

УДК 538.955

doi: 10.21685/2072-3040-2025-3-6

Влияние постоянного магнитного поля на усталостную долговечность диамагнетиков: роль эффекта Зеемана в усталостной прочности цветных металлов

В. В. Шляров¹, А. А. Серебрякова², К. В. Аксенова³, Д. В. Загуляев⁴

^{1,2,3,4}Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Кемеровская обл., Россия

¹shlyarov_vv@sibsiu.ru, ²serebryakova_aa@sibsiu.ru,

³19krestik91@mail.ru, ⁴zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения влияния постоянных магнитных полей на усталостную долговечность технически чистой меди и свинца, широко применяемых в промышленности и чувствительных к магнитным воздействиям, что позволит повысить надежность изделий и управлять их механическими свойствами. Цель – изучить влияние постоянного магнитного поля с индукцией 0,1–0,5 Тл на усталостную долговечность технически чистой меди марки М1 и свинца марки С2 размером 4 × 12 × 130 мм методом электроэрозионной резки на станке с числовым программным управлением. Испытания на усталость проводили на установке с циклическим асимметричным консольным изгибом при температуре (~300 К). Выбран режим с амплитудой нагружения 2,5 мм. Поверхность разрушения изучали методом сканирующей электронной микроскопии (КУКУ ЕМ6900) с анализом структуры в ImageJ, а элементный состав – с помощью Ultim Extreme. *Результаты.* Результаты усталостных испытаний показали, что магнитное поле увеличивает долговечность меди М1 на 9–28 % и свинца С2 на 7 % при 0,3 Тл, но снижает ее при 0,4–0,5 Тл; разрушение меди происходит через три зоны с формированием субзеренной структуры, а у свинца магнитное поле изменяет морфологию излома и механизм разрушения. Эффект Зеемана, вызывая расщепление энергетических уровней электронов, изменяет активационные энергии движения дислокаций в диамагнитных металлах, что влияет на скорость их скольжения и механические свойства. *Выводы.* Магнитное поле (0,1–0,25 Тл) увеличивает усталостную долговечность меди на 9–28 %, влияя на механизм разрушения через формирование субзеренной структуры. Магнитное поле при 0,3 Тл повышает усталостную долговечность свинца на 7 %, а при 0,4–0,5 Тл значительно снижает ее из-за влияния на подвижность дислокаций и морфологию излома. Эффект Зеемана изменяет электронную структуру диамагнитных металлов, меняя активационные энергии движения дислокаций и скорость их скольжения, что влияет на механические свойства.

Ключевые слова: магнитное поле, свинец, медь, эффект Зеемана, диамагнетики, структура, сканирующая микроскопия

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00578 (<https://rscf.ru/project/25-29-00578>).

Для цитирования: Шляров В. В., Серебрякова А. А., Аксенова К. В., Загуляев Д. В. Влияние постоянного магнитного поля на усталостную долговечность диамагнетиков: роль эффекта Зеемана в усталостной прочности цветных металлов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2025. № 3. С. 66–80. doi: 10.21685/2072-3040-2025-3-6

Influence of constant magnetic field on fatigue life of diamagnetics: the role of the Zeeman effect in the fatigue strength of non-ferrous metals

V.V. Shlyarov¹, A.A. Serebryakova², K.V. Aksenova³, D.V. Zaguliaev⁴

^{1,2,3,4}Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Kemerovo region, Russia

¹shlyarov_vv@sibsiu.ru, ²serebryakova_aa@sibsiu.ru,
³19krestik91@mail.ru, ⁴zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the study is due to the need to study the effect of constant magnetic fields on the fatigue life of commercially pure copper and lead, widely used in industry and sensitive to magnetic effects, which will improve the reliability of products and control their mechanical properties. The purpose of the work is to study the effect of a constant magnetic field with an induction of 0.1–0.5 T on the fatigue life of commercially pure copper and lead. *Materials and methods.* Samples of commercially pure copper grade M1 and lead grade C2 measuring $4 \times 12 \times 130$ mm were manufactured by electrical discharge cutting on a CNC machine. Fatigue tests were carried out on a setup with cyclic asymmetric cantilever bending at a temperature of (~ 300 K). The mode with a loading amplitude of 2.5 mm was selected. The fracture surface was studied by scanning electron microscopy (KYKY EM6900) with structure analysis in ImageJ, and the elemental composition was studied using Ultim Extreme. *Results.* The fatigue test results showed that the magnetic field increases the fatigue life of copper M1 by 9–28% and lead C2 by 7% at 0.3 T, but reduces it at 0.4–0.5 T; copper fracture occurs through three zones with the formation of a subgrain structure, while in lead the magnetic field changes the fracture morphology and the fracture mechanism. The Zeeman effect, causing splitting of the electron energy levels, changes the activation energies of dislocation motion in diamagnetic metals, which affects their sliding speed and mechanical properties. *Conclusions.* 1 The magnetic field (0.1–0.25 T) increases the fatigue life of copper by 9–28%, affecting the fracture mechanism through the formation of a subgrain structure. 2 A magnetic field of 0.3 T increases the fatigue life of lead by 7%, while at 0.4–0.5 T it significantly reduces it due to the effect on dislocation mobility and fracture morphology. 3 The Zeeman effect changes the electronic structure of diamagnetic metals, changing the activation energies of dislocation motion and their slip velocity, which affects mechanical properties.

Keywords: magnetic field, lead, copper, Zeeman effect, diamagnets, structure, scanning microscopy

Financing: the research was financed by the RSF within the grant No. 25-29-00578 (<https://rscf.ru/project/25-29-00578>).

