

Оригинальная статья

УДК 669.713.017:538.9

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-9-18

ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2024 г. А. А. Серебрякова, В. В. Шляров, Д. В. Загуляев

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

Аннотация. Представлен краткий обзор последних экспериментальных результатов изучения металлов и сплавов в условиях воздействия внешнего магнитного поля. Явление магнетизма очень широко исследуется различными группами ученых для применения в приборах и устройствах, используемых как в повседневной жизни людей, так и в промышленных масштабах. Выявлено, что влияние магнитного поля на структурно-фазовые превращения, прочностные и пластические свойства материалов при деформации в основном зависит от магнитной природы металла. Постоянное магнитное поле способствует изменению различных деформационных характеристик ряда твердых тел с ионной, ионно-ковалентной, ковалентной, молекулярной и металлической связями твердых тел. Установлено, что есть дополнительные факторы, обуславливающие изменение деформационных характеристик металлов и сплавов под воздействием внешних магнитных полей. В ходе анализа выявлены следующие факторы, дополнительно оказывающие влияние: температура плавления металла, строение кристаллической решетки, температура при проведении эксперимента, магнитная индукция при проведении обработки магнитным полем. Выявлено, что наибольшее количество исследований было проведено на титане, алюминии и их сплавах. Отмечено недостаточное количество исследований влияния магнитной обработки на технически чистый свинец. Результаты обзора могут иметь академическую значимость – полученные в исследовании результаты позволят расширить представления о влиянии магнитных воздействий на поликристаллические металлические материалы, а закономерности, полученные в работе, возможно использовать при изучении физических свойств металлических материалов.

Ключевые слова: магнитное поле, металл, сплав, свинец, диамагнетизм, парамагнетизм, деформация, дислокации, ползучесть, микротвердость

Для цитирования: Серебрякова А.А., Шляров В.В., Загуляев Д.В. Поведение металлов и сплавов под влиянием магнитного поля. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):9–18. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-9-18](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-9-18)

Original article

BEHAVIOR OF METALS AND ALLOYS UNDER THE INFLUENCE OF A MAGNETIC FIELD

© 2024 A. A. Serebryakova, V. V. Shlyarov, D. V. Zagulyaev

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

Abstract. A brief overview of the latest experimental results of studying metals and alloys under the influence of an external magnetic field is presented. The phenomenon of magnetism is widely studied by various groups of scientists for use in devices and devices used both in people's daily lives and on an industrial scale. It is revealed that the influence of the magnetic field on structural and phase transformations, strength and plastic properties of materials during deformation mainly depends on the magnetic nature of the metal. A constant magnetic field contributes to the change of various deformation characteristics of a number of solids with ionic, ion-covalent,

covalent, molecular and metallic bonding of solids. It has been established that there are additional factors that cause changes in the deformation characteristics of metals and alloys under the influence of external magnetic fields. During the analysis, the following factors were identified, additionally influencing: the melting point of the metal, the structure of the crystal lattice, the temperature during the experiment, magnetic induction during magnetic field treatment. It was revealed that the largest number of studies were conducted on titanium, aluminum and their alloys. An insufficient number of studies in the field of magnetic processing on technically pure lead have been noted. The results of the review may have academic significance – the results obtained in the study will expand the understanding of the influence of magnetic influences on polycrystalline metallic materials, and the patterns established in the work can be used in the study of the physical properties of metallic materials.

Key words: magnetic field, metals, alloys, lead, diamagnetism, paramagnetism, deformation, dislocations, creep, microhardness

For citation: Serebryakova A.A., Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V. Behavior of metals and alloys under the influence of a magnetic field. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):9–18. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-9-18](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-9-18)

Введение

Особое внимание к изучению влияния магнитных полей на сплавы и металлы весьма актуально в последнее время [1]. В частности, это касается области изучения магнитной обработки. Магнитная обработка металлов и сплавов – воздействие в течение некоторого времени на материал или готовое изделие постоянного, переменного или импульсного магнитного поля без каких-либо иных внешних воздействий с целью управляемого изменения структуры и свойств обрабатываемого объекта [2]. Влияние магнетизма на металлы и сплавы активно изучается с помощью разнообразных экспериментов.

Если рассматривать зарубежный опыт исследования магнитного воздействия на металлы и сплавы, то можно выделить несколько стран (Россия, Китай, Япония, Корея, Индия), исследователи которых занимаются этим вопросом. Наибольшую заинтересованность к изучению магнитного воздействия на металлы и сплавы проявляют ученые из Китая.

