

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 539.4; 538.9; 539.56; 621.7

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-627-640>

Обзорная статья

Разработки в области северного и арктического материаловедения для промышленности Республики Саха (Якутия)

В. В. Лепов^{✉,1}, А. А. Охлопкова²

¹Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
г. Якутск, Российская Федерация

²Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

✉wisecold@mail.ru

Аннотация

Представлен обзор исследований в области северного и арктического материаловедения, включая фундаментальные принципы и эмпирические подходы к созданию новых материалов для повышения целостности, безопасности и ресурса сложных технических систем, эксплуатируемых в экстремальных климатических условиях. Представлены основополагающие принципы создания материалов с заданной структурой на различных уровнях организации и масштабах, построения теоретических и численных моделей, выбора оптимальных соотношений составляющих и технологических переделов для получения заданного комплекса свойств – коррозионной стойкости, износо-, холодо- и морозостойкости, прочности и пластичности, – для обеспечения работоспособности и ресурса машин и конструкций в экстремальных условиях Арктики и Субарктики.

Ключевые слова: сталь, композит, полимер, морозостойкость, износостойкость, разрушение, вязко-хрупкий переход, многоуровневое моделирование, структурно-системный подход

Финансирование. Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук (проект № FWRS-2021-0039) и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (№ FSRG-2023-0026) и РНФ (№ 22-13-20056).

Для цитирования: Лепов В.В., Охлопкова А.А. Разработки в области северного и арктического материаловедения для промышленности Республики Саха (Якутия). Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023;28(4):627–640. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-627-640>

Review article

Materials Science of the North and the Arctic for the industry of the Republic of Sakha (Yakutia)

V. V. Lepov^{✉,1}, A. A. Okhlopkova²

¹Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

²Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

✉wisecold@mail.ru

Abstract

An overview of the research in the field of Northern and Arctic Materials sciences is provided, including the design and safe operation of materials for complex technical systems in extreme environments. The discussion covers the fundamental principles of material design, including structure at different levels of organization and scales, and the develop-

ment of theoretical and numerical models. Additionally, the optimal ratios of components and technological stages are discussed to obtain specific properties such as corrosion resistance, wear, cold and frost resistance, strength, and plasticity. These efforts aim to ensure the reliable operation and resource efficiency of machines and structures in harsh arctic and subarctic conditions.

Keywords: steel, composite, polymer, frost resistance, wear resistance, fracture, ductile-to-brittle transition, multi-level modeling, system-structural approach

Funding. This study was conducted within the framework of the Program of Basic Scientific Research of the State Academies of Sciences (project number FWRS-2021-0039) and supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (number FSRG-2023-0026) and the Russian Science Foundation (number 22-13-20056).

For citation: Lepov V.V., Okhlopova A.A. Materials Science of the North and the Arctic for the industry of the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(4):627–640. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-627-640>

Введение

Согласно современным данным, число исследований в области новых материалов, применяемых в том числе для экстремальных климатических условий Севера и Арктики, непрерывно растет [1]. Это объясняется развитием новых технологий получения материалов, ростом требований к их свойствам в различных отраслях промышленности, в частности, на транспорте и в энергетике, а также в химической и нефтегазо-

вой отрасли, где на первый план выходит химическая и коррозионная стойкость, а также износостойкость.

На рис. 1 представлена информация по количеству публикаций в каждом из направлений материаловедения в базе данных Scopus [1] за последнее десятилетие.

К композиционным материалам (четверть всех публикаций) отнесены здесь полимерные, металлические, (металло)керамические материалы, волокна и добавки, аэрогели, базальто- и углепластики. Вторая по числу публикаций область включает в себя материалы, полученные с помощью аддитивных технологий, это в первую очередь 3D- и 4D-печать, но также и 5D-печать, в том числе живых тканей, когда за счет получения специфической поверхностной и внутренней структуры материала становится возможным достижение синергетических, системных бионических эффектов [2]. Третье место по числу публикаций неожиданно заняли умные материалы. К ним отнесены, кроме пьезо- и термоэлектриков, метаматериалы, пирозлектрики, фотоэлектрики, магнито- и электрострикционные, самовосстанавливающиеся, самосмазывающиеся, самоочищающиеся, pH-чувствительные материалы, жидкости с управляемыми свойствами, сплавы с эффектом памяти формы. Полимеры и углеродные материалы занимают, соответственно, четвертое и пятое места. На шестом и седьмом местах с долей по 8 % – наноматериалы и покрытия. Исследования сталей и сплавов с особыми свойствами, добавок и смесей, высокоэнтропийных, диффузионно-твердеющих сплавов заняли всего лишь седьмое место. Работы по катализаторам, источникам преобразования и хранения энергии составляют всего 5 % всех публикаций, а исследования специальной кера-

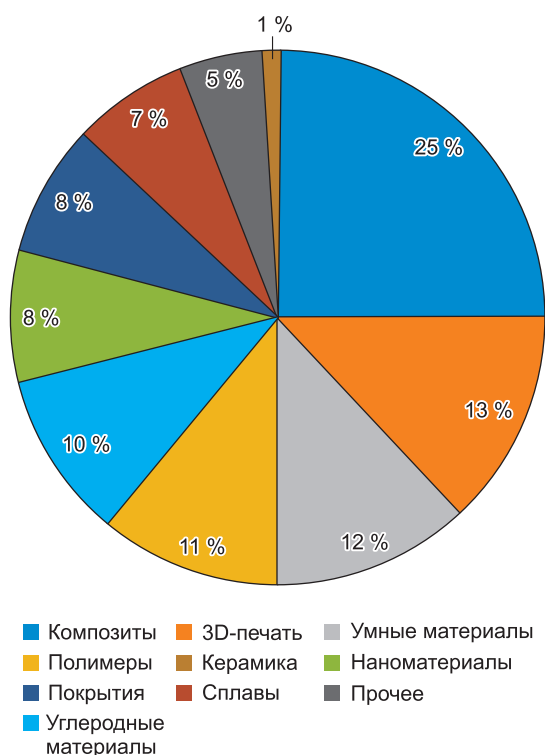


Рис. 1. Диаграмма распределения публикаций по направлениям исследований материалов [1]

Fig. 1. Share diagram of publications in the areas of material research [1]

мики и высокотемпературных сверхпроводников – 1 %.

Следует заметить, что практически все упомянутые области изучения материалов актуальны и для экстремальных условий эксплуатации, а с учетом того, что доля российских исследований в арктическом материаловедении составляет всего 5 %, следует значительно усилить работу в этом направлении.

Наряду с традиционным направлением северного материаловедения [3–5], связанным с хладостойкостью металлических материалов и их сварных соединений, возникло так называемое арктическое материаловедение [6], направленное на создание и неметаллических – полимерных и композиционных материалов, обладающих высокой надежностью при эксплуатации в условиях экстремального климата Арктики. Исследования в этих направлениях направлены на изучение поведения и прогнозирование долговечности и работоспособности материалов в условиях очень холодного климата Субарктики и побережья Арктики, реализации принципов рационального природопользования при создании и эксплуатации материалов в таких условиях, а также использование промышленно освоенных авиационных и космических материалов в особо экстремальных климатических условиях, например, при освоении других планет и астероидов.

