

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.793: 620.1

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-74-83>

Структура и состав медно-алюминиевых фрикционных покрытий для деталей машин

В.И. Балабанов¹, **Н.Н. Ивахненко²**, **В.Г. Борулько³**, **Д.В. Добряков⁴**, **А.И. Кругляк⁵**,
М.Ю. Бадекин⁶

^{1,2,3,6} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

⁴ Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса; М.О. г. Пушкино, Россия

⁵ Объединенный институт ядерных исследований; г. Дубна, Россия

¹ vbalabanov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>

² ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7328-7634>

³ vborulko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3221-3567>

⁴ dimasdobr@rambler.ru

⁵ kruglyakai@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0773-9919>

⁶ korund2002@list.ru; <http://orcid.org/0000-0002-3911-5900>

Аннотация. Прогнозировать свойства фрикционного покрытия для деталей машин, полученного в результате термомеханических и диффузионных процессов, можно при установлении корреляции параметров морфологии, элементного распределения и условий синтеза покрытий. С целью установления взаимосвязи этих факторов исследованы структура и состав медно-алюминиевого покрытия, синтезированного методом *in situ* фрикционного натирания на стальных подложках. Морфология поверхности и поперечного сечения изучена с помощью сканирующей электронной микроскопии в режиме обратно рассеянных электронов. Для количественной характеристики сложной системы трещин выполнен фрактальный анализ методом равномерных сеток. Глубинное распределение элементов Cu, Al, O и толщина слоев определены методом спектроскопии резерфордского обратного рассеяния (RBS). Полученное медно-алюминиевое покрытие характеризуется выраженной многоуровневой структурой. Данные RBS подтвердили формирование многослойной системы, включающей в себя поверхностную оксидную пленку Al₂O₃ (~5...15 нм), слой, обогащенный алюминием с градиентом меди, переходную диффузионную зону и медную подложку. СЭМ-анализ выявил масштабно-инвариантную организацию дефектов: от мозаичной полигонизации (20...80 мкм) до ультрамелкозернистой субструктуры (0,5...2 мкм) – и наличие оксидных включений (50...200 нм). Фрактальная размерность трещиноватой сети 1,917±0,076 свидетельствует о ее высокой степени самоподобия в диапазоне масштабов 10...300 мкм. Плотность дефектов на микроуровне достигает 45,7%. Трещинообразование обусловлено комбинированным действием термомеханических напряжений и хрупкости интерметаллидных фаз, возникающих в условиях активной междиффузии. Одновременно фрикционный нагрев активизирует поверхностное окисление. Раскрытие фундаментальной связи между параметрами фрикционного процесса, фрактальной природой дефектов и составом покрытий позволит целенаправленно задавать свойства биметаллическим системам.

Ключевые слова: фрактальный анализ; трещинообразование; медно-алюминиевое покрытие; СЭМ-анализ; структура; покрытие; фрикционное покрытие

Финансирование: Работа выполнена в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16 июня 2025 г.).

Для цитирования: Балабанов В.И., Ивахненко Н.Н., Борулько В.Г., Добряков Д.В., Кругляк А.И., Бадекин М.Ю. Структура и состав медно-алюминиевых фрикционных покрытий // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 3. С. 74-83. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-74-83>

ORIGINAL ARTICLE

Structure and composition of copper-aluminum friction coatings

V.I. Balabanov¹, N.N. Ivakhnenko², V.G. Borulko³, D.V. Dobryakov⁴, A.I. Kruglyak⁵, M.Yu. Badekin⁶^{1,2,3,6} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia⁴ FGBNU “Rosinformagrotekh”; Moscow region, Pushkino, Russia⁵ Joint Institute for Nuclear Research; Dubna, Russia¹ vbalabanov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>² ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7328-7634>³ vborulko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3221-3567>⁴ dimasdobr@rambler.ru⁵ kruglyakai@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0773-9919>⁶ korund2002@list.ru; <http://orcid.org/0000-0002-3911-5900>

Abstract. The properties of a friction coating for machine parts obtained through thermomechanical and diffusion processes can be predicted by establishing a correlation between morphology parameters, elemental distribution, and coating synthesis conditions. To investigate the relationship among these factors, the authors examined the structure and composition of a copper-aluminum coating synthesized by in situ friction cladding on steel substrates. Surface and cross-sectional morphology were studied using scanning electron microscopy (SEM) in backscattered electron mode. Fractal analysis employing the grid method was performed to quantitatively characterize the complex crack system. The depth distribution of Cu, Al, and O, as well as the layer thickness, were determined by Rutherford backscattering spectroscopy (RBS). The obtained copper-aluminum coating exhibits a pronounced multilevel structure. RBS data confirmed the formation of a multilayer system comprising a surface Al₂O₃ oxide film (~5-15 nm), an aluminum-enriched layer with a copper gradient, a transition diffusion zone, and a copper substrate. SEM analysis revealed scale-invariant defect organization, ranging from mosaic polygonization (20-80 μm) to an ultrafine-grained substructure (0.5-2 μm), along with the presence of oxide inclusions (50-200 nm). The fractal dimension of the crack network, measured at 1.917 ± 0.076 , indicates a high degree of self-similarity over a scale range of 10-300 μm. The defect density at the micro level reaches 45.7%. Crack formation arises from the combined effect of thermomechanical stresses and the brittleness of intermetallic phases generated under conditions of active interdiffusion. Concurrently, frictional heating activates surface oxidation. Elucidating the fundamental relationship between the parameters of the friction process, the fractal nature of defects, and the coating composition will enable the targeted tailoring of properties in bimetallic systems.

Keywords: fractal analysis; crack formation; copper-aluminum coating; SEM analysis; structure; coating; friction coating

Funding. This work was carried out within the framework of the project for the establishment and development of the Engineering Center of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Agreement No. 075-15-2025-543 dated June 16, 2025).