For citation: Shlyarov V.V., Serebryakova A.A., Aksenova K.V., Zaguliaev D.V. Influence of constant magnetic field on fatigue life of diamagnetics: the role of the Zeeman effect in the fatigue strength of non-ferrous metals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences.* 2025;(3):66–80. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3040-2025-3-6

Введение

В последние десятилетия влияние постоянных магнитных полей на механические свойства материалов привлекло значительное внимание исследователей. Особый интерес вызывает воздействие таких полей на усталостную долговечность диамагнитных материалов, включая технически чистую медь и свинец. Понимание этих эффектов важно для разработки надежных компо-

нентов в различных отраслях промышленности, включая электронику, энергетику и транспорт. Исследования показали, что постоянные магнитные поля могут существенно влиять на процессы накопления повреждений и роста трещин в металлах. Современные работы подтверждают наличие как усиления, так и подавления усталостных процессов в зависимости от условий магнитного воздействия. Авторы [1] продемонстрировали, что постоянное магнитное поле изменяет механизм накопления усталостных повреждений в медных сплавах, изменяя морфологию и плотность дислокаций. Установлено, что магнитное поле индукцией до 0,5 Тл оказывает влияние на механическую устойчивость медных нанопроволок при циклическом нагружении, снижая их усталостную прочность на 10–15 % [2]. Это позволяет предположить, что даже для массивных образцов наблюдаются аналогичные эффекты, обусловленные изменением энергетического состояния дислокационных структур [3].

Влияние магнитных полей на медь также изучалось с позиции электронной структуры. К. Тап и соавторы применили метод электронного зондирования и показали, что магнитное поле приводит к изменению плотности электронных состояний вблизи дефектов решетки, что потенциально связано с эффектом Зеемана [4]. Эти изменения могут влиять на активационные барьеры пластической деформации.

В отношении свинца количество прямых исследований влияния постоянных магнитных полей на его усталостную долговечность ограничено. Однако, учитывая его диамагнитные свойства и низкую температуру плавления, можно предположить, что магнитные поля могут оказывать влияние на процессы деформации и разрушения, аналогично другим диамагнитным металлам. L. Chen и соавторы показали высокую чувствительность свинца к низкоэнергетическим внешним воздействиям, включая магнитные поля, что выражается в изменении скорости ползучести и возникновении микротрещин [5].

Исследования других металлов также подтверждают влияние магнитных полей на усталостные характеристики. В наших более ранних работах установлено, что воздействие постоянного магнитного поля увеличивает число циклов до разрушения коммерчески чистого титана [6]. Изучено влияние магнитного поля на усталостные и механические свойства стали 35CrMo [7]. Исследованы эффекты статического магнитного поля на микроструктуру суперсплава Inconel 625, полученного методом селективного лазерного плавления, и обнаружены изменения в микроструктуре материала [8]. Эти данные подтверждают общую тенденцию изменения дефектообразования и микроструктурной стабильности под действием магнитных полей, что важно учитывать при проектировании компонентов, работающих в магнитной среде [9–11].

Подобные изменения были подтверждены в более поздних работах, где также фиксировались модификации зеренной структуры и распределения фаз в металлических сплавах, подвергавшихся статическим магнитным полям [12–15]. Эти результаты являются важным подтверждением универсальности эффектов магнитного поля, распространяющихся не только на диамагнитные материалы, но и на более широкий класс конструкционных металлов.

В целом существующие исследования подчеркивают необходимость дальнейшего изучения влияния постоянных магнитных полей на усталост-

ную долговечность диамагнитных материалов. Особое внимание следует уделить технически чистой меди и свинцу в связи с их широким применением в промышленности и потенциальной чувствительностью к магнитным воздействиям.

Таким образом целью данной работы является изучение влияния постоянного магнитного поля с индукцией 0,1–0,5 Тл на усталостную долговечность технически чистых меди и свинца.

Материалы и методы

Для исследований были изготовлены образцы технической чистой меди марки М1 и свинца марки С2. Образцы изготовлены с помощью электроэрозионного проволочно-вырезного станка с числовым программным управлением, имели форму параллелепипеда размером $4 \times 12 \times 130$ мм. Имитация трещины (концентраторы напряжений) в центральной части образца осуществлялась двумя надрезами в виде полуокружности радиусом 20 мм. В области концентраторов напряжений образцы подвергались механическому шлифованию, в ходе которого использовалась наждачная бумага с уменьшающейся дисперсией абразивных частиц. Поверхность изделия должна быть тщательно подготовлена перед испытаниями, поскольку разрушение компонентов при циклических нагрузках часто связано с возникновением и распространением усталостных трещин, которые обычно возникают непосредственно в поверхностном слое.

Проведение испытаний на усталость осуществлялось на специальной установке по схеме циклического асимметричного консольного изгиба.

Во время испытаний определялось число циклов, которые образцы выдерживали до разрушения. Температура испытаний во всех случаях была комнатной (~ 300 К). В результате пробных испытаний для проведения дальнейших усталостных испытаний образцов в условиях воздействия магнитного поля и без него был выбран режим, при котором амплитуда нагружения не изменялась и составляла 2,5 мм.

Поверхность разрушения образцов исследовали методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе KYKY EM6900, параметры структуры анализировали на специализированном программном обеспечении для анализа и обработки изображений ImageJ. Также с использованием специализированного устройства для исследования элементного состава Ultim Extreme была произведена оценка элементного состава исследуемых образцов. Для исследования поверхности разрушения были выбраны образцы меди и свинца, значения числа циклов до разрушения которых при каждом режиме были наиболее близки к средним по серии испытаний.

Результаты и обсуждение

Были проведены усталостные испытания полированных образцов меди М1 в исходном состоянии (без применения магнитного поля) и в магнитном поле различной индукции – 0,1, 0,15, 0,2 и 0,25 Тл (*in situ*). В результате исследований установлено, что технически чистая медь марки М1, подвергнутая испытаниям в условиях усталости без применения магнитного поля, разрушается в среднем через 248411 ± 24386 циклов после приложения асим-

метричной нагрузки с частотой $\sim 3,7$ циклов/с. Включение постоянного магнитного поля в процессе испытаний приводит к увеличению усталостной долговечности. А именно, среднее число циклов до разрушения при воздействии постоянного магнитного поля составляет: 270584 ± 34867 при $B = 0,1$ Тл, 284597 ± 11130 при $B = 0,15$ Тл, 294994 ± 19445 при $B = 0,2$ Тл и 318605 ± 42910 при $B = 0,25$ Тл. График зависимости среднего количества циклов до разрушения N от параметров внешнего магнитного поля (индукции B) представлен на рис. 1.

