



Научная статья
2.6.17 - Материаловедение (технические науки)
УДК 678.4:678.01

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.036



ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОКРЫТИЙ ЭЛАСТОМЕРОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ МОЛИБДЕНОМ

Юлия Вадимовна Кузнецова

БУ ВО «Сургутский государственный университет», Сургут, Россия
kuznecova_yv@surgu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0711-6637>

Аннотация. Широкое использование в настоящее время нанотехнологий позволяет получить принципиально новые материалы с требуемыми структурами и свойствами. Нанесение микроструктурных покрытий на поверхность металлов, эластомеров и других материалов представляет особый интерес, так как позволяет получить материалы с высокими эксплуатационными свойствами, что повышает безаварийный срок службы и эксплуатационный ресурс деталей и устройств. Поэтому представляет интерес проведение экспериментальных и теоретических исследований в этой области. В статье приведены результаты экспериментальных исследований структуры и фазового состава поверхностного слоя эластомеров, модифицированных молибденом, методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии. Цель исследования заключалась в изучении особенностей структуры покрытий из молибдена, нанесенных на поверхность резины, приготовленной на основе двух каучуков; проведении сравнительного анализа условий образования покрытий; определение наиболее оптимальных условий режимов распыления молибдена. Напыление проводилось методом магнетронного распыления. Результаты исследования показали, что характер и топология аморфно-кристаллической структуры покрытия существенно зависят от режимов распыления. Параметры структуры и рельефа также зависят от температуры подложки, времени напыления, материала мишени и мощности источника напыления. Для покрытий характерна зернистая структура с образованием кластеров разной формы и размеров. В ходе исследований были подобраны наиболее оптимальные режимы напыления для получения образцов с заданными свойствами. Температура подложки, время напыления, материал мишени и мощность источника напыления влияют на формирование структуры и рельеф поверхностей исходного и модифицированного образцов.

Ключевые слова: эластомеры, сканирующая электронная микроскопия, наноматериалы, топокомпозицы, износостойкость, аморфно-кристаллическая структура, рентгеновская дифрактометрия, модифицирование.

Для цитирования: Кузнецова Ю. В. Исследование структуры и фазового состава покрытий эластомеров, модифицированных молибденом // Ползуновский вестник. 2025. № 4, С. 212–217. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.036. EDN: <https://elibrary.ru/WOGPFB>.

Original article

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF COATINGS OF MOLYBDENUM-MODIFIED ELASTOMERS

Yuliya Vadimovna Kouznetsova

Surgut State University, Surgut, Russia
kuznecova_yv@surgu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0711-6637>

Abstract. Currently, the widespread use of nanotechnology makes it possible to obtain fundamentally new materials with the required structures and properties. The application of microstructural coatings to the surface of metals, elastomers and other materials is of particular interest, as it allows to obtain materials with high operational properties, which increases the trouble-free service life and service life of parts and devices. Therefore, it is of interest to conduct experimental and theoretical research in this area. The article presents the results of experimental studies of the structure and phase composition of the surface layer of molybdenum-modified elastomers using scanning electron microscopy and X-ray diffraction. The purpose of the study was to study the structural features of molybdenum coatings applied to the surface of rubber prepared on the basis of two rubbers; to conduct a comparative analysis of coating formation conditions; to determine the most optimal conditions for molybdenum spraying modes. Spraying was carried out by the method of magnetic spraying. The results of the study showed that the nature and topology of the amorphous-crystalline structure of the coating significantly depends on the spraying modes. The parameters of the structure and relief also depend on the temperature of the substrate, the deposition time, the target material, and the power of the sputtering source. The coatings are characterized

© Кузнецова Ю. В., 2025

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОКРЫТИЙ ЭЛАСТОМЕРОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ МОЛИБДЕНОМ

by a granular structure with the formation of clusters of various shapes and sizes. In the course of the research, the most optimal spraying modes were selected to obtain samples with the specified properties. The temperature of the substrate, the sputtering time, the target material, and the power of the sputtering source affect the formation of the structure and relief of the surfaces of the original and modified samples.

Keywords: elastomers, scanning electron microscopy, nanomaterials, topocomposites, wear resistance, amorphous crystal structure, X-ray diffractometry, modification.

