

Оригинальная статья

УДК 669.713.017:538.9

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-1(43)-3-9

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИНДУКЦИЕЙ 0,4 Тл НА ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВИНЦА С2

© 2023 г. А. А. Серебрякова, Д. В. Загуляев, В. В. Шляров, В. Е. Громов

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

Аннотация. В работе проведены исследования динамики деформационных характеристик технически чистого свинца марки С2 под влиянием постоянного магнитного поля с магнитной индукцией 0,4 Тл. Выполнены механические испытания на ползучесть, измерена микротвердость образцов свинца в исходном состоянии (без воздействия магнитного поля) и при воздействии внешнего магнитного поля. По результатам экспериментов построены деформационные кривые ползучести и зависимости микротвердости от времени выдержки в магнитном поле. Определены стадии ползучести. Выявлена линейная стадия, на участке которой был проведен расчет скорости ползучести свинца до и после применения внешнего магнитного поля. Установлены количественные изменения исследуемых характеристик. Под влиянием магнитного поля произошло значительное снижение скорости ползучести. Относительное остаточное удлинение образцов, разрушенных в процессе ползучести при воздействии магнитного поля, снизилось. Исследован начальный эффект влияния магнитного поля с индукцией 0,4 Тл на микротвердость свинца: микротвердость исследуемых образцов увеличивается. Увеличение времени выдержки в магнитном поле не приводит к существенным изменениям микротвердости свинца. Максимальное увеличение достигнуто после экспозиции в магнитном поле в течение 1 ч. Выявлена корреляция изменений скорости ползучести и изменений микротвердости материала, подвергнутого воздействию магнитного поля с магнитной индукцией 0,4 Тл.

Ключевые слова: свинец, магнитное поле, ползучесть, микротвердость, скорость ползучести, деформация

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания № 0809-2021-0013.

Благодарность. Исследования выполнены в Центре коллективного пользования «Материаловедение» ФГБОУ ВО «СибГИУ».

Для цитирования: Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В., Громов В.Е. Влияние магнитного поля индукцией 0,4 Тл на пластические свойства свинца С2 // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 1 (42). С. 3–9. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-3-9](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-3-9)

Original article

INFLUENCE OF THE MAGNETIC FIELD WITH AN INDUCTION OF 0.4 TL ON THE PLASTIC PROPERTIES OF C2 LEAD

© 2023 г. А. А. Serebryakova, D. V. Zaguliaev, V. V. Shlyarov, V. E. Gromov

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

Abstract. The paper studies the dynamics of deformation characteristics of technically pure C2 lead under the influence of a constant magnetic field with magnetic induction of 0.4 T. Mechanical creep tests were performed, the microhardness of lead samples was measured in the initial state (without the influence of a magnetic field) and under the influence of external magnetic field. Based on the experimental results, creep deformation curves and the dependence of microhardness on the exposure time in a magnetic field are constructed. The stages of creep are determined. A linear stage was identified, at the site of which the creep rate of lead was calculated before and after the application of an external magnetic field. Quantitative changes in the studied characteristics were established. Under the influence of the magnetic field, there was a significant decrease in the creep rate. The relative residual elongation of samples destroyed during creep under the influence of a magnetic field decreased. The initial effect of the influence of a magnetic field with an induction of 0.4 T on the lead microhardness is investigated: the microhardness of the studied samples increases. An increase in the holding time in the magnetic field does not lead to significant changes in the lead microhardness. The maximum magnification is achieved after holding in the magnetic field for 1 hour. The correlation of changes in the creep rate and changes in the microhardness of the material exposed to a magnetic field with magnetic induction of 0.4 T was revealed.

Keywords: lead, magnetic field, creep, microhardness, creep rate, deformation

Funding: The work was carried out within the framework of the state task No. 0809-2021-0013.

Acknowledgements: The research was carried out at the Center for Collective Use "Materials Science" of the SibSIU.