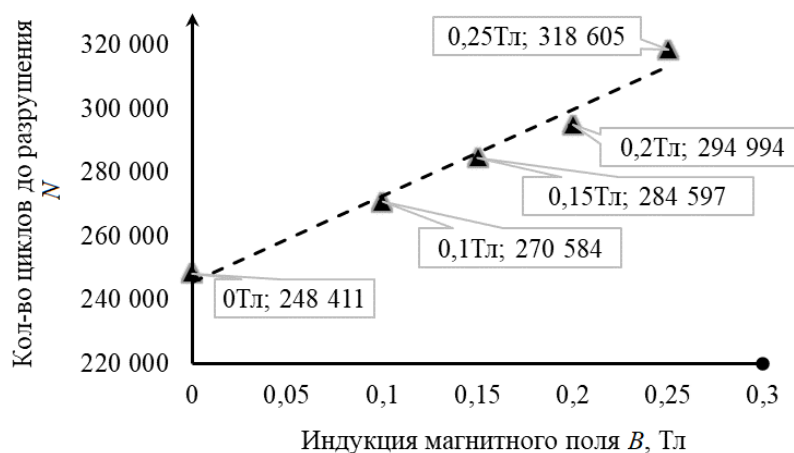


Рис. 1. Зависимость среднего количества циклов до разрушения N от индукции магнитного поля B

Аппроксимацию полученных экспериментальных результатов производили с помощью специализированного математического пакета Origin Pro 8.5. Анализ зависимости показывает, что применение постоянного магнитного поля с индукцией 0,1; 0,15; 0,2 и 0,25 Тл приводит к увеличению среднего количества циклов до разрушения образцов меди М1 на 8,9; 14,6; 18,8 и 28,3 % соответственно.

Усталостное разрушение, как правило, является процессом, развивающимся во времени в локальных объемах деформируемого материала. При достижении критического состояния наступает разрушение образца в целом. Характерное изображение структуры поверхности разрушения технически чистой меди М1, разрушенной в условиях усталости без применения магнитного поля, показано на рис. 2.

Процессы деформации, возникающие при проведении усталостных испытаний, в основном развиваются в области роста усталостных трещин и, в значительно меньшей степени, в области долома. При изменении направления нагрузки в устье трещины возникает значительная локализованная пластическая деформация. Поскольку изучаемый материал является поликристаллическим агрегатом, то фронт трещины распространяется некой паутиной (ветвлением). В общем случае структура образца, разрушенного в условиях усталостных испытаний, имеет три характерные зоны (рис. 3): 1 – зона зарождения трещины; 2 – зона циклического разрушения (стабильного роста трещины); 3 – зона долома, однократного квазистатического разрушения (когда $\sigma_{\text{действующее}} > \sigma_{\text{разрушающее}}$).

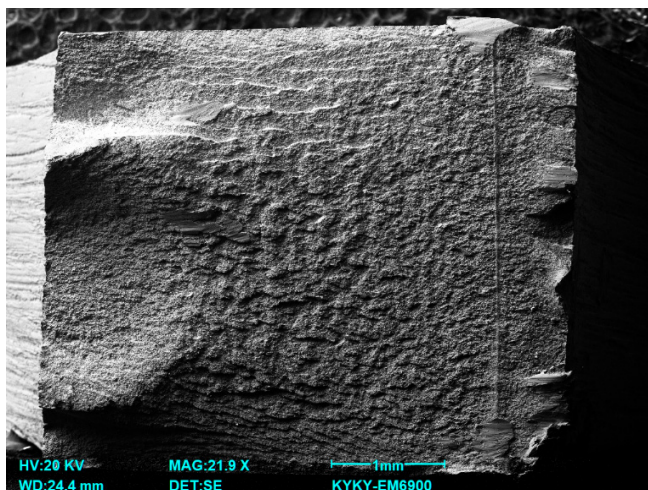


Рис. 2. Характерное изображение структуры поверхности разрушения технически чистой меди М1, разрушенной в условиях усталости без применения магнитного поля

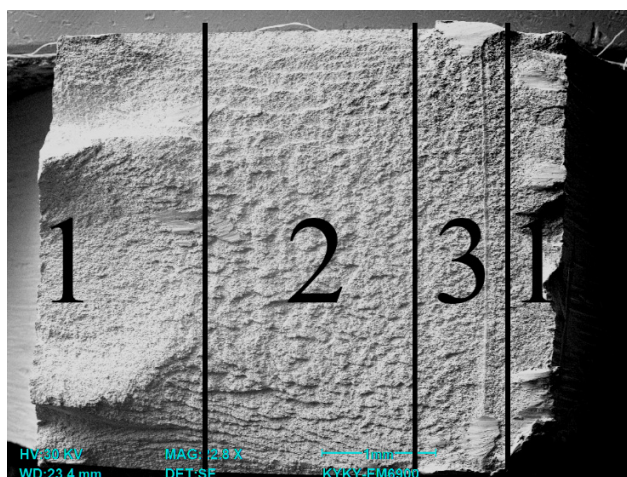


Рис. 3. Характерные зоны усталостного разрушения технически чистой меди М1: 1 – зона зарождения трещины; 2 – зона циклического разрушения (стабильного роста трещины); 3 – зона долома

В случае усталостного разрушения технически чистой меди М1 зона стабильного роста трещины характеризуется различными элементами структуры, присущими вязкому разрушению, среди которых можно отметить элементы вытяжки и ямки отрыва (рис. 4). Возникновение зоны вытяжки, т.е. сравнительно безрельфной поверхности разрушения, обусловлено так называемой вытяжкой, когда в процессе длительной деформации по существу стираются детали рельефа (рис. 4). Иногда в качестве причины образования таких областей рассматривается декогезия материала по плоскости скольжения или вязкий скол. Следует отметить, что ямки разрушения с элементами вытяжки присутствуют преимущественно в образцах меди, разрушенной при наложении магнитного поля. На рис. 5 приведены результаты исследования структуры поверхностного слоя образца меди (зона усталостного роста

трещины), разрушенного при циклических испытаниях в магнитном поле $B = 0,2$ Тл.