For citation: Kouznetsova, Y. V., (2025). Investigation of the structure and phase composition of coatings of molybdenum-modified elastomers. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 212-217. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.04.036. EDN: <https://elibrary.ru/WOGPFB>.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих областях промышленности требуются материалы и изделия, обладающие высокими эксплуатационными свойствами. Так, целый ряд изделий из полимеров и эластомеров, в частности резинотехнические изделия (РТИ), работают при повышенных температурах в агрессивных средах с высоким контактным давлением. Конструктивное исполнение, наряду с составом этих материалов, определяет эксплуатационные свойства изделий.

Особое внимание уделяется параметрам износостойкости РТИ, которые оцениваются по потере массы и изменению объема трущихся образцов и зависят от механических, механо- и термохимических воздействий [5]. Коэффициент трения, определяющий степень залипания и низкую износостойкость, достаточно высок для большинства марок РТИ. Это в свою очередь приводит к неудовлетворительным антифрикционным свойствам резины. Материалы с высокими эксплуатационными свойствами можно получить объёмными или поверхностными способами модифицирования. На этапе изготовления РТИ возможен объёмный тип модификации, который заключается во введении в основной состав различных добавок – наполнителей-модификаторов. Это способствует изменению структуры полимера и образованию межфазного слоя, что в свою очередь сказывается на эксплуатационных характеристиках композита [11].

При поверхностном модифицировании изменению подвергаются свойства поверхностных слоёв образца, тогда как свойства основного материала не изменяются. Речь идёт об изменении свойств поверхностных слоёв. Металлические микроstructures, нанесённые на поверхность резиновых изделий, позволяют повысить износостойкость, эластичность и расширить температурную область применения данных изделий [9].

Благодаря использованию нанотехнологий, стало возможным получение принципиально новых материалов с требуемыми структурами и свойствами [6].

Создание микроструктурных покрытий с заданными свойствами является в настоящее время одной из основных задач. Анализ литературных данных показывает, что нанесение микроструктурных покрытий на поверхность металлов, эластомеров и других материалов недостаточно изучены. Поэтому представляет интерес проведение экспериментальных и теоретических исследований в этой области. Нанесение микроструктурных покрытий производится с помощью новых или модернизированных существующих установок, предназначенных для распыления. При работе с эластомерами важно учитывать возможность снижения температур ниже критических значений для эластомеров и увеличении скорости проведения процесса. Это возможно осуществить с помощью систем, позволяющих реализовать метод магнетронного распыления на

поверхность эластомеров металлических и неметаллических материалов. В настоящее время разработан ряд методик для синтеза материалов с требуемыми свойствами и новых РТИ с уникальными свойствами за счет формирования необходимых структур на мезо-, микро-, наноуровне. В некоторых работах [8] рассмотрены вопросы разработки наноструктурных топокомпозиций – материалов, обладающих повышенными эксплуатационными свойствами, получаемых с помощью катодных систем вакуумных установок.

Таким образом, благодаря качественно новым свойствам изделий, полученных с использованием нанотехнологий, значительно повышается безаварийный срок службы и эксплуатационный ресурс деталей и устройств.

МЕТОДЫ

Для нанесения нанопокровов из тугоплавких металлов используются в основном ионно-плазменные методы, которые сопровождаются интенсивным рассеянием энергии. Структура покрытия при использовании метода магнетронного распыления образуется, проходя три стадии формирования. На начальной стадии происходит процесс зародышеобразования. Но отсутствие соответствующих термодинамических условий не способствует развитию массовой кристаллизации. Вторая стадия включает в себя процесс образования аморфных кластеров, центрами которых являются упомянутые выше нанокристаллические зародыши. На третьей стадии формируется межкристаллическая фаза с диссипативной структурой [3].

Каждая фаза представляет собой цепочку сложных процессов, формирующих поверхность образца. Настоящее исследование заключалось в изучении свойств модифицированной, специфически рельефной поверхности резиновых образцов. В качестве модификатора использовался молибден, наносимый на поверхность методом магнетронного распыления. За исследуемые образцы были взяты резиновые образцы, изделия из которых в настоящее время широко применяются в промышленности для изготовления покровного слоя резинокордных оболочек и различных резинотехнических изделий [11]. 70 единиц массовой части в данных образцах принадлежит полихлоропреновому каучуку марки Denka PS-40A или Байпрен 611. Оставшаяся массовая часть – это каучук БНКС-28 АМН [7].

