УДК 669.2/.8.018.58

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В. В. Шляров, Д. В. Загуляев, К. В. Аксенова

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Улучшение физических параметров и специальных свойств поверхностей материалов приобретает все большее значение в связи с многоплановыми научно-исследовательскими проблемами, связанными с внедрением высоких технологий в производственные процессы. Для анализа ресурса работы конструкций, механизмов, работающих в условиях механических нагрузок, необходимо изучение поведения металлов в условиях внешних энергетических воздействий. Изучено влияние слабых (до 0,5 Тл) магнитных полей на деформационные характеристики алюминия для возможности пластификации материала. Воздействие постоянными магнитными полями приводит к обратимому снижению микротвердости алюминия. Определено пороговое значение индукции постоянного магнитного поля (B = 0,1 Тл), выше которого возможен эффект влияния постоянного магнитного поля на микротвердость алюминия. Дальнейшее повышение индукции магнитного поля приводит к линейному возрастанию эффекта. При исследовании скорости ползучести технически чистого алюминия была выявлена зависимость скорости ползучести алюминия (на установившейся и ускоренной стадиях) от величины индукции магнитного поля. Наложение магнитного поля значительно изменяет скорость ползучести алюминия. Воздействие индукции магнитного поля приводит к существенному снижению скорости ползучести по сравнению с образцом, разрушенным без воздействия магнитного поля. На установившейся и логарифмической стадиях скорость ползучести уменьшается независимо от индукции магнитного поля. Установлено, что эффект влияния магнитного поля не однозначен: происходит как возрастание скорости ползучести с достижением максимального значения (B = 0,1 Тл), так и ее замедление с достижением минимального (B = 0,5 Тл). Была выявлена зависимость относительного изменения скорости ползучести алюминия от индукции магнитного поля.

Ключевые слова: технически чистый алюминий, ползучесть, микротвердость, парамагнетик, магнитное поле, индукция

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-00118).

Для цитирования: Шляров В.В., Загуляев Д.В., Аксенова К.В. Изменение механических характеристик технически чистого алюминия в условиях воздействия магнитного поля // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 2 (40). С. 10 – 16.

CHANGES IN THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF COMMERCIALLY PURE ALUMINUM UNDER THE CONDITIONS OF MAGNETIC FIELD INFLUENCES

V. V. Shlyarov, D. V. Zagulyaev, K. V. Aksenova

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. At present, the improvement of the physical parameters and special properties of the surfaces of materials is becoming increasingly important due to the multifaceted research problems associated with the introduction of high technologies into production processes. Since most structures and mechanisms operate under mechanical loads that lead to destruction, to analyze their service life, it is necessary to study the behavior of metals under external energy influences. In the work, the influence of weak magnetic fields up to 0.5 T on the deformation characteristics of aluminum for the possibility of plasticizing the material was

studied. It has been established that exposure to constant magnetic fields leads to a reversible decrease in the microhardness of aluminum. The threshold value of the induction of a constant magnetic field (B = 0.1 T) was determined, above which it is possible to observe the effect of the influence of a constant magnetic field on the microhardness of aluminum. A further increase in the magnetic field leads to a linear increase in the effect. In the study of the creep rate of commercially pure aluminum, the dependence of the creep rate of aluminum, at the steady and accelerated stages, on the magnitude of the magnetic field induction was revealed. It has been investigated that the application of a magnetic field significantly changes the creep rate of aluminum. The effect of the induction of the magnetic field leads to a significant decrease in the creep rate compared to the sample that was destroyed without the action of the magnetic field. At the steady and logarithmic stages, the creep rate decreases regardless of the magnetic field induction. It was also found that the effect of the influence of the magnetic field is not unambiguous: there is both an increase in the creep rate, reaching a maximum value at B = 0.1 T, and its slowing down, reaching a minimum at B = 0.5 T. Thus, the dependence of the relative change in the creep rate of aluminum on the value of the magnetic field induction was revealed.