Развитие арктического материаловедения происходит не только путем усложнения их химического состава и структуры, перехода от простых химических соединений к сложным, но и стремлением использовать местные природно-легированные руды и композиты на основе природных материалов, таких как дерево, лед, слоистые и каркасные силикаты, а также имеются попытки создания «умных», «интеллектуальных» материалов [7], которые обладают самодиагностикой, аккомодацией с окружающей средой и условиями работы и разделяются в соответствии с их чувствительностью на физические (давление, температура, влажность, свет, электрическое поле и магнитное поля), химические (рН, CO₂ и др.) или биологические раздражители. Также умные материалы могут использовать поглощаемую энергию и изменять свои характеристики, становясь идеальными датчиками для мониторинга состояния.

В последние годы особенно актуальными становятся исследования полифункциональных материалов, таких как металлокерамика и метал-

лополимеры, наномодифицированные композиционные материалы, аэрогели, метаматериалы, или материалы с аномальными свойствами, применение которых может быть экономически оправдано именно при особых обстоятельствах. При этом испытания и апробация их должны проходить в экстремальных климатических условиях Арктики и Субарктики.

Фундаментальные подходы к созданию новых материалов

Создание новых материалов всегда представляло собой трудную задачу, связанную с решением ряда комплексных междисциплинарных задач. Хотя химия и материаловедение, металлургия, машиностроение и авиакосмическая отрасль решают принципиально разные задачи, общими для них остаются фундаментальные физические законы и принципы, определяющие предельные свойства структур и оптимальные соотношения свойств конструкционных и функциональных материалов. В настоящее время мир поставлен перед необходимостью решения ряда насущных вопросов, связанных с безопасностью создаваемых и уже используемых сложных технических систем, включая энергетические комплексы и протяженные транспортные системы, в том числе эксплуатируемые в экстремальных климатических условиях Севера и Арктики [4, 5, 8].

Хотя последние представляются весьма перспективными для ряда специальных задач, таких как ускоренное построение эмпирических регрессионных зависимостей, оптимизация испытаний, классификация и кластеризация, а также оценка вероятностей для разработки новых составов оксидных соединений, композиционных материалов, электролитов, некоторых металлических сплавов сложного состава, что позволяет разрабатывать материалы с заранее заданным комплексом свойств как макроскопического, так и микроскопического масштаба, основываясь на их структуре, однако теоретической основой этих методов остаются знания и теории, основанные на фундаментальных принципах, и соответствующие методические подходы. Без них развитие каких-либо из технологий искусственного интеллекта не представляется возможным.

Первым фундаментальным является принцип относительности Галилея, связанный с необходимостью многомасштабного и многоуровневого рассмотрения явлений и объектов. Такие методы численного моделирования стали популяр-

ным инструментом оперирования на нескольких масштабах и позволили уменьшить число степеней свободы на основе организации локальных автономных вычислений [9–11]. Более того, эти методы позволяют получить строгие макроскопические уравнения для многомасштабных задач без разделения решения и строгих ограничений. Сама концепция многомасштабного моделирования появилась в последние десятилетия для описания задач симуляции механического, физического или химического поведения в уровне сплошного тела на основе информации, получаемой из численных моделей на более тонких масштабных уровнях в системе, не прибегая к эмпирическим конститутивным моделям. Было разработано большое количество методов, использующих ряд различных подходов для связывания пространственных и временных шкал [12–15].

Отдельно следует рассмотреть примеры реализации такого подхода в материаловедении, например, регулирование структуры твердосплавных алмазосодержащих композитов на стадии

пропитки легкоплавкими металлами в гибридной технологии синтеза, где в одном технологическом цикле осуществляются металлизация алмаза и спекание образца, обеспечивая тем самым сохранение покрытия в процессе изготовления алмазного инструмента [16]. При этом создается многоуровневая структура композита: элементы карбидного каркаса размером в несколько десятков микрон, состоящие из зерен карбида вольфрама размером в сотни нанометров, переходная зона «алмаз–связующее» размером в несколько микрон, и медная прослойка между всеми этими элементами толщиной от десятков до нескольких сотен нанометров (рис. 2).

Хрупкое разрушение и безопасность технических систем в Арктике

Традиционной для северного материаловедения проблемой является внезапное хрупкое разрушение элементов конструкций и узлов машин при их эксплуатации в условиях низких климатических температур. Оно находится в фокусе

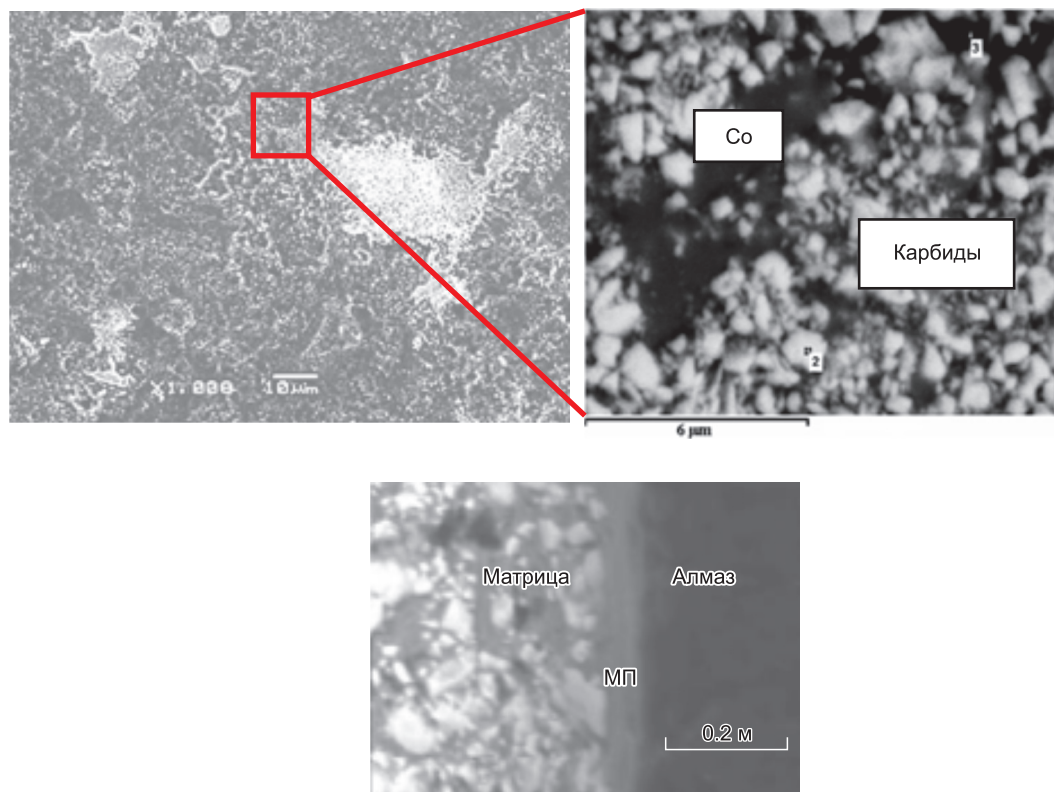


Рис. 2. Структура многоуровневой организации: *a* – микроструктура WC-Co композита, $\times 1000$; *б* – карбидный каркас композита; *в* – медная прослойка на границе между твердосплавной матрицей и кристаллом алмаза

Fig. 2. Structure of a multi-level organization: *a* – microstructure of the WC-Co composite, $\times 1000$; *б* – carbide framework of the composite; *в* – copper interlayer at the boundary between the carbide matrix and diamond crystal

научных исследований уже более ста лет и только в последние годы получает достаточно полное объяснение в рамках существующих физических теорий. Однако феноменология хрупкого разрушения хорошо изучена и для большинства сталей и сплавов укладывается в схему Иоффе–Давиденкова, согласно которой критическая температура хрупкости (хладноломкости) определяется моментом достижения напряжения трения решетки, соответствующего пределу текучести, пределу прочности или сопротивлению отрыву [22].