Металлы и сплавы по своим магнитным свойствам делятся на несколько основных групп (парамагнетики, диамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики). Изучение изменения механических свойств металлов и сплавов при воздействии на них внешними потоками энергии является активной областью для исследований в последние несколько лет. Это актуально для металлических материалов, которые нашли широкое применение во многих областях промышленности. Под влиянием постоянного магнитного поля могут изменяться деформационные характеристики ряда твердых тел с ионной, ионно-ковалентной, ковалентной, молекулярной и металлической связями твердых тел [3]. При обсуждении этих вопросов часто упоминается магнитопластический эффект (МПЭ), которому

стоит уделить особое внимание в процессах влияния магнитного поля на материалы и сплавы. Рассмотрено новое явление – движение дислокаций в постоянном магнитном поле в немагнитных кристаллах в отсутствие механической нагрузки (магнитопластический эффект). Определены следующие основные свойства МПЭ:

- инверсия знака индукции магнитного поля не меняет направления движения дислокаций;
- средний пробег дислокаций l линейно зависит от времени t пребывания образца в магнитном поле при небольших значениях магнитной индукции B (менее 1 Тл);
- средний пробег дислокаций l прямо пропорционален квадрату магнитной индукции при больших значениях t и относительно высокой величины B (более 1 Тл);
- эффект атермичен в интервале температур 4,2 – 77,0 К и лишь незначительно усиливается (на 20 – 30 %) при повышении температуры до комнатной.

Установлено, что магнитное поле создает условия открепления дислокаций от локальных дефектов, а их движение обусловлено действующими полями внутренних напряжений в кристалле. Эксперименты "in-situ" показали, что это движение имеет эстафетный характер.

Под действием магнитных полей изменяются пластичность, микротвердость, внутреннее трение, предел прочности и другие макроскопические свойства ионных кристаллов, полупроводников, металлов, а также молекулярных кристаллов, полимеров и т.д. [4; 5]. В работе [6] представлен анализ экспериментальных данных по влиянию магнитного поля на микротвердость алюминиевых, медных, титановых и магниевых сплавов. Происходит заметное изменение микротвердости сплавов по сравнению с образцами, неподвергнутых выдержке в слабом магнитном поле.

Подтверждено, что магнитное поле влияет на тип, структуру и свойства препятствий дислокаций в процессе пластической деформации. Исследования влияния магнитоэластического эффекта на подвижность дислокаций [7] было проведено путем изменений индукции магнитного поля. Выявлено, что снижение интенсивности индукции магнитного поля увеличивает магнитоэластический эффект. Кроме того, в работе [7] установлено, что воздействие магнитного поля влияет на макропластические свойства металлов.

В зависимости от классификации (по магнитной природе) эффект влияния магнитного поля на металл различен. Рассмотрим экспериментальные работы, в которых поднимаются вопросы влияния магнитных полей на металлы и сплавы различной магнитной природы, в частности, влияние магнитного поля на парамагнетики и диамагнетики.

Влияние магнитного поля на парамагнетики

Парамагнетики – вещества, которые намагничиваются в направлении внешнего магнитного поля и имеют положительную магнитную восприимчивость. Парамагнетики относятся к слабомагнитным веществам, магнитная проницаемость незначительно отличается от единицы.

Термин парамагнетизм ввел в 1848 г. М. Фарадей [8]. Молекулы парамагнетика обладают собственными магнитными моментами, которые под действием внешних полей создают результирующее поле, превышающее внешнее. Парамагнетики втягиваются в магнитное поле. При отсутствии внешнего магнитного поля парамагнетик не намагничен, так как из-за теплового движения собственные магнитные моменты атомов ориентированы совершенно беспорядочно [9]. К парамагнетикам относятся алюминий, вольфрам, цезий, платина, титан, литий, магний, натрий и многие другие (щелочные и щелочно-земельные металлы, а также сплавы этих металлов), кислород, оксиды азота и марганца, хлорное железо и другие [10; 11].

В работе [12] представлены результаты экспериментальных исследований динамической магнитной восприимчивости гексаферрита свинца в температурной области перехода из магнитоупорядоченного состояния в парамагнитное. При ориентации вектора напряженности переменного магнитного поля в направлении легкого намагничивания вдоль гексагональной оси в области температуры Кюри обнаружено аномальное пикообразное уменьшение действительной части магнитной восприимчивости. Наблюдаемый эффект зависит от частоты переменного магнитного поля и исчезает при частоте

примерно 12 МГц. Обнаруженные особенности интерпретируются как эффекты, обусловленные релаксационным резонансом.

