

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**TECHNICAL SCIENCES**

УДК 624.01:620.184.6(084.4)

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-1-78-88>

Поступило в редакцию 26.03.2025

Received 26.03.2025

Член-корреспондент В. В. Рубаник¹, Ю. В. Царенко¹, А. Б. Найзабеков², С. Н. Лежнев²

¹*Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси,
пр. Генерала Лядникова, 13, 210009, Витебск, Республика Беларусь*

²*Рудненский индустриальный университет,
ул. 50 лет Октября, 38, Рудный, Костанайская область, Республика Казахстан*

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
МЕТОДОМ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ**

Аннотация. На образцах меди М1 и медных сплавов марки Л63 и ЛЖМц66-4-7, полученных методом радиально-сдвиговой прокатки, установлены закономерности формирования структуры и механических свойств ультрамелкозернистой меди и ее сплавов при ультразвуковой обработке. Методом дифракции обратно рассеянных электронов определены ориентировки индивидуальных зерен, локальная текстура, а также идентифицированы фазы в исследуемых образцах. Определены локальные и общие деформации, количество рекристаллизованных и деформированных зерен, их размеры и ориентацию. Методами рентгеноструктурного анализа и сканирующей электронной микроскопии исследована структура ультрамелкозернистых материалов и их механические свойства. Установлена связь параметров ультразвукового воздействия с микроструктурой и физико-механическими свойствами ультрамелкозернистых образцов меди и латуни. Показано, что ультразвуковое воздействие на материалы после их радиально-сдвиговой прокатки при определенных амплитудах механических напряжений способствует релаксации неравновесной структуры границ зерен и снятию, таким образом, внутренних напряжений.

Ключевые слова: ультрамелкозернистые материалы, ультразвуковая обработка, радиально-сдвиговая прокатка, микротвердость, предел прочности, дифракция обратно рассеянных электронов

Для цитирования. Влияние ультразвуковой обработки на структуру материалов при интенсивной пластической деформации методом радиально-сдвиговой прокатки / В. В. Рубаник, Ю. В. Царенко, А. Б. Найзабеков, С. Н. Лежнев // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2026. – Т. 70, № 1. – С. 78–88. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-1-78-88>

Corresponding Member Vasili V. Rubanik¹, Yury V. Tsarenko¹, Abdrakhman B. Naizabekov², Sergey N. Lezhnev²

¹*Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus,
13, General Lyudnikov Ave., 210009, Vitebsk, Republic of Belarus*

²*Rudny Industrial University,
38, 50 let Ortyabrya Str., Rudny, Kostanay Region, Republic of Kazakhstan*

**INFLUENCE OF ULTRASONIC TREATMENT ON THE STRUCTURE OF MATERIALS SUBJECT
TO INTENSIVE PLASTIC DEFORMATION BY RADIAL-SHEAR ROLLING**

Abstract. The subject of study comprises samples of M1 copper and copper alloys of the L63 and LZHMts66-4-7 grades obtained by radial-shear rolling. The patterns of formation of the structure and mechanical properties of ultrafine-grained copper and its alloys obtained by radial-shear rolling under ultrasonic treatment are established. The electron backscatter diffraction method is used to determine the orientations of individual grains, local texture, and identify phases in the samples under study. Local and general deformations, the number of recrystallized and deformed grains, their sizes and orientations are determined. The structure of ultrafine-grained materials and their mechanical properties are studied using X-ray diffraction analysis and scanning electron microscopy. The relationship between the parameters of ultrasonic action and the microstructure and physico-mechanical properties of ultrafine-grained copper and brass samples is established. It is shown that

ultrasonic action on materials after their radial-shear rolling at certain amplitudes of mechanical stresses promotes relaxation of the nonequilibrium structure of grain boundaries and, thus, the removal of internal stresses.

Keywords: ultrafine-grained materials, ultrasonic processing, radial-shear rolling, microhardness, tensile strength, electron backscatter diffraction

For citation. Rubanik V. V., Tsarenko Yu. V., Naizabekov A. B., Lezhnev S. N. Influence of ultrasonic treatment on the structure of materials subject to intensive plastic deformation by radial-shear rolling. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2026, vol. 70, no. 1, pp. 78–88 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-1-78-88>

Введение. Требования к свойствам конструкционных материалов в современных условиях становятся более высокими и дифференцированными. В первую очередь, это относится к ответственным металлическим изделиям, работающим в экстремальных условиях эксплуатации в аэрокосмической, химической, медицинской и других отраслях промышленности. Один из методов улучшения эксплуатационных характеристик, в частности за счет повышения прочности материалов, состоит в уменьшении размеров кристаллитов от микронных до ультрамелкозернистого (УМЗ) и наноразмерного состояния (НС).

Формирование УМЗ структуры металлов и сплавов методами интенсивного пластического деформирования (ИПД) позволяет оказывать значительное влияние на деформационное поведение и механические свойства металлов и сплавов, что дает основания считать ИПД весьма перспективным методом управления структурой и свойствами металлических материалов. Наибольший интерес к наноструктурированным материалам обусловлен не только их уникальными физико-химическими свойствами, но и весьма высокими механическими свойствами: прочностью, пластичностью, износостойкостью [1; 2]. В силу того, что УМЗ материалы появились сравнительно недавно, их устойчивость к внешним воздействиям, в частности, к пластической деформации и нагреву изучена недостаточно. Недостаточно также изучены процессы и способы обработки таких материалов.

Общим для УМЗ и НС материалов, полученных деформационными методами наноструктурирования, является то, что их микроструктура неравновесна (метастабильна). Электронно-микроскопические исследования показывают диффузный дифракционный контраст границ зерен в УМЗ и НС материалах, свидетельствующий о наличии высоких внутренних напряжений. Источниками этих напряжений являются неравновесные границы зерен, сформировавшиеся при пластической деформации. Высокая плотность кристаллических дефектов и значительная запасенная энергия приводят к низкой термической стабильности и электропроводности нанометаллов, что затрудняет их применение. Для устранения этих проблем материаловеды предлагают различные методы обработки, такие как неполный рекристаллизационный отжиг, градиентная деформация и т. д., чтобы создать гетерогенную микроструктуру в металле, а затем оптимизировать соотношение прочности и пластичности/проводимости.