Признанная необходимость многомасштабного рассмотрения эволюции структуры и свойств при эксплуатации материалов и сложных систем, а также ограниченности подходов, основанных на концепции приемлемого риска, принципах классической механики сплошных сред, механики разрушения и теории предельных состояний, позволяют по-новому оценить возможности новых методов анализа, диагностики и моделирования на основе структурных эволюционных и статистических подходов. Экстремальные условия эксплуатации, когда отдельные элементы и целые системы подвергаются многократным фазовым переходам, действию усталостного, коррозионного и ударно-контактного нагружения, вынуждают учитывать влияние изменения повреждений на структуру материала и пластическое деформирование, а неоднородности напряженно-деформированного состояния – на предельные характеристики упрочняющихся конструкционных сталей.

Имеющиеся наработки в области конструкционного материаловедения (физики прочности, механики деформирования и разрушения, физико-химических основ металловедения, механики структурно-неоднородных материалов) и моделирования технологических взаимосвязанных механических и физико-химических процессов в экстремальных условиях низких температур и фазовых переходов могут послужить основой для комплексного решения проблемы обеспечения техногенной безопасности сложных технических систем [2].

Известно, что исследование состояния материала при деформировании и разрушении экспериментальных образцов или реальных конструкций, в частности морфологии поверхности и элементного состава, возможно как *in situ*, например, для мониторинга и управления объектом, так и *a posteriori*, например, для экспертизы

и выявления причин аварии. При этом методики должны быть апробированы *a priori*, – в частности, широко используемые методы электронной сканирующей микроскопии и элементного волнового анализа применяются для анализа поверхностей разрушения образцов материалов, находящихся как в исходном состоянии, так и после длительной эксплуатации, включая воздействие коррозии, температурных колебаний, а также после термо-, ультразвуковой обработки, равноканального углового или винтового пресования, экструзии иковки. Образцы испытываются на статическое растяжение, длительную и малоцикловую усталость, ударную вязкость при низких климатических температурах (до -60°C).

Хладноломкость выявляется при испытаниях на динамический изгиб в условиях объемного напряженного состояния, когда дислокационное скольжение затруднено. Поэтому для анализа воздействия низких температур на процесс распространения трещин необходимо рассматривать особенности динамического разрушения. В работах Иоффе, Нильсона и Броберга дана оценка предельной скорости трещины, или скорости поверхностных волн Релея в материале, не превышающей 90 % от скорости волн сдвига $c = \sqrt{\mu/\rho}$, где μ – модуль упругости второго рода, ρ – удельная плотность. При приближении к этой скорости существенно изменяется интенсивность распределения напряжений в вершине растущей трещины, тогда как при скоростях, не превышающих 0,05 c (как в случае испытаний на ударный изгиб), можно считать ее соответствующей условиям статического нагружения.

Также выяснено, что водород формирует собственную подсистему в решетке металла с собственными частотами колебаний вне фононного спектра кристалла. Фононно-дислокационная теория вязко-хрупкого перехода в ОЦК-металлах расширена и на явление водородного охрупчивания, при этом энергия активации микропластического сдвига за счет взаимодействия с решеточным водородом существенно снижается. На этой основе построена теоретическая и численная модель, результаты расчетов по которой показали качественное и количественное совпадение с экспериментом [18].

Исследования хладостойкости сталей и их сварных соединений, полученных в том числе с использованием природно-легированных руд месторождения Томтор на территории Республики Саха (Якутия) [19, 20], показали, что представ-

ляется целесообразным выбор материалов с высокими значениями энергии активации пластического сдвига сталей и сплавов путем микролегирования сталей редкоземельными элементами, что обеспечит существенное повышение энергии активации и рост сопротивления дислокационно-фононной подсистемы действию растворенного водорода и активной коррозии.

Также одной из наиболее перспективных альтернатив аддитивной технологии для металлических материалов представляется интенсивная пластическая деформация, создающая равновесную дисперсную структуру с микронапряжениями сжатия [20]. Высокая прочность, а также достаточные пластичность и вязкость, исключающие опасность хрупкого разрушения, являются основными требованиями к конструкционным материалам, используемым в технических системах. Одним из эффективных методов увеличения хладостойкости металлических материалов, кроме выплавки сталей специального состава, является получение более мелкой структуры не только зерен, но и составляющих их субзерен и блоков различной фазы. Это достигается целенаправленным управлением их структурой. Развиваемый подход в решении вопроса повышения прочности и хладостойкости материалов заключается, например, в использовании комбинированных методик механической и термической обработки, включая разные по физической сущности и виду нагружения способы [20].

Создание многофункциональных полимерных материалов для нужд Севера и Арктики

В Стратегии развития Арктической зоны России и национальной безопасности до 2035 года, утвержденной 26.10.2020 г., основными направлениями являются: создание новых и модернизация существующих производств; развитие наукоемких и высокотехнологичных производств. Они предусматривают развитие транспортной, энергетической инфраструктуры, промышленных кластеров, которое, в силу уникальных климатических факторов, во многом зависит от бесперебойной работы технических систем. Наиболее подверженными и зависимыми от климатических условий и рабочей среды деталями являются уплотнительные детали и узлы трения, которые определяют работоспособность и долговечность техники. Повышение надежности и долговечности гидравлических, питательных узлов и узлов

трения техники и оборудования, эксплуатируемых в регионах Арктики и Субарктики, представляет собой одну из острых проблем вследствие недостаточной приспособленности промышленных конструкционных материалов к условиям эксплуатации. В связи с этим применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) позволяет решить проблему повышения работоспособности деталей технических систем горнодобывающей промышленности и транспортных средств. Использование металлических и керамических изделий предполагает усложнение технологий из-за их слабой способности гасить удары и вибрации. В связи с этим замена металлических деталей на полимерные самосмазывающиеся детали в узлах трения будет способствовать снижению трудозатрат, загрязнения окружающей среды, повышению безопасности эксплуатации и решению проблемы импортозамещения.