For citation: Serebryakova A.A., Zaguliaev D.V., Shlyarov V.V., Gromov V.E. Influence of the magnetic field with an induction of 0.4 T on the plastic properties of C2 lead. Bulletin of the Siberian State Industrial University. 2023, no. 1 (43), pp. 3–9. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-3-9](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-3-9)

Введение

Известны различные способы изменения свойств материалов при использовании внешних энергетических воздействий. Одним из способов является воздействие магнитным полем [1 – 3], которое, как показывают исследования, способно влиять на структуру и свойства металлов и сплавов [4, 5]. Применение постоянного магнитного поля позволяет управлять механическими свойствами (прочность, пластичность, твердость) и процессами пластической деформации материала [6 – 9]. Ранее были исследованы процессы ползучести сплавов алюминия, меди и других металлов [10 – 13]. Деформационное поведение технически чистого поликристаллического свинца при воздействии магнитного поля до 1 Тл остается малоизученным.

В настоящей работе изучается изменение микротвердости и пластичности свинца в процессе ползучести под влиянием магнитного поля с индукцией 0,4 Тл. В предыдущих экспериментах [14] было применено магнитное поле с меньшей (0,3 Тл) индукцией и было установлено, что происходит увеличение скорости ползучести свинца на 87 % по сравнению с исходной скоростью, показана динамика относительного остаточного удлинения образцов, разрушенных без воздействия и под воздействием магнитного поля. По сравнению с исходным значением деформация уменьшилась на 1,57 %. Исследования позволили выявить эффект влияния магнитного поля на микротвердость: под влия-

нием магнитного поля с индукцией 0,3 Тл микротвердость образца снижается. Максимальное снижение микротвердости происходит в течение 1 ч воздействия магнитного поля на образец: по сравнению с исходным значением микротвердость после выдержки в магнитном поле в течение 1 часа снижается на 7,8 %. Выявлено, что при последующей выдержке в магнитном поле значение микротвердости остается на постоянном уровне. Основываясь на этих результатах, отражающих эффект воздействия магнитного поля на свинец, актуальным является изучение динамики пластических характеристик свинца (микротвердость, скорость ползучести) при увеличении индукции магнитного поля до 0,4 Тл.

Методы и принципы исследования

В качестве образцов для исследований ползучести использована свинцовая проволока марки С2 диаметром 2 мм. В исследуемых образцах содержание свинца составляло 99,9786 %, содержание примесей не превышало 0,0214 % (сурьма – 0,002 %, олово – 0,002 %, медь – 0,001 %, висмут – 0,004 %, мышьяк – 0,001 %, железо – 0,0005 %, серебро – 0,0007 %, цинк – 0,0002 %, Mg + Ca + Na – 0,010 %). Для испытаний на микротвердость применялись образцы свинца в форме прямоугольного параллелепипеда размерами 12×5×15 мм. Образцы свинца предварительно подвергали рекристаллизационному от-

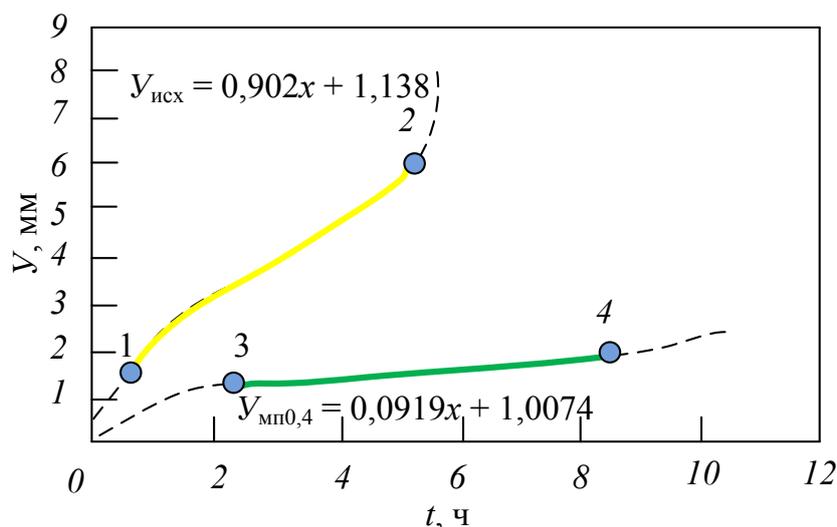


Рис. 1. Кривые ползучести свинца в исходном состоянии ($Y_{исх}$) и подвергнутого воздействию магнитного поля ($Y_{мп0,4}$) с индукцией 0,4 Тл

Fig. 1. Creep curves of lead in the initial state ($Y_{исх}$) and exposed to a magnetic field ($Y_{мп0,4}$) with an induction of 0.4 T

жигу при температуре 200 °С в течение 2 ч, далее их охлаждали в течение 24 ч до комнатной температуры. В процессе такой процедуры структура поликристаллического свинца была приведена в наиболее однородное состояние.