В результате испытаний образцов титана марки ВТ1-0 на многоцикловую усталость выявлено, что наблюдается увеличение усталостной долговечности на 64 % в постоянном магнитном поле 0,3 Тл [13]. Экспериментальные результаты по исследованию процесса ползучести показали, что в постоянном магнитном поле скорость ползучести увеличивается на 30,71 %. В работах [14; 15] были получены результаты влияния магнитного поля на металлы и сплавы. Установлена зависимость изменения усталостной долговечности технически чистого титана от индукции магнитного поля. Показано, что включение постоянного магнитного поля в процессе испытаний приводит к многократному увеличению усталостной долговечности (199105 ± 15023 при $B = 0,3$ Тл; 270492 ± 20505 при $B = 0,4$ Тл и 319828 ± 27321 при $B = 0,3$ Тл). Методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии проведены исследования поверхности разрушения образцов титана марки ВТ1-0, разрушенных в условиях усталости в магнитном поле и без него. Разрушение материала проходит по смешанному механизму: присутствуют не только признаки хрупкого разрушения (фасетки квазискола), но и признаки пластической деформации (гребни). Установлено, что при усталостном нагружении в магнитном поле критическая длина трещины возрастает в 1,45 раза. В зоне усталостного роста трещины наблюдается формирование субзеренной структуры (размеры субзерен $0,56 \div 0,87$ мкм), а в магнитном поле при $B = 0,4$ Тл – $0,67 \div 1,1$ мкм. В зоне ускоренного роста трещины среднее расстояние между усталостными бороздками в образцах титана зависит от магнитной индукции и снижается от 0,78 мкм при $B = 0$ Тл до 0,49 при $B = 0,5$ Тл. Исследования дислокационной субструктуры образцов выявили формирование дислокационной субструктуры сетчатого типа (область поверхности разрушения до 5 мкм), переходящей в дислокационную субструктуру, сформированную хаотически распределенными дислокациями. Скалярная плотность дислокаций вблизи поверхности разрушения на расстоянии до 1 мкм составляет $6,9 \cdot 10^{10}$ см⁻²; $4,9 \cdot 10^{10}$ см⁻² и $4,55 \cdot 10^{10}$ см⁻² для образцов, разрушенных при величине B , равной 0,3 и 0,5 Тл. При увеличении расстояния от поверхности разрушения снижается, независимо от условий усталостных испытаний. Усталостные испытания образцов титана сопровождаются формированием внутренних полей напряжений, основными концентраторами напряжений являются границы раздела и

стыки границ зерен, границы раздела фрагментов, а также линии дислокаций. Поперечные размеры контуров экстинкции в поверхностном слое до 1 мкм, независимо от наличия магнитного поля, минимальны (15 – 17 нм). Включение магнитного поля приводит к плавному (от 17 до 99 нм при $B = 0,3$ Тл) и резкому (от 16 до 230 нм при $B = 0,5$ Тл) увеличению толщины контуров экстинкции. Плотность концентраторов напряжений в поверхностном поликристаллическом слое выше в образце, разрушенном в магнитном поле 0,3 Тл ($1,5 \text{ мкм}^{-2}$). Ранее было установлено, что воздействие магнитным полем на технически чистый титан марки ВТ1-0 приводит к снижению значения микротвердости на 3 – 8 % с последующей ее стабилизацией за время, зависящее от параметров обработки. Начальный эффект влияния (наблюдающийся сразу после экспозиции образцов из поля) характеризуется линейной зависимостью от времени обработки для индукции магнитного поля 0,3 и 0,4 Тл и носит ступенчатый характер для 0,5 Тл. Время стабилизации микротвердости линейно зависит от времени обработки для индукции магнитного поля 0,3 Тл, носит экспоненциальный характер для индукции 0,4 Тл и имеет сложный вид – для 0,5 Тл. Установлено, что стабилизация микротвердости за 24 ч происходит не для всех параметров воздействия, например, для параметров обработки 0,4 и 0,5 Тл; 1,75 и 2,00 ч выдержки – не происходит стабилизация за указанное время. Выявлен порог времени выдержки (0,5 ч), ниже которого не наблюдается эффект магнитного влияния независимо от индукции магнитного поля. В ходе экспериментальных исследований процесса ползучести установлено, что при воздействии магнитным полем 0,3 Тл происходит увеличение скорости ползучести титана до 3,39 %/ч. Дальнейшее увеличение индукции магнитного поля до 0,4 Тл приводит еще к более существенному увеличению скорости ползучести по сравнению с образцом, разрушенном без воздействия магнитным полем (скорость ползучести составляет 4,62 %/ч). Максимальный эффект увеличения скорости ползучести технически чистого титана марки ВТ1-0 наблюдается при наложении постоянного магнитного поля с индукцией 0,5 Тл, скорость процесса составляет 5,69 %/ч. Стоит отметить, что на начальной (логарифмической) стадии ползучести действие магнитного поля не выражено.

Влияние магнитного поля на диамагнетики

Диамагнетики – вещества, намагничивающиеся против направления внешнего магнитного поля. В присутствии внутреннего магнитного поля диамагнетики магнитны [9]. К диамагнети-

кам относятся инертные газы, азот, водород, кремний, фосфор, висмут, цинк, медь, золото, серебро, свинец, а также многие другие как органические, так и неорганические соединения. Человек в магнитном поле ведет себя как диамагнетик.

В работах [16 – 18] были проведены исследования оказываемого магнитным полем эффекта на бериллий и его сплавы. Изучено поведение образцов бериллия до, в течение и после обработки опытных образцов в слабом постоянном магнитном поле. По полученным экспериментальным данным рассчитаны температурно-временные зависимости отношения скоростей движения дислокаций в процессе и после магнитного воздействия. Выявлено, что экспозиция образцов в магнитном поле, а также их старение после магнитного воздействия кардинально меняет характер температурных зависимостей скоростей движения дислокаций. Итогом исследований стали эмпирические выражения, описывающие эти зависимости. Установлено, что последствия магнитного воздействия в диамагнитном бериллии имеет сложный характер, который подтверждает факт наличия нескольких механизмов «магнитной памяти».