В Республике Саха (Якутия) разработкой новых морозостойких полимерных композитов, способных выдерживать экстремальные условия эксплуатации, занимаются успешно в течение ряда лет СВФУ, ИПНГ СО РАН, ИФТПС СО РАН [21–29]. Наиболее перспективными термoplastами, на основе которых создаются морозостойкие композиты, являются политетрафторэтилен (ПТФЭ) и сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), модифицированные различными дисперсными и волокнистыми наполнителями, функциональными добавками, и эластомерные материалы на основе каучуков высокой морозостойкости. Изделия на основе разработанных ПКМ характеризуются повышенным ресурсом эксплуатации и позволяют заменить зарубежные аналоги.

Современные наземные и авиационные транспортные средства и технологическое оборудование комплектуются значительным количеством (до тысячи различных типоразмеров) деталей. Резина является непревзойденным материалом, который применяется для создания уплотнительных устройств, так как она обладает высокоэластическими свойствами, способна к обратимым деформациям, имеет практическую несжимаемость, невысокую плотность, обладает большим внутренним трением и демпфирующими свойствами. К резинам, из которых изготавливаются резинотехнические (РТИ) изделия, эксплуатирующиеся в условиях холодного климата, предъявляются особые требования [22, 23, 27–29]. Две трети территории России находится в зоне хо-

лодного климата, наиболее экстремальное сочетание факторов наблюдается в регионах Крайнего Севера и Арктики, климатические условия которых характеризуются значительными (20–30 °C) среднесуточными колебаниями температур с переходом через 0 °C в осенне-весенний период и низкими значениями зимних минимальных температур, которые могут достигать <–60 °C. Практика эксплуатации различной техники в РС(Я) показывает, что до 30 % отказов обусловлены неисправностями различных РТИ в составе уплотнительных устройств. До недавнего времени данная задача частично решалась за счет применения импортных каучуков, таких как фторсилоксановые, эпихлоргидриновые, акрилатные, гидрированные бутадиен-нитрильные и др. Эти материалы сочетают в себе высокую маслобензостойкость и определенный уровень морозостойкости, что, несмотря на их высокую стоимость, делало их популярными для решения ряда практических задач. В нынешних условиях, когда остро стоит проблема импортозамещения и подобные каучуки или хорошо известный натуральный каучук, который широко себя зарекомендовал для изготовления шин, становятся менее доступными, задача создания новых рецептур резин на основе отечественных каучуков становится особо актуальной. Задача усложняется, когда, кроме высокой морозостойкости, материалы должны обладать износо-, маслостойкостью. В СВФУ и ИПНГ СО РАН получены новые составы маслобензостойких и морозостойких резин на основе смесей отечественных бутадиен-нитрильных и диеновых каучуков, в которых уровень свойств регулируется за счет создания определенной фазовой морфологии [22, 23, 27–29]. Для достоверной оценки работоспособности разработанных ПКМ и серийных резин проводятся натурные климатические испытания.

Прогресс в области разработки ПКМ нового поколения невозможен без понимания физико-химических закономерностей формирования многокомпонентных гетерогенных систем. Решение этой проблемы представляет собой сложную задачу, включающую целый ряд направлений: исследование химической природы полимера, основанное на современных представлениях о строении, свойствах, конформационном состоянии макромолекул и их влиянии на природу взаимодействия с наполнителем; исследование химической природы наполнителя как модификатора структурной организации полимера; изучение межфазных яв-

лений, их природы и влияния на свойства наполненной системы; исследование механизма усиления при наполнении полимера и т. д. [30, 32, 35].

Качество машиностроительных материалов и совершенство современной техники жестко зависят от уровня фундаментальных исследований закономерностей формирования многокомпонентных систем и механизмов их функционирования, в том числе, в экстремальных условиях: при высоких нагрузках, радиационном и химическом воздействии, высоких и сверхнизких температурах.

Подавляющее большинство ПКМ различного функционального назначения сформировано традиционным технологическим приемом – наполнением полимерных связующих различными модификаторами. Этот путь является достаточно эффективным для реализации частных задач, но без знания природы явлений, лежащих в основе механизмов формирования композитов, трудно прогнозировать их свойства в тех или иных условиях эксплуатации. Перспективным направлением этой технологии является использование нетрадиционных наполнителей: жидких, жидкокристаллических, твердых ультрадисперсных и наносоединений, обеспечивающих уникальные сочетания в материале электрических, магнитных, тепловых, механических и других свойств, которые невозможно реализовать в обычных наполненных полимерах.

Перспективными наполнителями ПТФЭ в современном мире по праву считаются нанонаполнители, количество публикаций растет ежегодно. Имеется огромное количество работ, в том числе, якутских ученых [21, 30–35], в которых в качестве наполнителей были применены нанопорошки оксидов, нитридов, боридов, оксинитридов, карбидов, силицидов, силанов, шпинелей переходных металлов, которые при малом содержании приводили к существенному повышению износостойкости ПКМ (до 1000–1500 раз по сравнению с исходным полимером).

Реализация подобных свойств с помощью нанонаполнителей связана с проявлением так называемых размерных эффектов и обусловлена аномальностью структурных характеристик таких частиц (искажением кристаллической решетки вследствие изменения межатомных расстояний и валентных углов), особыми физическими свойствами вещества частиц (обобществление электронов, входящих в ансамбль, и делокализация электронной плотности), термодинамическими

(способность частиц быть высокоэффективными «ловушками» для носителей зарядов) и др.

Наноразмерные частицы, как правило, отличаются развитой удельной поверхностью. Поэтому модифицирующую способность нанонаполнителей в значительной мере определяют свойства поверхности частиц. К ним относятся параметры смачивания, адсорбции, адгезии, характеристики релаксационных процессов на границе раздела фаз. Известно [35], что структура поверхностного слоя полимера, формирующегося на границах по механизму адсорбции, определяет физико-химические, механические, трибологические свойства композиционных материалов.

Немаловажную роль в изменении триботехнических параметров ПКМ играют трибохимические процессы, протекающие при их изнашивании. Знание закономерностей влияния наполнителей на протекание трибохимических процессов и в этих процессах, а также в явлениях фрикционного переноса открывает новые пути создания триботехнических материалов.

Как правило, нанонаполнители синтезируют с использованием высоких технологий: плазмо- и механохимии, крио- и детонационного синтеза. В связи с произошедшими в последние десятилетия изменениями в экономической и экологической обстановке актуальна разработка новых технологий получения и длительного сохранения соединений в наноразмерном состоянии.

В последнее время для разработки многофункциональных материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками используются гибридные наполнители (наночастицы, волокна, функциональные добавки – поверхностно-активные вещества, олигомерные соединения и химически активные вещества и др.) [32–34]. Как правило, в полимерных композитах, наполненных такими наполнителями, каждая отдельная фаза композита вносит соответствующий функциональный вклад, который влияет на физико-механические и триботехнические свойства материала. Однако, к настоящему времени не полностью раскрыты доминирующие факторы, обеспечивающие повышение эксплуатационных свойств ПКМ, наполненных сочетанием различных типов наполнителей (волокно и наночастица, нано- и микрочастицы).

