечения S , мм ²	226,6	226,7	144,3	141,0	148,2	153,2	159,9	166,0	172,4
Расстояние от края рабочей зоны, мм	45	50	55	60	65	70	75	80	85
Площадь сечения S , мм ²	178,9	184,5	192,3	197,7	205,7	210,6	219,9	224,6	225,8

ределенной нагрузки предела текучести образца для большего сечения, приблизительно равной 6400 Н. После нагружения измерялось локально относительное удлинение на каждом выбранном участке. Данные измерений представлены на рис. 2 в соответствии с площадью поперечного сечения.

Анализ микроструктуры поверхности участков образца в поляризованном свете

Согласно рис. 2 были выделены усредненные участки образца:

— участок на расстоянии от 0 до 35 мм — со степенью деформации 17,5%;

— участок на расстоянии от 35 до 60 мм — со степенью деформации 5,5 %;

— участок на расстоянии от 60 до 85 мм — со степенью деформации 1,5%.

Образец разрезали на три части и из каждого участка изготовили микрошлиф, который был подвергнут электролитическому травлению, необходимому для получения на поверхности интерференционной картины при дальнейшем исследовании методом поляризационной микроскопии. В качестве электролита для травления был применен раствор 40%-ной плавиковой кислоты, борной кислоты в дистиллированной воде. Микроструктура поверхности шлифов представлена на рис. 3. Из рисунка видно, что с увеличением степени деформации зерна становятся более вытянутыми по направлению деформации.