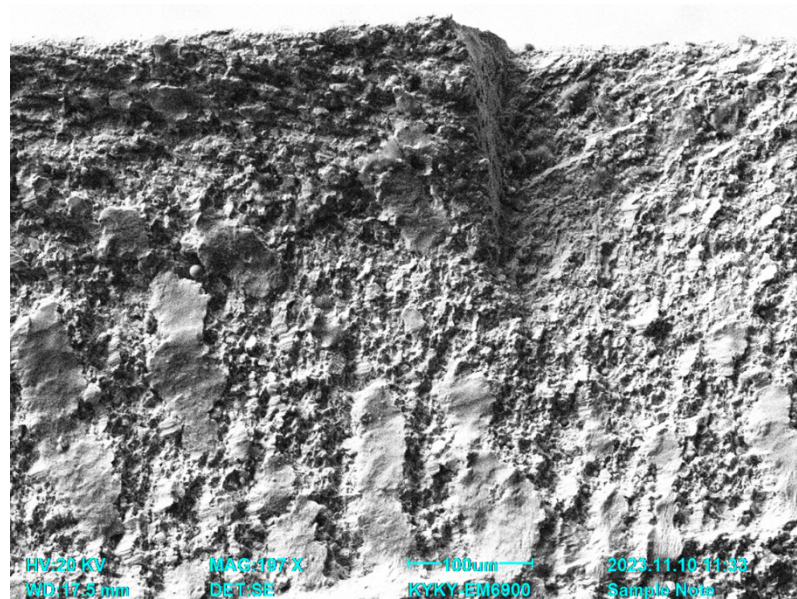


Рис. 4. Структура технической чистой меди с элементами вытяжки. Образец М1, разрушенный в условиях усталости в постоянном магнитном поле 0,25 Тл

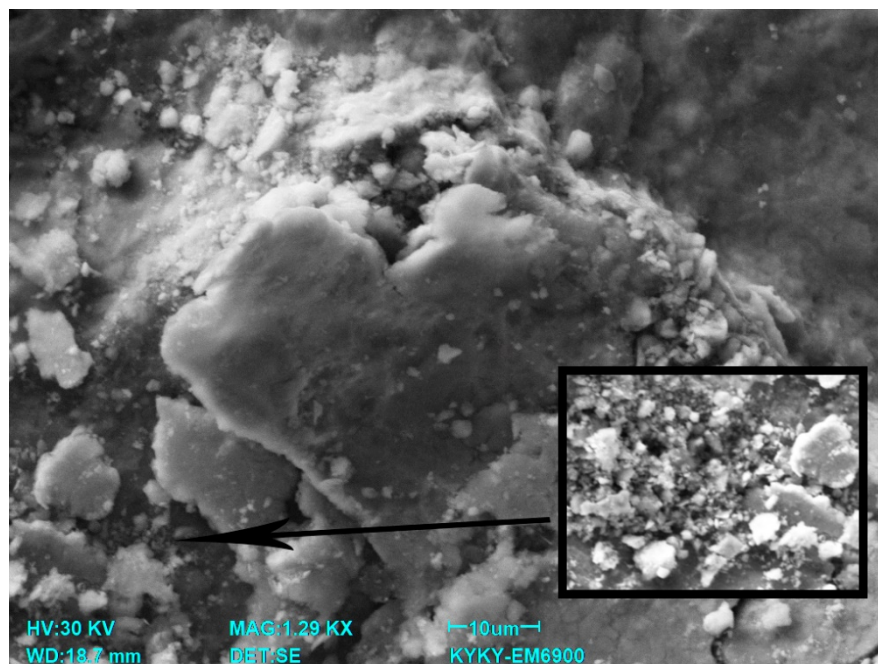


Рис. 5. Блочная (субзеренная) структура, формирующаяся в меди, разрушенной при циклических испытаниях после 274366 циклов в магнитном поле при $B = 0,2$ Тл

Особенностью зоны усталостного роста трещины является формирование субзеренной (фрагментированной) структуры. Размеры субзерен изме-

няются в пределах 0,67–1,5 мкм. Подобная субструктура формируется и в поверхностном слое образцов меди, циклические испытания которых были проведены в условиях отсутствия магнитного поля. Размеры субзерен в этом случае изменяются в пределах 0,56–0,87 мкм. Исследования показывают, что формирование субзеренной структуры в зоне усталостного роста трещины может оказывать влияние на передвижение микротрещины. Фрактографический анализ поверхности разрушения меди М1 в условиях усталостного нагружения позволяет заключить, что разрушение материала проходит по смешанному механизму, что совпадает с общепринятыми представлениями о кинетике данного процесса в металлических материалах.

Результаты проведенных усталостных испытаний образцов свинца марки С2 представлены на рис. 6. Выявлено, что чистый свинец марки С2, подвергнутый испытаниям усталости без применения магнитного поля, разрушается в среднем через 460346 циклов (рис. 5) после приложения нагрузки с частотой ~2,19 циклов/с.

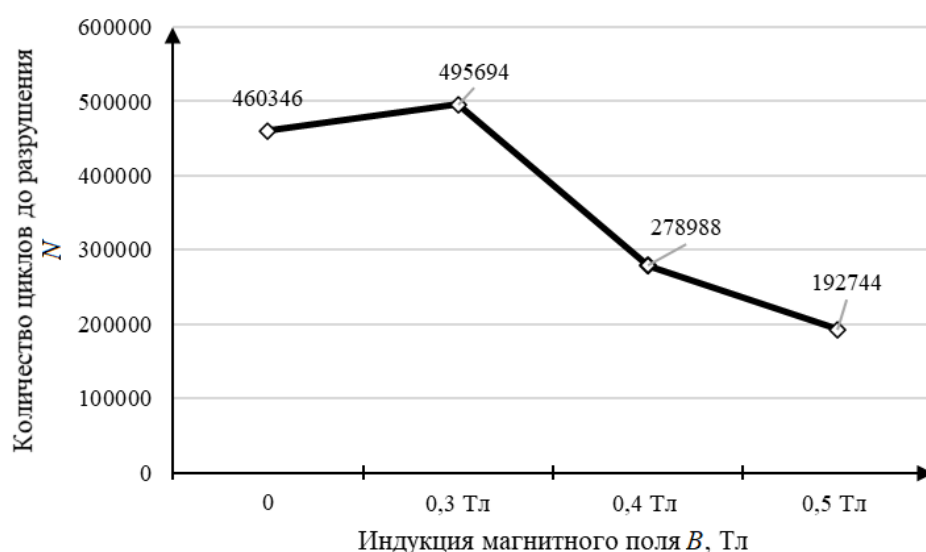


Рис. 6. Зависимость среднего количества циклов до разрушения N от индукции магнитного поля B