Keywords: commercially pure aluminum, creep, microhardness, paramagnet, magnetic field, induction

Funding: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Project No. 21-79-00118).

For citation: Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V., Aksenova K.V. Changes in the mechanical characteristics of commercially pure aluminum under the conditions of magnetic field influences. *Bulletin of SibSIU*. 2022, no. 2 (40), pp. 10 – 16. (In Russ.).

Введение

Экономические и экологические требования, предъявляемые к промышленным предприятиям, требуют разработки и использования «легких» материалов, обеспечивающих высокую эффективность использования топлива и низкий коэффициент выбросов в окружающую атмосферу. Спрос на «легкие» металлы и сплавы (алюминий) в различных отраслях промышленности постоянно увеличивается [1, 2]. Алюминий активно применяется в автомобильной и аэрокосмической промышленности, в электротехнике, благодаря его хорошей стойкости к деформации ползучести, термической стабильности и отличной электропроводности [3 – 5]. Но, как и любой материал, алюминий и сплавы на его основе имеют ряд недостатков (слабое сопротивление ползучести). Разрушение при ползучести является неизбежной проблемой для электропроводных устройств при длительной эксплуатации, оказывая значительное влияние на применение алюминиевых сплавов.

Обычно выделяют три вида ползучести в зависимости от температуры: *1* – низкотемпературная ползучесть ($T < 0{,}3T_{пл}$); *2* – промежуточная ползучесть ($0{,}3T_{пл} < T < 0{,}6T_{пл}$); *3* – высокотемпературная ползучесть ($T > 0{,}6T_{пл}$) ($T_{пл}$ – температура плавления сплавов) [6, 7]. Основное внимание исследователей приковано к изучению ползучести при высокой температуре. В работе [8] сообщается о ползучести чистого алюминия с добавлением 0,026 % Fe при температуре от 200 до 500 °C. Некоторые исследователи сосредоточили свое внимание на ползучести при промежуточной температуре [9, 10]. Существует несколько путей увеличения эксплуатационных характеристик алюминиевых сплавов, одним из которых является воздействие внешними потоками энергии. В последние десятилетия приоритетное развитие получили такие новые высокоэффективные методы обработки, как лазерное облучение, электронно-пучковая обработка, ионно-плазменное воздействие, обработка электрическими и магнитными полями [11 – 13]. Использование таких методов энергетического воздействия приводит к многократному повышению эксплуатационных свойств (твердости, износостойкости, жаростойкости и др.). В связи со сложностью физических процессов, происходящих в металлах и сплавах при рассматриваемых условиях, возможности этих методов продолжают изучаться. Это обусловливает актуальность проведения новых исследований и их практического применения для повышения функциональных свойств в том или ином конкретном случае.

Поскольку алюминий широко применяют в электротехнике, то целесообразно исследовать влияние электрических и магнитных полей, которые образуются при протекании тока в проводнике, на механические свойства материала. В настоящее время на кафедре естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета (СибГИУ) проведен комплекс исследований и установлено, что незначительное изменение поверхностной энергии материала путем подведения электрического потенциала приводит к существенным изменениям деформационных характеристик и дислокационной субструктуры [14 – 16]. Исследования показали,

что обработка короткими мощными импульсами электрического тока, которая, оказывая влияние на дефектную субструктуру, может изменять распределение внутренних напряжений, фазовый состав, зеренную структуру и, в конечном итоге, существенно снижать сопротивление деформированию. Кроме значительного эффекта прямого токового воздействия на процесс деформирования (при ползучести) изменения деформационных характеристик можно достичь при преобразовании электрического потенциала поверхности, величина которого контролирует ход многих практически важных процессов (коррозия, износ и т.д.). Эффект электрического потенциала на пластическое течение металлов и сплавов изучен в меньшей степени. В работе [15] выявлено ускорение ползучести и снижение долговечности при наложении слабого потенциала (1 В) к изолированному образцу алюминия, подвергаемому испытанию на ползучесть.