Нами [3–5] впервые было показано, что ультразвуковая обработка (УЗО) является эффективным способом релаксации структуры сильно деформированных материалов, в том числе УМЗ материалов, полученных деформационными методами, которая приводит к повышению доли большеугловых границ зерен, релаксации неравновесных границ и тройных стыков зерен, не приводя при этом к значительному росту зерен. Эффект релаксации структуры зависит от амплитуды ультразвука, т. е. существуют некоторые оптимальные амплитуды напряжений, при которых он максимален. Показано, что ультразвуковое воздействие приводит к заметному повышению термической стабильности структуры УМЗ никеля, связанному с релаксацией структуры границ зерен, снижением внутренних напряжений и стабилизацией структуры материала при этом. Установлен эффект роста пластичности при УЗО, происходящий одновременно с ростом предела текучести и сохранением предела прочности УМЗ никеля, полученного равноканальным угловым прессованием, что может иметь практически важное значение для повышения комплекса механических свойств УМЗ материалов [3–6].

Установлено, что УЗО позволяет снизить плотность дефектов УМЗ образцов никеля [5], оказывает влияние на деформационное поведение и характер мартенситных превращений в материалах [7].

Главный недостаток наиболее распространенных и изученных методов ИПД, препятствующий широкому промышленному внедрению, ограничения в размерах образцов и крайне низкая технологичность производства. Устранить эти недостатки можно, используя способ ИПД за счет радиально-сдвиговой прокатки (РСП), которая позволяет получать УМЗ состояние, но уже в длинномерных круглых прутках с некоторыми особенностями распределения структуры [8]. В процессе РСП, помимо значительного измельчения всей структуры заготовки, происходит посылное ориентирование новой измельченной структуры, что связано с характером движения различных слоев металла. Особенностью процесса является схема напряженно-деформированного состояния, позволяющая формировать мелкозернистую структуру в поверхностном слое деформируемой заготовки [8; 9], кроме того, РСП является частным случаем винтовой прокатки и пока единственным способом получения проката с круглой формой поперечного сечения, а также служит для деформации сплошных заготовок с интенсивным уплотнением и высоким уровнем сдвиговых деформаций. Метод РСП позволяет деформировать длинномерные объемы, достигая значений накопленной степени деформации 10 и более. При этом интенсивно измельчается структура металла и повышаются его свойства, в ряде случаев до рекордных уровней [8]. В настоящее время это один из наиболее перспективных и доступных способов интенсивной пластической деформации для широкого промышленного производства структурированных прутков из различных материалов.

Существенным преимуществом РСП является полное структурное прорабатывание металла по всему сечению и его уплотнение, повышение физико-механических свойств проката, благодаря значительному углу подачи достигается увеличение технологической пластичности заготовок более чем на 300 %. В очаге деформации радиально-сдвиговой прокатки реализуется схема напряженно-деформированного состояния, близкая к всестороннему сжатию с большими сдвиговыми деформациями, являющаяся благоприятной для формирования УМЗ структуры. Основная особенность радиально-сдвиговой прокатки – немонотонность и турбулентность деформации, а также отличия в пластическом течении и проработке структуры разных зон заготовки вследствие траекторно-скоростных особенностей процесса [8; 9].

Результаты исследований [8] показали, что ультрамелкозернистая структура в прутке, подвергнутом деформации на стане радиально-сдвиговой прокатки, распространяется на глубину не менее четверти радиуса прутка от его поверхности. Переходная зона находится в области между $0,5R$ и $0,25R$ сечения прутка. Вследствие структурной неоднородности по сечению прутка наблюдается и плавное падение уровня микротвердости к центральной зоне прутка, что свидетельствует о градиентном характере сформировавшейся в продеформированных на стане радиально-сдвиговой прокатки прутках из стали марки 08X18H10T [8].

Как уже отмечалось, УЗО позволяет улучшить структуру объемно-деформированного металла после равноканального углового прессования и кручения под высоким давлением. В связи с этим логично предположить, что УЗО окажет влияние на структуру и свойства металлов, деформированных методом РСП. Ранее такие исследования не проводились.

Целью исследования является установление закономерностей формирования структуры, механических свойств ультрамелкозернистой меди и ее сплавов, полученных методом радиально-сдвиговой прокатки, при ультразвуковой обработке.

Материалы и методы исследования. Исследования проводили на образцах из технической меди М1 и медных сплавах ЛБ3 и ЛЖМц66-4-7 толщиной 0,45–0,6 мм в виде дисков диаметром 15 мм, которые были вырезаны из цилиндрических образцов, полученных радиально-сдвиговой прокаткой. При проведении экспериментов была выбрана максимальная скоростная характеристика для стана радиально-сдвиговой прокатки РСП 10-30, а именно, скорость вращения валков 100 об/мин.

Технология прокатки медных и латунных заготовок на стане радиально-сдвиговой прокатки РСП 10-30 заключалась в следующем. Заготовки, подвергнутые предварительной термической обработке [9], перед деформированием нагревали до температуры 500 °С с выдержкой в трубчатой печи фирмы Nabertherm для выравнивания температуры по сечению образцов. В случае деформирования меди заготовки предварительному нагреву не подвергались, и обработка осу-

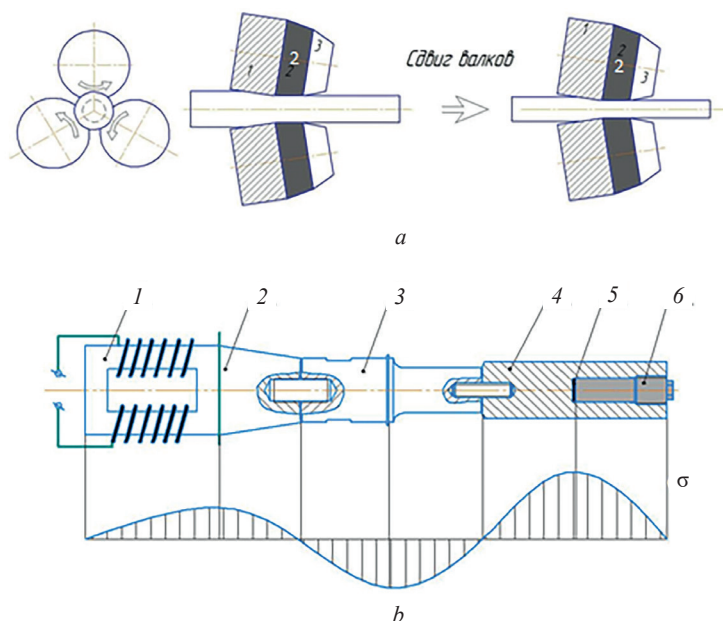


Рис. 1. Схемы радиально-сдвиговой прокатки (а) и ультразвуковой обработки ультрамелкозернистых образцов в виде дисков (b): 1 – ультразвуковой преобразователь, 2 – концентратор, 3 – бустер, 4 – волновод, 5 – обрабатываемый образец, 6 – поджимной винт