В работе [19] исследована ползучесть цинка. Установлено, что скорость ползучести при сжатии монокристаллов цинка измерялась на приращениях деформации образца на 150 нм, что позволяло определять скачки деформации от 300 нм. Показано, что слабое постоянное магнитное поле с индукцией $B = 0,2$ Тл увеличивает среднюю скорость ползучести и уменьшает высоту и резкость субмикронных скачков деформации. Предварительная выдержка в поле влияет на скорость и характеристики скачков деформации. Это объясняется с позиций модели, связывающей действие магнитного поля с разрушением барьеров для движения дислокаций.

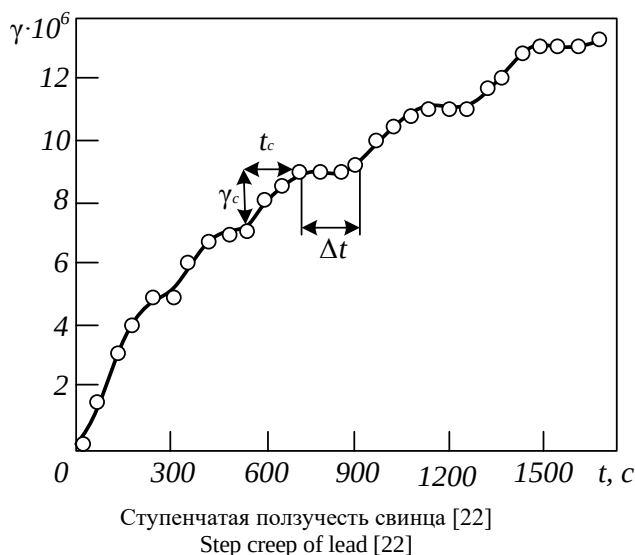
В работе [20] исследована динамика магнитной проницаемости диамагнитных диэлектриков. Магнитная проницаемость характеризует магнитные свойства материала. Она сильно зависит от поля для нелинейных сред (ферромагнетики, для которых характерен гистерезис). Для таких сред магнитная проницаемость как независимое от поля число может указываться приближенно в рамках линеаризации. Для парамагнетиков и диамагнетиков линейное приближение достаточно хорошо для широкого диапазона величин поля.

Одним из наименее исследованных диамагнетиков является свинец. Проведем исследования ползучести свинца без воздействия магнитного поля. В работе [21] получен ступенчатый вариант ползучести. Вопрос ступенчатой ползу-

чести был изучен ранее, но до настоящего времени нет единого мнения о природе данного явления, поэтому рассматриваемая тема является актуальной для изучения. Испытания проводили на проволочных образцах, предварительно подверженные отжигу. В ходе испытаний были получены кривые ползучести в координатах деформация – время (см. рисунок).

Образование ступенек объясняется тем, что в процессе деформации, вновь образовавшиеся дислокации встречают на пути движения препятствия. Это затормаживает процесс деформации. Локальное поле напряжений заторможенных дислокаций будет возрастать с увеличением деформации пропорционально их количеству. Когда поле напряжений достигнет уровня, необходимого для преодоления поля напряжения препятствия, направленного против приложенного напряжения, происходит прорыв дислокаций. Это приводит к появлению ступеньки на кривой ползучести. Установлено, что ступенчатая ползучесть обусловлена периодическим размножением дислокаций вследствие диффузионных процессов, протекающих в ядре дислокации.

В работе [22] рассмотрено влияние периодических колебаний на немонотонную ползучесть свинца. Испытания проводили на проволочных образцах свинца, которые предварительно были подвержены отжигу. Исследования проводили при комнатной температуре на установке, позволяющей одновременно измерять ползучесть и внутреннее трение. Напряжение ползучести было ниже предела текучести (2,04 МПа). Внутреннее трение измеряли в амплитуднонезависимой области. Максимальный сдвиг на поверхности образца, возникающий под действием периодических колебаний, составлял $7 \cdot 10^{-6}$ отн. ед., что соответствует амплитуде напряжения 0,042 МПа. Частоту колебаний варьировали в пределах 0,79 – 4,60 кол/с. Кривые внутреннего трения



фиксировали на движущейся фотопленке осциллографа, измерения проводили в течение 1 ч.

Немонотонный характер изменения параметров ползучести в зависимости от частоты колебаний связан с релаксационным процессом внутри ядер дислокаций, происходящим под действием знакопеременных напряжений. Периодическое изменение внутреннего трения под влиянием приложенного напряжения в процессе немонотонной ползучести связано с размножением дислокаций, обусловленным перераспределением подвижных точек закрепления вдоль дислокации. Природа микропластических деформаций, обнаруживающихся в процессе немонотонной ползучести, возрастание внутреннего трения при действии на образец периодически изменяющегося и монотонно нарастающего в пределах макроупругости сдвигового напряжения, независимо от способа нагружения образца, обусловлена одним и тем же физическим процессом (размножением дислокаций).