В настоящей работе предлагается рассмотреть влияние постоянного магнитного поля на микротвердость и ползучесть на установившейся стадии процесса. Для исследований использовали технически чистый поликристаллический алюминий (до 0,08 % (здесь и далее по массе) Fe; до 0,06 % Si; до 0,02 % Mn; до 0,008 % Ti; до 0,01 % Cu; до 0,02 % Mg; до 0,02 % Zn; 0,03 % Ga; остальное Al).

Методы и принципы исследования

В качестве источника магнитного поля использовали электромагнит. Индукцию регулировали подбором силы тока, протекающего в катушке. Индукцию магнитного поля измеряли миллитесламетром ТПУ (точность до 0,01 мТл). Значение индукции магнитного поля варьировалось в интервале от 0 до 0,5 Тл (при этом сила тока изменялась в пределах 0,18 – 6,20 А).

Измерения микротвердости проводили по методу Виккерса в соответствии с требованиями ГОСТ 9450 – 76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» по методу восстановленного отпечатка (основной) с помощью четырехгранной пирамиды с квадратным основанием (микротвердомер HVS-1000). Первоначально измеряли исходную микротвердость образца, после чего помещали его во внешнее магнитное поле и проводили магнитную обработку. Далее образец вынимали из поля и проводили измерения микротвердости сразу после выдержки в магнитном поле и после определенных интервалов времени. Для измерения микротвердости в работе использовали образцы в виде параллелепипедов размером 0,4×1,0×1,0 см, которые располагали в магнитном поле таким образом, чтобы линии индукции были перпендикулярны стороне образца площадью 1 $см^2$ и пронизывали ее. Геометрию магнитного поля не изменяли во всех испытаниях, при этом варьировали значение индукции магнитного поля и время выдержки в нем.

Была проведена оценка скорости ползучести в условиях наложения магнитных полей на образцах, представляющих собой цилиндр длиной 250 и диаметром 2,5 мм. Исследовали процесс ползучести без и с воздействием магнитного поля, при этом индукция магнитного поля измерялась аналогично методике измерения микротвердости. Исследование процесса ползучести проводили с помощью испытательной машины на растяжение, сконструированной в СибГИУ. Она состоит из металлического жесткого каркаса, на который был установлен источник магнитного поля, внутри каркаса располагается блок для проведения экспериментов совместно с измерительной аппаратурой.

Основные результаты

Изучение влияния магнитного поля на микротвердость алюминия показало, что после удаления образца из магнитного поля относительное изменение микротвердости снижается на величину, зависящую от времени выдержки и индукции магнитного поля. После прекращения действия магнитного поля микротвердость возвращается к исходному значению за время порядка 20 – 26 ч. Зависимости относительного изменения микротвердости от времени, прошедшего после обработки магнитным полем 0,3 Тл, приведено в таблице.

Проведены исследования начального эффекта влияния магнитного поля на микротвердость алюминия. Результаты исследований представлены на рис. 1.

Влияние магнитного поля (0,3 Тл) на микротвердость технически чистого алюминия при разном времени обработки
The effect of a 0.3 T magnetic field on the microhardness of technically pure aluminum at different processing times

Время выдержки, ч	Относительное изменение микротвердости, %	Погрешность измерения, %
0,25	–2,60	0,74
0,50	–5,35	1,02
1,00	–8,70	1,20
1,50	–10,30	0,80
2,00	–12,50	0,80