Прекрасные электроизоляционные характеристики, негорючесть, рекордно низкий коэффициент трения, хорошие антиадгезионные и гидрофобные свойства, химическая стойкость, ши-

рокий температурный интервал эксплуатации определили использование фторполимеров во многих отраслях промышленности: атомной, химической, машиностроительной, строительной, спортивной. Совокупность важных физико-химических характеристик ПТФЭ с достаточно высокими прочностными свойствами позволили применять его в качестве уплотнительного материала при самых сложных условиях эксплуатации, в том числе для техники Севера. Такие отрицательные качества ПТФЭ, как низкая износостойкость, ползучесть, высокий коэффициент термического расширения, могут быть устранены или сведены к минимуму введением модификаторов.

В результате теоретических и экспериментальных исследований релаксации и ползучести, трения и износа было показано, что допустимый диапазон давлений и температур при эксплуатации уплотнений из ПТФЭ может быть существенно расширен за счет особенностей конструктивного исполнения уплотнительного узла. И.Н. Черским с соавторами [36] была разработана теория проектирования и расчета полимерных уплотнителей и узлов трения для северной техники. Опираясь на хорошо развитый аппарат теории деформирования и наполнения полимеров, он создал научные основы оптимального проектирования хладостойких износостойких полимерных деталей, и это послужило импульсом для разработки целой гаммы оригинальных конструкций с резко увеличенным ресурсом работоспособности в интервале температур от –60 до 100 °С.

В настоящее время большинство промышленно выпускаемых материалов на основе ПТФЭ – это композиции с большой степенью наполнения (более 15–30 % об.). На отечественном рынке наиболее широко представлены следующие марки композиционных материалов на основе ПТФЭ: Ф-4К20 (20 % молотого кокса), Ф-4К20М5 (20 % молотого кокса + 5 % дисульфида молибдена), Ф4С15 (15 % стекловолокна), Флубон-15 (15 % углеродных волокон) и Флубон-20 (20 % углеродных волокон). Эти композиты характеризуются высокой износостойкостью (в 250–1000 раз выше), прочностью при сжатии (в 1,5–2 раза выше) и низкой деформацией под нагрузкой по сравнению с ненаполненным полимером.

Разработке ПКМ триботехнического назначения на основе ПТФЭ и исследованию их свойств и структуры посвящены труды многих авторов: В.М. Бузника, В.А. Белого, А.В. Виноградова,

О.А. Адриановой, С.Н. Попова, А.А. Охлопковой, Ю.К. Машкова, Г.Н. Сиренко, О.В. Кропотина и др. [24, 25, 30, 31]. Однако современное развитие технических систем требует создания новых материалов, удовлетворяющих жестким требованиям машиностроения.

Комплексные исследования по разработке композитов, модифицированных нанометровыми частицами нитридов и оксидов металлов, открыли перспективы создания адаптивных к условиям эксплуатации материалов на основе ПТФЭ. Однако высокая стоимость синтетических наномодификаторов потребовала поиска перспективных технологий перевода в структурно-активное состояние природных материалов. В настоящее время в лаборатории «Технологии полимерных нанокompозитов» СВФУ активно ведутся исследования по разработке композитов с использованием механоактивированных природных соединений (слоистых силикатов, углеродного, базальтового волокна, цеолитов) в качестве компонентов многокомпонентных систем [33–34, 37]. Отличительная особенность данных композитов – сочетание высоких вязкоупругих характеристик с повышенной (до 2500 раз по сравнению с исходным ПТФЭ) износостойкостью. Самоорганизация макромолекул, интенсифицированная нанонаполнителем, коренная перестройка структуры в ряде случаев приводит к получению так называемых умных материалов, обладающих способностью адаптироваться, приспосабливаться к внешним условиям эксплуатации.

Выявление факторов, ответственных за проявление приспособляемости ПКМ к внешним воздействиям, неразрывно связано с пониманием процессов, сопровождающих изменения в надмолекулярной структуре полимерной матрицы, вводящих различные модификаторы при формировании и функционировании материала. Для объяснения процессов, происходящих при создании адаптивных материалов на основе легко поляризуемых и кристаллизующихся материалов (СВМПЭ, ПТФЭ), удачной оказалась гипотеза о поляризационных механизмах формирования поверхностных слоев полимера на границе связующее–наполнитель, выдвинутая в работах Охлопковой А.А. и Пинчука Л.С. [35]. Она наиболее полно объясняет механизм воздействия наночастиц как на реорганизацию надмолекулярной структуры полимера, так и на механизм усиления деформационно-прочностных характеристик нанокompозитов. Суть гипотезы состоит в том, что

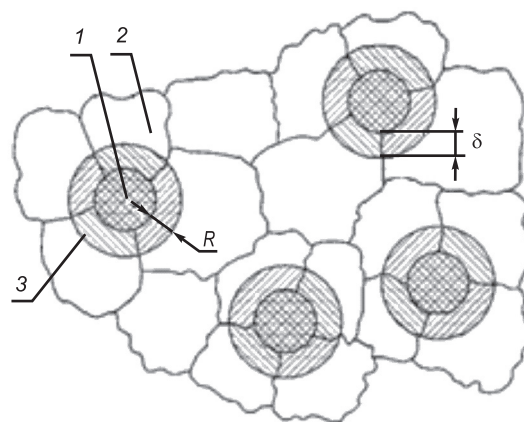


Рис. 3. Схема формирования структуры ПКМ, наполненного наноразмерным наполнителем: 1 – наполнитель; 2 – полимерная матрица; 3 – зона межфазного взаимодействия между компонентами; R – радиус действия поля поляризационного заряда частиц наполнителя; δ – толщина межфазного слоя [35]

Fig. 3. Scheme of PCM structure formation filled with nano-sized filler: 1 – filler; 2 – polymer matrix; 3 – zone of interphase interaction between components; R – radius of action of the polarization charge field of filler particles; δ – thickness of the interphase layer [35]

в нанокompозитах имеет место поляризация полимера, инициируемая зарядовым состоянием частиц, которая интенсифицирует процессы кристаллизации. Известно, что уровень электретного состояния наночастиц зависит от их природы, размеров и формы, т. е. варьируя характеристики и концентрацию нанодисперсных добавок, а следовательно, и уровень межфазного взаимодействия, можно создать оптимальные условия, обеспечивающие усиление тех или иных свойств материала. В случае использования нанонаполнителя механизм усиления композиционных материалов объясняется электростатическим взаимодействием между компонентами ПКМ, схема образования которого представлена на рис. 3 [35].

Для регулирования свойств полимерных нанокompозитов разработаны специальные технологии введения нанокompонентов в полимерную матрицу: механоактивация и ультразвуковая обработка на различных стадиях переработки ПКМ [30, 32–34]. Таким образом, ключевым моментом в создании адаптивных материалов является изыскание эффективных способов воздействия на нанодисперсный наполнитель, приводящих к увеличению электретного состояния наночастиц, оптимальной поляризационной способности и адгезии к макромолекулам полимера.