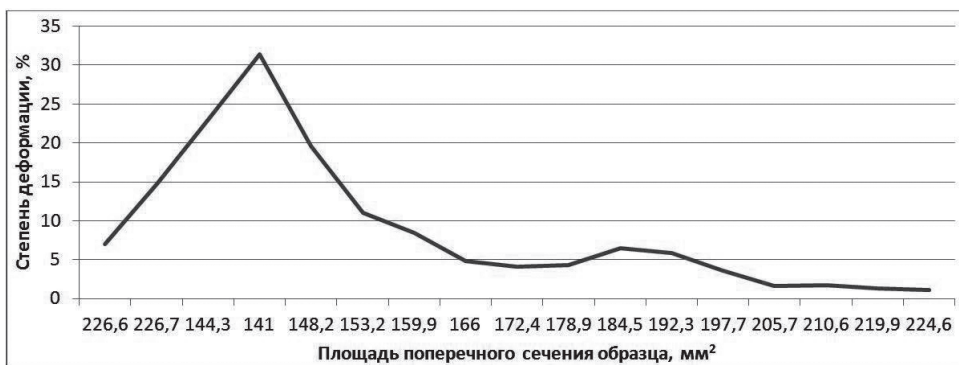


Рис. 2. График распределения относительного удлинения по длине образца

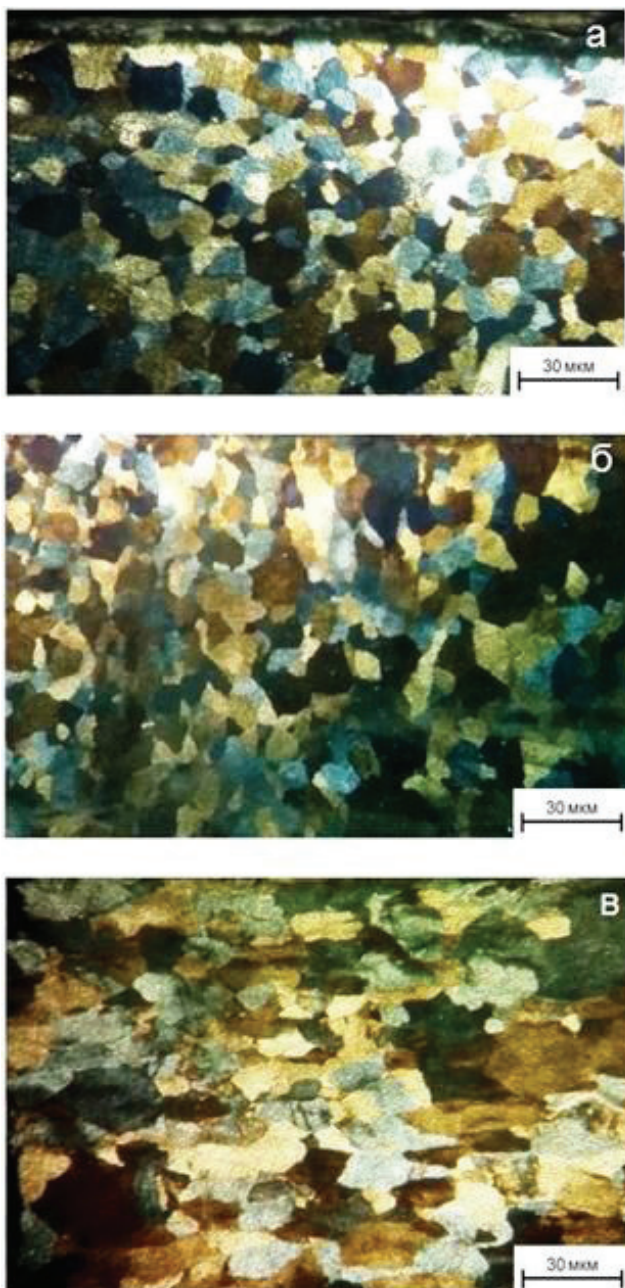


Рис. 3. Микроструктура края поверхности образцов в поляризованном свете: а – при степени деформации 1,5%; б – при степени деформации 5,5%; в – при степени деформации 17,5%

Также был проведен количественный анализ объемной доли зерен различного цвета в соответствии с ранее разработанной методикой определения механических свойств отдельных зерен [19].

Результаты

Результат количественного анализа объемной доли зерен различного цвета представлен в табл. 4.

Из таблицы видно, что на участке образца со степенью деформации 5,5% происходит резкое уменьшение объемной доли зерен коричневого цвета и увеличение объемной доли зерен синего и желтого цвета.

Этот эффект можно объяснить тем, что коричневые зерна условно соответствуют кристаллографическому направлению [110], вдоль которого пластическая деформация в данном материале проходит легче. Поэтому с увеличением степени деформации зерна данного направления пропадают из поля зрения наблюдающего в микроскоп.

Таблица 4

Объемная доля зерен определенного цвета в соответствии со степенью деформации

Деформация образца	1,5%	5,5%	17,5%
Объемная доля синих зерен, %	39,4	49,5	51,5
Объемная доля коричневых зерен, %	37,0	20,7	17,2
Объемная доля желтых зерен, %	23,6	29,7	31,5

Выводы

Определена зависимость изменения интерференционной картины микроструктуры сплава АД0 от степени деформации. Установлено, что с повышением степени деформации объемная доля зерен синего и желтого цвета увеличивается, а

коричневого цвета — уменьшается. Это можно объяснить тем, что данные зерна соответствуют кристаллографическому направлению [110], более податливого для пластической деформации в ГЦК решетке.

Следует отметить, что при деформации 5,5% объемная доля синих и желтых зерен увеличивается на 25%, а коричневых уменьшается на 44%. При степени деформации 17,5%, в сравнении с 5,5%, объемная доля коричневых зерен становится меньше еще на 17%, объемная доля синих и желтых увеличивается незначительно — на 4 и 6% соответственно.

