УДК 620.3; 539.42
https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-510-520

CC BY 4.0

Оригинальная статья

Прочность и электропроводность бетонных композитов, модифицированных оксидом графена

В. В. Лепов[✉,1], Д. Н. Попов[2], А. С. Анисимов[1]

[1]*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация*
[2]*Северо-Восточный федеральный университет им М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация*

[✉]*wisecold@mail.ru*

Аннотация
Создание и применение так называемых умных, многофункциональных и гибридных материалов является одним из актуальных направлений современного материаловедения. В работе приведены результаты механических испытаний, исследований микроструктуры, оценки электрофизических свойств, а также стохастического моделирования разрушения образцов из бетонного композита, модифицированного переработанным вторичным сырьем в виде восстановленного оксида графена. Работы проведены с целью создания материалов повышенной прочности и с заданной электропроводностью. Дан обзор исследований в области создания и моделирования процессов разрушения гибридных материалов. Приведены подходы к оценке напряженного состояния и обосновано применение концепции зоны предразрушения и структурного размера для описания процессов разрушения в квазихрупких материалах. Показано, что высокие прочностные свойства и электропроводность графена позволяют существенно улучшить характеристики гибридного композита при незначительной концентрации модификатора. Образцы для испытаний были изготовлены с добавлением 0,2 и 0,5 мас.% оксида графена. Для исследования структуры и состава использовались электронная сканирующая растровая микроскопия и инфракрасная спектроскопия. Механические испытания показали, что добавление восстановленного оксида графена вызывает увеличение прочности на 48 % при содержании всего 0,5 мас.% оксида графена и снижение электрического сопротивления до 550–600 Ом, при этом снятие нагрузки восстанавливает прежние значения проводимости. Установлено, что модификация бетона графеном улучшает как электрические, так и механические характеристики. Подобные гибридные материалы могут быть применены в системах мониторинга состояния конструкций, самонагревающихся элементах, при заземлении электроопор, с целью повышения надежности и безопасности эксплуатации энергетических комплексов и технических систем в экстремальных климатических условиях Арктики и Субарктики.

Ключевые слова: гибридный материал, бетонный композит, оксид графена, электропроводящий композит, квазихрупкое разрушение, зона предразрушения, стохастическое моделирование

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект «Многоуровневое моделирование процессов разрушения повреждающихся конструкционных материалов с фазовыми переходами», (№ 24-21-20122, https://rscf.ru/project/24-21-20122).

Благодарности. Авторы выражают благодарность ЦКП ЯНЦ СО РАН и СВФУ им. М.К. Аммосова за содействие в проведении исследований и предоставление оборудования.

Для цитирования: Лепов В.В., Попов Д.Н., Анисимов А.С. Прочность и электропроводность бетонных композитов, модифицированных оксидом графена. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):510–520. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-510-520

© Лепов В. В., Попов Д. Н., Анисимов А. С., 2025

Original article

Mechanical strength and electrical conductivity of concrete composites enhanced with graphene oxide

Valeriy V. Lepov✉[1], Dmitry N. Popov[2], Andrey S. Anisimov[1]

[1]*Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*
[2]*Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation*

✉*wisecold@mail.ru*

Abstract
The development and application of "smart", multifunctional, and hybrid materials are among the most significant areas of modern materials science. This article presents the results of mechanical testing, microstructural analysis, evaluation of electrophysical properties, and stochastic modeling of the failure of samples made from a concrete composite reinforced with recycled secondary materials in the form of reduced graphene oxide. The aim of this work was to create materials with increased strength and a given electrical conductivity. An overview of research on the creation and modeling of failure processes in hybrid materials is provided. Approaches for assessing stress states are presented, and the use of the concept of the pre-fracture zone and structural scale to describe failure processes in quasi-brittle materials is justified. It has been shown that the high strength and electrical conductivity properties of graphene can significantly enhance the characteristics of a hybrid composite material with a low concentration of modifier. Concrete samples were prepared with graphene oxide mass fractions of 0.2% and 0.5%. Structural and chemical characterizations were conducted via scanning electron microscopy and infrared spectroscopy. Mechanical testing demonstrated that the inclusion of reduced graphene oxide at 0.5% concentration increased strength by 48% and decreased electrical resistance to 550–600 ohms, with conductivity values reverting to baseline upon load removal. These findings suggest that graphene modification significantly enhances the electrical and mechanical performance of concrete composites. Therefore, these hybrid materials hold considerable potential for use in structural health monitoring systems, self-heating elements, grounding electrodes, and for improving the reliability and safety of energy infrastructure and engineering systems, especially those functioning in harsh Arctic and Subarctic environments.