В работах [23; 24] на основе представлений физической мезомеханики исследованы закономерности структурных изменений в поликристаллах свинца на разных стадиях ползучести. Показано, что стадии ползучести свинца формируются как эволюция структурных уровней деформации, масштаб которых возрастает в следующей последовательности: микро, мезо, макро. Стадия I неустановившейся ползучести связана с локальными кристаллографическими сдвигами на микромасштабном уровне. На стадии II стационарной ползучести ведущим механизмом деформации является движение зерен как целого на мезомасштабном уровне, аккомодируемое внутризеренными сдвигами и резко выраженными эффектами фрагментации и экструзии в приграничных зонах. Стадия III ускоренной ползучести связана с движением как целого конгломератов самосогласованно деформирующихся зерен на макромасштабном уровне. Количественные измерения показали, что сдвиговые и поворотные составляющие деформации при ползучести развиваются взаимосвязанно и самосогласованно.

В работе [25] исследованы характер и механизм формирования динамической мезоструктуры, статистика числа и распределения трещин по размерам, их связь с характеристиками усталости свинца и свинцовых сплавов при знакопеременном изгибе. Показано, что определяющую роль в их усталостном разрушении играют масштаб, форма элементов динамической мезоструктуры и кинетика ее формирования, в основе которой лежит степень однородности деформации. Решающим фактором в повышении долговечности поликристаллов является подавление локализации деформации и, как следствие,

формирования мезоконцентраторов напряжений. Это предотвращает развитие опасной блочной мезоструктуры и рост усталостных трещин выше критического размера.

В работе [26] проведены исследования физико-химических процессов, инициированных переменным магнитным полем напряженностью 0,1 Тл и частотой до 10 кГц в немагнитных кристаллах азидов серебра и свинца. Экспериментально обнаружено медленное разложение, сопровождающееся пластической деформацией как при действии переменного магнитного поля, так и в пост-процессах. Исследована зависимость относительного объема выделившегося газа при протекании пост-процессов от частоты переменного магнитного поля.

Было исследовано внешнее критическое магнитное поле магнитных сверхпроводников, зависящее от температуры (применяемое для сверхпроводников свинца и висмута ($Pb82Bi18$)) [27]. Было исследовано внешнее критическое магнитное поле магнитных сверхпроводников по теории Гинзбурга-Ландау. Анализ и модификацию зависимости свойств от температуры исследовали методом вариации, с помощью первого уравнения Гинзбурга-Ландау. Аналитическая формула внешнего критического магнитного поля определялась магнитными свойствами материала (восприимчивости и дифференциальной восприимчивости). Кроме того, зависящее от температуры внешнее критическое магнитное поле было изучено на основе четырех моделей: Чена, Чжу, Шаненко и Чанжана.

В работах [28; 29] были проведены исследования и получены экспериментальные зависимости по влиянию магнитного поля на микротвердость, скорость ползучести, время длительности процесса ползучести, относительное остаточное удлинение образца и фрактографические особенности поверхности разрушения свинца марки С2. Установлено, что при величине $B = 0,3$ Тл скорость ползучести увеличилась на 87 %, а при значении $B 0,4$ и $0,5$ Тл скорость ползучести снижается по сравнению с исходными значениями на 94 и 97 %.

Выводы

На основании обзора современных исследований по влиянию магнитного поля на материалы и сплавы выявлено, что определяющим фактором в изменении свойств металлов и сплавов, подвергнутых магнитной обработке, является магнитная природа материала. Выявлены факторы, оказывающие влияние во время магнитной обработки (температура плавления металла, строение кристаллической решетки, температура при проведении эксперимента, магнитная ин-

дукция при проведении обработки магнитным полем). Установлено, что влияние магнитной обработки на парамагнетики проявляется снижением микротвердости и увеличением скорости ползучести. Кроме того, включение магнитного поля приводит к плавному увеличению толщины контуров экстинкции и многократному увеличению усталостной долговечности. Влияние магнитного поля на диамагнитные материалы выражается увеличением средней скорости ползучести, а также снижением высоты и резкости субмикронных скачков деформации. Анализ последних публикаций свидетельствует о том, что на диамагнитном свинце проведено недостаточное количество исследований поведения рассматриваемого металла под влиянием магнитного поля, что обуславливает актуальность изучения этого диамагнетика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моргунов Р.Б., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В. Термодинамический анализ магнитопластических эффектов в «немагнитных» металлах. *Труды ВИАМ*. 2018;12:79–87. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-12-79-87>; EDN: YROENN.
2. 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 магнотрикционными микровключениями. *Труды ВИАМ*. 2019;10:3–13. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-10-3-13>; EDN: BRGQUK.
3. Alshits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petrzhik E.A. *Crystallography Reports*. 2003;48:768–795
4. Покоев А., Осинская Ю., Шахбанова С., Ямщикова К. Магнитопластический эффект в алюминиевых сплавах. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2018;82; 961–964. <https://doi.org/10.1134/S0367676518070335> EDN: XWOIWD.
5. Pokoev A., Osinskaya J. Manifestation of Magnetoplastic Effect in Some Metallic Alloys. *Defect and Diffusion Forum*. 2018;383:180–184. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.383.180>
6. Li G.-R., Wang H., Li P.-S., Gao L.-Z., Peng C.-X., Zheng R. Mechanism of dislocation kinetics under magnetoplastic effect. *Acta Physica Sinica*. 2015;64(14):148102. <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.148102>