Как показано на рис. 6, включение постоянного магнитного поля в процесс приводит к увеличению усталостной долговечности при значении индукции магнитного поля 0,3 Тл, в среднем количество циклов при данном значении индукции составило 495694, что на 7 % больше, чем при испытаниях без магнитного поля (рис. 5)

Обратный характер влияния включения магнитного поля в процессе разрушения образцов наблюдается при усталостных испытаниях с применением индукции 0,4 и 0,5 Тл. Число циклов до разрушения при воздействии постоянного магнитного поля при этих значениях составляет: 278988 при $B = 0,4$ Тл, 192744 при $B = 0,5$ Тл (рис. 5), что на 40 и на 59 % ниже, чем при испытании без включения магнитного поля.

Выявленный знакопеременный характер означает, что в зависимости от изменяющихся значений индукции магнитного поля количество циклов,

необходимых для разрушения образца, изменяется, это указывает на наличие сложности в механизмах взаимодействия между магнитным полем и структурой материала, что может вызывать как усиление, так и ослабление его усталостной прочности.

На рис. 7 можно наблюдать образовавшиеся в процессе разрушения ямки отрыва (микроуглубления) внутри излома диаметром от 50 до 100 мкм. Образование подобных микроуглублений является особенностью морфологии поверхности разрушения при пластическом течении металла в процессе деформации, в данном случае при усталостном нагружении. Частицы неметаллических включений или вторых фаз могут быть очагом зарождения микроуглублений. Поверхность излома в данной области (рис. 7) представлена также многочисленными трещинами, направленными от ямок отрыва, протяженностью 20–300 мкм.

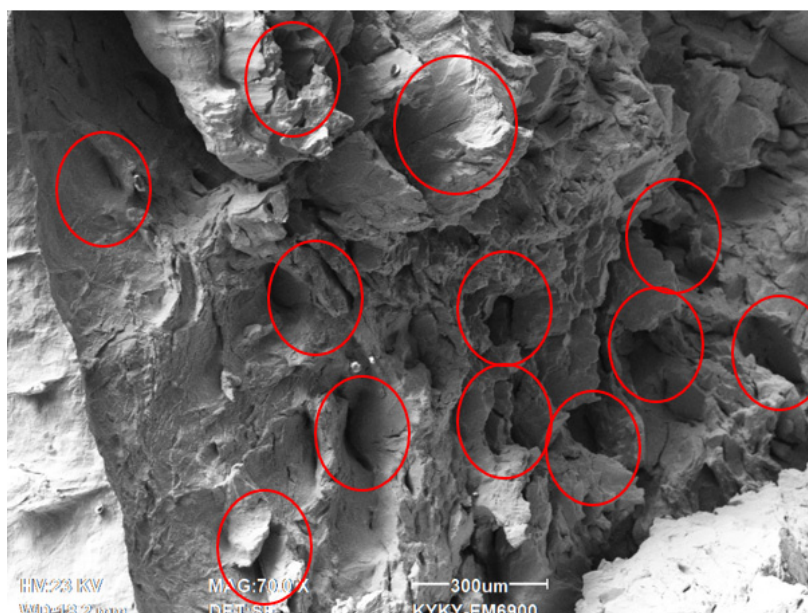


Рис. 7. Фрактограмма излома образца, разрушенного в процессе усталостного нагружения без применения магнитного поля

Далее проанализируем особенности излома и морфологию поверхности образца, полученного при усталостном разрушении с применением магнитного поля с индукцией магнитного поля 0,3; 0,4 и 0,5 Тл в процессе испытания.

Анализ фрактографических характеристик разрушений образцов свинца, полученных в процессе усталости, позволяет сделать следующие выводы. При умеренной индукции, около 0,4 Тл, наблюдается более «вязкая» картина разрушения с несколькими зонами: усталостные бороздки (зона (1)) формируются благодаря повышенной подвижности дислокаций, в то время как зона ускоренного роста трещины зона (2) возникает из-за активного накопления повреждений при циклических нагрузках. Фасетки скола указывают на разрушение вдоль определенных кристаллографических плоскостей, что связано с ориентацией вектора скольжения дислокаций в магнитном поле. При более

высокой индукции, около 0,5 Тл, процесс изменяет свой характер: на поверхности образуются многочисленные неоднородности, шероховатости, выступы и трещины, при этом четкое разграничение зон практически отсутствует. Это может быть связано с «закреплением» или запиранием части дислокаций магнитным полем (магнитопластический эффект), что приводит к образованию локальных пластических зон и, как следствие, к неоднородному рельефу излома.

На рис. 8 представлена фрактограмма излома образца, разрушенного при 0,4 Тл.