Испытания на ползучесть осуществляли на разработанной и изготовленной в ФГБОУ ВО «СибГИУ» экспериментальной установке на растяжение до разрушения [15]. Установка состоит из жесткого металлического каркаса, в котором установлен источник магнитного поля с измерительной аппаратурой. Сигналы с датчика передаются на ПК и обрабатываются. Полученные данные об удлинении образца и времени позволили построить кривые процесса ползучести. Дальнейший анализ данных проводился в Microsoft Excel. При помощи перечисленных инструментов выполняли выявление линейной (установившейся) стадии ползучести. Линейная стадия ползучести определялась при помощи построения касательной к кривой ползучести. Тангенс угла наклона данной прямой равен значению скорости ползучести материала.

Величина постоянного растягивающего напряжения σ была рассчитана путем отнесения усилия, растягивающего образец, к площади сечения образца и составила 5,57 МПа.

Индукция магнитного поля составляла 0,4 Тл. В качестве источника магнитного поля использовался постоянный электромагнит с возможностью регулирования индукции. В настоящей работе индукцию регулировали путем изменения силы тока в катушках. Величину индукции магнитного поля измеряли миллитесламетром ТПУ. Испытания проводили при комнатной температуре.

При исследованиях микротвердости образцы располагали в магнитном поле таким образом, чтобы линии индукции были перпендикулярны стороне образца с размерами 15×12 мм и пронизывали ее. Обработку магнитным полем проводили по режимам (1) – (4): выдержка образца в поле с индукцией 0,4 Тл течение 1, 2, 3 и 4 ч. Микротвердость измеряли сразу же после обработки образца в магнитном поле на микротвердомере HVS-1000 (по Виккерсу). Испытательная нагрузка: 10 г. Время нагружения образца и нахождение под нагрузкой составляло 10 с, время разгрузки 5 с. Обработку данных по результатам микроиндентирования выполняли в программах Excel и Origin Pro 8.

Основные результаты

В результате набраны статистические данные по процессу ползучести свинца, получены кривые ползучести поликристаллического свинца в обычных условиях ($Y_{исх}$) и при действии магнитного поля с индукцией 0,4 Тл ($Y_{мп0,4}$) (рис. 1).

Выявлена линейная стадия на кривой ($Y_{исх}$) – участок 1 – 2, а на кривой $Y_{мп0,4}$ линейная стадия процесса ползучести – участок 3 – 4. Были построены касательные к данным участкам кривой, с помощью тангенса угла наклона касательных определены скорости ползучести. Рассчитанное по трем испытаниям среднее значение скорости ползучести для образца в исходном состоянии составило 0,902 мм/ч, при воздействии магнитного поля с индукцией 0,4 Тл – 0,0919 мм/ч. Происходит снижение скорости ползучести свинца на 89,8 % по сравнению с исходным значением.

Относительное остаточное удлинение (δ) не подвергнутых магнитному влиянию образцов до

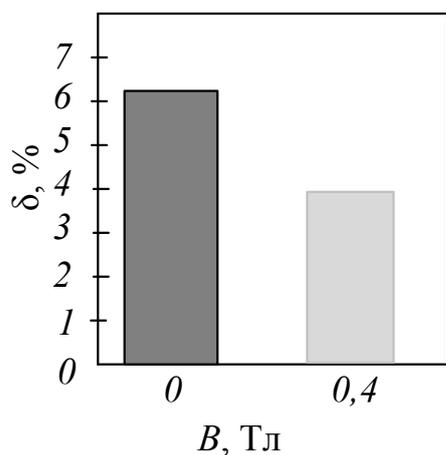


Рис. 2. Относительное остаточное удлинение образцов в испытании на ползучесть без воздействия магнитного поля (0) и после воздействия магнитным полем с индукцией 0,4 Тл (0,4)

Fig. 2. Relative residual elongation of samples in the creep test without exposure to a magnetic field (0) and after exposure to a magnetic field with an induction of 0.4 Tl (0.4)

разрушения в процессе ползучести в среднем составляет 6,18 % (рис. 2). Относительное остаточное удлинение образцов, подвергнутых воздействию магнитного поля, составило 3,8 % (рис. 2). По сравнению с исходным значением относительное остаточное удлинение образцов уменьшилось на 2,4 %.