7. Краев М.В., Краева В.С. Пластическая деформация металлов и сплавов с применением постоянного магнитного поля. В кн.: *Материалы 6-й международной конференции «Космические технологии: настоящее и будущее»*. Днепр. 2017:75.
8. Плетнев С.В. *Магнитное поле, свойства, применение: Научное и учебно-методическое справочное пособие*. Санкт-Петербург: Гуманистика, 2004:624.
9. Ida N. The Static Magnetic Field. In: *Engineering Electromagnetics*. Springer. 2021;377–418.
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-15557-5_8
10. Kassner M.E. *Fundamentals of Creep in Metals and Alloys*. Elsevier Ltd. 2015:356.
<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-047561-5.X0001-2>
11. Попова Л.И., Болдырев Д.А. *Физика прочности и пластичности*. Тольятти: ТГУ. 2017:74.
12. Безлепкин А.А., Кунцевич С.П., Костюков В.И. Ориентационные и релаксационные особенности динамической магнитной восприимчивости $PBFe_{12}O_{19}$ при переходе из магнитоупорядоченного состояния в парамагнитное. *Физика твердого тела*. 2015;11:2151–2154. EDN: UJMJMR.
13. Аксенова К.В., Шляров В.В., Загуляев Д.В. Деформационное поведение технически чистого титана в постоянном магнитном поле 0,3 Тл. В кн.: *Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов. Сборник тезисов докладов XXVI Уральской школы металловедов-термистов, Екатеринбург, 07–11 февраля 2022 года*. Екатеринбург: УРФУ. 2022;123–127. EDN: LTYFYK.
14. Шляров В.В., Загуляев Д.В., Громов В.Е., Глезер А.М., Серебрякова А.А. Особенности деформации технически чистого титана в постоянном магнитном поле. *Деформация и разрушение материалов*. 2022;3:25–31. EDN: NZOQKK.
15. Шляров В.В., Загуляев Д.В., Шлярова Ю.А., Серебрякова А.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Изменение элементного и фазового состава, дефектной субструктуры образцов системы «пленка (ТИТАН) / (АК5М2) подложка», подвергнутых облучению электронным пучком. В кн.: *Материалы во внешних полях: труды XII Международного онлайн-симпозиума*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ. 2023:67–69. EDN: ADYYSB.
16. Курек Е.И., Курек И.Г., Олейнич-Лысюк А.В., Паранский Н.Д. Об особенностях магнитного последствия в высокочистом диамагнитном бериллии. *Физика твердого тела*. 2014;56(8):1546–1553. EDN: SNVZDJ.
17. Осинская Ю.В., Петров С.С., Покоев А.В., Рунов В.В. Исследование методом малоуглового рассеяния нейтронов магнитоэластического эффекта в бериллиевой бронзе при старении в магнитных полях. *Физика твердого тела*. 2010;52(3):486–488. EDN: RCRTQN.
18. Осинская Ю.В., Петров С.С., Покоев А.В. Комплексное экспериментальное исследование магнитоэластического эффекта в медно-бериллиевом сплаве. *Вестник СамГУ*. 2010;4(78):145–154. EDN: NNLLHT.
19. Песчанская Н.Н., Смирнов Б.И., Шпейзман В.В. Скачкообразная ползучесть при сжатии монокристаллов цинка в магнитном поле. *Физика твердого тела*. 2008;50(6):997–1001. EDN: RCRIWD.
20. Калытка В.А., Баширов А.В., Оспанов Б.С., Балтабаева Н.Т. Магнитная проницаемость диамагнитных и ферромагнитных диэлектриков. *Актуальные научные исследования в современном мире*. 2019;5–1(49):145–148. EDN: OMORLL.
21. Могильникова Т.Т. Ступенчатая ползучесть свинца. *Вопросы атомной науки и техники*. 2010;6:42–46.
22. Могильникова Т.Т. Влияние периодических колебаний на немонотонную ползучесть свинца. *Вісник ХНУ*. 2010;14:65–69.
23. Елсукова Т.Ф., Новоселова Е.М., Караваева В.В., Ангелова Г.В. Стадии высокотемпературной ползучести поликристаллов свинца как эволюция структурных уровней пластической деформации. *Физическая мезомеханика*. 2000;3(5):91–99.
24. Жукова К.П., Елсукова Т.Ф., Панин В.Е., Руденко Ю.Н. Температурная зависимость процессов деформации на границах зерен и в приграничных зонах при растяжении поликристаллов свинца. *Известия вузов. Физика*. 1988;4:13–18.
25. Елсукова Т.Ф., Панин В.Е. Закономерности и механизм циклической деформации, статистика развития усталостных трещин в свинце и сплавах на его основе. *Физика металлов и металловедение*. 2004;97(1):121–128.
26. Крашенинин В.И., Кузьмина Л.В., Дорохов М.А. Реакционная способность и дислокационная структура кристаллов азидов серебра и свинца в переменном магнитном поле. *Изве-*