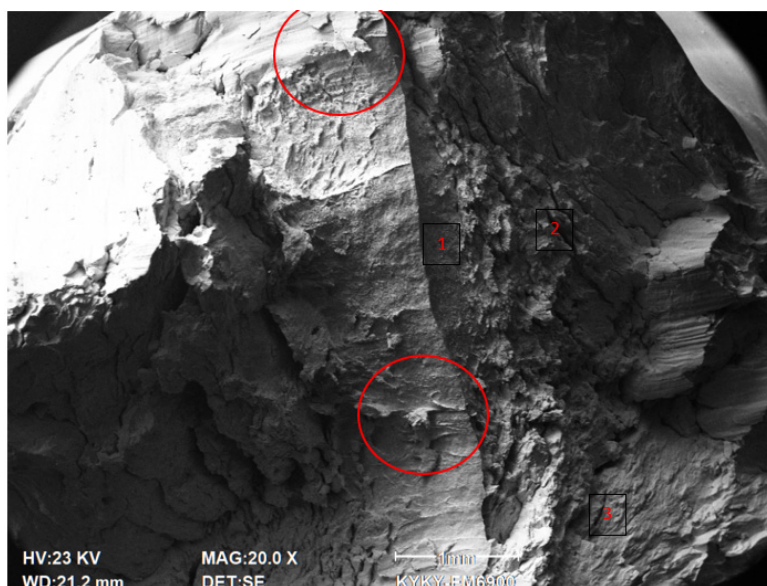


Рис. 8. Фрактограмма излома образца, разрушенного в процессе усталостного нагружения, с указанием зон разрушения (индукция магнитного поля $B = 0,4$ Тл)

Поверхность излома образцов, разрушенных при воздействии магнитного поля с индукцией 0,4 Тл, показывает вязкий, неоднородный характер излома, темно-серого цвета. Выявляются три зоны: 1 – зона среза (доллома); 2 – зона ускоренного развития трещины; 3 – зона стабильного роста трещины. Зона 1 протяженностью около 4 мм характеризуется наличием вязких усталостных бороздок. Зона ускоренного развития трещины 2 образована множеством трещин, расположенных параллельно волокнистой зоне.

Основываясь на экспериментальных данных усталостных испытаний диамагнетиков меди и свинца, сформулируем возможный механизм влияния магнитного поля на данные металлы.

Одним из механизмов, посредством которого постоянное магнитное поле может влиять на деформационные характеристики диамагнитных материалов, таких как технически чистая медь и свинец, является эффект Зеемана. Этот эффект заключается в расщеплении энергетических уровней электронов в атоме под действием внешнего магнитного поля. В контексте материаловедения, хотя расщепление уровней невелико, оно может существенно влиять на электронную структуру, плотность состояний и, как следствие, на поведение дислокаций и других дефектов кристаллической решетки [16–18].

Энергия расщепления определяется как

$$\Delta E = \mu_B \cdot g \cdot m_J \cdot B,$$

где $\mu_B = \frac{eh}{2m_e} \approx 9,27 \cdot 10^{-24}$ – магнетрон Бора; g – гиромагнитное отношение

(для электрона ≈ 2); m_J – магнитное квантовое число; B – индукция магнитного поля.

Для электронов в металле, особенно вблизи дефектов (например, дислокаций, вакансий или межузельных атомов), это расщепление может изменить энергетические уровни, тем самым влияя на вероятность термически активируемого движения дефектов [19, 20].

Так, скорость дислокационного скольжения (по механизму активации) при термически активируемых процессах под действием магнитного поля описывается уравнением Аррениуса:

$$v_d = v_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E(B)}{kT}\right),$$

где $\Delta E(B) = \Delta E_0 \pm \mu_B g B$ – энергия активации с учетом эффекта Зеемана; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Изменение ΔE даже на небольшую величину под действием магнитного поля приводит к экспоненциальному изменению скорости дислокационного скольжения, что непосредственно влияет на предел текучести, ползучести и усталостную прочность [21–23].

В наших работах [24, 25] показаны изменения скорости ползучести технически чистого свинца в зависимости от индукции магнитного поля, что можно описать зависимостью

$$\dot{\epsilon}(B) = \dot{\epsilon}_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q - \mu_B g B}{kT}\right).$$

Таким образом, при увеличении B , если Q уменьшается, скорость ползучести возрастает, эффект особенно будет замечен при низких температурах и в мягких магнетиках, таких как свинец.

Для меди и свинца, как диамагнетиков, магнитная восприимчивость $\chi < 0$, и в них не возникает собственного магнитного момента, однако внешнее поле все равно оказывает влияние через орбитальное движение электронов:

$$\vec{M} = \chi \cdot \vec{H},$$

где \vec{M} – намагниченность; \vec{H} – напряженность поля.

Даже слабое поле может повлиять на орбитальную структуру электронов и тем самым на межатомные силы.

В работе [26] экспериментально показано, что магнитное поле может вызывать перераспределение дислокаций в меди и изменять характер пластической деформации. Это подтверждает, что в диамагнитных металлах возможно значительное изменение микроструктуры и механических свойств под действием постоянного магнитного поля.

Для свинца, обладающего высокой пластичностью и низкой температурой плавления, магнитные поля могут особенно сильно влиять на термически активируемые процессы, такие как ползучесть, рекристаллизация и рост зерен. Подобные эффекты могут объясняться модификацией электронных состояний при помощи эффекта Зеемана, влияющего на энергетику межатомных взаимодействий и активационные барьеры [27–29].

Таким образом, можно утверждать, что эффект Зеемана представляет собой один из физических механизмов, способных объяснить наблюдаемые изменения деформационных характеристик меди и свинца при воздействии постоянного магнитного поля.