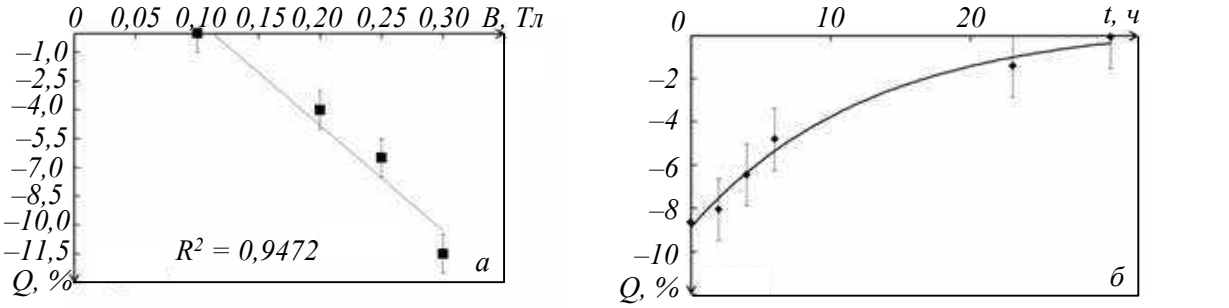

Рис. 1. Относительное изменение микротвердости технически чистого алюминия:
а – зависимость начального эффекта влияния от индукции магнитного поля; *б* – релаксация *Q* после одного часа выдержки в магнитном поле 0,3 Тл

Fig. 1. Relative change in microhardness of technically pure aluminum:
a – dependence of the initial effect of the influence on the induction of the magnetic field; *б* – relaxation *Q* after one hour of exposure in a magnetic field of 0,3 T

Влияние магнитного поля (рис. 1, *а*) на микротвердость не наблюдается при индукции менее 0,1 Тл, что говорит о существовании порогового значения *B*. При дальнейшем увеличении индукции магнитного поля эффект линейно возрастает. Микротвердость алюминия после удаления из магнитного поля (рис. 1, *б*) релаксирует до исходного значения по закону $Q = 0{,}53 - Q_0 \exp[-t/12{,}72]$ (где *t* – время, прошедшее после обработки образца магнитным полем; Q_0 – постоянная, зависящая от величины магнитного поля и времени выдержки в нем, характеризующая начальный эффект влияния магнитного поля).

При изучении влияния магнитного поля на процесс ползучести основное внимание было уделено стадии установившейся ползучести, скорость на которой постоянна. Скорость ползучести определялась численным дифференцированием зависимости $\xi = \xi_0 + \xi' t$, описывающей кинетику процесса. Для количественной оценки эффекта действия магнитного поля использован параметр относительного изменения скорости ползучести на линейной стадии. Относительное изменение скорости ползучести $\xi \frac{\xi'_{mg} + \xi'}{\xi'}$, где ξ'_{mg} и ξ' – усредненное значение скорости ползучести при воздействии магнитного поля и без него. Зависимость относительного изменения скорости ползучести от индукции магнитного поля приведена на рис. 2.

Из представленной на рис. 2 зависимости ξ (*B*) следует, что эффект влияния магнитного поля не однозначен: происходит как возрастание скорости ползучести с достижением максимального значения при $B = 0{,}1$ Тл, так и ее замедление с достижением минимального при $B = 0{,}5$ Тл.

Была выявлена зависимость относительного изменения скорости ползучести алюминия от индукции магнитного поля. Установлен знакопеременный характер зависимости относительного изменения скорости ползучести алюминия ξ от индукции магнитного поля. Показано, что при $B \leq 0{,}1$ Тл скорость ползучести увеличивается, а время, необходимое для разрушения, – снижается. В интервале $B > 0{,}1$ Тл скорость ползучести уменьшается, время увеличивается.

Для объяснения зависимостей предположим, что магнитное поле стимулирует движение дислокаций. Это может происходить за счет открепления дислокаций от точечных дефектов под действием постоянного магнитного поля [17].

Результаты, полученные в рамках настоящей работы, согласуются с результатами исследований, в которых было показано, что применение постоянного магнитного поля в процессе ползучести технически чистого титана ВТ1-0 приводят к увеличению скорости процесса на установившейся стадии [18]. Также было установлено, что после магнитной обработки происходит снижение микротвердости на 3 – 8 % в зависимости от индукции поля [19].