Fig. 1. Radial shear rolling scheme (a) and ultrasonic treatment of ultrafine-grained disk-shaped samples (b): 1 – ultrasonic transducer, 2 – concentrator, 3 – booster, 4 – waveguide, 5 – processed sample, 6 – clamping screw

ществлялась при комнатной температуре. Температура заготовок при подаче в валки прокатного стана составляла для латуни марок Л63 и ЛЖМц 66-4-7 500 °С. После чего было осуществлено деформирование данных заготовок на стане РСП до диаметра 16 мм с шагом абсолютного обжатия по диаметру 2,0 мм по стандартной схеме деформирования, представленной на рис. 1, а. На последней стадии шаг абсолютного обжатия по диаметру составлял 0,9–1,0 мм до диаметра около 15 мм.

Для проведения ультразвуковой обработки были использованы образцы в виде дисков диаметром 15 мм, которые нарезались из цилиндрических прутков после радиально-сдвиговой прокатки на высокоточном отрезном станке с охлаждением. Диски закрепляли внутри полости волновода продольных ультразвуковых колебаний в пучности механических напряжений с помощью специального винта, обеспечивающего надежный акустический контакт между волноводом и обрабатываемым образцом [10] (рис. 1, b).

Питание преобразователя ПМС15А-18 осуществляли от ультразвукового генератора УЗГ2-4М. Ультразвуковую обработку образцов проводили с амплитудой знакопеременных механических напряжений до 85 МПа. Обработка выполнялась при постоянном усилии поджатия образца к волноводу в пучности напряжений, затягивающий момент винта составлял 90 Н·м.

Валки стана РСП (рис. 1, а) имеют два обжимных участка 1 и 3 и расположенный между ними калибрующий участок 2.

Микротвердость образцов меди и латуни в УМЗ состоянии перед и после ультразвуковой обработки при различных значениях амплитуды знакопеременных напряжений исследовали путем измерения на приборе Micromet-II с нагрузкой 50 г по ГОСТ 9450-76. Исследование дифракционной картины структуры образцов проводили на аттестованном сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения Mira фирмы Tescan (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором и EBSD-детектором.

Результаты и их обсуждение. Анализ результатов, представленных на рис. 2, показывает, что после радиально-сдвиговой прокатки наблюдается определенное распределение микротвердости по сечению образцов меди и латуни. В центральной части наблюдается некоторое снижение микротвердости в пределах 14–16 %. Это согласуется с теоретическими положениями

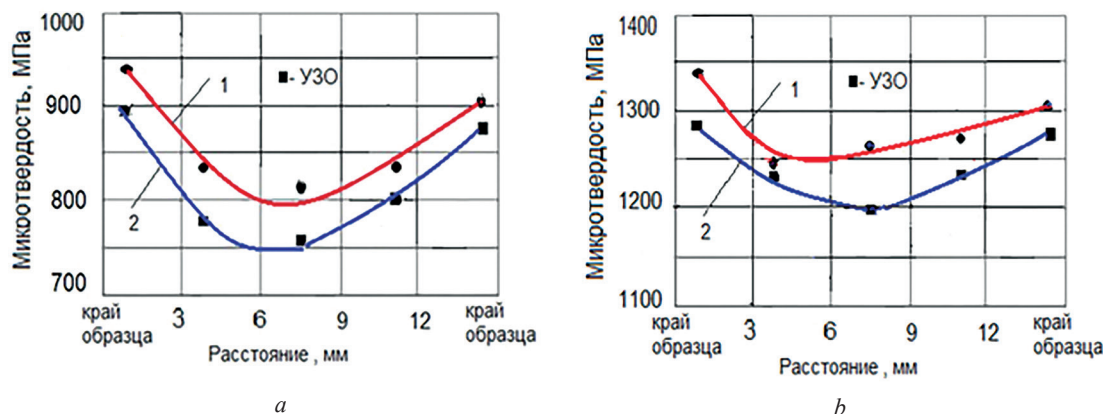


Рис. 2. Распределение микротвердости по диаметру диска меди М1 (а) и латуни ЛЖМц66-47 (b) после радиально-сдвиговой прокатки: 1 – без УЗО, 2 – после УЗО 40 МПа

Fig. 2. Distribution of microhardness by the diameter of the disk of copper M1 (a) and brass LZhMts66-47 (b) after radial-shear rolling: 1 – without UST; 2 – after UST 40 MPa

по радиально-сдвиговой прокатке, согласно которым в осевой зоне заготовки преобладает ламинарное течение металла, сходное с таковым при продольной прокатке или прессовании. В результате осевая зона имеет структуру, отличную от периферийной зоны. Это связано с тем, что в периферийной зоне наблюдается более высокая турбулентность деформации и выше эквивалентная степень деформации, чем в центральной зоне [8].

Как видно (рис. 2), ультразвуковая обработка образцов с амплитудой напряжений 40 МПа приводит к снижению микротвердости по всему сечению, причем максимальное снижение наблюдается в центральной части образцов и составляет 6–7 %. Ультразвуковая обработка при $\sigma = 85$ МПа также приводит к снижению микротвердости меди и латуни соответственно на 6 и 4,5 % по сравнению с образцами без ультразвуковой обработки. Полученные результаты согласуются с результатами по измерению микротвердости после УЗО образцов меди и никеля, полученных методом сдвига, обусловленного трением между инструментом и образцом под высоким гидростатическим давлением [10; 11].