Перед процедурой ионно-плазменного распыления образцы подвергались предварительной подготовке, включающей в себя ионную очистку высокочастотной плазмой в течение 10 минут, очистку поверхности образцов от механических посторонних включений (крошек резины, пыли и др.). Проводилась подготовка вакуумной камеры и приспособления для распыления. Затем образцы загружались в камеру и осуществлялась вакуумная откачка.

Режимы распыления определялись экспериментально. При проведении поверхностного структурного

модифицирования образцов в качестве технологического газа использовался аргон, давление которого в камере составляло 3,3÷3,4 МПа. Система подачи аргона основана на базе регулятора расхода, обеспечивающей высокую надежность данного процесса. Начальной нагрев образца проводился в положении без прямого попадания пучка. Молибден распылялся на образцы при температуре подложки 80 °С с шагом 30 минут и мощностью распыления от 100 до 150 Вт. При данном режиме распыления получаем линейную зависимость толщины покрытия от времени распыления.

Для нанесения молибденового покрытия использовалось устройство Vsm-200ADVAVAC (Канада), которое снабжено распылительной мишенью, при этом чистота молибдена составляет порядка 99,95%. Данная система позволяет производить магнетронное распыление металлов и неметаллов с помощью одного или нескольких магнетронов. Температура основания (подложки) при распылении поддерживается в оптимальном диапазоне температур 80-90°С и контролировалась термпарой. В ходе распыления магнетроны располагались снизу, подложкодержатель с образцами резины – сверху. Толщина покрытия и текущая скорость распыления отслеживались системой измерения толщины STM-2XM (производство Sycon, США), снабжённой кварцевым датчиком [11].

Исследование структурных характеристик поверхностного слоя проводилось методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с помощью сканирующего электронного микроскопа марки «JEOL JSM 5700-LV». Использование системы химического анализа EDX JED-2201 JEOL (Япония) позволило провести качественный и количественный химический анализ исследуемого объекта [11].

Рентгенографические исследования проводились на дифрактометре XRD 7000S в медном K α -излучении ($\lambda = 0,154$ нм). Стандартная методика «Theta 2Theta» использовалась с целью исключения рефлексов малой интенсивности, принадлежащих соединениям каучуков и их наполнителей. Расчет межплоскостных расстояний выполнялся по дифракционным максимумам рентгенограмм, полученных по методу скользящего пучка при углах скольжения α от 5° до 15°. Полученные значения межплоскостных расстояний усредняли и сравнивали с табличными значениями для предполагаемых фаз, присутствующих в покрытии. Толщину покрытия оценивали по толщине слоя, ослабляющего интенсивность рентгеновского излучения. Расшифровка рентгенограмм производилась на основе закона Вульфа–Брэгга [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Очевидно, что на структуру покрытий оказывают влияние свойства исходного материала, состояние и температура поверхности, скорость распыления, а также процессы, происходящие во время описанных выше стадий формирования структуры образца.

В свою очередь состав и структура модифицированных покрытий определяют их свойства [1]. В качестве примера на рисунках 1 - 4 представлены микрофотографии поверхностей исходной и модифицированной молибденом резины в 2D формате. Время распыления Mo соответствует 30, 90 и 120 минут. Анализ снимков позволяет сделать вывод о том, что время распыления существенно влияет на рельеф покрытия. Наличие мелких зёрен и их образований на поверхности исходного образца (рис.1а) определяет большое количество микро-шероховатостей [2].

На характер структурных образований молибденового покрытия на резине, наряду с длительностью распыления, существенно влияет такой технологический параметр, как мощность распыления. На рисунке 5 приведены графики зависимости размеров кластеров от мощности распыления для двух образцов. Покрытие первого образца получено при времени распыления 60 минут и составляет 38 нм. Покрытие второго образца формировалось в течение 120 минут и имеет толщину 170 нм [11].