Исследования микротвердости технически чистого поликристаллического свинца показали начальный эффект воздействия магнитного поля на материал (рис. 3) (начальный эффект воздействия магнитного поля на образец – значение микротвердости, измеренное сразу же после магнитной обработки образца).

Микротвердость (HV_0) образца свинца до обработки составила 7,65 HV (рис. 3, точка 1). На рис. 3 показана микротвердость образцов после выдержки в магнитном поле в течение 1, 2, 3 и 4 ч (точки 2 – 5). В течение первого часа выдержки

образца в магнитном поле (точка 2) наблюдается резкое повышение микротвердости до 8,875 HV (на 16,1 %). Далее не происходит значительного изменения микротвердости: В точках 3 – 5 значения составили 8,80 HV, 8,74 HV и 8,725 HV. Таким образом, начальный эффект влияния магнитного поля выражен увеличением микротвердости по сравнению с исходным значением, что позволяет сделать предположение о повышении прочности свинца. Как известно, прочность – это свойство материала сопротивляться разрушению при внешнем воздействии. Прочность и микротвердость связаны тем, что при испытании на микротвердость исследуется сопротивление внедрению в поверхность твердого тела (микроиндентора): чем тверже материал, тем сложнее его деформировать. Предполагаемой причиной упрочнения поверхности свинца под воздействием магнитного поля может быть снижение подвижности дислокаций материала [16 – 18].

По полученным данным можно сделать вывод, что наиболее рациональным является режим 1, в котором образец выдержан в магнитном поле с индукцией 0,4 Тл в течение 1 ч. Дальнейшее увеличение времени выдержки в магнитном поле не приводит к усилению эффекта.

Выводы

В результате испытаний набраны статистические данные по влиянию магнитного поля с индукцией 0,4 Тл на микротвердость и скорость ползучести образцов свинца марки С2. Получены кривые ползучести поликристаллического свинца, которые позволили выявить линейную стадию ползучести и рассчитать скорости ползучести без воздействия и под воздействием магнитного поля. Под воздействием магнитного поля происходит снижение скорости ползучести

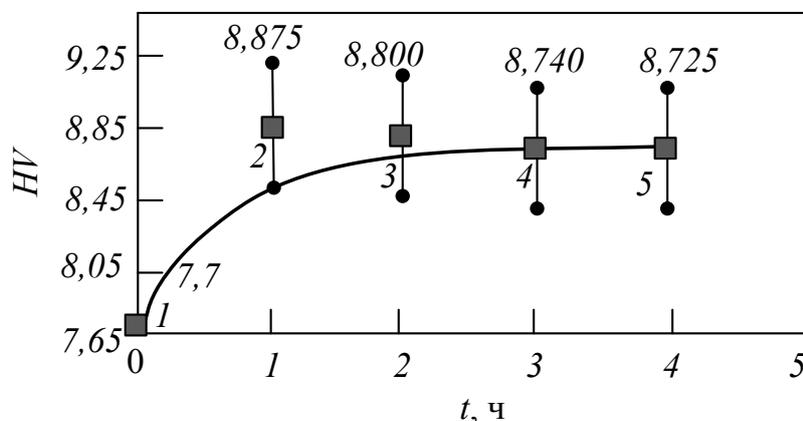


Рис. 3. Начальный эффект влияния магнитного поля на микротвердость свинца С2 при $B = 0,4 \text{ Tl}$

Fig. 3. The initial effect of the magnetic field on the microhardness of C2 lead at $V = 0.4 \text{ T}$