For citation: Balabanov V.I., Ivakhnenko N.N., Borulko V.G., Dobryakov D.V., Kruglyak A.I., Badekin M.Yu. Structure and composition of copper-aluminum friction coatings. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(3):74-83. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-74-83>

Введение

Фрикционные методы нанесения покрытий – эффективная и ресурсосберегающая альтернатива традиционным технологиям – таким, как гальваника или газотермическое напыление [1]. Эти методы, основанные на диффузионных процессах, интенсивной пластической деформации и локальном нагреве в зоне контакта, позволяют формировать прочно сцепленные, плотные слои без применения сложного вакуумного оборудования. Особый интерес представляет создание биметаллических систем – таких,

как «Медь-алюминий», сочетающих высокие триботехнические и прочностные характеристики [2]. Однако формирование таких покрытий сопровождается сложными термомеханическими и диффузионными процессами, приводящими к возникновению специфических структурных особенностей: слоистости, развитой трещиноватости, формированию оксидных фаз и ультрамелкозернистой субструктуры.

Несмотря на значительный прогресс в применении фрикционных методов, детальные взаимосвязи параметров процесса, возникающей многоуровневой морфологии покрытия, его химического состава

и конечных эксплуатационных свойств остаются недостаточно изученными. В частности, требует системного количественного описания масштабно-инвариантная (фрактальная) природа дефектной структуры, определяющая механическую целостность и долговечность покрытия [3]. Традиционный качественный анализ микрофотографий часто оказывается недостаточным для прогнозирования поведения материала. Для углубленного понимания механизмов формирования и деградации фрикционных покрытий необходим комплексный подход, сочетающий высокоразрешающую визуализацию, точный элементный анализ и современные методы количественной обработки изображений – такие, как фрактальный анализ [4].

Цель исследований: комплексное изучение структуры и состава медно-алюминиевых покрытий, полученных методом фрикционного натирания, с установлением количественных корреляций между параметрами морфологии, элементным распределением и условиями синтеза.

Материалы и методы

Медно-алюминиевое покрытие для деталей машин получали методом *in situ* фрикционного натирания на модифицированном токарно-винторезном станке: вращающиеся цилиндрические подложки из стали 40 активировали медно-алюминиевой технологической средой, после чего к ним под заданным нормальным усилием прижимали инструмент из алюминиевого сплава. Механизированная поперечная подача обеспечивала равномерное покрытие; интенсивный пластический перенос сопровождался характерным свистящим звуком и приводил к формированию прочно сцепленного слоя [5]. Заготовки нарезают на диски толщиной 5 мм, очищали и сушили для последующего анализа.

Для морфологического исследования использовали сканирующий электронный микроскоп LEO-1430 VP (Carl Zeiss, Германия) в режиме высокого вакуума с ускоряющим напряжением 20 кВ и четырехквadrантным детектором обратно рассеянных электронов (4QBSD). Образцы фиксировали на электропроводящий скотч и напыляли платиной (~10...15 нм) в течение 130 с в аргоновой атмосфере (0,1...0,2 мбар) для предотвращения зарядки. Рабочее расстояние варьировали от 14 до 30 мм, что позволяло исследовать рельеф с увеличением от 100× до 4010×, охватывая как макрзоны контакта, так и субмикронные структуры. Высокий атомный контраст между Cu и Al обеспечивал четкую визуализацию границ зерен, трещин и фазовых включений без травления [6].

Фрактальный анализ проводили по микрофотографиям с применением Python (библиотеки OpenCV,

scikit-image). Изображения конвертировали в градации серого, сглаживали фильтром Гаусса ($\sigma = 1$), выделяли дефекты методом Кэнни (пороги 30/100), замыкали разрывы морфологической операцией и бинаризовали. Фрактальную размерность D_f определяли методом равномерных сеток: на бинарное изображение накладывали сетку с размером ячейки $\varepsilon = 2 \dots 128$ пикселей (в геометрической прогрессии), подсчитывали число занятых ячеек $N(\varepsilon)$ и строили зависимость $\ln N(\varepsilon)$ от $\ln(1/\varepsilon)$. Наклон линейной регрессии (коэффициент детерминации $R^2 > 0,98$) давал значение $D_f = 1,917 \pm 0,076$, подтверждая самоподобие трещин в диапазоне масштабов 10...300 мкм. Анизотропию оценивали через преобразование Хафа: параметр порядка $S = 0,513$ указывал на умеренную направленность трещин, обусловленную направлением фрикционного воздействия. Плотность дефектов достигала 45,7% [7].

Элементный состав и глубинные профили Cu, Al и O определяли методом спектрометрии резерфордского обратного рассеяния (RBS) на ускорительной установке ЭГ-5 в лаборатории Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) (рис. 1). Ионы $^4\text{He}^+$ ускоряли до 2,0 МэВ, регистрировали рассеянные частицы полупроводниковым детектором (угол 165° , разрешение 16 кэВ) при вакууме 0,67 мПа. Моделирование спектров осуществляли в программе SIMNRA 6.03 с учетом различия масс ядер меди и алюминия, что обеспечивало четкое разделение пиков и позволяло количественно оценить толщину слоев (0,5...5,0 мкм), градиенты концентрации и степень