Кроме того, при проведении исследований адаптационного поведения материалов при трении было впервые показано, что подобные «активные» наноконпоненты катализируют трибохимические процессы и способствуют организации новых диссипативных структур, приспособляющихся к условиям трения. Впервые выявлено, что в процессе трения ПКМ наряду с деструкцией протекают процессы структурирования с участием нанонаполнителя и формирования на поверхности трения слоев, отличающихся высокой структурной организацией.

Для селективного изменения необходимых адгезионных, антифрикционных и прочностных свойств и повышения адаптационной способности полимерных материалов многие авторы используют многофакторное модифицирование компонентов композита, в первую очередь нанонаполнителя, заключающееся в комбинировании различных физических и химических методов его модификации в присутствии электрических полей, ультразвука или сдвиговых усилий. Принудительная активация функциональных добавок, обеспечивающих максимальную степень структурирования полимера, может служить эффективным инструментом для тонкой «настройки» свойств материалов.

Подобные «активные» добавки, способствующие улучшению межфазного взаимодействия, могут быть эффективны также в многокомпонентных полимерных системах, в которых в качестве матрицы используются два и более полимера. Использование различных сочетаний полимеров с варьированием класса (термопласты, эластомеры), химического строения и состава смеси позволяет получить множество комбинаций, обладающих новым комплексом свойств. Полимеры в большинстве случаев несовместимы друг с другом и это означает, что полученные смеси являются гетерогенными системами с развитой межфазной поверхностью. Природа полимеров, их химическое строение, как правило, определяют уровень их межфазного взаимодействия, взаимной адгезии на границе раздела фаз, которые существенно влияют на процессы смещения и являются одним из основных параметров регулирования фазовой морфологии системы. В случае высокого межфазного взаимодействия формируется фазовая морфология композиций с малыми размерами частиц дисперсной фазы, развитым переходным слоем, которая характеризуется высокими деформационно-проч-

ностными и высокоэластическими свойствами. Направленное воздействие на границу раздела фаз в смеси полимеров с помощью «активных» добавок, обладающих повышенной поверхностной энергией, может существенно улучшить эксплуатационные показатели полученных материалов вследствие коренного изменения фазовой морфологии композиции.

На данный момент недостаточно раскрыты закономерности процессов, протекающих в нанокompозитах под действием внешних воздействий. Кроме того, недостаточно исследована парадигма взаимосвязи «технология – структура – свойства», раскрывающая способность тех или иных полимерных материалов приспособляться к экстремальным условиям эксплуатации. Бесспорно, оценка способности материалов к адаптации является критическим моментом для прогнозирования свойств материалов в различных условиях эксплуатации и поиск новых методов оценки адаптационного потенциала полимерных нанокompозитов.

В ряде работ [26, 37] в качестве наполнителя ПТФЭ используют гибридные наполнители, которые, дополняя друг друга, приводят к созданию полимерных композитов с улучшенной износостойкостью и теплопроводностью при сохранении превосходных диэлектрических свойств ПТФЭ.

Одним из интереснейших направлений материаловедения в РС(Я) являются исследования, проводимые в лаборатории «Графеновые нанотехнологии» СВФУ. Синтезированы и исследованы моно-, двух-, полислоистые полупроводниковые пленки дисульфида молибдена и дисульфида вольфрама, предназначенные для создания гибких солнечных элементов [38]. Гибкие солнечные батареи могут работать в качестве портативных легких источников энергии для зарядки навигаторов, фонарей, мобильных телефонов, фотоаппаратов, ноутбуков, что необходимо для жителей Крайнего Севера, оленеводов, геологов, вахтовых работников, находящихся вдали от цивилизации. Такие солнечные элементы характеризуются дешевизной, механической прочностью, гибкостью, морозо- и водостойкостью. Гибкость их структур определяет простоту транспортировки по сравнению с громоздкими хрупкими солнечными панелями, создаваемыми на основе кремния.

Графен является полуметаллом, а его производные (оксид графена и фторографен) имеют диэлектрические свойства. Варьирование типами

материалов двумерных пленок и комбинацией их укладки в гетероструктурах позволяет получать устройства с разными интересными свойствами, которые открывают беспрецедентные возможности для фундаментальных исследований и практического применения. Ван-дер-ваальсовы гетероструктуры, созданные из двумерных материалов, таких как дисульфид молибдена, графен и его производные, являются основными элементами в нанoeлектронных приборах.

Одним из наиболее активно исследуемых материалов в данной области является оксид графена (ОГ), на основе которого разработаны технологии получения графенового электронного текстиля [39–41]. С бурным развитием носимой электроники такие технологии позволяют создавать «умную» одежду, выполняющую функцию различных электронных устройств. При этом, благодаря свойствам ОГ, возможно создание различных датчиков (влажности, температуры, освещения, пульса, газоанализаторы и т. д.), пассивных элементов (резисторы, проводящие дорожки и т. д.), а также устройств хранения электрической энергии (суперконденсаторы). Графеновый электронный текстиль может применяться в различных сферах, например, для создания одежды с электрическим подогревом, различных устройств ввода для управления электронными устройствами, а также одежды для мониторинга жизненных показателей человека в реальном времени и т. д. Другой актуальной областью носимой электроники является печатная электроника. ОГ, включающий различные кислородсодержащие функциональные группы, может обладать полупроводниковыми или диэлектрическими свойствами в зависимости от степени окисления. Принципиально новой задачей для печатной электроники является печать на текстильных подложках.

Заключение

Важность решения проблемы безопасной эксплуатации и продления ресурса объектов тепловой и ядерной энергетики, химической промышленности, наземного, надводного и воздушного транспорта, промышленного и гражданского строительства и нефтегазопроводов в регионах с экстремальными условиями эксплуатации обусловлена не только недостаточными темпами их возобновления, но и высокой вероятностью катастрофических разрушений, вызванных, в частности, процессами деградации структуры и свойств материалов.

Особенность металлических конструкций состоит в том, что наступление предельного состояния и разрушения хотя бы одного конструктивного элемента вызывает аварию всего сложного, иногда значительных масштабов сооружения. Такое явление чаще всего связано с суровыми природно-климатическими условиями Крайнего Севера и Арктики.

При хрупких разрушениях различных сооружений наиболее часто очагами возникновения и распространения трещин служат сварные соединения, являющиеся конструктивно неоднородными участками и формирующиеся при монтаже многих крупноразмерных металлоконструкций, элементов техники Севера, а также протяженных линейных сооружений. Во многих случаях основными очагами возникновения трещин служат различные технологические и эксплуатационные микро- и макродефекты – непровары, подрезы, скопления пор, шлаковые включения, риски, трещины и другие дефекты. Кроме этого, возникновению разрушения способствуют низкие температуры и их колебания, наличие водорода, коррозионно-активных сред, накопление микроповреждений в структуре материалов.