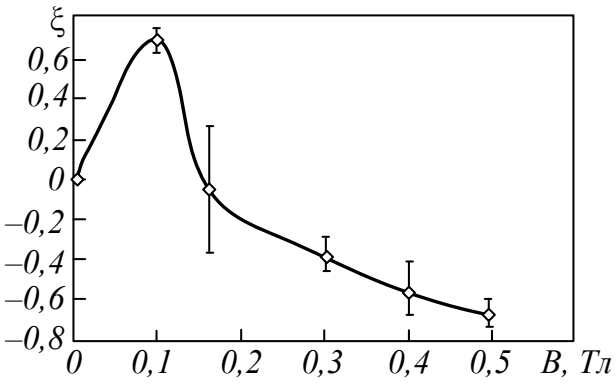

Рис. 2. Зависимость относительного изменения скорости ползучести ξ от индукции магнитного поля *B*

Fig. 2. The dependence of the relative change in the creep velocity ξ on the induction of the magnetic field *B*

Выводы

При помещении образцов технически чистого алюминия в постоянное магнитное поле наблюдается обратимое снижение микротвердости. Микротвердость возвращается к исходному состоянию по экспоненциальному закону.

Показано, что эффект магнитного влияния на процесс ползучести алюминия является знакопеременным, происходит как возрастание скорости ползучести, так и ее замедление, в зависимости от индукции магнитного поля.

Схожие полученные экспериментальные результаты на разных материалах позволяют утверждать, что магнитное поле может применяться для пластификации парамагнитных металлов и имеет перспективу промышленного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jeong C. High temperature mechanical properties of AlSiMg(Cu) alloys for automotive cylinder heads // Materials Transactions. 2013. Vol. 54 (4). P. 588–594.
2. Joyce M.R., Styles C.M., Reed P.A.S. Elevated temperature short crack fatigue behaviour in near eutectic Al – Si alloys // International Journal of Fatigue. 2003. Vol. 25 (9-11). P. 863–869.
3. Zhao Q., Qian Z., Cui X., Wu Y., Liu X. Optimizing microstructures of dilute Al–Fe–Si alloys designed with enhanced electrical conductivity and tensile strength // Journal of Alloys and Compounds. 2015. Vol. 650. P. 768–776.
4. Zhang X., Zhang H., Kong X., Fu D. Microstructure and properties of Al–0.70Fe–0.24Cu alloy conductor prepared by horizontal continuous casting and subsequent continuous extrusion forming // Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition). 2015. Vol. 25 (6). P. 1763–1769.
5. Jiang X., Zhang Y., Yi D., Wang H., Deng X., Wang B. Low-temperature creep behavior and microstructural evolution of 8030 aluminum cables // Materials Characterization. 2017. Vol. 130. P. 181–187.
6. Pan L., Mirza F.A., Liu K., Chen X.G. Effect of Fe-rich particles and solutes on the creep behaviour of 8xxx alloys // Materials Science and Technology. 2016. Vol. 33. P. 1130–1137.
7. Kassner M.E., Smith K. Low temperature creep plasticity // Journal of Materials Research and Technology. 2014. Vol. 3 (3). P. 280–288.
8. Sherby O.D., Goldberg A., Ruano O.A. Solute-diffusion-controlled dislocation creep in pure aluminium containing 0.026 at.% Fe // Philosophical Magazine. 2007. Vol. 84. P. 2417–2434.
9. Kim H. Low-temperature creep behavior of ultrafine-grained 5083 al alloy processed by equal-channel angular pressing // Journal of Mechanical Science and Technology. 2010. Vol. 24 (10). P. 2075–2081.
10. Marquis E.A., Seidman D.N., Dunand, D.C. Effect of mg addition on the creep and yield behavior of an Al–Sc alloy // Acta Materialia. 2003. Vol. 51 (16). P. 4751–4760.
11. Моргунов Р.Б., Валеев Р.А., Скворцов А.А., Королев Д.В., Пискорский В.П., Куницына Е.И., Кучеряев В.В., Коплак О.В. Магнитопластический и магнитомеханический эффекты в алюминиевых сплавах с магнитострикционными микровключениями // Труды ВИАМ. 2019. № 10. С. 3–13.
12. Ener S., Skokov K.P., Karpenkov D.Yu., Kuz'min M.D., Gutfleisch O. Magnet properties of Mn70Ga30 prepared by cold rolling and magnetic field annealing // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2015. Vol. 382. P. 265–270.
13. Li J., Zhou J., Liu L., Feng A., Huang S., Meng X. High-cycle bending fatigue behavior of TC6 titanium alloy subjected to laser shock peening assisted by cryogenic temperature // Surface and Coatings Technology. 2021. Vol. 409. P. 126848.
14. Комиссарова И.А., Ярополова Н.Г., Коновалов С.В., Загуляев Д.В., Громов В.Е. Влияние контактных воздействий на нанотвердость металлов // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2014. № 33. С. 125–131.
15. Коновалов С.В., Данилов В.И., Зуев Л.Б., Филипьев Р.А., Громов В.Е. О влиянии электрического потенциала на скорость ползучести алюминия // Физика твердого тела. 2007. Т. 49 (8). С. 1389–1391.
16. Жмакин Ю.Д., Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Кузнецов В.А., Громов В.Е. Совершенствование аппаратурного обеспечения электростимулированных процессов обработки металлов давлением // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2009. Т. 6. № 2. С. 92–98.
17. Альшиц В.И. Магнитопластический эффект: основные свойства и физические механизмы // Кристаллография. 2003. № 5. С. 826–854.
18. Шляров В.В., Загуляев Д.В. Влияние магнитных полей на процесс пластической деформации цветных металлов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2019. Т. 16. № 3. С. 394–398.
19. Шляров В.В., Анучина Е.А., Загуляев Д.В., Коновалов С.В. Изменение микротвердости