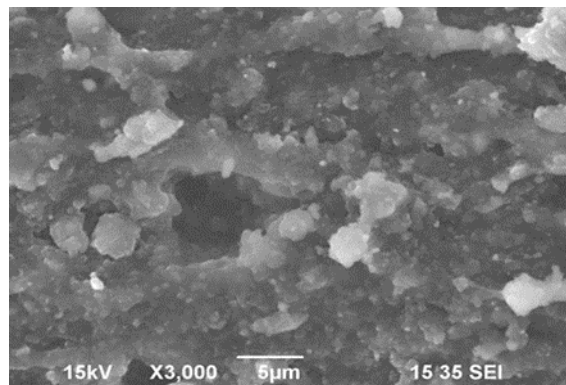


Рисунок 1 – Структура поверхности исходного образца
Figure 1 – The surface structure of the initial sample

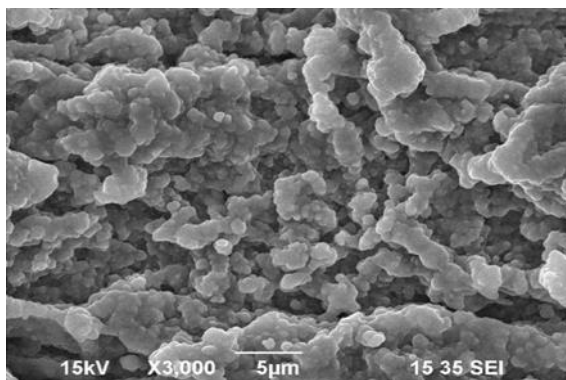


Рисунок 2 – Структура поверхности модифицированного образца при времени распыления 30 мин
Figure 2 – Surface structure of the modified sample at a spray time of 30 min

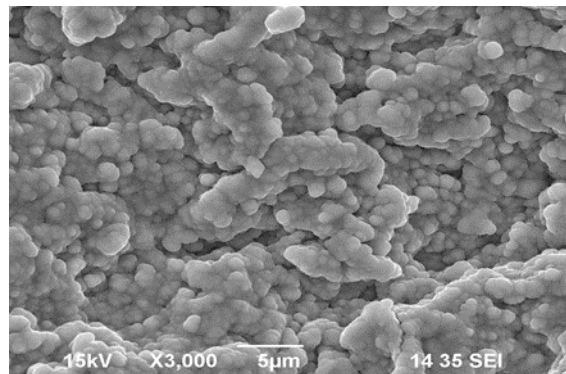


Рисунок 3 – Структура поверхности модифицированного образца при времени распыления 90 мин
Figure 3 – Surface structure of the modified sample at a spray time of 90 min

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОКРЫТИЙ ЭЛАСТОМЕРОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ МОЛИБДЕНОМ

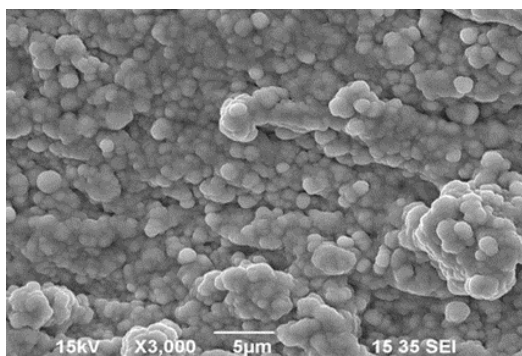


Рисунок 4 – Структура поверхности модифицированного образца при времени распыления 120 мин

Figure 4 – Surface structure of the modified sample at a spray time of 120 min



Рисунок 5 – Зависимость размеров кластерных образований от мощности ионно-плазменного распыления

Figure 5 – Dependence of the size of cluster formations on the ion plasma sputtering power

Представленные результаты позволяют сделать предварительные выводы по влиянию времени и мощ-

ности распыления на особенности структуры молибденового покрытия.

При времени распыления молибдена 90 минут и 120 минут запускается процесс формирования зёрен и кластеров размерами от несколько сотен до тысяч нанометров.

Образовавшиеся структурные единицы (кластеры) представляют собой переходный элемент между отдельным атомом и твердым телом. Логично, что их свойства существенно отличаются от свойств первоначального образца, что объясняется наличием особой разновидности металлической связи между соединениями атомов металла, обуславливающей прочность материала [4]. Кластерная структура не только локализует соединение небольших участков поверхности, но и позволяет избежать взаимных воздействий (заеданий) и снижает интенсивность изнашивания. Данный факт подтверждён тестом на износостойкость [10]. Таким образом, при заданной мощности рост кластерных образований определяется увеличением времени распыления модификатора. Эффект уменьшения размеров кластерных зёрен наблюдается с увеличением мощности излучения ионов с мишени на резиновую подложку, так как более равномерное распределение ионов по поверхности образца возможно при увеличении количества мелких кластеров. При чём данный процесс характерен для любого времени распыления.