- стия вузов. *Физика*. 2006;49(1):103–106. EDN: KYCQMF.
27. Changjan A., Meakniti S., Udomsamuthirun P. The temperature-dependent surface critical magnetic field (HC3) of magnetic superconductors: Applied to lead bismuth (Pb82Bi18) superconductors. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2017;107:32–35. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2431/1/012044>
 28. Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В. Влияние магнитного поля с индукцией до 0,5 Тл на динамику деформационных характеристик свинца. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2023;20(1):52–58. <http://dx.doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.006>; EDN:EURCJU.
 29. Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В., Громов В.Е., Аксенова К.В. Исследование микротвердости и параметра пластичности свинца во внешних магнитных полях с индукцией до 0.5 Тл. *Известия Алтайского государственного университета*. 2023;4(132):52–58. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2023\)4-07](https://doi.org/10.14258/izvasu(2023)4-07)
- ### REFERENCES
1. Morgunov R.B., Piskorskii V.P., Valeev R.A., Korolev D.V. Thermodynamic analysis of magnetoplastic effects in "non-magnetic" metals. *Trudy VIAM*. 2018;12:79–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-12-79-87> EDN: YROENN.
 2. 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 microswitches. *Trudy VIAM*. 2019;10:3–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-10-3-13>; EDN: BRGQUK.
 3. Alshits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petrzhek E.A. *Crystallography Reports*. 2003;48:768–795.
 4. Pokoev A., Osinskaya Yu., Shakhbanova S., Yamshchikova K. Magnetoplastic effect in aluminum alloys. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2018;82:961–964. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0367676518070335> EDN: XWOIWD.
 5. Pokoev A., Osinskaya J. Manifestation of Magnetoplastic Effect in Some Metallic Alloys. *Defect and Diffusion Forum*. 2018;383:180–184. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.383.180>
 6. Li G.-R., Wang H., Li P.-S., Gao L.-Z., Peng C.-X., Zheng, R. Mechanism of dislocation kinetics under magnetoplastic effect. *Acta Physica Sinica*. 2015;64(14):148102. <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.148102>
 7. Kraev M.V., Kraeva V.S. Plastic deformation of metals and alloys using a constant magnetic field. In: «Materials of the 6th International Conference "Space Technologies: Present and Future"». Dnepropetrovsk 2017:75. (In Russ.).
 8. Pletnev S.V. Magnetic field, properties, application: Scientific and methodological reference manual. Sankt-Peterburg: Gumanistika, 2004:624. (In Russ.).
 9. Ida N. The Static Magnetic Field. In: Engineering Electromagnetics. 2021;377–418. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-15557-5_8
 10. Kassner M.E. *Fundamentals of Creep in Metals and Alloys*. Elsevier Ltd, 2015:356. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-047561-5.X0001-2>
 11. Popova L.I., Boldyrev D.A. *Physics of strength and plasticity*. Togliatti: Izd-vo TGU, 2017:74. (In Russ.).
 12. Bezlepkin A.A., Kuntsevich S.P., Kostyukov V.I. Orientation and relaxation features of dynamic magnetic susceptibility $PBFe_{12}O_{19}$ during the transition from a magnetically ordered state to a paramagnetic state. *Fizika tverdogo tela*. 2015;11:2151–2154. (In Russ.). EDN: UJMJMR.
 13. Aksanova K.V., Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V. Deformation behavior of technically pure titanium in a constant magnetic field of 0.3 T. In book: Actual problems of physical metallurgy of steels and alloys: a collection of theses of reports of the XXVI Ural School of Thermists, Yekaterinburg, February 07-11, 2022. Yekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2022;123–127. (In Russ.). EDN: LTYFYK.
 14. Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V., Gromov V.E., Glezer A.M., Serebryakova A.A. Features of deformation of technically pure titanium in a constant magnetic-nitric field. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2022;3:25–31. (In Russ.). EDN: NZOQKK.
 15. Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V., Shlyarova Yu.A., Serebryakova A.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. Change in the elemental and phase composition, defective substructure of samples of the "film (TITAN)/(AK5M2) substrate" system exposed to electron beam irradiation. In: *Materials in the external fields: works of the XII In-*