Keywords: hybrid material, concrete composite, reduced oxidize-graphene, electrically conductive composite, quasi-brittle fracture, pre-fracture zone, stochastic modeling

Funding. This study was supported by the Russian Science Foundation under the project "Multilevel modeling of fracture processes in damaging structural materials with phase transition" (No. 24-21-20122, https://rscf.ru/project/24-21-20122).

Acknowledgements. The authors would like to thank the Core Shared Research Facilities of the Federal Research Centre "The Yakut Scientific Centre SB RAS" and NEFU for their suport in conducting the research and providing equipment.

For citation: Lepov V.V., Popov D.N., Anisimov A.S. Mechanical strength and electrical conductivity of concrete composites enhanced with graphene oxide. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):510–520. (In Russ.); https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-510-520

Введение

В последние годы композиты, армированные волокнами, находят все более широкое применение в гражданском строительстве при реставрации существующих сооружений и при строительстве новых. Такие композиты обладают рядом преимуществ перед сталью, включая высокое соотношение прочности и веса и хорошую коррозионную стойкость. В результате использование стеклопластиковых композитов в качестве внешнего армирования для модернизации конструкций стало очень популярным в последние годы [1]. В настоящее время во всем мире проводится большое количество исследований, посвященных изучению характеристик различных видов конструкций, изготовленных только из композитов или из композитов в сочетании с другими материалами (гибридных конструкций) [2, 3]. Примерами могут служить стеклопластиковые мостовые покрытия, бетонированные стеклопла-

стиковые трубы в качестве колонн и свай, а также стеклопластиковые кабели.

Но по сравнению со сталью и обычным бетоном такие композиты имеют ряд недостатков, к которым относятся относительно высокая стоимость, линейно-упруго-хрупкое поведение при деформации, низкое отношение модуля упругости к прочности и плохая огнестойкость. При реконструкции экономия средств достигается за счет ряда аспектов, которые компенсируют более высокую стоимость материалов, но при новом строительстве окупаемость их низкая, поскольку модифицированные фиброй композиты по требованиям экономической эффективности, особенно с точки зрения оценки стоимости жизненного цикла [2, 3], используются преимущественно в зонах, подверженных растяжению, а их пониженная огнестойкость приемлема для наружных, включая мостовые, конструкций, но для шахт и взрывоопасных производств требуется создание гибридных жаростойких конструкций, что достигается в настоящее время использованием стали, бетона и добавок в виде дорогих углеродных нанотрубок. Область использования гибридных конструкций в новом строительстве становится отдельным направлением исследований модифицированных полимерных, бетонных и стеклопластиковых композитов. Таким образом, целью использования гибридных конструкций является достижение оптимальной комбинации для повышения ресурса и надежности, обеспечения экономической эффективности эксплуатации системы.

Рис. 1. Классификация гибридных материалов по назначению и виду связи

Fig. 1. Classification of hybrid materials by purpose and type of bond

С другой стороны, гибридные материалы сочетают в себе свойства двух или более монолитных веществ, в том числе находящихся в разном фазовом состоянии [4]. К ним относятся волокнистые и гранулированные композиты, пенопласты и решетки, аэрогели, многослойные (сэндвич) панели, и природные материалы [5, 6]. В настоящее время к ним относят в основном сочетания неорганических и органических материалов с уникальными свойствами, что позволяет находить им широкое применение (рис. 1).

Например, полимерные материалы, являющиеся изоляторами, используются уже как проводники электричества за счет создания специальной молекулярной структуры, например, в электропроводящих сопряженных полимерах (Нобелевская премия по химии за 2000 г.). Эта разработка 1977 г. связана с обнаружением объемных структурных переходов в полимерах, обеспечивающих чувствительность к приложенному напряжению и позволяющих использовать их в качестве сервоприводов.