Шероховатость, как основная геометрическая характеристика поверхности, по сути, представляет собой совокупность микронеровностей на поверхности изделия. Такие параметры, как средняя шероховатость Ra и средняя максимальная высота Rz, определяют эксплуатационные свойства и износостойкость изделия при трении образцов. Вероятность возникновения поверхностных трещин от усталости возрастает с увеличением степени шероховатости. И наоборот, уменьшение этого параметра приводит к уменьшению вероятности образования трещин. Основные характеристики шероховатости поверхности исходного и модифицированного молибденом образцов представлены в таблице 1. Время распыления варьируется от 30 до 150 минут с шагом в 30 минут [3].

Таблица 1 – Параметры шероховатости резины, модифицированной молибденом, в зависимости от времени распыления

Table 1 – Roughness parameters of molybdenum-modified rubber, depending on the spray time

Время распыления, мин.	исх	30	60	90	120	150
Средняя шероховатость Ra	2,7	3,0	2,0	2,1	1,9	1,0
Максимальная высота шероховатости Rt	1,9	2,7	1,5	2,1	1,7	1,0
Максимальная глубина впадины шероховатости Rv	1,6	2,3	1,5	2,1	1,6	1,0
Средняя максимальная высота профиля Rz	1,4	3,7	2,1	2,4	2,2	1,0

Эксплуатационные свойства эластомеров, в том числе резин, модифицированных тугоплавкими металлами, зависят от химического состава приповерхност-

ного слоя. Элементный состав исходных образцов и образцов с молибденовым покрытием, полученных при разном времени распыления, представлен в таблице 2 [11].

Таблица 2 – Элементный состав исходных и модифицированных образцов при различном времени распыления молибдена

Table 2 – The elemental composition of the initial and modified samples at different times of molybdenum sputtering

Время распыления, мин.	Основные элементы, масс. %					Соединения, масс. %
	C	O	Mg	Cl	Mo	MoO ₃
Исходный	88,3	1,2	1,8	8,7		
Исходный	78	8	1,1	12		
60	46	21,2		69	23,9	
60	42	19		8	26	
90	10	25		8	57	
90	34	21		3	42	63
120		24		2	67	
120	6	31		2	62	92
150	25	14		1,5	59	
150	24	24		2	49	73

ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, нанослой молибдена на поверхности резинового изделия меняет рельеф и структуру поверхностного слоя, что сказывается на параметрах шероховатости. На начальных стадиях ионно-плазменной обработки при времени напыления 30 мин на исходном рельефе резинового образца формируется новая структура поверхности [3]. Это связано с нанесением на поверхность резинового образца твердых кристаллических гранул наполнителя, образующих дополнительные выступы и впадины. Дисперсность ингредиентов резиновой смеси имеет тот же порядок, что и средний размер гранул. Наслаивание металлического покрытия на верхний слой резины приводит к увеличению параметров шероховатости. Начальная структура поверхности закрывается и на образце образуется специфический рельеф, связанный с увеличением толщины покрытия. Процесс уменьшения впадин и высоты шероховатости приводит к выравниванию поверхности в горизонтальной проекции и наиболее выражен у образцов с толщиной покрытия более 80 нм. При этом основные параметры шероховатостей уменьшаются.

Анализ данных показывает, что увеличение времени распыления металла приводит к уменьшению концентрации углерода и хлора в приповерхностных слоях. При времени распыления 90 и более минут наблюдается появление трёхокси молибдена MoO_3 . Увеличение времени напыления при определённой мощности (100 Вт) приводит к увеличению размеров структурных образований (от 1,05 до 1,17 мкм). Дальнейшее увеличение мощности напыления способствует увеличению числа кластеров с меньшими размерами.