В области фундаментальных исследований установлены механизмы и феноменология низкотемпературного вязко-хрупкого перехода в сталях и сплавах, адаптации материалов на основе ПТФЭ, СВМПЭ при внешних механических и фрикционных воздействиях. Эффект самоорганизации разработанных композитов при фрикционном воздействии вызван несколькими процессами, благодаря которым происходит формирование новой более износостойкой поверхности. Показано, что для обеспечения адаптации ПКМ к фрикционному нагружению необходимо: введение компонентов с высокой структурной активностью для формирования тонкого поверхностного слоя, характеризуемого лабильностью; участие компонентов в трибохимических реакциях в качестве агентов сшивки фрагментов трибораспада макромолекул; использование технологических приемов при переработке ПКМ (воздействие физических полей, модифицирование поверхности частиц компонентов), обеспечивающих их потенциальные возможности как усиливающих, армирующих, направляющих агентов при структурной перестройке.

Многие разработки ученых-материаловедов прошли испытания и внедрены в АК «АЛРОСА», АО «Водоканал», МЧС России, АО «Саха-

транснефтегаз», АО «Саханефтегазсбыт», РЖД, АО «Алмазы Анабара», ООО «Автогруппа», АО «Теплоэнергия», ЖКХ РС(Я) и др.

Список литературы / References

1. Жуков В.В., Карпов А.А., Карпов И.А. и др. Анализ трендов перспективных материалов для нефтегазовой отрасли. *ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти*. 2022;7(3):136–147. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2022-7-3-136-147>

Zhukov V.V., Karpov A.A., Karpov I.A., et al. Analysis of perspective materials trends for the oil and gas industry. *PROneft. Professionally about Oil*. 2022;7(3):136–147. (In Russ.) <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2022-7-3-136-147>

2. Lepov V., Petrov N., Pavlov N. System analysis of the modern materials and technologies in power engineering and industry for the Russian North and Arctic. *AIP Conference Proceedings*. 2023;2552(1):080026. <https://doi.org/10.1063/5.0112831>

3. Ларионов В.П., Ковальчук В.А. *Хладостойкость и износ деталей машин и сварных соединений*. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение; 1976. 207 с.

Larionov V.P., Kovalchuk V.A. *Cold resistance and wear of machine parts and welded joints*. Novosibirsk: Nauka; Sibirskoe otделение. 1976. 207 p. (In Russ.)

4. Ларионов В.П. *Сварка и проблемы вязкохрупкого перехода*. Новосибирск: СО РАН; 1998. 593 с.

Larionov V.P. *Welding and problems of ductile-brittle transition*. Novosibirsk: SB RAS; 1998. 593 p. (In Russ.)

5. Григорьев А.В., Лепов В.В. *Надежность и ресурс технических систем в экстремальных условиях эксплуатации Арктики и Субарктики: железнодорожный транспорт*. Новосибирск: СО РАН; 2018. 112 с.

Grigorev A.V., Lepov V.V. *Reliability and service life of technical systems in extreme operating conditions of the Arctic and Subarctic: railway transport*. Novosibirsk: SB RAS; 2018. 112 p. (In Russ.)

6. Бузник В.М. *Арктическое материаловедение*. Томск: Издательский дом Томского государственного университета; 2018. 44 с.

Buznik V.M. *Arctic materials science*. Tomsk: Publishing House of the Tomsk State University; 2018. 44 p. (In Russ.)

7. Qader I. N., K  k M., Dagdelen F., Y. Aydođdu e. A review of smart materials: researches and applications. *El-Cezeri*. 2019;6(3):755–788. <https://doi.org/10.31202/ecjse.562177>

8. Lepov V.V., Petrov N.A., Prokhorov D.V., et al. Concept of integrity, reliability and safety of energy and transport systems for cold climate regions. *E3S Web of Conferences*. 2020;209:05009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020905009>

9. Hughes T.J.R. Multiscale phenomena: Green’s functions, the Dirichlet-to-Neumann formulation, subgrid scale models, bubbles and the origins of stabilized methods. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineer-*

ing. 1995;127(1-4):387–401. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(95\)00844-9](https://doi.org/10.1016/0045-7825(95)00844-9)

10. Лепов В.В. и др. Многоуровневое иерархическое эволюционное моделирование процессов разрушения материалов. *Вычислительные технологии*. 2008;13(3):315–322.

Lepov V.V., et al. Multilevel hierarchical evolutionary modeling of materials destruction processes. *Vychislitelnye tekhnologii*. 2008;13(3):315–322. (In Russ.)

11. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Деформируемое твердое тело как нелинейная иерархически организованная система. *Физическая мезомеханика*. 2011; 14(3):7–26.

Panin V.E., Egorushkin V.E. Deformable solid as a nonlinear hierarchically built system. *Physical Mesomechanics*. 2011; 14(3):7–26. (In Russ.)

12. Weinan E., Bjorn E., Zhongyi H. Heterogeneous multiscale method: a general methodology for multiscale modeling. *Physical Review B*. 2003;67(9):092101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.092101>

13. Fish J., Wagner G.J., Keten S. Mesoscopic and multiscale modelling in materials. *Nature Materials*. 2021; 20:7740786. <https://doi.org/10.1038/s41563-020-00913-0>

14. Лепов В.В., Бисонг С.М., Голых Р.Н. Многоуровневый подход к моделированию процессов разрушения материалов с субмикроструктурой, применимых в условиях Арктики и Субарктики. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):156–171. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-156-171>

Lepov V.V., Bisong S.M., Golykh R.N. Foundation of multilevel approach to fracture modeling for materials with submicrostructure applicable for Arctic and Subarctic environment. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):156–171. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-156-171>

15. Efendiev Ya., Hou Th.Y. *Multiscale finite element methods: theory and applications*. NY: Springer New York; 2009. 234 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09496-0>

16. Акимова М.П., Шарин П.П. Структура алмазосодержащего материала на основе карбида вольфрама с пропиткой расплавом эвтектики железо – углерод. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение*. 2022;24(3):25–32. <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2022.3.03>

Akimova M.P., Sharin P.P. The structure of diamond-containing material based on tungsten carbide impregnated with an iron – carbon eutectic melt. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022;24(3): 25–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2022.3.03>

17. Солнцев Ю.П., Ермаков Б.С., Слепцов О.И. *Материалы для низких и криогенных температур*. Санкт-Петербург: Химиздат; 2008. 767 с.

Solntsev Yu.P., Ermakov B.S., Sleptsov O.I. *Materials for Low and Cryogenic Temperatures*. St.-Petersburg: Khimizdat; 2008. 767 p. (In Russ.)