Список литературы

1. Li Q., Zhang Y., Zhao H. Influence of static magnetic field on fatigue damage evolution in copper alloys // *Materials Science and Engineering A*. 2020. Vol. 785. P. 139431. doi: 10.1016/j.msea.2020.139431
2. Zhou X., Lin M., Zhang H. Magnetic field effect on fatigue resistance of copper nanowires // *Journal of Applied Physics*. 2021. Vol. 130 (4). P. 045103. doi: 10.1063/5.0056374
3. Wang J., Liu F., Chen Y. Modulation of electronic structure in copper under magnetic field: implications for deformation mechanisms // *Acta Materialia*. 2023. Vol. 241. P. 118444. doi: 10.1016/j.actamat.2023.118444
4. Tan K., Wu Z., Feng Q. Probing electronic structure of copper under magnetic fields using X-ray magnetic circular dichroism // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021. Vol. 537. P. 168170. doi: 10.1016/j.jmmm.2021.168170
5. Chen L., Hu M., Sun D. Low-energy external field effects on creep and microdamage in pure lead // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 20. P. 3223–3230. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.09.165
6. Aksenova K., Zaguliaev D., Konovalov S., Shlyarov V., Ivanov Y. Influence of constant magnetic field upon fatigue life of commercially pure titanium // *Materials*. 2022. Vol. 15 (19). P. 6926. doi: 10.3390/ma15196926
7. Gu Q., Huang X., Xi J., Gao Z. The influence of magnetic field on fatigue and mechanical properties of a 35CrMo steel // *Metals*. 2021. Vol. 11 (4). P. 542. doi: 10.3390/met11040542
8. Zhu W., Yu S., Chen C., Shi L., Xu S., Shuai S., Hu T., Liao H., Wang J., Ren Z. Effects of static magnetic field on the microstructure of selective laser melted Inconel 625 superalloy: numerical and experimental investigations // *Metals*. 2021. Vol. 11 (11). P. 1846. doi: 10.3390/met11111846
9. Zhang Y., Tang Y., Liu Z., Li Q. Static magnetic field influence on grain refinement in metallic alloys // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. Vol. 504. P. 166666. doi: 10.1016/j.jmmm.2020.166666
10. Kim S., Lee H. J., Cho Y. Magnetic-field-assisted microstructure evolution in Fe-based alloys // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2020. Vol. 51. P. 3432–3441. doi: 10.1007/s11661-020-05757-0
11. Chen Y., Zhao J., Li S. Effects of static magnetic field on solidification structure of Cu-based alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 853. P. 157218. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.157218
12. Xie Y., Wang C., He X. Static magnetic field-induced grain growth and recrystallization in aluminum alloys // *Materials Characterization*. 2022. Vol. 186. P. 111835. doi: 10.1016/j.matchar.2022.111835
13. Liu H., Song Y., Zhang X. Microstructure and phase distribution control in magnetic-field-treated magnesium alloys // *Materials Science Forum*. 2023. Vol. 1076. P. 138–144. doi: 10.4028/p-4w1532

14. Ren X., Hu D., Wang F. Magnetic field-assisted phase transformation in steels: A review // *Journal of Materials Science & Technology*. 2021. Vol. 75. P. 56–69. doi: 10.1016/j.jmst.2020.09.063
15. Gao Y., Wang J., Li Z. Influence of static magnetic field on dislocation behavior and hardening in pure metals // *Metals*. 2022. Vol. 12 (4). P. 665. doi: 10.3390/met12040665
16. Mishra R. S., Mcfadden S. X., Valiev R. Z., Mukherjee A. K. Deformation mechanisms and tensile superplasticity in nanocrystalline materials // *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*. 1999. Vol. 51, № 1. P. 37–40. doi: 10.1007/s11837-999-0010-1 EDN TEHHQP.
17. Misumi I., Ohkubo H. Effect of Magnetic Field on Fatigue Crack Growth. Oak Ridge, TN : OSTI. 1993. 45 с.
18. Safran S. A. Statistical Thermodynamics of Surfaces, Interfaces, and Membranes. Oxford : Westview Press, 1994. 255.
19. Kraft M. [et al.]. Fatigue in Submicron Copper Films // *International Journal of Materials Research*. 2002. Vol. 93, № 4. P. 321–328.
20. Magnetic Effects in Solids / ed. by H. Kronmüller [et al.]. Berlin : Springer, 2003. 5121 p.
21. Haasen P. Physical Metallurgy. 3rd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 1996. 493 p.
22. Meyers M. A., Chawla K. K. Mechanical Behavior of Materials. Cambridge : Cambridge University Press, 2008. 680 p.
23. Kittel C. Introduction to Solid State Physics. Hoboken, New Jersey : Wiley, 2004. 704 p.
24. 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*. 2023. № 1 (43). С. 3–9. doi: 10.57070/2304-4497-2023-1(43)-3-9
25. Serebryakova A. A., Zaguliaev D. V., Shlyarov V. V. Influence of a Magnetic Field with Induction up to 0.5 T on the Dynamics of the Deformation Characteristics of Lead // *Physics of the Solid State*. 2023. Vol. 65, № 1. P. 27–31. doi: 10.1134/s1063783423700087
26. Konovalov S., Yaropolova N., Zagulyaev D., Ivanov Y. F., Gromov V. An Impact of the Magnetic Field on the Fine Copper Structure under Creep Failure Conditions // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 788. P. 111–116. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.788.111>
27. Mura T. Micromechanics of Defects in Solids. Berlin : Springer, 1987. 587 p.
28. Likhachev V. A. [et al.]. Magnetic Control of Structure and Properties of Materials. Moscow : Nauka, 2006. 345 p.
29. Шалимова К. В. Физика полупроводников. М. : Энергоатомиздат, 1985. 392 с.

References

1. Li Q., Zhang Y., Zhao H. Influence of static magnetic field on fatigue damage evolution in copper alloys. *Materials Science and Engineering A*. 2020;785:139431. doi: 10.1016/j.msea.2020.139431
2. Zhou X., Lin M., Zhang H. Magnetic field effect on fatigue resistance of copper nanowires. *Journal of Applied Physics*. 2021;130(4):045103. doi: 10.1063/5.0056374
3. Wang J., Liu F., Chen Y. Modulation of electronic structure in copper under magnetic field: implications for deformation mechanisms. *Acta Materialia*. 2023;241:118444. doi: 10.1016/j.actamat.2023.118444
4. Tan K., Wu Z., Feng Q. Probing electronic structure of copper under magnetic fields using X-ray magnetic circular dichroism. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021;537:168170. doi: 10.1016/j.jmmm.2021.168170
5. Chen L., Hu M., Sun D. Low-energy external field effects on creep and microdamage in pure lead. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;20:3223–3230. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.09.165