Таким образом, по сравнению с исходными образцами основные параметры шероховатости ниже у образцов с модифицированной поверхностью, а значит степень износостойкости у них выше, а коэффициент трения резинометаллической пары меньше [1]. Наибольший эффект модификации наблюдается при проведении данного процесса при температуре нагрева подложки от 80 до 90 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эластомеры резины и резинотехнических изделий находят широкое практическое применение. Их модифицирование, как объемное, так и поверхностное может существенно улучшить эксплуатационные свойства РТИ. Микроструктурное покрытие на резиновой подложке позволяет улучшить эластичность резины. Таким образом процесс модифицирования представляет большой научный и практический интерес.

Для получения РТИ с требуемыми свойствами наиболее подходящими модификаторами являются тугоплавкие металлы, в частности молибден. Магнетронное распыление, как новая технология модификации резиновых образцов, обеспечивает нанесение микроструктурного металлопокрытия на резиновую подложку, улучшающего физико-механические свойства изделия.

Методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии были исследованы структура и фазовый состав покрытий на основе молибдена.

Сравнительный анализ структуры исходных и модифицированных образцов показал, что характер и топология аморфно-кристаллической структуры покрытия существенно зависят от режимов распыления. Параметры структуры и рельефа зависят от температуры подложки, времени напыления, материала мишени и

мощности источника напыления. Для покрытий характерна зернистая структура с образованием кластеров разной формы и размеров. В ходе исследований были подобраны наиболее оптимальные режимы напыления для получения образцов с заданными свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлин Е.В., Сейдман Л.А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. Москва : Техносфера, 2010. 528 с. ISBN 978-5-94836-222-9.
2. Калистратова, Л. Ф. Особенности структуры поверхностного слоя эластомеров, модифицированных методом магнетронного распыления вольфрама / Л. Ф. Калистратова, В. И. Суриков, П. А. Давидюк // Актуальные проблемы современной науки : Материалы VII Региональной научно-практической конференции с международным участием, Омск, 20 апреля 2018 года / Минобрнауки России, ОмГТУ, каф. «Физика»; редкол.: А.И. Блесман, М.А. Зверев, О.М. Сухарева. Омск: Омский государственный технический университет, 2018. С. 29-33.
3. Калистратова, Л. Ф. Структура и фазовый состав поверхностного слоя эластомеров, модифицированных вольфрамом методом магнетронного распыления / Л. Ф. Калистратова, Е. А. Рогачев, В. И. Суриков, Ю. В. Кузнецова // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2021. Т. 14, № 5. С. 572-582. DOI 10.17516/1999-494X-0334.
4. Ковшов А.Н. Основы нанотехнологии в технике : учебное пособие для студ. высш. учеб. Заведений / А.Н. Ковшов, Ю.Ф. Назаров, И.М. Ибрагимов. М. : издат. центр «Академий», 2009. 240 с.
5. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений / Б.Н. Арзамасов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов и др. М: Машиностроение, 1986. 384 с, ил.
6. Наноструктурные материалы в машиностроении: учебное пособие / С.В. Матренин, Б.Б. Овечкин; Томский политехнический университет, 2010. 186 с.
7. Николаев И.В. Триботехнические свойства поверхностно модифицированной резины / Николаев И.В., Полонянкин Д.А., Суриков В.И., Целых Е.П. // Актуальные проблемы современной науки: Материалы IV регион. науч.- прак. конф. (Омск, 17 апр. 2015 г.). Омск: ОмГТУ, 2015. С. 43-45.
8. Разработка и получение наноструктурных композиций / П. Б. Гринбер, Д. Н. Коротаев, К. Н. Полещенко, В. И. Суриков // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2015. № 3(43). С. 39-45.
9. Технология нанесения наноструктурированных металлопокрытий на резинотехнические изделия / П. Б. Гринберг, К. Н. Полещенко, В. И. Суриков, Е. Е. Тарасов // Вестник Омского университета. 2012. № 2(64). С. 249-252.
10. Целых, Е. П. Влияние наноструктурного поверхностного модифицирования на триботехнические свойства резин / Е. П. Целых, Д. А. Полонянкин, В. И. Суриков // Актуальные проблемы современной науки : Материалы III региональной молодежной научно-практической конференции с международным участием, Омск, 25 апреля 2014 года / Редколлегия: В. И. Суриков, В. К. Волкова, Т. В. Куниевская. Омск: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет", 2014. С. 88-90.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОКРЫТИЙ ЭЛАСТОМЕРОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ МОЛИБДЕНОМ

11. Целых, Е. П. Влияние режимов ионно-плазменного напыления на структуру и свойства износостойких покрытий на резиновой подложке : специальность 05.16.09 "Материаловедение (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Е. П. Целых. Омск, 2015. 170 с.