Исследования микроструктуры (рис. 3), проведенные на световом микроскопе MeF-3 фирмы Reichert (Австрия), показали, что ультразвуковая обработка образцов меди приводит к некоторому изменению размеров зерна. Размеры зерна заготовки меди М1 после радиально-сдвиговой прокатки имеют в центральной части более высокие значения, в пределах от 40 до 100 мкм, в то время как в поверхностных слоях наблюдается существенное измельчение структуры, при этом размеры зерна уменьшаются до 30–40 мкм (рис. 3, б).

После УЗО с амплитудой напряжений 70 МПа в поверхностных слоях образца меди наблюдается некоторое увеличение размера зерна до 35–40 мкм, в то время как в центральной части образца размер зерна несколько уменьшается. Образование спиральной макроструктуры при радиально-сдвиговой прокатке вызвано силовыми и кинематическими условиями воздействия технологического инструмента на заготовку [8]. Ультразвук вызывает ряд эффектов при взаимодействии с дефектами структуры, и какой из этих эффектов будет преобладать, зависит как раз от исходной структуры материала. Воздействие УЗО способствует релаксации структуры, при которой дефекты выстраиваются в более равновесные конфигурации, что приводит к снижению внутренних напряжений для наиболее упрочненных поверхностных слоев заготовки. Это, в свою очередь, влияет на структурные свойства, что и наблюдается в эксперименте. При амплитудах ультразвуковых колебаний, превышающих пороговое значение, происходит размножение дислокаций, и как результат, ультразвук оказывает упрочняющее действие на центральные слои заготовки, вызывая тем самым некоторое уменьшение размера зерна [11; 12].

Для медных сплавов марки Л63 и ЛЖМц66-4-7, деформированных методом радиально-сдвиговой прокатки, характер изменения размера зерен в поверхностных и центральных слоях заго-

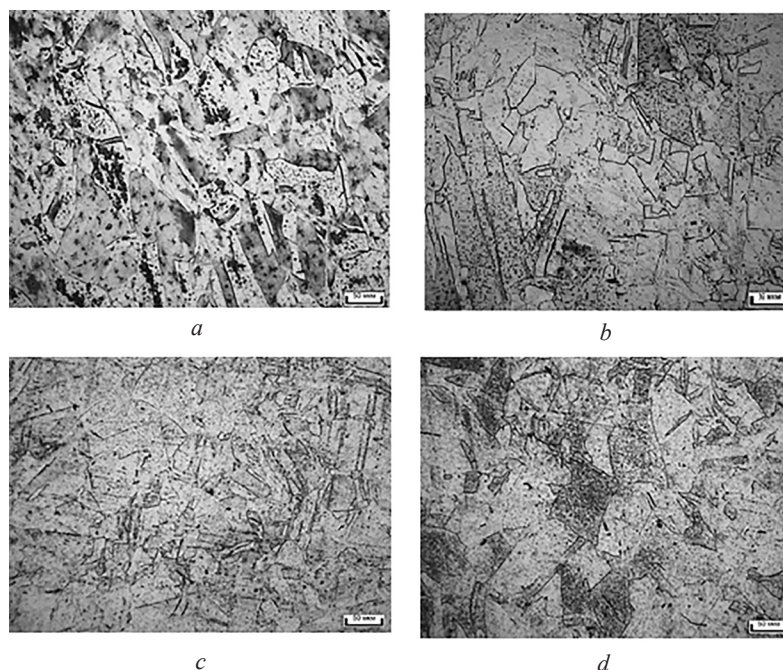


Рис. 3. Микроструктура образцов меди у края поверхности (*a, c*) и в центре (*b, d*), $\times 100$: *a, b* – без УЗО; *c, d* – УЗО 70 МПа

Fig. 3. Microstructure of copper samples at the edge of the surface (*a, c*) and in the center (*b, d*), $\times 100$: *a, b* – without UST; *c, d* – UST 70 MPa

товки носит аналогичный характер. Так, образцы сплава Л63 в поверхностных областях зерна имеют размер 5–20 мкм, а в центре – 10–40 мкм.

Анализ исследованных структур меди (рис. 4) вблизи поверхности деформированной заготовки показал, что в образцах после УЗО и без УЗО существуют замкнутые и незамкнутые границы зерен. В этом образце основная масса границ имеет преимущественно угол разориентации менее 15° .

Метод дифракции отраженных электронов (EBSD, ДОРЭ) [13] позволяет определить величину углов разориентации границ зерен в структуре металла, причем границы разориентировки выше 15° считаются большеугловыми границами зерен, а меньше 15° – малоугловыми.

Для анализа изменения текстуры при УЗО были построены обратные полюсные фигуры для каждого состояния (рис. 4, *e, f*). В исходном деформированном образце меди можно выделить две области с определенными преимущественными кристаллическими направлениями. Однако после ультразвуковой обработки одна из компонент текстуры ослабевает. Это можно объяснить тем, что генерируемые при УЗО дислокации, встраиваясь в границы зерен, увеличивают их взаимную разориентацию и приводят к повороту зерен. Вместе с тем можно отметить повышенную полюсную плотность зерен, лежащих плоскостью (111) в плоскости поверхности образца.

На рис. 4, *g, h* представлены размеры зерен образцов меди после радиально-сдвиговой прокатки и их распределение по размерным группам, а также распределение углов разориентации между зернами (рис. 4, *i, j*). В основном зерна имеют размеры около 10 мкм, наблюдается значительное количество малоугловых границ.

Из анализа результатов, представленных на рис. 4, следует, что после ультразвуковой обработки образцов меди, деформированных методом радиально-сдвиговой прокатки, вблизи поверхностного слоя (до 0,25 радиуса заготовки) доля большеугловых границ в структуре увеличивается и с ростом УЗО до 85 МПа указанная зависимость сохраняется.