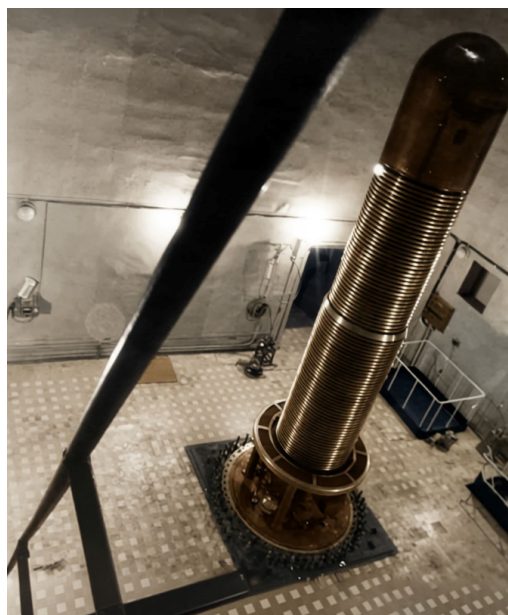


Рис. 1. Установка ЭГ-5 ОИЯИ. Общий вид камеры анализа с индукторной катушкой

Fig. 1. JINR EG-5 facility. General view of the analysis chamber with an induction coil

взаимной диффузии на границе «Покрытие-подложка» с погрешностью $\leq \pm 3\%$ (плотность потока $5 \cdot 10^{12}$ ионов/(с·см²), экспозиция 300 с) [8].

Результаты и их обсуждение

Исследование поверхности и глубинного состава медно-алюминиевых покрытий, полученных методом фрикционного наплавления, проводилось

комплексно: с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) в режиме обратно рассеянных электронов (QBSE) и спектроскопии резерфордского обратного рассеяния (RBS). Микрофотографии (рис. 2) с увеличением от $100 \times$ до $4010 \times$ обеспечили многоуровневое определение морфологии покрытия от макроскопических дефектов до субмикронных деталей поверхностной топологии [9].

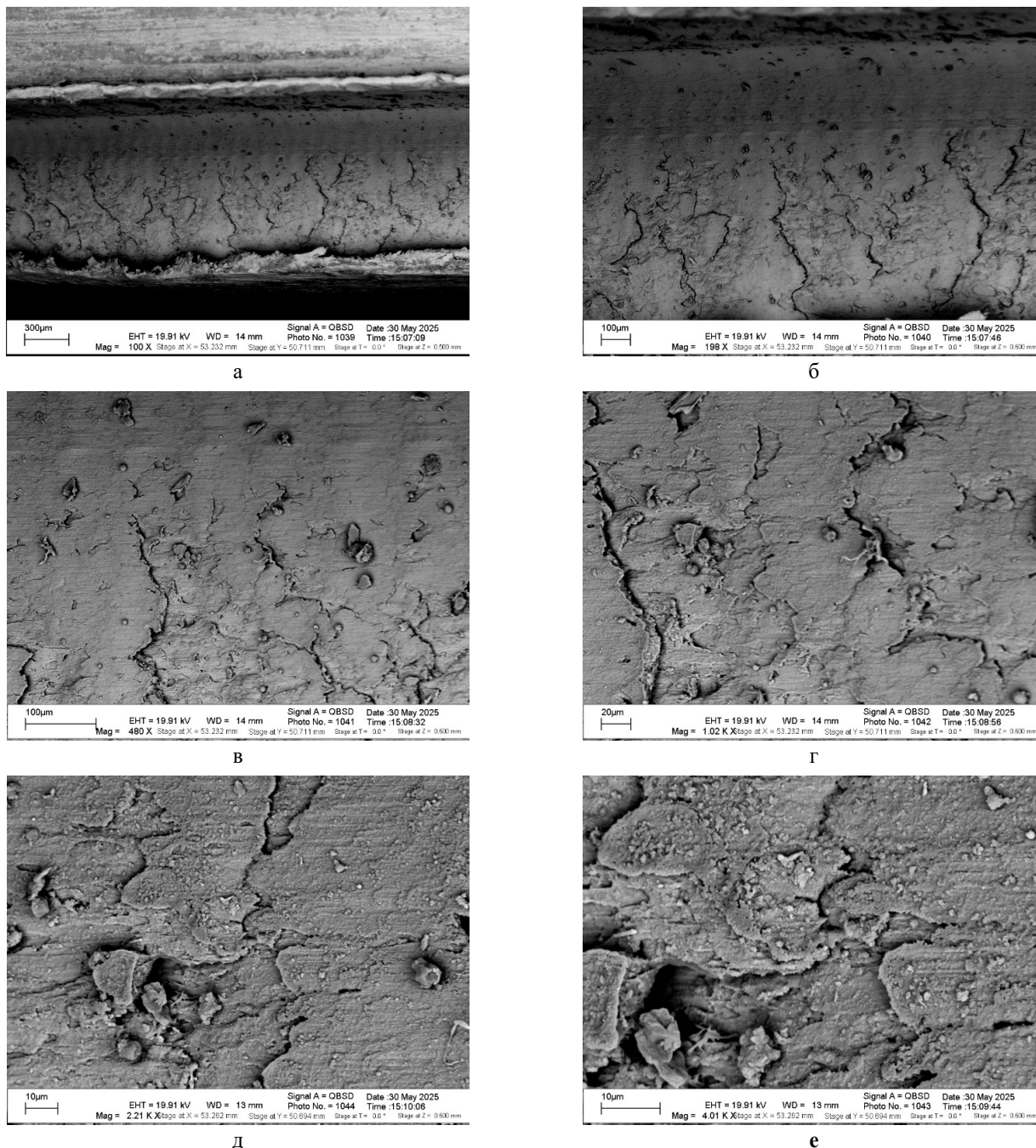


Рис. 2. СЭМ-изображения микроструктуры медно-алюминиевого покрытия, полученного фрикционным наплавлением. Поперечные срезы покрытия при различном увеличении: а) $\times 100$; б) $\times 198$; в) $\times 480$; г) $\times 1020$; д) $\times 2210$; е) $\times 4010$

Fig. 2. SEM images of the microstructure of copper-aluminum coatings obtained by friction cladding.