свинца на 89,8 % по сравнению с исходной скоростью. Показана динамика относительного остаточного удлинения образцов, разрушенных без воздействия и под воздействием магнитного поля. По сравнению с исходным значением деформация уменьшилась на 2,4 %. Микротвердость образца, подвергнутого влиянию магнитного поля 0,4 Тл, увеличивается. Максимальное повышение происходит в течение 1 ч воздействия. Микротвердость после 1 часа возрастает на 16,1 %. При дальнейшей выдержке в магнитном поле значение микротвердости остается неизменным. На основании этого можно сделать вывод о том, что эффект влияния магнитного поля с индукцией 0,4 Тл на свинец не зависит от времени выдержки в нем исследуемого материала, что соответствует результатам эксперимента при индукции 0,3 Тл. Однако остальные характеристики, такие как микротвердость и скорость ползучести, изменялись обратным образом. В предыдущих исследованиях авторского коллектива, скорость ползучести свинца марки С2 увеличилась, а микротвердость снизилась при выдержке образцов в магнитном поле с индукцией 0,3Тл. Таким образом, наблюдается неоднозначный характер изменения анализируемых характеристик, который меняется в зависимости от значений индукции магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ida N. The static magnetic field. In book: Engineering electromagnetics. Springer, New York, NY, 2021. P. 377–418.
2. Gillon P. Uses of intense d.c. magnetic fields in materials processing // Materials science and engineering: A. 2000. No. 287. P. 146–152.
3. Watanabe K., Motokawa M., Herlach F. Materials science in static high magnetic fields. In book: Materials science in static high magnetic fields. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002. P. 3–10.
4. Cai Q., Zhai C., Luo Q., Zhang T.-Y. Effects of magnetic field on the microstructure and mechanical property of Mg-Al-Gd alloys // Materials characterization. 2019. No. 154. P. 233–240.
5. Balaji S. Magnetic fields in materials. In book: Electromagnetics made easy. Springer, Singapore. 2020. P. 355–379.
6. Bilal N., Xiaoyan L., Zhinan Y., Jiali Z., Fucheng Z., Junkui L. Effect of magnetic field on microstructure and mechanical properties of austempered 70Si3MnCrsteel // Materials science and engineering: A. 2019. Vol. 759. P. 11–18.
7. Yasuda H., Molokov S., Moreau R., Moffatt K. Applications of high magnetic fields in materials processing. In book: Magneto-hydrodynamics. Fluid mechanics and its applications. Springer, Dordrecht. 2007. P. 329.
8. Asai S. Application of high magnetic fields in materials processing // Cheminform. 2006. Vol. 24. No. 37. P. 349–354.
9. Papaefthymiou G. Magnetic fields in materials. In book: The magnetic fields 1st Edition. 2022. P. 3–29.
10. Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Комиссарова И.А., Литвиненко Н.Г., Громов В.Е. Закономерности изменения деформационного поведения поликристаллической меди после магнитной обработки // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. № 4-2. С. 1763–1766.
11. Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Пономарева М.В. и др. Влияние слабого магнитного поля на пластичность алюминия А85 // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2010. Т. 15. № 3-1. С. 820–821.
12. Pshonkin D.E. Effect of static magnetic fields on creep of aluminum alloy // Solid state phenomena. 2017. No. 269. P. 1–6.
13. Скворцов А.А., Пшонкин Д.Е. Влияние магнитного поля на ползучесть алюминиевого сплава с Fe-содержащими включениями. В кн.: Фазовые превращения и прочность кристаллов: сб. тезисов X Международной конференции (29 октября – 2 ноября 2018 года, Черноголовка). Черноголовка, 2018. С. 91.
14. Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В. Влияние магнитного поля с индукцией 0,3 Тл на пластические свойства технически чистого свинца. В кн.: Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XXII Международной научно-практической конференции (10 – 11 ноября 2021 г). В 2 ч. Ч. 1. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2021. С. 261–266.
15. Коновалов С.В., Данилов В.И., Зуев Л.Б. и др. Автоматизированная установка для регистрации и анализа ползучести металлов и сплавов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. № 8. С. 64–66.
16. Zagulyaev D., Konovalov S., Shlyarov V., Chen X. Influence of constant magnetic field on plastic characteristics of paramagnetic metals // Materials Research Express. 2019. Vol. 6. No. 9. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab2c8a>
17. Мильман Ю.В. Масштабная зависимость твердости и характеристики пластичности, определяемой при индентировании // Деформация и разрушение материалов. 2008. № 8. С. 3–10.

18. Пинчук А.И., Шаврей С.Д. Корреляция между микротвердостью и подвижностью двойникующихся дислокаций в кристаллах висмута при приложении постоянного магнитного поля и импульсов тока // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 12. С. 80–84.