Карты рекристаллизации образцов меди (рис. 5) показывают соотношение деформированных и рекристаллизованных зерен в структуре металла. Карты рекристаллизации были сформированы следующим образом, сначала проводилась реконструкция зерен, затем программным путем измерялись средние разориентировки в пределах зерна, если средний угол разориентировки в зерне превышает 2° , то зерно учитывалось как деформированное, при этом некоторые

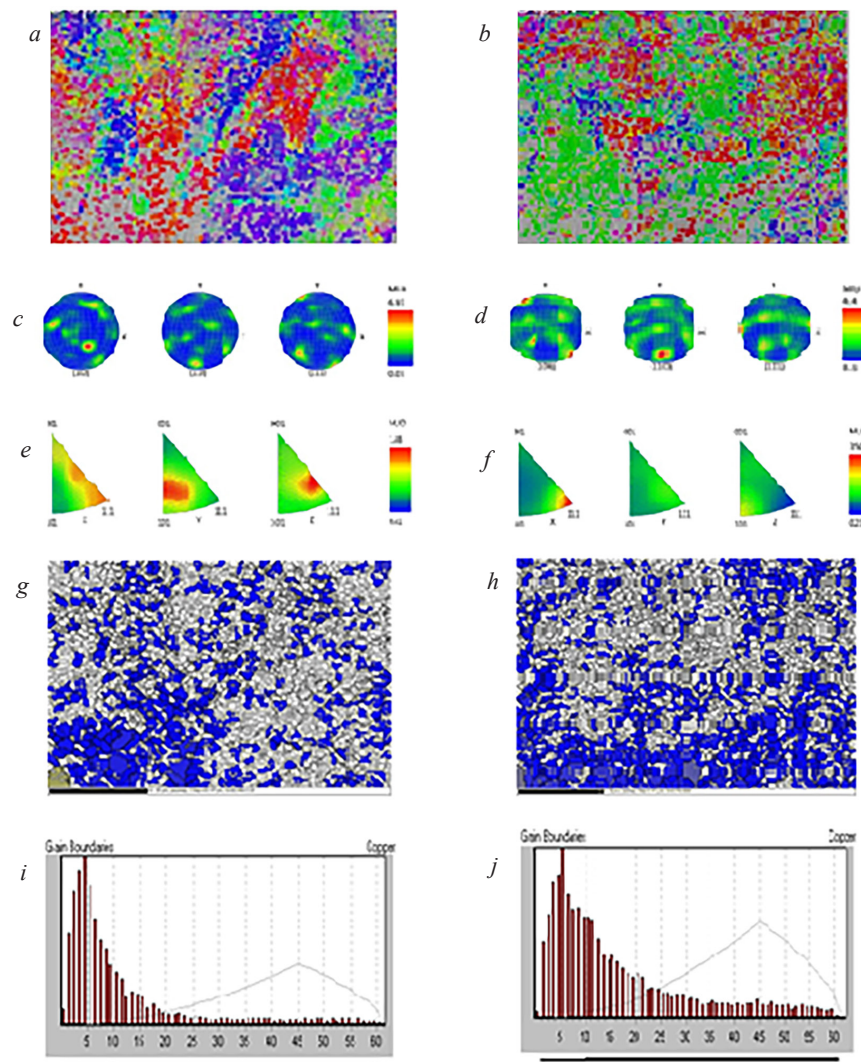


Рис. 4. Распределение зерен по размерам (*a, b*); прямые (*c, d*) и обратные (*e, f*) полюсные фигуры, распределение зерен по размерным группам (*g, h*), распределение углов разориентации между зернами (*i, j*) образцов меди М1 после радиально-сдвиговой прокатки: *a, c, e, g, i* – без УЗО; *b, d, f, h, j* – после УЗО 40 МПа

Fig. 4. Distribution of grain sizes (*a, b*); direct (*c, d*) and inverse (*e, f*) pole figures, distribution of grains by size groups (*g, h*), distribution of misorientation angles between grains (*i, j*) of copper samples M1 after radial-shear rolling: *a, c, e, g, i* – without UST; *b, d, f, h, j* – after UST 40 MPa

зерна состояли из субзерен. В случае, если внутренняя разориентировка в субзерне не превышает 2° , а от субзерна к субзерну превышает, то зерно идентифицировалось как субструктурное, т. е. полигонизованное [13].

Если средний угол разориентировки не превышал 2° , то зерно считалось рекристаллизованным. На картах рекристаллизации для исследуемых образцов меди: красным выделены деформированные зерна, желтым – субструктурные (полигонизованные зерна), синим – рекристаллизованные. Как видно (рис. 5) после интенсивной пластической деформации методом радиально-сдвиговой прокатки и последующей ультразвуковой обработки доля рекристаллизованных и полигонизованных зерен увеличивается. Причем в большинстве случаев они находятся вблизи высокоугловых границ зерен и иногда в объеме больших зерен. Можно предположить, что зародыши рекристаллизации формируются в наиболее искривленных участках кристаллической решетки материала, т. е. у высокоугловых границ зерен.

Как известно, пластическая деформация в объеме металла начинается лишь в случае, когда внешнее напряжение в кристалле достигает критического скалывающего напряжения или пре-