В качестве примера разработки перспективного гибридного материала можно привести композит на основе бамбукового волокна и графенсодержащих наполнителей [7]. Исследовались композиты, армированные натуральной тканью и полученные путем переплетения бамбуковых волокон методом ручной укладки. Было изучено три состава композита с массовой долей наномодификаторов, таких как оксид графена (ОГ) и флэш-графен (ФГ), в 0,5, 0,75 и 1,0 %. Оказалось, что добавление ФГ в композиты может быть эффективным подходом в плане механических свойств по сравнению с исходной тканью и ОГ-композитом, и при 0,75 мас.% ФГ-композит оказался на 30 % прочнее при растяжении, на 19 по ударной вязкости, на 16 по твердости и 15 % по тепловому прогибу. При содержании наномодификатора выше оптимального механические свойства композита ухудшались.

Гибридные материалы привлекают большое внимание в области хранения энергии, поскольку, например, сочетание углеродных и псевдоемкостных материалов (оксидов переходных металлов или проводящих полимеров) способствует улучшению характеристик суперконденсаторов [3]. Такие структуры могут быть включены в сеть емкостных материалов для получения электродов

с гибридным электрохимическим откликом, что позволит сократить разрыв между батареями и суперконденсаторами по плотности энергии и мощности. При этом структура материалов для хранения энергии играет фундаментальную роль. Например, уменьшение частиц модификатора до наноразмеров может привести даже к емкостноподобному поведению материалов. Возможны и множественные гибридизации (углерод/оксид / проводящий полимер).

В строительстве для электроэнергетики электропроводящие бетоны имеют широкие перспективы применения в качестве заземляющих опор, обеспечивающих безопасную эксплуатацию [8]. Применение их в качестве конденсаторов атмосферного электричества, его аккумуляции и хранения требует отдельного рассмотрения, в том числе в составе новейших интегрированных и распределенных сетей [9].

Гибридные материалы и конструкции, таким образом, становятся весьма перспективными областями исследования. Разнообразие получаемых свойств и материалов, используемых при производстве гибридных конструкций, применимо в различных областях, от конструкционного машиностроения, горного производства до электронной и биомедицинской промышленности. Многофункциональные композиты становятся наиболее высокотехнологичными инженерными материалами, способными выдерживать механические нагрузки и отличающимися высокой термостабильностью, усталостной прочностью, а также повышенной коррозионной стойкостью.

Однако проектирование таких композитов с заранее заданными свойствами представляет собой трудную задачу. Гибрид материалов с разной прочностью порождает композит с промежуточными механическими свойствами, зависящими от содержания компонентов, например, льда и базальтовой фибры [10]. При этом можно добиться существенного упрочнения материала в определенном направлении. Однако добиться заданных физических свойств, например электро- и теплопроводности, а также емкости (как конденсатора), например электропроводящих бетонов, сложнее.

Усложняется также задача моделирования разрушения хрупких материалов. В отличие от вязких, в квазихрупких гибридных композитах напряженное состояние в вершине трещины отличается более широкой и затупленной зоной предразрушения (ЗПР) с накопленными микроповреждениями [11]. Так, для бетона предел прочности и трещиностойкость будут зависеть от размера этой зоны, поскольку высокий уровень поглощения энергии повышает вязкость разрушения, однако понижает прочность ввиду более раннего зарождения трещины.

Кроме геометрии зоны предразрушения, значимыми представляются также энергия разрушения и характерный структурный параметр (размер) материала. Структурный параметр c_c связан с размером микроструктурных элементов материала (зерна, заполнителя) и определяет масштаб, на котором материал переходит от хрупкого поведения к квазихрупкому. Таким образом, в крупнозернистом бетоне в вершине трещины зона предразрушения больше, чем в мелкозернистом. Саму зону при этом можно рассматривать как совокупность n элементов микроструктуры (зерен, или частиц), участвующих в процессе разрушения. Предел прочности материала $\sigma_{сж}$ и трещиностойкость K_{IC} в значительной степени определяются развитием ЗПР: большее поглощение энергии и высокая трещиностойкость, малая номинальная прочность материала из-за раннего зарождения трещины.

Материалы и методы

По результатам испытаний различных бетонов ширина ЗПР примерно в 3 раза превышает максимальный размер крупного заполнителя: $b_n = 3 \cdot c_c$, а длина порядка $l_n = 1{,}5 \cdot c_c$. Тогда предельная нагрузка на образец с надрезом (трещиной) может быть выражена через структурный параметр [12]

$$P_{max} = A_э \cdot \sigma_t, \quad (1)$$

где σ_t – предел прочности на разрыв, а $A_э$ – коэффициент, имеющий размерность площади ($\sim\pi \cdot c_c^2$) и зависящий от характеристик ЗПР и геометрии образца.