REFERENCES

1. Ida N. *The static magnetic field*. In: *Engineering electromagnetics*. Springer, New York, NY. 2021, pp. 377–418.
2. Gillon P. Uses of intense d.c. magnetic fields in materials processing. *Materials science and engineering: A*. 2000, no. 287, pp. 146–152.
3. Watanabe K., Motokawa M., Herlach F. Materials science in static high magnetic fields. In: *Materials science in static high magnetic fields*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002, pp. 3–10.
4. Cai Q., Zhai C., Luo Q., Zhang T.-Y. Effects of magnetic field on the microstructure and mechanical property of Mg–Al–Gd alloys. *Materials characterization*. 2019, no. 154, pp. 233–240.
5. Balaji S. Magnetic fields in materials. In: *Electromagnetics made easy*. Springer, Singapore. 2020, pp. 355–379.
6. Bilal N., Xiaoyan L., Zhinan Y., Jiali Z., Fucheng Z., Junkui L. Effect of magnetic field on microstructure and mechanical properties of austempered 70Si3MnCrsteel. *Materials science and engineering: A*. 2019, vol. 759, pp. 11–18.
7. Yasuda H., Molokov S., Moreau R., Moffatt K. Applications of high magnetic fields in materials processing. In: *Magnetohydrodynamics. Fluid mechanics and its applications*. Springer, Dordrecht. 2007, pp. 329.
8. Asai S. Application of high magnetic fields in materials processing. *Cheminform*. 2006, vol. 24, no. 37, pp. 349–354.
9. Papaefthymiou G. Magnetic fields in materials. In: *The magnetic fields 1st Edition*. 2022, pp. 3–29.
10. Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Komissarova I.A., Litvinenko N.G., Gromov V.E. Regularities of changes in the deformation behavior of polycrystalline copper after magnetic treatment. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2013, vol. 18, no. 4-2, pp. 1763–1766. (In Russ.).
11. Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Ponomareva M.V. et al. The influence of a weak magnetic field on the plasticity of aluminum A85. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2010, vol. 15, no. 3-1, pp. 820–821. (In Russ.).
12. Pshonkin D.E. Effect of static magnetic fields on creep of aluminum alloy. *Solid state phenomena*. 2017, no. 269, pp. 1–6.
13. Skvortsov A.A., Pshonkin D.E. The influence of a magnetic field on the creep of an aluminum alloy with Fe-containing inclusions. In: *Phase transformations and crystal strength: collection of abstracts of the X International Conference (October 29 – November 2, 2018, Chernogolovka)*. Chernogolovka, 2018, p. 91. (In Russ.).
14. Serebryakova A.A., Zagulyaev D.V., Shlyarov V.V. The influence of a magnetic field with an induction of 0.3 Tl on the plastic properties of technically pure lead. In: *Metallurgy: technologies, innovations, quality: Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference (November 10-11, 2021)*. In 2 parts. Part 1. Novokuznetsk: SibGIU, 2021, pp. 261–266. (In Russ.).
15. Konovalov S.V., Danilov V.I., Zuev L.B. et al. Automated installation for registration and analyzing of creep of metals and alloys. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2007, no. 8, pp. 64–66. (In Russ.).
16. Zagulyaev D., Konovalov S., Shlyarov V., Chen X. Influence of constant magnetic field on plastic characteristics of paramagnetic metals. *Materials Research Express*. 2019, vol. 6, no. 9. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab2c8a>
17. Mil'man Yu.V. Scale dependence of hardness and plasticity characteristics determined during indentation. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2008, no. 8, pp. 3–10. (In Russ.).
18. Pinchuk A.I., Shavrei S.D. Correlation between microhardness and mobility of twin dislocations in bismuth crystals under the application of a constant magnetic field and current pulses. *Pis'ma v ZhTF*. 2002, vol. 28, no. 12, pp. 80–84. (In Russ.).

Сведения об авторах

Анна Александровна Серебрякова, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: aserebrakova87@gmail.com

Дмитрий Валерьевич Загуляев, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiiu.ru

Виталий Владиславович Шляров, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: ShlyarovVitaly@yandex.ru

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин

плин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-5147-5343

Information about the authors

Anna A. Serebryakova, Postgraduate student of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

E-mail: aserebrakova87@gmail.com

Dmitry V. Zagulyaev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University

E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru

Vitaly V. Shlyarov, Post-graduate student of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

E-mail: ShlyarovVitaly@yandex.ru

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 08.09.2022

После доработки 17.10.2022

Принята к публикации 24.10.2022

Received 08.09.2022

Revised 17.10.2022

Accepted 24.10.2022