титана ВТ1-0 при воздействии магнитным полем // Вестник Тамбовского университета. Серия естественные и технические науки. 2016. С. 1444–1446.

REFERENCES

1. Jeong C. High temperature mechanical properties of AlSiMg(Cu) alloys for automotive cylinder heads. *Materials Transactions*. 2013, vol. 54 (4), pp. 588–594.
2. Joyce M.R., Styles C.M., Reed P.A.S. Elevated temperature short crack fatigue behaviour in near eutectic Al–Si alloys. *International Journal of Fatigue*. 2003, vol. 25 (9-11), pp. 863–869.
3. Zhao Q., Qian Z., Cui X., Wu Y., Liu X. Optimizing microstructures of dilute al-fe-si alloys designed with enhanced electrical conductivity and tensile strength. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015, vol. 650, pp. 768–776.
4. Zhang X., Zhang H., Kong X., Fu D. Microstructure and properties of al-0.70Fe-0.24Cu alloy conductor prepared by horizontal continuous casting and subsequent continuous extrusion forming. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. 2015, vol. 25 (6), pp. 1763–1769.
5. Jiang X., Zhang Y., Yi D., Wang H., Deng X., Wang B. Low-temperature creep behavior and microstructural evolution of 8030 aluminum cables. *Materials Characterization*. 2017, vol. 130, pp. 181–187.
6. Pan L., Mirza F.A., Liu K., Chen X.G. Effect of Fe-rich particles and solutes on the creep behaviour of 8xxx alloys. *Materials Science and Technology*. 2016, vol. 33, pp. 1130–1137.
7. Kassner M.E., Smith K. Low temperature creep plasticity. *Journal of Materials Research and Technology*. 2014, vol. 3 (3), pp. 280–288.
8. Sherby O.D., Goldberg A., Ruano O.A. Solute-diffusion-controlled dislocation creep in pure aluminium containing 0.026 at.% Fe. *Philosophical Magazine*. 2007, vol. 84, pp. 2417–2434.
9. Kim H. Low-temperature creep behavior of ultrafine-grained 5083 al alloy processed by equal-channel angular pressing. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2010, vol. 24(10), pp. 2075–2081.
10. Marquis E.A., Seidman D.N., Dunand, D.C. Effect of mg addition on the creep and yield behavior of an Al–Sc alloy. *Acta Materialia*. 2003, vol. 51 (16), pp. 4751–4760.
11. Morgunov R.B., Valeev R.A., Skvortsov A.A., Korolev D.V., Piskorskii V.P., Kunitsyna E.I., Kucheryaev V.V., Koplak O.V. Magnetoplastic and magnetomechanical effects in aluminum alloys with magnetostrictive microinclusions. *Trudy VIAM*. 2019, no. 10, pp. 3–13. (In Russ.).
12. Ener S., Skokov K.P., Karpenkov D.Yu., Kuz'min M.D., Gutfleisch O. Magnet properties of Mn70Ga30 prepared by cold rolling and magnetic field annealing. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015, vol. 382, pp. 265–270.
13. Li J., Zhou J., Liu L., Feng A., Huang S., Meng X. High-cycle bending fatigue behavior of TC6 titanium alloy subjected to laser shock peening assisted by cryogenic temperature. *Surface and Coatings Technology*. 2021, vol. 409, pp. 126848.