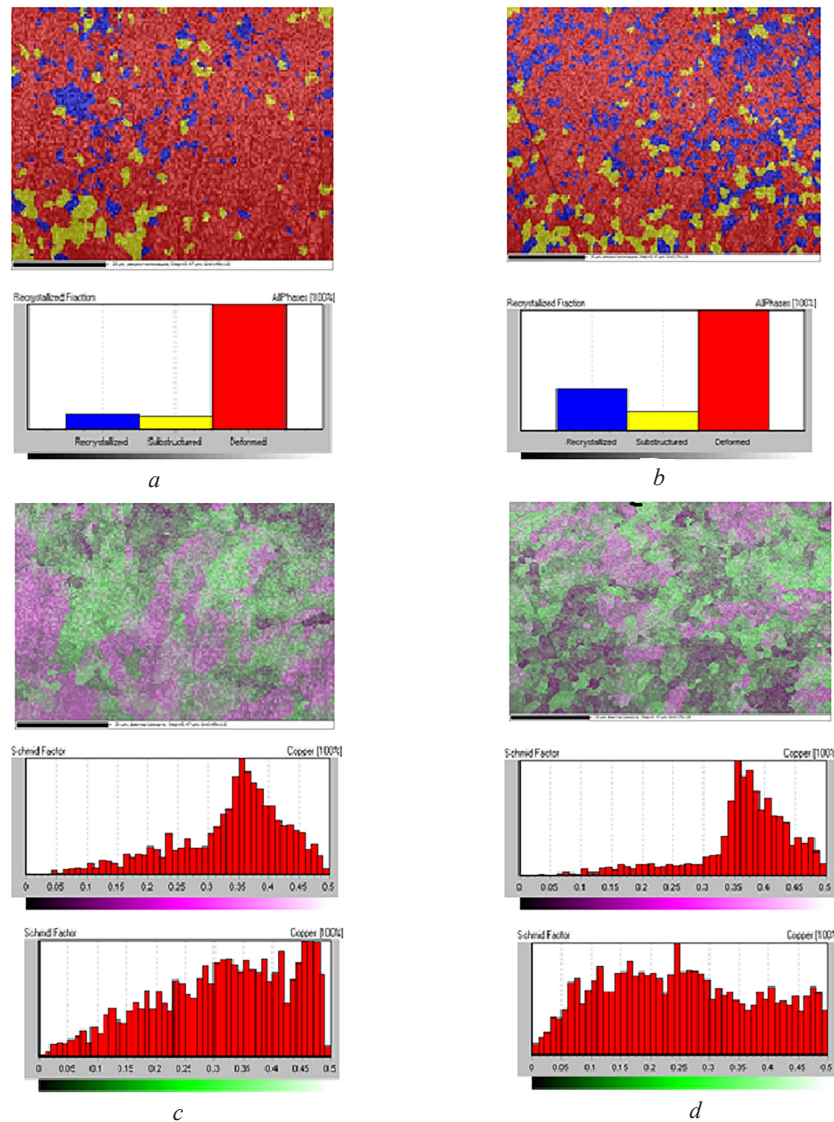


Рис. 5. Карты рекристаллизации зерен (*a, b*) и карты фактора Шмида (*c, d*) для образцов меди после радиально-сдвиговой прокатки: *a, c* – без УЗО; *b, d* – после УЗО 40 МПа

Fig. 5. Grain recrystallization maps (*a, b*) and Schmid factor maps (*c, d*) for copper samples after radial-shear rolling: *a, c* – without UST; *b, d* – after UST 40 MPa

дела текучести в той плоскости и в том направлении, в котором она осуществляется [13], что соответствует величине критического скалывающего напряжения, т. е. закону Шмида. При этом из всевозможных равноправных систем направлений и плоскостей скольжения первой начнет действовать система, в которой раньше всего достигнет своего максимального значения составляющая внешнего напряжения. Карты Шмида показывают, в каком зерне начнется раньше деформация при одноосной нагрузке. В тех областях, где цвет зерна светло-зеленый, деформация начнется раньше, чем в более темных зернах (рис. 5, *c, d*). По данным картам можно судить об однородности распределения деформации в металле и склонности металла к деформации.

Для определения количественных параметров структуры ультрамелкозернистой меди (рис. 6) был использован метод рентгеноструктурного анализа (РСА). Рентгеноструктурные исследования образцов меди, полученных методом радиально-сдвиговой прокатки, показывают наличие искажений решетки, значительных микронапряжений, которые вызывают уширение рентгеновских пиков. Также размер областей когерентного рассеяния (ОКР), полученный методом РСА, заметно меньше размера зерен, рассчитанного из электронно-микроскопических

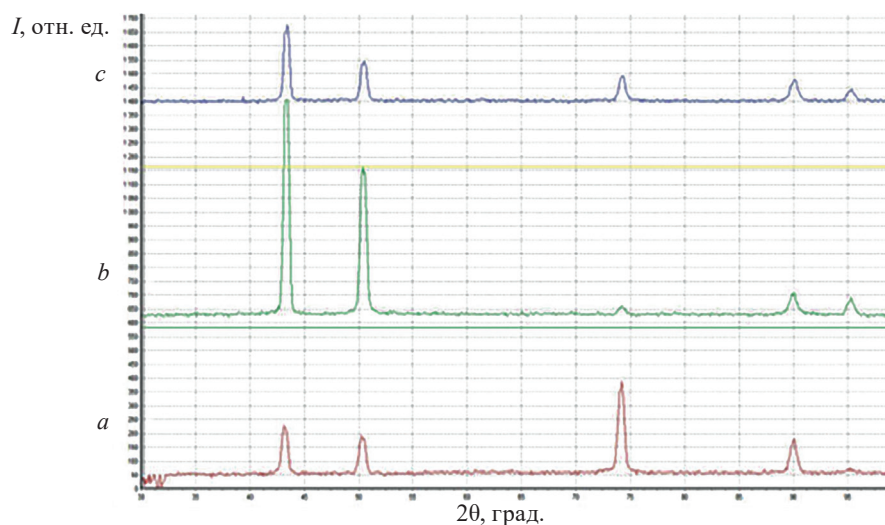


Рис. 6. Дифрактограмма ($\text{CuK}\alpha$) образца меди М1 после РСП (a – без УЗО, b – УЗО 40 МПа, c – УЗО 70 МПа)

Fig. 6. Diffraction pattern ($\text{CuK}\alpha$) of copper sample M1 after RSP (a – without UST, b – UST 40 MPa, c – UST 70 MPa)

снимков, для всех рассмотренных случаев деформационной обработки. Метод РСА позволяет определять размеры ОКР, соответствующих внутренней области зерен, однако не включающих в себя приграничные сильно искаженные области, образующиеся в материалах при интенсивной пластической деформации. Структура, формирующаяся при ИПД, является весьма неоднородной, внутренние объемы зерен могут включать в себя субструктурные фрагменты, которые методом РСА определяются как отдельные ОКР.

Снижение уширения рентгеновских линий свидетельствует как об уменьшении микронапряжений в исследуемом образце после ультразвуковой обработки образцов меди (рис. 6), так и о некотором росте областей когерентного рассеяния. Размер ОКР, как правило, отождествляют со средним размером кристаллитов, определив который можно судить о характере изменения размера кристаллитов в материале в зависимости от условий обработки [14; 15]. По результатам РСА проведена оценка размеров ОКР образцов по уширению рефлексов на полученных дифрактограммах по формуле Шеррера–Селякова (таблица).