Соотношение (1) обобщает классический критерий прочности материалов и линейно-упругий критерий Гриффитса для квазихрупкого случая. Также известно соотношение, связывающее предел прочности и вязкость разрушения:

$$K_{IC} = 2\ \sigma_t\ c_c^{1/2}. \quad (2)$$

Для различных хрупких и квазихрупких материалов структурный параметр c_c может различаться весьма существенно. Так, для монокристаллического кремния структурный параметр – размер атома ~3 Å, а для бетона с крупным наполнителем – около 20 мм. В табл. 1 указаны прочность

Таблица 1

Структурный параметр и трещиностойкость материалов согласно (2)

Table 1

Structural parameter and crack resistance of materials according to (2)

Материал	σ_t, МПа	c_c, м	P_{max}, Н	K_{IC}, МПа·м$^{1/2}$
Кремний	~2000	~3 10^{-10}	~5,7 · 10^{-10}	~6900
Гранит	~100	~2,5 · 10^{-3}	1960	~10
Бетон В15М200	~15	~2 10^{-2}	18850	~4,7
Керамика	~50	~5 10^{-4}	~40	~0,42
ОГ-бетон В15	~45	~2 10^{-5}	~ 0,057	~0,4

Таблица 2

Состав бетонной смеси для гибридного материала

Table 2

Composition of concrete mixture for hybrid material

Состав	Масса, кг
Портландцемент CEM I 32, 5 %	5,62
Известняковый заполнитель, град. 10–20 и 20–40 мм	16,16
Вода	2,76
Речной песок	7,73
Пластификатор + жидкое стекло	0,114
Восстановленный оксид графена (ОТ), 0,2 и 0,5 мас.%	0,011 и 0,031

и структурные параметры некоторых материалов, а также вычисленные по (1), (2) предельные нагрузки и трещиностойкость. Следует учитывать, что расчетные параметры являются локальными и указывают на способность образования трещины в ЗПР и поглощение в ней энергии деформации.

С целью разработки передовых материалов для конструкционных применений и исследования влияния оксида графена на электропроводность и механические свойства цементных композитов выполнена серия экспериментов. Высокие электропроводность и прочность графена могут значительно улучшить свойства бетонных матриц. Исследователями рассматривались проблемы агрегации частиц графена в цементной матрице, приводящей к неоднородности и снижению армирующего эффекта, а также проблемы производства таких композитов [13–19]. Предложено использовать оксид графена, а также наносить графен на поверхность заполнителей [16].

Для создания электропроводящих бетонов важен выбор электропроводящих добавок [17], а для повышения стабильности и чувствительности электрических характеристик к механическим воздействиям требуется разработка специальных композитных бетонов [18, 19]. И хотя потенциал графена в качестве функциональной добавки весьма высок, использование графеновых бетонов в качестве «умных» материалов для самодиагностики все еще находится на стадии изучения.

Для исследования свойств взяты образцы бетона марки М15, модифицированные восстановленным ОГ в количестве 0,2 и 0,5 % от массы цемента (табл. 2). Для характеристики взаимодействия между ОГ и цементной матрицей были использованы методы спектроскопии, включая комбинационную и инфракрасную.

В качестве пластифицирующей добавки для бетонов в данной работе используется высококонцентрированная суперпластифицирующая добавка на основе полиариловых и поликарбоксилатных эфиров для бетонов с повышенной ремонтопригодностью – MasterPolyheed 4001 для уменьшения замедляющего воздействия на гидратацию цемента, в соответствии с организационным стандартом STO 70386662-309-2021. За рабочий состав бетона был принят состав, подобранный по ГОСТ 27006-2019 для выбранных материалов по нормативной прочности, соответствующей классу В12.5 в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 26633-2015. Исходные компоненты, указанные в табл. 1, были смешаны с использованием лабораторного миксера LS-CB-10 и утрамбованы в формах размером 100×100×400 мм с использованием вибростола ВМ-6.4 в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 10180-2012. Взвешивание компонентов производилось на электронных весах

A&D GF-6100. Бетон готовился в лаборатории «Строительные материалы» ИТИ СВФУ.