Cross sections of the coatings:

- a) magnification $\times 100$; b) magnification $\times 198$; c) magnification $\times 480$; d) magnification $\times 1020$; e) magnification $\times 4010$

На начальном этапе микроскопического анализа при низком увеличении (рис. 2а) наблюдается характерная слоистая структура покрытия, формирующаяся в результате последовательного наложения и пластической деформации материала в зоне фрикционного контакта [10]. На рисунке можно увидеть поверхность с выраженной анизотропией, обусловленной направлением относительного движения инструмента и образца, проявляющейся в преимущественно горизонтальной ориентации основных трещиноватых дефектов. Видны два контрастных слоя: верхний, более темный, в режиме QBSE (среднее атомное число Z ниже), соответствующий алюминийсодержащей фазе, и нижний – более светлый, богатый медью. Между этими слоями четко прослеживается зона контакта с неровностями профиля высотой 5...15 мкм, что указывает на интенсивный процесс смешивания материалов при высокой температуре и давлении в зоне фрикционного воздействия [11].

При дальнейшем увеличении (рис. 2б, 2в) становится очевидной мозаичная структура поверхности с четко выраженной полигонизацией. Поверхность разбивается на ячейки размером 20...80 мкм, ограниченные сетью микротрещин шириной от 0,5 до 3 мкм. Контраст в изображениях QBSE позволяет различить области с различным химическим составом: темные участки соответствуют алюминию и его оксидам, светлые области обогащены медью. Наблюдается характерная «чешуйчатая» морфология, типичная для процессов адгезионного переноса материала при фрикционном нанесении, с отдельными выступами и кратерами размером 10...30 мкм, являющимися следами локального схватывания и разрыва микросварных соединений между контактирующими поверхностями [12]. В матрице покрытия равномерно распределены мелкодисперсные включения размером 1...5 мкм, которые согласно последующему анализу RBS представляют собой оксидные частицы.

Детальное исследование микроструктуры при больших увеличениях (рис. 2г) выявляет сложную систему дефектов. Трещины имеют разветвленную дендритную морфологию с характерным поперечным размером открытия 0,1...0,5 мкм и проникают на глубину до 5...10 мкм, что видно по теневым контрастам на боковых стенках трещин. Поверхность покрытия демонстрирует высокий уровень шероховатости, развитой в результате интенсивной пластической деформации. Количественная оценка СЭМ-изображений характерных участков площадью 20×20 мкм показала среднее арифметическое отклонение профиля R_a 1,2...1,8 мкм. Микрорельеф формируется суперпозицией пластических деформаций,

сдвиговых полос и микропор, возникающих в результате термомеханических напряжений при циклическом нагружении в процессе нанесения [13]. Между стенками трещин наблюдаются перемычки материала, что прямо указывает на процесс пластической деформации и релаксации напряжений, предшествовавший окончательному разрушению.

При максимальном увеличении (рис. 2д, 2е) наблюдается ультрамелкозернистая структура покрытия с размером субзерен 0,5...2 мкм. Поверхность на этом уровне представляет собой композицию из мелких кристаллитов, спекшихся между собой, с четко видимыми границами зерен и выходами дислокаций. Присутствуют наноразмерные частицы (50...200 нм), агрегированные в кластеры до 1...2 мкм, которые, по-видимому, являются оксидами алюминия (Al_2O_3), образующимися в результате термической активации поверхности при фрикционном нагреве. Текстура поверхности носит выраженный «клеточный» характер с ячейками размером 2...5 мкм, разделенными трещинами шириной менее 100 нм, что соответствует стадии зарождения и роста трещин усталости в условиях циклического теплового и механического нагружения [14].

Для количественной оценки морфологии поверхности проведен фрактальный анализ системы трещин методом равномерных сеток. Анализ охватывал все масштабные уровни от 300 мкм до 10 мкм, соответствующие диапазону увеличений от $100 \times$ до $4010 \times$. В каждом изображении выделялась бинарная маска трещин с использованием детектора краев Кэнни с последующей скелетизацией для уточнения геометрии линий дефектов. На рисунке 3 показана зависимость фрактальной размерности (D_f) системы трещин от увеличения при СЭМ-анализе медно-алюминиевого покрытия.

Установлено, что фрактальная размерность трещиноватой структуры D_f составляет в среднем $1,917 \pm 0,076$ при коэффициенте вариации 4,0%. Это свидетельствует о высокой степени самоподобия и структурной устойчивости морфологии поверхности в широком диапазоне масштабов. Значения D_f изменяются от 1,793 ($198 \times$) до 2,000 ($2210 \times$), приближаясь к евклидовой размерности 2 при переходе к наномасштабам, что указывает на эффективное заполнение поверхности сложной разветвленной системой микротрещин с развитой структурой, характерной для процессов фрактального роста дефектов в условиях диффузионно-контролируемой релаксации напряжений. Масштабная зависимость фрактальной размерности показывает плато в диапазоне $480 \times \dots 4010 \times$ ($D_f \approx 1,96 \dots 2,00$), что соответствует переходу к универсальному режиму роста трещин,