Области когерентного рассеяния образцов меди и латуни

Coherent scattering regions of copper and brass samples

Материал Material	Вид обработки Processing type	Размер ОКР, нм OCR size, nm
Медь М1	РСП, без УЗО	13,5
	РСП, УЗО 40 МПа	15,1
	РСП, УЗО 70 МПа	16,3
Латунь Л63	РСП, без УЗО	12,5
	РСП, УЗО 40 МПа	14,0
	РСП, УЗО 70 МПа	13,7
Латунь ЛЖМц 66-4-7	РСП, без УЗО	12,8
	РСП, УЗО 40 МПа	13,8
	РСП, УЗО 70 МПа	13,9

Как видно (таблица) ультразвуковая обработка привела к росту ОКР у всех образцов меди и латуни от 8 до 20 %, причем наибольший рост наблюдался для меди М1.

Закключение. Установлена связь параметров ультразвукового воздействия с микроструктурой и физико-механическими свойствами УМЗ образцов меди и латуни, полученных методом радиально-сдвиговой прокатки. Показано, что ультразвуковое воздействие на материалы после

радиально-сдвиговой прокатки при определенных амплитудах механических напряжений способствует релаксации неравновесной структуры границ зерен и снятию, таким образом, внутренних напряжений.

Методом дифракции обратно рассеянных электронов определены ориентировки индивидуальных зерен, локальная текстура, а также идентифицированы фазы в исследуемых образцах после радиально-сдвиговой прокатки, что позволило определить локальные и общие деформации, количество рекристаллизованных и деформированных зерен, их размеры и ориентацию. Показано, что после ультразвуковой обработки образцов меди, предварительно деформированных методом радиально-сдвиговой прокатки вблизи поверхностного слоя, доля большеугловых границ в структуре увеличивается.

Список использованных источников

1. Носкова, Н. И. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы / Н. И. Носкова, Р. Р. Мулюков. – Екатеринбург, 2003. – 279 с.
2. Valiev, R. Z. Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation / R. Z. Valiev, A. V. Korznikov, R. R. Mulyukov // *Materials Science and Engineering: A*. – 1993. – Vol. 168, N 2. – P. 141–148. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(93\)90717-s](https://doi.org/10.1016/0921-5093(93)90717-s)
3. Changes in the microstructure and mechanical properties of nanomaterials under an ultrasonic wave effect / A. A. Nazarov, A. A. Samigullina, R. R. Mulyukov [et al.] // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2014. – Vol. 43. – P. 153–159. <https://doi.org/10.3103/s1052618814020113>
4. Microstructure changes in ultrafine-grained nickel processed by high pressure torsion under ultrasonic treatment / A. A. Samigullina, A. A. Mukhametgalina, S. N. Sergeev [et al.] // *Ultrasonics*. – 2018. – Vol. 82. – P. 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.09.005>
5. Effect of ultrasonic treatment on the strength and ductility of bulk nanostructured nickel processed by equal-channel angular pressing / A. A. Samigullina, A. A. Nazarov, R. R. Mulyukov [et al.] // *Reviews on Advanced Materials Science*. – 2014. – Vol. 39, N 1. – P. 48–53.
6. Рубаник, В. В. Влияние ультразвука на физико-механические свойства проволоки при равноканальном угловом протягивании / В. В. Рубаник, Ю. В. Царенко // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 1. – С. 94–102. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-1-94-102>
7. Tensile strain of alloys with the martensitic transformation under the external impact / A. V. Frolova, Yu. V. Tsarenko, V. V. Rubanik [et al.] // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2019. – Vol. 83. – P. 1289–1293. <https://doi.org/10.3103/s1062873819100071>
8. Влияние радиально-сдвиговой прокатки на микроструктуру и механические свойства нержавеющей аустенитной стали 08X18H10T / А. Б. Найзабеков, С. Н. Лежнев, Е. А. Панин, А. С. Арбуз // *Черная металлургия*. – 2020. – Т. 76, № 2. – С. 162–168.
9. Role of pre-heat treatment in the formation of a favorable fine-grained structure in copper and brass for further deformation / A. Naizabekov, I. Volokitina, E. Panin [et al.] // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2023. – Vol. 58, N 4. – P. 783–787. <https://doi.org/10.59957/jctm.v58i4.112>
10. Ультразвуковая обработка нанометаллов, полученных деформационными методами / Ю. В. Царенко, В. В. Рубаник, В. Ф. Луцко [и др.] // *Актуальные проблемы прочности: материалы Междунар. науч. конф., Витебск, 25–29 мая 2020 г.* / под ред. В. В. Рубаника. – Молодечно, 2020. – С. 366–368.
11. Влияние ультразвуковой обработки на механические свойства металлов, подвергнутых интенсивной пластической деформации / В. В. Рубаник, Ю. В. Царенко, Дж. Т. Вонг, Ю. В. Ли // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 356–364. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-356-364>
12. Computer simulation of preliminary heat treatment and radial-shear rolling of brass / A. Naizabekov, S. Lezhnev, E. Panin [et al.] // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2024. – Vol. 59, N 3. – P. 661–671. <https://doi.org/10.59957/jctm.v59.i3.2024.21>
13. Маркова, Л. В. Применение метода дифракции обратно рассеянных электронов в исследованиях микроструктуры при определении причин разрушения металлических конструкций / Л. В. Маркова, В. В. Коледа, Н. С. Колондинская // *Приборы и методы измерений*. – 2018. – Т. 9, № 3. – С. 243–253. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-3-243-253>
14. Effect of ultrasonic processing on the properties of ultrafine-grained brass / I. Volokitina, A. Naizabekov, S. Lezhnev [et al.] // *Materiali in tehnologije*. – 2024. – Vol. 58, N 3. – P. 301–307. <https://doi.org/10.17222/mit.2024.1099>
15. Влияние ультразвуковой обработки на структуру и механические свойства ультрамелкозернистой меди и ее сплавов, полученных методом радиально-сдвиговой прокатки / А. Б. Найзабеков, С. Н. Лежнев, В. В. Рубаник [и др.] // *Актуальные проблемы прочности: материалы LXVIII Междунар. науч. конф., Витебск, 27–31 мая 2024 г.* / под ред. В. В. Рубаника. – Минск, 2024. – С. 330–332.