- ternational Online Symposium. Novokuznetsk: ITs SibGIU. 2023;67–69. (In Russ.).*
16. Kurek E.I., Kurek I.G., Oleinich-Lysyuk A.V., Raranskii N.D. On the features of magnetic aftereffect in highly pure diamagnetic beryllium. *Fizika tverdogo tela. 2014;56(8):1546–1553. (In Russ.).* EDN: ADYYSB.
 17. Osinskaya Yu.V., Petrov S.S., Pokoev A.V., Runov V.V. Investigation by small-angle neutron scattering of magnetoplastic effect in beryllium bronze during aging in magnetic fields. *Fizika tverdogo tela. 2010;52(3):486–488 (In Russ.).* EDN: SNVZDJ.
 18. Osinskaya Yu.V., Petrov S.S., Pokoev A.V. Comprehensive experimental study of magnetoplastic effect in copper-beryllium alloy. *Vestnik SamGU. 2010;4(78):145–154. (In Russ.).*
 19. Peschanskaya N.N., Smimov B.I., Shpeizman V.V. Jump creep when compressing zinc single crystals in a magnetic field. *Fizika tverdogo tela. 2008;50(6):997–1001. (In Russ.).* EDN: RCRTQN.
 20. Kalytko V.A., Bashirov A.V., Ospanov B.S., Baltabaeva N.T. Magnetic permeability of diamagnetic and ferromagnetic dielectrics. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennoy mire. 2019;5-1(49):145–148. (In Russ.).* EDN: NNLLHT.
 21. Mogil'nikova T.T. Stupenchataya polzuchest' svintsya. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. 2010;6:42–46. (In Russ.).* EDN: RCRIWD.
 22. Mogil'nikova T.T. Effect of periodic fluctuations on lead non-monotonic creep. *Visnik KhNU. 2010;14:65–69. (In Russ.).* EDN: OMORLL.
 23. Elsukova T.F., Novoselova E.M., Karavaeva V.V., Angelova G.V. High temperature creep stages of lead polycrystals as evolution of structural levels of plastic deformation. *Fizicheskaya mekhanika. 2000;3(5):91–99. (In Russ.).*
 24. Zhukova K.P., Elsukova T.F., Panin V.E., Rudenko Yu.N. Temperature dependence of deformation processes at grain boundaries and in boundary zones when stretching lead polycrystals. *Izvestiya vuzov. Fizika. 1988;4:13–18. (In Russ.).*
 25. Elsukova T.F., Panin V.E. Regularities and mechanism of cyclic deformation, statistics on the development of fatigue cracks in lead and alloys based on it. *Fizika metallov i metallovedenie. 2004;97(1):121–128. (In Russ.).*
 26. Krashenin V.I., Kuz'mina L.V., Dorokhov M.A. Reactivity and dislocation structure of silver and lead azide crystals in an alternating magnetic field. *Izvestiya vuzov. Fizika. 2006;49(1):103–106. (In Russ.).*
 27. Changjan A., Meakniti S., Udomsamuthirun P. The temperature-dependent surface critical magnetic field (HC3) of magnetic superconductors: Applied to lead bismuth (Pb82Bi18) superconductors. *Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2017;107:32–35. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2431/1/012044>*
 28. Serebryakova A.A., Zagulyaev D.V., Shlyarov V.V. Influence of magnetic field with induction up to 0.5 T on dynamics of deformation characteristics of lead. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya. (In Russ.). 2023;20(1):52–58. <http://dx.doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.006>;EDN: KYCQMF.*
 29. Serebryakova A. A., Zagulyaev D. V., Shlyarov V. V., Gromov V. E., Aksenova K. V. Study of microhardness and plasticity parameter of lead in external magnetic fields with induction up to 0.5 T. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta. 2023;4(132):52–58. (In Russ.). [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2023\)4-07](https://doi.org/10.14258/izvasu(2023)4-07)*
- Сведения об авторах**
Анна Александровна Серебрякова, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: aserebrakova87@gmail.com
SPIN-код: 5889-2235
AuthorID: 1105025
- Виталий Владиславович Шляров**, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: shlyarov@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8130-648X
SPIN-код: 5074-3309
- Дмитрий Валерьевич Загуляев**, д.т.н., профессор кафедры естественно-научных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-9859-8949
SPIN-код: 9522-4745
- Information about the authors**
Anna A. Serebryakova, Postgraduate student of the Department of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: aserebrakova87@gmail.com
SPIN-code: 9522-4745
- Vitaly V. Shlyarov**, Post-graduate student of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University
E-mail: shlyarov@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8130-648X

SPIN-code: 5074-3309

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Dmitry V. Zaguliaev, Dr. Sci. (Tech.), Prof. of the Chair
of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel,
Siberian State Industrial University

E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-9859-8949

SPIN-code: 9522-4745

Поступила в редакцию 29.03.2023

После доработки 24.04.2023

Принята к публикации 27.04.2023

Received 29.03.2023

Revised 24.04.2023

Accepted 27.04.2023