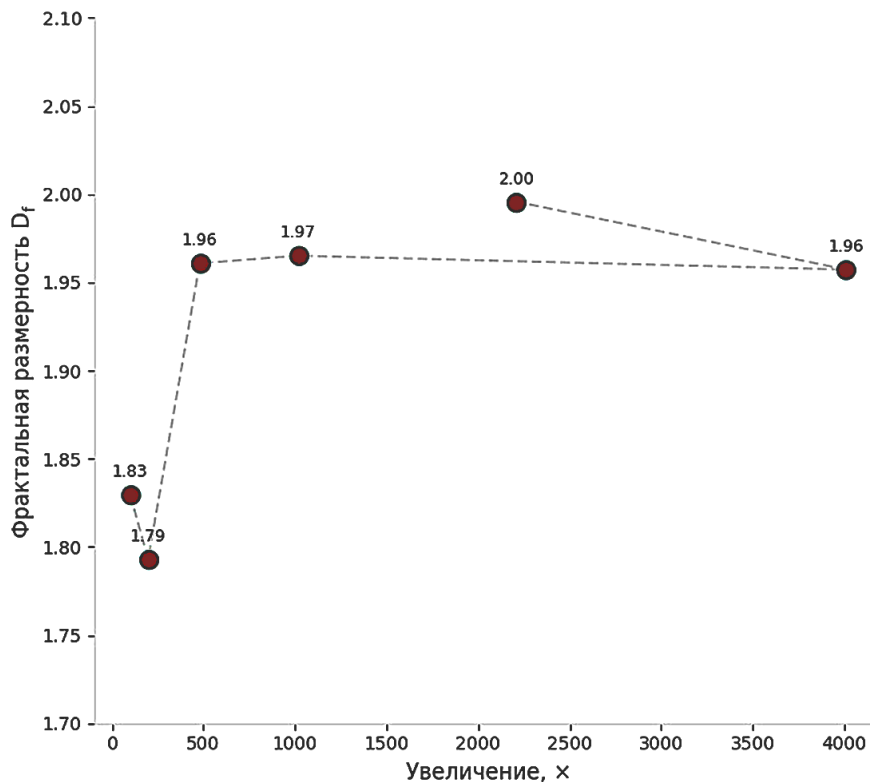


Рис. 3. Зависимость фрактальной размерности (D_f) системы трещин от увеличения при СЭМ-анализе медно-алюминиевого покрытия

Fig. 3. Relationship between the fractal dimension (D_f) of the crack system and magnification during SEM analysis of the copper-aluminum coating

который не зависит от макрокопических граничных условий [15].

На рисунке 4 показана гистограмма распределения углов ориентации линейных дефектов в медно-алюминиевом покрытии. Анализ ориентационного распределения трещин на изображениях с максимальным разрешением выявил преимущественно горизонтальную направленность с максимумом распределения углов около 0° относительно направления фрикционной обработки. Параметр ориентационного порядка $S = 0,513$ подтверждает умеренную анизотропию структуры, обусловленную направленностью процесса пластического течения материала в зоне контакта. Плотность дефектов (относительная площадь, занятая трещинами) составляет в среднем 33,7%, монотонно возрастая с уменьшением масштаба и достигая 45,7% на уровне 10 мкм, что коррелирует с плотностью межзеренных границ в ультрамелкозернистых материалах, полученных методами интенсивной пластической деформации.

Спектроскопия резерфордского обратного рассеяния (RBS) с пучком α -частиц с энергией 2 МэВ (углы падения $\alpha = 30^\circ$, угол рассеяния $\theta = 170^\circ$) подтвердила слоистую структуру покрытия, выявленную методом СЭМ. Спектры RBS, представленные на рисунке 5, показывают три характерных

энергетических пика, соответствующих присутствующим в системе элементам: кислороду (O) с энергией края около 0,7 МэВ; алюминию (Al) с энергией 1,1 МэВ; меди (Cu) с энергией 1,5 МэВ.

Отличная корреляция экспериментальных данных (сплошная линия) с результатами моделирования (пунктирная линия) позволяет количественно оценить глубинное распределение элементов и толщину слоев. Поверхностный пик кислорода (рис. 5, энергия $\sim 0,7$ МэВ) с высокой интенсивностью указывает на образование оксидной пленки на поверхности покрытия толщиной порядка 5...15 нм (оценка по ширине пика), что коррелирует с наблюдением мелкодисперсных оксидных частиц на СЭМ-изображениях высокого разрешения (рис. 2д, 2е). Присутствие кислорода преимущественно в поверхностном слое подтверждает термоактивированный механизм окисления алюминия при фрикционном нагреве, приводящий к формированию защитной пленки Al_2O_3 , видимой в СЭМ как темные включения в матрице покрытия. Плато за пиком O и до пика Al соответствует смешанному слою Al-Cu с переменным составом.

Пик алюминия (рис. 5, энергия $\sim 1,1$ МэВ) с относительно низкой энергией края поглощения (смещение относительно табличного значения для

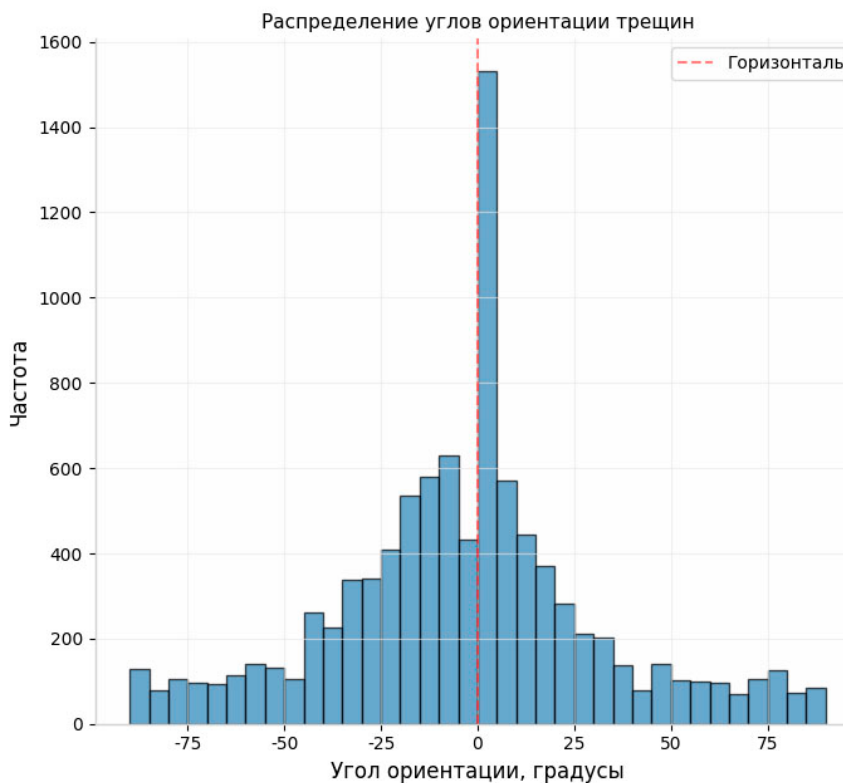


Рис. 4. Гистограмма распределения углов ориентации линейных дефектов (трещин) в медно-алюминиевом покрытии