Список источников

1. Барышников М.П., Чукин М.В., Бойко А.Б. Исследование влияния неоднородности структуры на напряженно-деформированное состояние в процессах обработки давлением // Вестник ПНИПУ. 2015. Т. 17. № 1. С. 14-20.
2. Третьяков А.Ф. Исследование механических и технологических свойств листовых пористых сетчатых материалов из стали 12Х18Н10Т // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. № 6(54). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-6-1498
3. Данилов С.В., Резник П.Л., Лобанов М.Л. и др. Влияние горячей прокатки на анизотропию механических свойств алюминиевого сплава 6061 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2017. Т. 17. № 1. С. 73-80. DOI: 10.14529/met170109
4. Белокопытов В.И. Прогнозирование анизотропии прочностных свойств изделий из алюминиевых гранул и разработка технологических процессов, приводящих к её снижению // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 4(36). С. 35-37.
5. Попович А.А., Суфияров В.Ш., Борисов Е.В. и др. Анизотропия механических свойств изделий, изготовленных методом селективного лазерного плавления порошковых материалов // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2016. № 3. С. 4-11. DOI: 10.17073/1997-308X-2016-3-4-11
6. Ларина Т.В., Кутенкова Е.Ю., Минин О.В., Минин И.В. Влияние анизотропии свойств на изменение физических и механических свойств поверхности металла // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Т. 5. №1. С. 229-233.
7. Гречников Ф.В., Ерисов Я.А., Тихонова А.А. и др. Влияние анизотропии заготовок на разнотолщинность стенки изделия при вытяжке // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19. № 1-3. С. 581-586.
8. Ковалевич М.В., Гончаров А.В., Гуков Р.Ю. Разнотолщинность цилиндрических деталей из титановых сплавов при пневмотермической формовке // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 3. С. 136-142.
9. Галкин В.И., Палтеевич А.Р., Шелест А.Е. Моделирование и оценка причин возникновения дефектов в процессе изотермической штамповки орбренных панелей из алюминиевых сплавов // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 170-178.
10. ГОСТ 11701-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент. — М.: Издательство стандартов, 1993. — 15 с.
11. Гололобова Л.Е., Чупеткина И.В., Чижов И.А. Влияние технологических параметров на бочкообразование при совмещении осадки и обратного выдавливания // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. № 12. С. 163-167.
12. Gregson P.J., Flower H.M. Microstructural control of toughness in aluminium-lithium alloys // Acta Metallurgica. 1985. Vol. 33. No. 3, pp. 527-537. DOI: 10.1016/0001-6160(85)90095-1
13. Dorward R.C. Zirconium vs manganese-chromium for grain structure control in an Al-Cu-Li alloy // Metallurgical Transactions A. 1987. Vol. 18, pp. 1820-1823. DOI: 10.1007/BF02646214
14. Lee E.W., Kalu P.N., Brandao L. et al. The effect of off-axis thermomechanical processing on the mechanical behavior of textured 2095 Al-Li alloy // Materials Science and Engineering. 1999. A265, pp. 100-109.
15. Лившиц Б.Г. Металлография: Учебник для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1990. — 236 с.
16. Аргинбаева Э.Г., Базылева О.А. Исследование структуры и физико-механических свойств интерметаллидных никелевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 4. С. 14-19.
17. Аргинбаева Э.Г., Базылева О.А., Колодочкин В.Г., Хавацкий К.К. Влияние кристаллографической ориентации на структуру и физико-механические свойства интерметаллидного сплава на основе Ni₃Al // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 2(27). С. 3-7.
18. Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Акинина М.В. Сравнительный анализ анизотропии механических свойств и микроструктуры деформированных полуфабрикатов из высокопрочных магниевых сплавов с РЗЭ // Труды ВИАМ. 2018. № 5(65). С. 24-32.
19. Воронин С.В., Чаплыгин К.К. Методика определения кристаллографической ориентации зерен алюминиевого сплава АД1 в поляризованном свете // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 1. С. 202-208.
20. Анисович А.Г. Применение поляризованного света в анализе металлов и сплавов // Литье и металлургия. 2012. № 3(66). С. 146-151.
21. ГОСТ 1497 (ИСО 6892-84) Металлы. Методы испытаний на растяжение. — М.: Стандартинформ, 2008. — 24 с.
22. Мельников А.А., Бунова Г.З. Технология термообработки алюминиевых полуфабрикатов: Учебное пособие. — Самара: СамГАУ, 2005. — 128 с.