6. Aksenova K., Zaguliaev D., Kononov S., Shlyarov V., Ivanov Y. Influence of constant magnetic field upon fatigue life of commercially pure titanium. *Materials*. 2022;15(19):6926. doi: 10.3390/ma15196926
7. Gu Q., Huang X., Xi J., Gao Z. The influence of magnetic field on fatigue and mechanical properties of a 35CrMo steel. *Metals*. 2021;11(4):542. doi: 10.3390/met11040542
8. Zhu W., Yu S., Chen C., Shi L., Xu S., Shuai S., Hu T., Liao H., Wang J., Ren Z. Effects of static magnetic field on the microstructure of selective laser melted Inconel 625 superalloy: numerical and experimental investigations. *Metals*. 2021;11(11):1846. doi: 10.3390/met11111846
9. Zhang Y., Tang Y., Liu Z., Li Q. Static magnetic field influence on grain refinement in metallic alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020;504:166666. doi: 10.1016/j.jmmm.2020.166666
10. Kim S., Lee H. J., Cho Y. Magnetic-field-assisted microstructure evolution in Fe-based alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2020;51:3432–3441. doi: 10.1007/s11661-020-05757-0
11. Chen Y., Zhao J., Li S. Effects of static magnetic field on solidification structure of Cu-based alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;853:157218. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.157218
12. Xie Y., Wang C., He X. Static magnetic field-induced grain growth and recrystallization in aluminum alloys. *Materials Characterization*. 2022;186:111835. doi: 10.1016/j.matchar.2022.111835
13. Liu H., Song Y., Zhang X. Microstructure and phase distribution control in magnetic-field-treated magnesium alloys. *Materials Science Forum*. 2023;1076:138–144. doi: 10.4028/p-4w1532
14. Ren X., Hu D., Wang F. Magnetic field-assisted phase transformation in steels: A review. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021;75:56–69. doi: 10.1016/j.jmst.2020.09.063
15. Gao Y., Wang J., Li Z. Influence of static magnetic field on dislocation behavior and hardening in pure metals. *Metals*. 2022;12(4):665. doi: 10.3390/met12040665
16. Mishra R.S., Mcfadden S.X., Valiev R.Z., Mukherjee A.K. Deformation mechanisms and tensile superplasticity in nanocrystalline materials. *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*. 1999;51(1):37–40. doi: 10.1007/s11837-999-0010-1 EDN: TEHHQP
17. Misumi I., Ohkubo H. *Effect of Magnetic Field on Fatigue Crack Growth*. Oak Ridge, TN: OSTI. 1993:45.
18. Safran S.A. *Statistical Thermodynamics of Surfaces, Interfaces, and Membranes*. Oxford: Westview Press, 1994:255.
19. Kraft M. et al. Fatigue in Submicron Copper Films. *International Journal of Materials Research*. 2002;93(4):321–328.
20. Kronmüller H. et al. (ed.). *Magnetic Effects in Solids*. Berlin: Springer, 2003:5121.
21. Haasen P. *Physical Metallurgy*. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996:493.
22. Meyers M.A., Chawla K.K. *Mechanical Behavior of Materials*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008:680.
23. Kittel C. *Introduction to Solid State Physics*. Hoboken, New Jersey : Wiley, 2004:704.
24. Serebryakova A.A., Zagulyayev D.V., Shlyarov V.V., Gromov V.E. The influence of a magnetic field with induction of 0.4 T on the plastic properties of lead C2. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrialnogo universiteta = Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;(1):3–9. (In Russ.). doi: 10.57070/2304-4497-2023-1(43)-3-9
25. Serebryakova A.A., Zaguliaev D.V., Shlyarov V.V. Influence of a Magnetic Field with Induction up to 0.5 T on the Dynamics of the Deformation Characteristics of Lead. *Physics of the Solid State*. 2023; 65(1):27–31. doi: 10.1134/s1063783423700087
26. Kononov S., Yaropolova N., Zagulyayev D., Ivanov Y. F., Gromov V. An Impact of the Magnetic Field on the Fine Copper Structure under Creep Failure Conditions. *Applied Mechanics and Materials*. 2015;788:111–116. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.788.111

27. Mura T. *Micromechanics of Defects in Solids*. Berlin: Springer, 1987:587.
28. Likhachev V.A. et al. *Magnetic Control of Structure and Properties of Materials*. Moscow: Nauka, 2006:345.
29. Shalimova K.V. *Physics of Semiconductors*. Moscow: Energoatomizdat, 1985:392 (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Виталий Владиславович Шляров
научный сотрудник управления
научных исследований, Сибирский
государственный индустриальный
университет (Россия, Кемеровская
обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

E-mail: shlyarov_vv@sibsiu.ru

Vitaliy V. Shlyarov
Researcher, Scientific Research
Department, Siberian State Industrial
University (42 Kirova street, Novokuznetsk,
Kemerovo region, Russia)

Анна Александровна Серебрякова
научный сотрудник управления
научных исследований, Сибирский
государственный индустриальный
университет (Россия, Кемеровская
обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

E-mail: serebryakova_aa@sibsiu.ru

Anna A. Serebryakova
Researcher, Scientific Research
Department, Siberian State Industrial
University (42 Kirova street, Novokuznetsk,
Kemerovo region, Russia)

Крестина Владимировна Аксенова
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры естественнонаучных
дисциплин имени профессора
В. М. Финкеля, старший научный
сотрудник управления научных
исследований, Сибирский
государственный индустриальный
университет (Россия, Кемеровская
обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

E-mail: 19krestik91@mail.ru

Krestina V. Aksenova
Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor of the
sub-department of natural science
disciplines named after Professor
V.M. Finkel, senior researcher,
Scientific Research Department, Siberian
State Industrial University (42 Kirova street,
Novokuznetsk, Kemerovo region, Russia)

Дмитрий Валерьевич Загуляев
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры естественнонаучных
дисциплин имени профессора
В. М. Финкеля, начальник управления
научных исследований, Сибирский
государственный индустриальный
университет (Россия, Кемеровская
обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru

Dmitriy V. Zaguliaev
Doctor of engineering sciences, associate
professor, professor of the sub-department
of natural science disciplines named after
Professor V.M. Finkel, senior researcher,
Scientific Research Department, Siberian
State Industrial University (42 Kirova street,
Novokuznetsk, Kemerovo region, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 14.05.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 27.06.2025

Принята к публикации / Accepted 15.07.2025