14. Komissarova I.A., Yaropolova N.G., Konovalov S.V., Zagulyaev D.V., Gromov V.E. Influence of Contact Actions on the Nanohardness of Metals. *Vestnik gornometallurgicheskoi sektsii rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2014, no. 33, pp. 125–131. (In Russ.).
15. Konovalov S.V., Danilov V.I., Zuev L.B., Filip'ev R.A., Gromov V.E. On the effect of electric potential on the creep rate of aluminum. *Fizika tverdogo tela*. 2007, vol. 49 (8), pp. 1389–1391. (In Russ.).
16. Zhmakin Yu.D., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Kuznetsov V.A., Gromov V.E. Improvement of hardware support for electrically stimulated metal forming processes. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2009, vol. 6, no. 2, pp. 92–98. (In Russ.).
17. Al'shits V.I. Magnetoplastic effect: main properties and physical mechanisms. *Kristallografiya*. 2003, no. 5, pp. 826–854. (In Russ.).
18. Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V. Influence of magnetic fields on the process of plastic deformation of non-ferrous metals. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2019, vol. 16, no. 3, pp. 394–398. (In Russ.).
19. Shlyarov V.V., Anuchina E.A., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V. Change in the microhardness of titanium VT1-0 when exposed to a magnetic field. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2016, pp. 1444–1446. (In Russ.).

Сведения об авторах

***Виталий Владиславович Шляров**, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля,* Сибирский государственный индустриальный университет
***ORCID**:* 0000-0001-8130-648X
***E-mail**:* shlyarov@mail.ru

***Дмитрий Валерьевич Загуляев**, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля,* Сибирский государственный индустриальный университет
***ORCID**:* 0000-0002-9859-8949
***E-mail**:* zagulyaev_dv@bk.ru

***Крестина Владимировна Аксенова**, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля*, Сибирский государственный индустриальный университет
***ORCID**:* 0000-0003-4908-6776
***E-mail**:* 19krestik91@mail.ru

Information about the authors

***Vitaly V. Shlyarov**, Postgraduate student of the Department of Natural Sciences named after Prof. V.M. Finkel*, Siberian State Industrial University
***ORCID**:* 0000-0001-8130-648X
***E-mail**:* shlyarov@mail.ru

***Dmitry V. Zagulyaev**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Natural Sciences named after Prof. V.M. Finkel*, Siberian State Industrial University
***ORCID**:* 0000-0002-9859-8949
***E-mail**:* zagulyaev_dv@bk.ru

***Kristina V. Aksenova**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Natural Sciences named after Prof. V.M. Finkel,* Siberian State Industrial University
***ORCID**:* 0000-0003-4908-6776
***E-mail**:* 19krestik91@mail.ru

© 2022 г. *В.В. Шляров, Д.В. Загуляев, К.В. Аксенова*
Поступила в редакцию 3 февраля 2022 г.