Для измерения удельного сопротивления бетонов в свободном состоянии использовался цифровой мультиметр FAZA MAS830L (Россия). Удельное сопротивление бетона при нагрузке измеряли с помощью программируемого источника питания АКТАКОМ APS-7151 (Финляндия). Для этой цели в образцы в виде призм размером 40×10×10 см во время формования были встроены четыре сетчатых электрода из нержавеющей стали размером 8×12 см. Анализ поведения удельного электрического сопротивления бетона при деформации проводился в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 10180-2012.

Результаты и обсуждение

Результаты показали, что добавление ОГ снизило электрическое сопротивление, которое для образцов с содержанием ОГ 0,2% уменьшилось примерно с 600 Ом до 550 Ом при сжатии, а затем вернулось к исходным значениям. Измерения, проведенные как двухзондовым методом, так и с помощью цифрового мультиметра, показали, что увлажненный материал может обнаруживать нагрузки даже при надавливании пальцем (~1 Н). Предельная прочность составила около 40–50 кН с резким снижением удельного сопротивления при разрушении (давление пластины на 100 см^2). Испытания на прочность при сжатии показали увеличение прочности на 48 % при использовании всего 0,05 % оксида графена. Эти результаты свидетельствуют о том, что включение графена повышает как электропроводность, так и механическую прочность, это делает композиты пригодными одновременно как для мониторинга технического состояния зданий и сооружений, так и для самонагревающихся систем.

Результаты рамановской и ИК-спектроскопии подтвердили успешное внедрение частиц оксида графена в минеральную матрицу бетона (рис. 2).