References

1. Noskova N. I., Mulyukov R. R. *Submicrocrystalline and Nanocrystalline Metals and Alloys*. Ekaterinburg, 2003. 279 p. (in Russian).
2. Valiev R. Z., Korznikov A. V., Mulyukov R. R. Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering: A*, 1993, vol. 168, no. 2, pp. 141–148. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(93\)90717-s](https://doi.org/10.1016/0921-5093(93)90717-s)
3. Nazarov A. A., Samigullina A. A., Mulyukov R. R., Tsarenko Yu. V., Rubanik V. V. Changes in the microstructure and mechanical properties of nanomaterials under an ultrasonic wave effect. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2014, vol. 43, pp. 153–159. <https://doi.org/10.3103/s1052618814020113>
4. Samigullina A. A., Mukhametgalina A. A., Sergeev S. N., Zhilyaev A. P., Nazarov A. A., Zagidullina Yu. R., Parkhimovich N. Yu., Rubanik V. V., Tsarenko Yu. V. Microstructure changes in ultrafine-grained nickel processed by high pressure torsion under ultrasonic treatment. *Ultrasonics*, 2018, vol. 82, pp. 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.09.005>
5. Samigullina A. A., Nazarov A. A., Mulyukov R. R., Tsarenko Yu. V., Rubanik V. V. Effect of ultrasonic treatment on the strength and ductility of bulk nanostructured nickel processed by equal-channel angular pressing. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2014, vol. 39, no. 1, pp. 48–53.
6. Rubanik V. V., Tsarenko Yu. V. Ultrasound influence on the physical and mechanical properties of wire at equal-channel angular broaching. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 1, pp. 94–102 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-1-94-102>
7. Frolova A. V., Tsarenko Yu. V., Rubanik V. V., Stolyarov V. V., Rubanik V. V. Tensile strain of alloys with the martensitic transformation under the external impact. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2019, vol. 83, pp. 1289–1293. <https://doi.org/10.3103/s1062873819100071>
8. Naizabekov A. B., Lezhnev S. N., Panin E. A., Arbuz A. S. Impact of radial-shearrolling on the microstructure and mechanical properties of 08X18N10T stainless austenitic steel. *Chernaya metallurgiya = Ferrous Metallurgy*, 2020, vol. 76, no. 2, pp. 162–168 (in Russian).
9. Naizabekov A., Volokitina I., Panin E., Rubanik V., Tsarenko Yu. Role of pre-heat treatment in the formation of a favorable fine-grained structure in copper and brass for further deformation. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2023, vol. 58, no. 4, pp. 783–787. <https://doi.org/10.59957/jctm.v58i4.112>
10. Tsarenko Yu. V., Rubanik V. V., Lutsko V. F., Samoletov V. G., Wang J. T., Liu Yu. Ultrasonic treatment of nanometals obtained by deformation methods. *Aktual'nyye problemy prochnosti: materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Vitebsk, 25–29 maya 2020 g., pod redaktsiei V. V. Rubanika* [Current Strength Issues: Proceedings of the International Scientific Conference, Vitebsk, May 25–29, 2020 / edited by V. V. Rubanik]. Molodechno, 2020, pp. 366–368 (in Russian).
11. Rubanik V. V., Tsarenko Yu. V., Wang J. T., Liu Yu W. Influence of ultrasonic processing on the mechanical properties of metals subjected to intense plastic deformation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 3, pp. 356–364 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-3-356-364>
12. Naizabekov A., Lezhnev S., Panin E., Arbuz A., Tolkushkin A., Tsyba P., Rubanik V., Tsarenko Yu. Computer simulation of preliminary heat treatment and radial-shear rolling of brass. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2024, vol. 59, no. 3, pp. 661–671. <https://doi.org/10.59957/jctm.v59.i3.2024.21>
13. Markova L. V., Koleda V. V., Kolodinskaya N. S. Application of the electron backscattered diffraction method in microstructure research for determining of causes of metal structures destruction. *Pribory i metody izmerenii = Devices and Methods of Measurements*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 243–253 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-3-243-253>
14. Volokitina I., Naizabekov A., Lezhnev S., Panin E., Rubanik V., Tsarenko Yu. Effect of ultrasonic processing on the properties of ultrafine-grained brass. *Materialy in tehnologije = Materials and Technology*, 2024, vol. 58, no. 3, pp. 301–307. <https://doi.org/10.17222/mit.2024.1099>
15. Naizabekov A. B., Lezhnev S. N., Rubanik V. V., Tsarenko Yu. V. Effect of ultrasonic treatment on the structure and mechanical properties of ultrafine-grained copper and its alloys obtained by radial-shear rolling. *Aktual'nyye problemy prochnosti: materialy LXVIII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Vitebsk, 27–31 maya 2024 g., pod redaktsiei V. V. Rubanika* [Current Strength Problems: Proceedings of the LXVIII International Scientific Conference, Vitebsk, May 27–31, 2024, edited by V. V. Rubanik]. Minsk, 2024, pp. 330–332 (in Russian).

Информация об авторах

Рубаник Василий Васильевич – член-корреспондент, д-р техн. наук, заведующий отделом. E-mail: ita@vitebsk.by.

Царенко Юрий Валентинович – канд. техн. наук, заместитель директора. E-mail: labpt@vitebsk.by.

Найзабеков Абдрахман Батырбекович – д-р техн. наук, профессор. E-mail: naizabekov57@mail.ru.

Лежнев Сергей Николаевич – канд. техн. наук, доцент. E-mail: sergey_legnev@mail.ru.

Information about the authors

Rubanik Vasily V. – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Head of Department. E-mail: ita@vitebsk.by.

Tsarenko Yury V. – Ph. D. (Engineering), Deputy Director. E-mail: labpt@vitebsk.by.

Naizabekov Abdrakhman B. – D. Sc. (Engineering), Professor. E-mail: naizabekov57@mail.ru.

Lezhnev Sergey N. – Ph. D. (Engineering), Associate Professor. E-mail: sergey_legnev@mail.ru.