References

1. Baryshnikov M.P., Chukin M.V., Boiko A.B. *Vestnik PNIPU*, 2015, vol. 17, no. 1, pp. 14-20.
2. Tret'yakov A.F. *Inzhenernyi zhurnal. Nauka i innovatsii*, 2016, no. 6(54). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-6-1498
3. Danilov S.V., Reznik P.L., Lobanov M.L. et al. *Vestnik Yuzhno-ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 73-80. DOI: 10.14529/met170109
4. Belokopytov V.I. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2011, no. 4(36), pp. 35-37.
5. Popovich A.A., Sufiyarov V.Sh., Borisov E.V. et al. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*, 2016, no. 3, pp. 4-11. DOI: 10.17073/1997-308X-2016-3-4-11
6. Larina T.V., Kutenkova E.Yu., Minin O.V., Minin I.V. *Interesno Geo-Sibir'*, 2016, vol. 5, no. 1, pp. 229-233.
7. Grechnikov F.V., Erisov Ya.A., Tikhonova A.A et al. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2017, vol. 19, no. 1-3, pp. 581-586.
8. Kovalevich M.V., Goncharov A.V., Gukov R.Y. Titanium alloys cylindrical components unevenness during pneumo-thermal forming. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no 3, pp. 136-142.
9. Galkin V.I., Paltievich A.R., Shelest A.E. Modeling and evaluation of defects occurrence reasons while isothermal punching of ribbed panels from aluminum alloys. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no 3, pp. 170-178.
10. *Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie tonkikh listov i lent, GOST 11701-84* (Metals. Tensile testing methods of thin sheets and strips, State Standard 11701-84), Moscow, Standarty, 1993, 15 p.
11. Gololobova L.E., Chupetkina I.V., Chizhov I.A. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2019, no. 12, pp. 163-167.
12. Gregson P.J., Flower H.M. Microstructural control of toughness in aluminium-lithium alloys. *Acta Metallurgica*, 1985, vol. 33, no. 3, pp. 527-537. DOI: 10.1016/0001-6160(85)90095-1
13. Dorward R.C. Zirconium vs manganese-chromium for grain structure control in an Al-Cu-Li alloy. *Metallurgical Transactions A*, 1987, vol. 18, pp. 1820-1823. DOI: 10.1007/BF02646214
14. Lee E.W., Kalu P.N., Brandao L. et al. The effect of off-axis thermomechanical processing on the mechanical behavior of textured 2095 Al-Li alloy. *Materials Science and Engineering*, 1999, A265, pp. 100-109.
15. Livshits B.G. *Metallografiya* (Metallography), 3rd ed., Moscow, Metallurgiya, 1990, 236 p.
16. Arginbaeva E.G., Bazyleva O.A. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2013, no. 4, pp. 14-19.
17. Arginbaeva E.G., Bazyleva O.A., Kolodochkin V.G., Khvatskii K.K. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2013, no. 2(27), pp. 3-7.
18. Volkova E.F., Mostyaev I.V., Akinina M.V. *Trudy VIAM*, 2018, no. 5(65), pp. 24-32.
19. Voronin S.V., Chaplygin K.K. A technique for determining aluminum alloy grains crystallographic orientation in polarized light. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 202-208.
20. Anisovich A.G. *Lit'e i metallurgiya*, 2012, no. 3(66), pp. 146-151.
21. *Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie. GOST 1497* (Metals. Methods of tension test, State Standard 1497), Moscow, Standarty, 2008, 24 p.
22. Mel'nikov A.A., Bunova G.Z. *Tekhnologiya termoobrabotki alyuminievykh polufabrikatov* (Technology of aluminum semi-finished products heat treatment), Samara, SamGAU, 2005, 128 p.

Статья поступила в редакцию 17.05.2022; одобрена после рецензирования 27.05.2022; принята к публикации 30.05.2022.

The article was submitted on 17.05.2022; approved after reviewing on 27.05.2022; accepted for publication on 30.05.2022.

Редакторы *М.С. Винниченко, Е.Л. Мочина*
Компьютерная верстка *О.Г. Лавровой*

Сдано в набор 13.07.2022. Подписано в печать 23.09.2022.
Бумага писчая. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 30,22. Уч.-изд. л. 32,50. Тираж 105 экз. Заказ 229/1086.
Цена договорная.

Издательство МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993
Типография Издательства МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993