Fig. 4. Histogram of the distribution of orientation angles of linear defects (cracks) in a copper-aluminum coating

чистого Al) свидетельствует о расположении алюминийсодержащего слоя непосредственно под поверхностной оксидной пленкой, что согласуется с СЭМ-данными о преобладании алюминия в верхнем слое покрытия (темный контраст на рисунке 2а-2в). Ширина пика Al указывает на толщину слоя порядка 0,5...1,0 мкм и наличие градиентного перехода к подложке, что объясняет наблюдаемую

в СЭМ «чешуйчатую» структуру с переменным контрастом по толщине.

Интенсивный пик меди (рис. 5, энергия ~1,5 МэВ) с характерным наклоном переднего фронта соответствует основному материалу подложки или нижнему слою покрытия, богатому медью. Смещение края пика Cu к более низким энергиям относительно табличного значения для массивной меди указывает

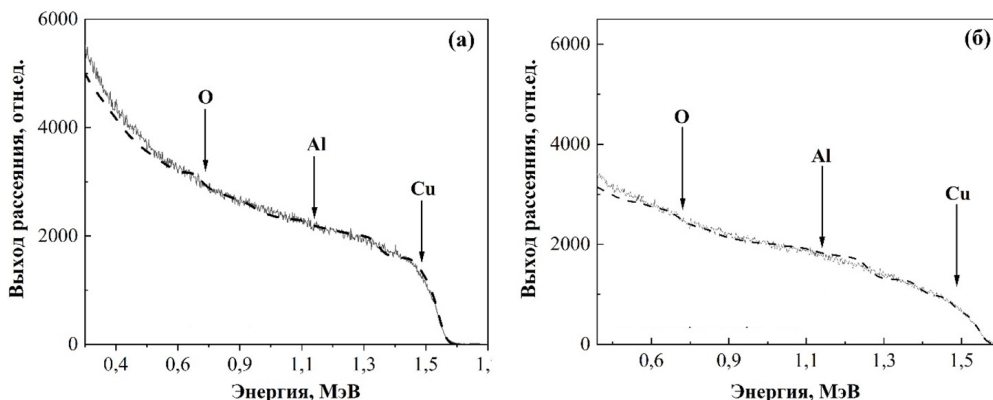


Рис. 5. Спектры RBS ($E = 2$ МэВ, $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 170^\circ$) для двух образцов с Cu-Al-покрытиями, нанесенными фрикционным наплавлением:

а) толщина ~1,8 мкм; б) толщина ~3,2 мкм; — эксперимент, - - - модель (SIMNRA); стрелками указаны энергетические края сигнатур O, Al и Cu

Fig. 5. RBS spectra ($E = 2$ MeV, $\alpha = 30^\circ$, $\theta = 170^\circ$) for two samples with Cu-Al particles deposited by friction fusion: a) thickness ~1.8 μm; b) thickness ~3.2 μm; solid line – experiment, dashed line – model (SIMNRA); arrows indicate the energy edges of the O, Al, and Cu signatures

на наличие межфазной границы Al/Cu с шероховатостью, оцениваемой по фрактальным данным, СЭМ ($D_f \approx 1,92$). Высокая интенсивность сигнала Cu подтверждает, что фрикционное покрытие имеет двухслойную структуру: верхний слой обогащен алюминием и его оксидами, нижний слой – медный.

Корреляция между методами позволяет интерпретировать трещиноватость, наблюдаемую на СЭМ-изображениях (рис. 2б, 2в, 2г), как результат термомеханических напряжений, возникающих при охлаждении системы вследствие различия коэффициентов температурного расширения ($\alpha_{Al} \approx 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{Cu} \approx 17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и образования оксидов с объемным расширением. Фрактальная размерность трещин $D_f \approx 1,92$, близкая к значениям для диффузионно-релаксированных поверхностей, свидетельствует о том, что рост дефектов происходил в условиях активной междиффузии Al-Cu с образованием интерметаллидов, обогащающих границы зерен и способствующих хрупкому разрушению при термических циклах.

Таким образом, комплексный анализ СЭМ и RBS подтверждает формирование многослойной структуры покрытия с термодинамически стабильной многоуровневой структурой: оксидная пленка Al_2O_3 (на поверхности) → слой алюминия с примесями меди (основной объем покрытия) → переходная диффузионная зона Al-Cu → медная подложка. Фрактальная природа трещиноватой структуры и высокая плотность дефектов (33...46%) обусловлены особенностями фрикционного нанесения, сочетающего интенсивный пластический деформационный перенос материала с высокотемпературной активацией диффузионных процессов и окисления.

Выводы

1. Комплексное исследование медно-алюминиевых покрытий, полученных методом фрикционного натирания, с применением СЭМ, фрактального

анализа и спектроскопии резерфордовского обратного рассеяния, выявило закономерности формирования их многоуровневой структуры.

2. В результате фрикционного воздействия формируется многослойная система: наноразмерная оксидная пленка Al_2O_3 (5...15 нм), основной слой с градиентным распределением меди (0,5...1,0 мкм), диффузионная зона Al-Cu и медная подложка; данные RBS подтвердили интенсивную взаимную диффузию на границе раздела.