18. Lepov V., Arkhanselskaja E., Achikasova V. Kinetics of brittle fracture in metals under the influence of

- hydrogen. *Procedia Structural Integrity*. 2019;20:24–29. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.12.110>
19. Sleptsov O.I., Sivtsev M.N., Sleptsov G.N., et al. Slow destruction of welded joints during welding at naturally low temperatures condition. *Welding International*. 2020;34(1-3):40–44. <https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1918477>
20. Ivanov A.M. Low-temperature fracture of low-alloy steel after severe plastic deformation. *Russian Engineering Research*. 2020;40(1):33–37. <https://doi.org/10.3103/S1068798X20010098>
21. Okhlopko A.A., Sleptsova S.A., Nikiforova P.G., et al. Main directions for research on the development of tribotechnical composites used in the Arctic Regions (Experience of North-Eastern Federal University in Yakutsk). *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019;10(6):1441–1447. <https://doi.org/10.1134/S2075113319060157>
22. Petrova N.N., Portnyagina V.V., Mukhin V.V., et al. Preparation and improved physical characteristics of propylene oxide rubber composites. *Molecules*. 2018;23(9):2150. <https://doi.org/10.3390/molecules23092150>
23. Sokolova M.D., Davydova M.L., Shadrinov N.V. The modification of rubber compounds with nanodisperse graphites. *International Polymer Science and Technology*. 2015; 42(3):27–30. <https://doi.org/10.1177/0307174X1504200306>
24. Старцев О.В., Лебедев М.П. Температура стеклования и характеристические температуры α -перехода аморфных полимеров на примере полиметилметакрилата. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2018;60(4S):3–16. <https://doi.org/10.1134/S2308112019010073>
- Startsev O.V., Lebedev M.P. Glass-transition temperature and characteristic temperatures of α transition in amorphous polymers using the example of poly(methyl methacrylate). *Polymer Science, Series A*. 2018;60(6): 911–923. <https://doi.org/10.1134/S0965545X19010073>
25. Бузник В.М. и др. *Фторополимерные материалы*. Томск: Изд-во НТЛ; 2017. 600 с.
- Buznik V.M., et al. *Fluoropolymer materials*. Tomsk: NTL Publishing House; 2017. 600 p. (In Russ.)
26. Kirillina I.V., et al. Nanocomposites based on polytetrafluoroethylene and ultrahigh molecular weight polyethylene: A brief review. *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2014;35(12):3411–3420. <https://doi.org/10.5012/bkcs.2014.35.12.3411>
27. Kapitonov E.A., Petrova N.N., Mukhin V.V., et al. Enhanced physical and mechanical properties of nitrile-butadiene rubber composites with N-cetylpyridinium bromide-carbon black. *Molecules*. 2021;26(4):805. <https://doi.org/10.3390/molecules26040805>
28. Мухин В.В. и др. Исследование работоспособности резин на основе эпихлоргидринового каучука в углеводородной среде в условиях холодного климата. *Каучук и резина*. 2018; 77(5):314–319.
- Mukhin V.V., et al. Study of the performance of epichlorohydrin rubber-based elastomers in the hydrocarbon environment under the cold climate. *Kauchuk i Rezina*. 2018;77(5):314–318.
29. Shadrinov N.V. Effect of thermal aging on deformation properties of nitrile-butadiene rubber: atomic force microscopy data. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019;10(1):53–57. <https://doi.org/10.1134/S2075113319010283>
30. Охлопкова А.А. и др. *Модификация полимеров ультрадисперсными соединениями*. Якутск: Изд-во СО РАН; 2003. 222 с.
- Okhlopko A.A., et al. *Modification of polymers with ultradisperse compounds*. Yakutsk: Publishing House SB RAS; 2003. 222 p. (In Russ.)
31. Petrova N.N., Jungkeun Lee, Portnyagina V.V., et al. Antiswelling and frost-resistant properties of a zeolite-modified rubber mechanical seal at low temperature. *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2015;36(2): 464–467. <https://doi.org/10.1002/bkcs.10075>
32. Danilova S.N., Yarusova S.B., Kulchin Y.N., et al. UHMWPE/CaSiO₃ Nanocomposite: mechanical and tribological properties. *Polymers*. 2021;13(4):570. <https://doi.org/10.3390/polym13040570>
33. Spiridonov A.M., Sokolova M.D., Fedoseeva V.I., et al. Adsorption complexes ‘zeolite–cationic surfactant’: properties and surface activity in a polymer composite material based on ultra-high-molecular-weight polyethylene. *Materials Today Chemistry*. 2021;(20):100441. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100441>
34. Borisova R.V., Spiridonov A.M., Okhlopko T.A., et al. Bromination of UHMWPE surface as a method of changing adhesion to nanoparticles. *Materials Today Communications*. 2018;14:65–71. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2017.12.014>
35. Охлопкова А.А., Виноградов А.В., Пинчук Л.С. *Пластики, наполненные ультрадисперсными неорганическими соединениями*. Гомель: ИММС НАНБ; 1999. 164 с.
- Okhlopko A.A., Vinogradov A.V., Pinchuk L.S. *Plastics filled with ultrafine inorganic compounds*. Gomel: MPRI; 1999. 164 p. (In Russ.)
36. Черский И.Н. Применение фторопласта-4 в уплотнительных узлах, работающих при низких температурах. *Физико-технические проблемы транспорта на Севере: Сборник трудов*. Якутск: ИФТПС СО АН СССР; 1971:93–107.
- Cherskiy I.N. The use of fluoroplastic-4 in sealing units operating at low temperatures. In: *Physical and technical problems of transport in the North (Collection of papers)*. Yakutsk: IPTPN SB AS USSR; 1971:93–107. (In Russ.)
37. Vasilev A.P., Struchkova T.S., Nikiforov L.A., et al. Mechanical and tribological properties of PTFE composites with carbon fiber and layered silicate fillers. *Molecules*. 2019;24(2):224. <https://doi.org/10.3390/molecules24020224>
38. Nebogatikova N.A., Antonova I.V., Prinz V.Ya., et al. Fluorinated graphene dielectric films obtained from functionalized graphene suspension: preparation and properties. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2015;17(20):13257–13266. <https://doi.org/10.1039/C4CP04646C>

39. Smagulova S.A., Egorova M.N., Tomskaya A.E., Kapitonov A.N. Synthesis of carbon dots with tunable luminescence. *Journal of Material Science&Engineering*. 2017;6(5):1000376. <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000376>

40. Alexandrov G.N., Smagulova S.A., Kapitonov A.N., et al. Thin partially reduced oxide-graphene films: struc-

tural, optical, and electrical properties. *Nanotechnologies in Russia*. 2014;9(7-8):363–368. <https://doi.org/10.1134/S1995078014040028>

41. Nikolaev D.V., Evseev Z.I., Smagulova S.A., Antonova I.V. Electrical Properties of Textiles Treated with Graphene Oxide Suspension. *Materials*. 2021;14(8):1999. <https://doi.org/10.3390/ma14081999>

Об авторах

ЛЕПОВ Валерий Валерьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2360-7983>, ResearcherID: F-9875-2011, Scopus Author ID: 6508081764, РИНЦ AuthorID: 1747, e-mail: wisecold@mail.ru

ОХЛОПКОВА Айталиа Алексеевна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>, ResearcherID: A-6594-2014, Scopus Author ID: 57856, e-mail: okhlopkova@yandex.ru

About the authors

LEPOV, Valeriy Valerievich, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2360-7983>, ResearcherID: F-9875-2011, Scopus Author ID: 6508081764, RISC AuthorID: 1747, e-mail: wisecold@mail.ru

OKHLOPKOVA, Aitalina Alexeevna, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>, Researcher ID: A-6594-2014, Scopus Author ID: 57856, e-mail: okhlopkova@yandex.ru

Поступила в редакцию / Submitted 04.10.2023

Поступила после рецензирования / Revised 25.10.2023

Принята к публикации / Accepted 10.11.2023