Информация об авторах

Ю. В. Кузнецова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Сургутского государственного университета.

REFERENCES

1. Berlin E. V., Seidman L. A. (2010) Ion-plasma processes in thin-film technology. Moscow: *Technosphere Publ.* (In Russ.). - ISBN 978-5-94836-222-9.
2. Kalistratova, L. F., Surikov, V. I., & Davidyuk, P. A. (2018). *Features of the surface layer structure of elastomers modified by magnetron sputtering of tungsten. In Current Issues in Modern Science: Proceedings of the VII Regional Scientific-Practical Conference with International Participation* (pp. 29–33). Omsk: Omsk State Technical University. (In Russ.).
3. Kalistratova, L. F., Rogachev, E. A., Surikov, V. I., & Kuznetsova, Y. V. (2021). Structure and phase composition of the surface layer of elastomers modified by tungsten using magnetron sputtering. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 14(5), 572–582. (In Russ.). DOI: 10.17516/1999-494X-0334.
4. Kovshov, A. N., Nazarov, Yu. F., & Ibragimov, I. M. (2009). *Osnovy nanotekhnologii v tekhnike: Uchebnoe posobie dlya stud. vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fundamentals of Nanotechnology in Engineering: Textbook for Students of Higher Educational Institutions.* Izdatel'skiy Tsentr "Akademiya", Moskva. (In Russ.).
5. Arzamasov, B. N., Sidorin, I. I., Kosolapov, G. F., et al. (1986). *Materialovedenie: Uchebnik dlia vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedenii. Materials science: Textbook for higher technical educational institutions. Mashinostroyeniye*, Moskva. (In Russ.).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 июня 2025; одобрена после рецензирования 24 ноября 2025; принята к публикации 28 ноября 2025.

The article was received by the editorial board on 07 June 2025; approved after editing on 24 Nov 2025; accepted for publication on 28 Nov 2025.

6. Matrenin, S. V., & Ovechkin, B. B. (2010). *Nan-strukturnye materialy v mashinostroyenii: Uchebnoe posobie. Nanostructured materials in mechanical engineering: Textbook.* Tomsk Polytechnic University, Tomsk. (In Russ.).

7. Nikolaev, I. V., Polonyankin, D. A., Surikov, V. I., & Tselykh, E. P. (2015). Tribotechnical properties of surface-modified rubber. *In Actual problems of modern science: Materials of the IV regional scientific-practical conference* (pp. 43–45). Omsk: Omsk State Technical University. (In Russ.).

8. Grinberg, P. B., Korotaev, D. N., Poleshchenko, K. N., & Surikov, V. I. (2015). Development and production of nanostructured topocomposites. *Vestnik Sibirskoy Gosudarstvennoy Avtomobil'no-Dorozhnoy Akademii*, *(3)*43, 39–45. (In Russ.).

9. Grinberg, P. B., Poleshchenko, K. N., Surikov, V. I., & Tarasov, E. E. (2012). Technology of applying nanostructured metal coatings on rubber products. *Vestnik Omskogo Universiteta*, *(2)*64, 249–252. (In Russ.).

10. Tselykh, E. P., Polonyankin, D. A., & Surikov, V. I. (2014). The influence of nanostructural surface modification on the tribological properties of rubbers. *In Actual problems of modern science: Materials of the III regional youth scientific-practical conference with international participation* (pp. 88–90). Omsk: Omsk State Technical University. (In Russ.).

11. Tselykh, E. P. (2015). *Vliyaniye rezhimov ionno-plazmennogo napyleniya na strukturu i svoysva iznosostoykikh pokrytiy na rezinovoy podlozhke: Spetsial'nost' 05.16.09 "Materialovedeniye (po otraslyam)". The effect of ion-plasma spraying modes on the structure and properties of wear-resistant coatings on a rubber substrate: Specialty 05.16.09 "Materials Science (by industry)" (Doctoral dissertation).* Omsk. (In Russ.).

Information about the authors

Y. V. Kouznetsova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Life Safety Department» of the Surgut State University.