3. Поверхность характеризуется масштабной инвариантной неоднородностью с иерархией дефектов: от мозаичной полигонизации (20...80 мкм) до ультрамелкозернистой структуры (0,5...2 мкм) и наноразмерных оксидных включений (50...200 нм). Фрактальный анализ трещин показал высокую степень самоподобия (диапазон масштабов 10...300 мкм), среднюю размерность $D_f = 1,917 \pm 0,076$ и плотность дефектов 33,7...45,7%, что обусловлено совместным действием пластической деформации, термических напряжений (ввиду различия КТР компонентов) и диффузионных процессов; умеренная анизотропия трещин ($S = 0,513$) отражает направленность фрикционного воздействия.

4. Трещинообразование носит термомеханический характер, инициируясь напряжениями при охлаждении и усугубляясь образованием хрупких интерметаллидов в зоне диффузии, тогда как фрикционный нагрев одновременно способствует поверхностному окислению алюминия.

5. Уникальные триботехнические свойства покрытий (высокая адгезия и износостойкость) напрямую связаны с их дефектной фрактальной организацией, что создает основу для целенаправленной оптимизации режимов фрикционного нанесения с целью управления структурой и функциональными характеристиками биметаллических систем.

Список источников

1. Аверин В.А., Евенко В.В. Современные возможности защиты машин и оборудования от фрикционного, абразивного и коррозионного износа // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2023. № 37. С. 76-78. EDN: CURRRT
2. Balabanov V.I., Dobryakov D.V., Alipichev A. Yu. Developing the technology of friction alitising. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(5):52-56. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-52-56>
3. Benraouda A. Optimal control for an elastic frictional contact problem. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics* 2024;17(2):151-161. EDN: AAVCFR
4. Погоньшев В.А., Мокшин И.А., Погоньшева Д.А. Условия формирования качественного покрытия при финишной антифрикционной безабразивной обработке // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т. 19, № 6 (222). С. 247-249. EDN: TZPPMM

References

1. Averin V.A. Evenko, V.V. Modern possibilities of protection of machinery and equipment from friction, abrasive and corrosive wear. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii*. 2023;37:76-78. (In Russ.)
2. Balabanov V.I., Dobryakov D.V., Alipichev A. Yu. Developing the technology of friction alitising. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(5):52-56. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-52-56>
3. Benraouda A. Optimal control for an elastic frictional contact problem. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics* 2024;17(2):151-161.
4. Pogonyshev V.A., Mokshin I.A., Pogonysheva D.A. Conditions for formation of high-quality coating during finishing antifriction non-abrasive treatment. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2023;19(6):247-249. (In Russ.)

5. Букреев О., Пилушина Г.А. Перспективные материалы для фрикционных механизмов машин лесного комплекса // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2021. № 34. С. 89-93. EDN: ОВКНУS

6. Балабанов В.И., Ивахненко Н.Н., Добряков Д.В., Дорошкевич А.С., Кругляк А.И. Исследование структуры покрытий, полученных методом фрикционного алитирования // Техника и оборудование для села. 2026. № 1. С. 34-37. EDN: FLPAHZ

7. Goryacheva I.G., Meshcheryakova A.R. Modeling of surface fracture in friction interaction of fiber composites. *Journal of Siberian Federal Universit. Mathematics and Physics*. 2021;14(6):690-699. EDN: KBIZGB

8. Балабанов В.И., Голубев И.Г., Добряков Д.В. Совершенствование технологического процесса фрикционного нанесения защитных покрытий // Техника и оборудование для села. 2023. № 10 (316). С. 31-34. EDN: FCIBDY

9. Касимов Р.М., Алехина Р.А., Блинов Н.Д., Свиридов А.С. Исследование влияния разбавителя на реологические и технологические свойства эпоксидных композитов // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 5. С. 68-74. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-68-74>

10. Куксенова Л.И., Козлов Д.А., Алексеева М.С. Влияние структуры медных покрытий на работоспособность тяжело нагруженных стальных пар трения // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2022. № 4 (354). С. 150-160. EDN: PSHUAV

11. Куксенова Л.И., Козлов Д.А., Алексеева М.С. Триботехнические и структурные характеристики модифицированных медью поверхностных слоев тяжело нагруженных сопряжений // Трение и износ. 2021. Т. 42, № 5. С. 596-608. EDN: XNLYUV

12. Kharytonchik S.V., Kussyak V.A., Le N.V. Control of pneumatic actuator for automated mechanical transmission dry friction clutch base on the pulse width modulation signal. *Science and Technique*. 2021;20(1):26-32. EDN: WUTAOQ

13. Балабанов В.И., Ивахненко Н.Н., Добряков Д.В. Теоретические основы нанесения антиизносных покрытий // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 5. С. 61-67. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-61-67>

14. Yusubov F. The impact of surface-active inert lubricants on brake friction composites. *Journal of Technical Research*. 2024;10(3):54-60. EDN: STIJST

15. Javadov M.Y., Volchenko D.A., Skrypnyk V.S. et al. Physical methods for evaluating the load of friction pairs of braking devices (Part I). *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*. 2021;13(2):58-68. https://doi.org/10.52171/2076-0515_2021_13_02_58_68

5. Bukreev O. Pilyushina, G.A. Promising materials for friction mechanisms of forest complex machines. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii*. 2021;34:89-93. (In Russ.)

6. Balabanov V.I., Ivakhnenko N.N., Dobryakov D.V. Study of the structure of the coatings obtained by friction calorizing. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2026;1:34-37. (In Russ.)

7. Goryacheva I.G., Meshcheryakova A.R. Modeling of surface fracture in friction interaction of fiber composites. *Journal of Siberian Federal Universit. Mathematics and Physics*. 2021;14(6):690-699. (In Russ.)

8. Balabanov V.I., Golubev I.G., Dobryakov D.V. Improving the technological process of frictional application of protective coatings. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;10:31-34. (In Russ.)

9. Kasimov R.M., Alekhina R.A., Blinov N.D., Sviridov A.S. Study of the effect of a diluent on the rheological and technological properties of epoxy composites. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):68-74. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-68-74>

10. Kuksenova L.I., Kozlov D.A., Alekseeva M.S. Influence of the structure of copper coatings on the performance of heavy-loaded steel friction couples. *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. 2022;4:150-160. (In Russ.)

11. Kuksenova L.I., Kozlov D.A., Alekseeva M.S. Tribotechnical and structural characteristics of copper-modified surface layers of heavy loaded couples. *Journal of Friction and Wear*. 2021;42(5):596-608. (In Russ.)

12. Kharytonchik S.V., Kussyak V.A., Le N.V. Control of pneumatic actuator for automated mechanical transmission dry friction clutch base on the pulse width modulation signal. *Science and Technique*. 2021;20(1):26-32.

13. Balabanov V.I., Ivakhnenko N.N., Dobryakov D.V. Theoretical foundations of frictional application of anti-wear coatings. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):61-67 (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-61-67>

14. Yusubov F. The impact of surface-active inert lubricants on brake friction composites. *Journal of Technical Research*. 2024;10(3):54-60.

15. Javadov M.Y., Volchenko D.A., Skrypnyk V.S. et al. Physical methods for evaluating the load of friction pairs of braking devices (Part I). *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*. 2021;13(2):58-68. https://doi.org/10.52171/2076-0515_2021_13_02_58_68

Информация об авторах

¹ Балабанов Виктор Иванович, д-р техн. наук, профессор; vbabanov@rgau-msha.ru; и.о. заведующего кафедрой сельскохозяйственного строительства; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>; SPIN-код: 1885-6817

² Ивахненко Наталья Николаевна, канд. физ.-мат. наук, доцент; доцент кафедры физики; ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7328-7634>; SPIN-код: 5082-0613

³ Борулько Вячеслав Григорьевич, д-р техн. наук; и.о. заведующего кафедрой техносферной безопасности; vborulko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3221-3567>; SPIN-код: 9252-5835

⁴ Добряков Дмитрий Викторович, аспирант; dimasdobr@rambler.ru

⁵ Кругляк Анастасия Игоревна, инженер Сектора ядерно-физического материаловедения

Author Information

Viktor I. Balabanov¹, DSc (Eng), Professor; vbabanov@rgau-msha.ru; Acting Head of the Department of Agricultural Construction; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>

Natalya N. Ivakhnenko², CSc (Phys. – Math.), Associate Professor; Associate Professor of the Department of Physics; ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7328-7634>

Vyacheslav G. Borulko³, DSc (Eng); Acting Head of the Department of Technosphere Safety; vborulko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3221-3567>

Dmitry V. Dobryakov⁴, postgraduate student, dimasdobr@rambler.ru

Anastasia I. Kruglyak⁵, Engineer, Sector of Nuclear-Physical Materials Science and Ion-Implantation Nanotechnologies, kruglyakai@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0773-9919>

и ионно-имплантационных нанотехнологий;
kruglyakai@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0773-9919>;
SPIN-код: 1337-3660

⁶ **Бадекин Максим Юрьевич**, старший преподаватель
кафедры техносферной безопасности; korund2002@list.ru;
<http://orcid.org/0000-0002-3911-5900>; SPIN-код: 1447-7503

^{1, 2, 3, 6} Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434,
Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

⁴ Российский научно-исследовательский институт информации
и технико-экономических исследований
по инженерно-техническому обеспечению
агропромышленного комплекса; 141261,
Российская Федерация, Московская область, Пушкинский
р-н, р.п. Правдинский, ул. Лесная, 60

⁵ Объединенный институт ядерных исследований; 141980,
Российская Федерация, Московская обл., г. Дубна,
ул. Жолио-Кюри, 6

Вклад авторов

В.И. Балабанов – концептуализация, руководство исследованиями, администрирование проекта, создание черновика рукописи, редактирование окончательной версии;

Н.Н. Ивахненко – методология, проведение исследований, верификация данных;

В.Г. Борулько – руководство исследованиями, методология, проведение исследований;

Д.В. Добряков – проведение исследований, верификация данных, ресурсы;

А.И. Кругляк – формальный анализ, программное обеспечение, верификация данных;

М.Ю. Бадекин – формальный анализ, программное обеспечение, визуализация, создание черновика рукописи.

Статья поступила 18.02.2025, после рецензирования и доработки 27.04.2026, принята к публикации 14.05.2026

Maxim Yu. Badekin⁶, Senior Lecturer, the Department
of Technosphere Safety; korund2002@list.ru;
<http://orcid.org/0000-0002-3911-5900>

^{1, 2, 3, 6} Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy: 127434,
Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

⁴ Russian Research Institute of Information and Technical and
Economic Research in Engineering and Technical Support
of the Agro-Industrial Sector (Rosinformagrotekh); 141261,
Moscow Region, Pushkino District, Pravdinsky,
Lesnaya Str., 60

⁵ Joint Institute for Nuclear Research: 141980, Russian Federation,
Moscow Region, Dubna, Joliot-Curie Str., 6

Author Contribution

V.I. Balabanov – conceptualization, project supervision, project administration, writing – original draft, manuscript review and editing;
N.N. Ivakhnenko – methodology, investigation, data verification;
V.G. Borulko – research supervision, methodology, investigation;
D.V. Dobryakov – investigation, data verification, resources;
A.I. Kruglyak – formal analysis, software, data verification;
M.Yu. Badekin – formal analysis, software, visualization, writing – original draft.

Received 18.02.2025; Revised 27.04.2026; Accepted 14.05.2026