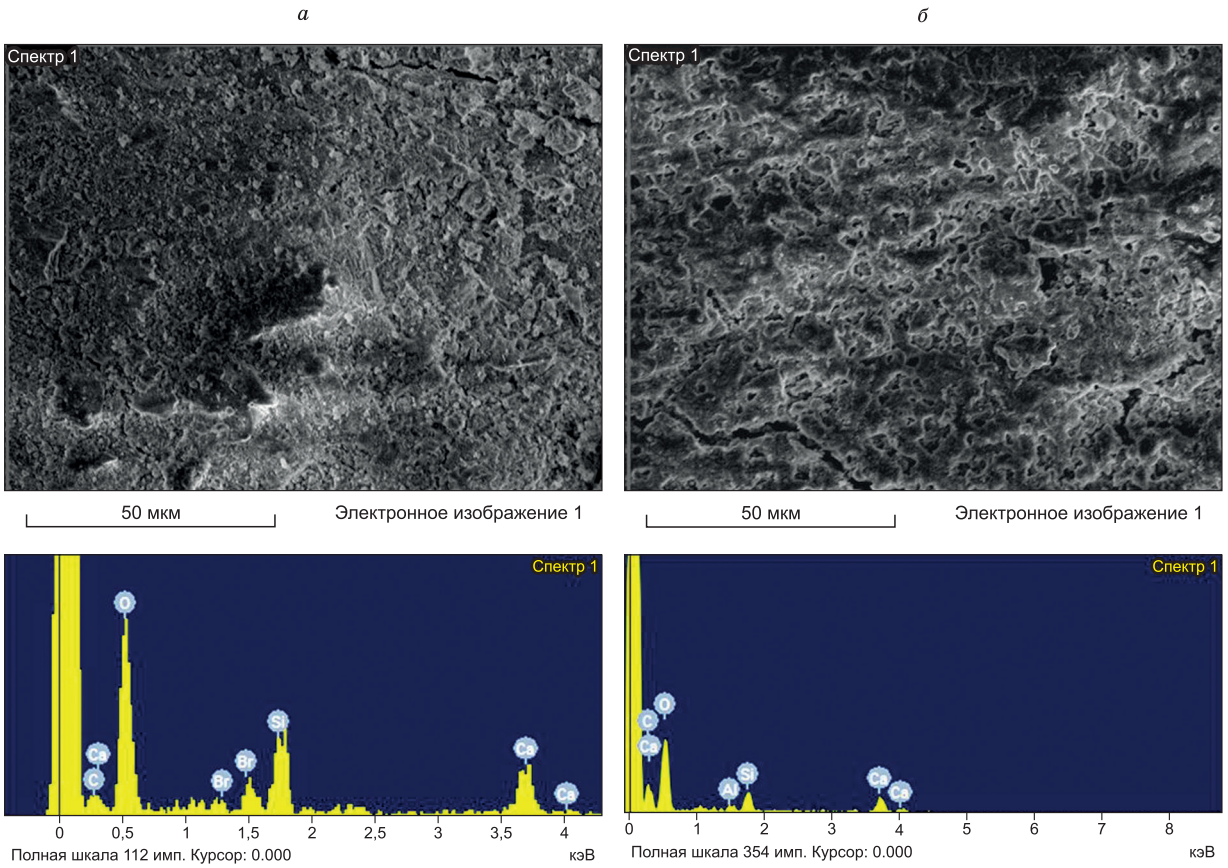

Рис. 2. Микроизображения поверхности и данные ИК-спектроскопии образцов после испытаний с дефектами в виде: пор и микротрещин (*а*) и микро- и макротрещин (*б*)

Fig. 2. Surface scan images and IR spectroscopy data for testing samples reveal defects such as pores and microcracks (*а*), micro- and macrocracks (*б*)

Структурные искажения и различные дефекты, наблюдаемые в графене, свидетельствуют о его взаимодействии с компонентами цементного композита.

Добавление ОГ в количестве 0,2 % от массы цемента снизило удельное сопротивление с увеличением прочности вследствие уплотнения, что и повысило проводимость. Скорость изменения удельного сопротивления при дальнейшем сжатии уменьшалась, и при определенном уровне нагрузки было отмечено резкое падение проводимости, что свидетельствует о высокой чувствительности проводящих свойств ОГ-композита к механическим повреждениям.

Определение свойств композитов как гибридных материалов в случае отсутствия экспериментальных данных может быть осуществлено с помощью подходов Фойгта и Рейсса, которые применяются, в частности, для оценки эффективного модуля упругости композита на основе соотношения его компонентов без необходимости рассмотрения особенностей микроструктуры [8]. Подход применим также для оценки теплопроводности гибридных материалов при допущениях идеального контакта между матрицей (здесь бетонной) и частицами модификатора (ОГ), возможности осреднения температур и теплового потока по представительному объему [20].

На рис. 3 показаны диаграммы деформации образцов композита при испытании на сжатие при различных концентрациях ОГ в течение 7, 14 и 28 дней. По результатам испытаний бетона марки B12.5 (прочность до 12,5–15,5 МПа) с содержанием MOG 0,2 и 0,5 % от массы цемента было выявлено, что при добавлении MOG в бетонную смесь удельное сопротивление готового изделия снижается с увеличением внешней нагрузки (сжатия). Скорость изменения удельного сопротивления бетона снижалась с увеличением сжатия образца (рис. 4). Предел текучести бетона наблюдался в диапазоне 40–50 кН для всех возрастов бетона.

Рисунок 4 иллюстрирует изменение электросопротивления с ростом нагрузки для всех образцов, что указывает на чувствительность бетона к деформации при сжатии. Быстрее всего проводимость растет в начале нагрузки, а затем рост замедляется. Для образца с 0,2 мас.% графена электрическое сопротивление падает более резко (в 2 раза), чем для образца с 0,5 мас.% графена. Чувствительность к деформации выше у образцов с 7-дневной выдержкой по сравнению с образцами с 14- и 28-дневной выдержкой. При достижении предела прочности происходит резкий скачок электрического сопротивления, связанный с разрушением образца. Диаграммы имеют сходный характер для всех периодов отверждения, что указывает на воспроизводимость результатов. Таким образом, введение графена повышает чувствительность бетона к деформации при сжатии. Эти графики иллюстрируют возможность использования бетона, модифицированного графеном, в качестве самочувствующего «умного» материала.

Стохастическое моделирование и визуализация процесса разрушения новых композиционных материалов осуществляется при известных внутренней структуре и характеристиках частиц, содержащих ОГ [5, 6], а также с применением концепции ЗПР для квазихрупких материалов [11]. На рис. 5 показана микроструктура поверхности образцов после испытаний с дефектами в виде пор и микротрещин (*а*) и микро- и макротрещин (*б*). Выявлен эффект огибания дефекта. Тем самым выявлен механизм разрушения гибридного материала, когда мелкие частицы в ОГ-бетоне инициируют микротрещины, но макротрещина растет только вокруг крупного дефекта. Для достоверности подобного моделирования необходима достаточно полная база данных по разрушению бетона без модификаторов из той же партии, а также точное распределение дефектов и включений в образцах.

Заключение

Таким образом, введение восстановленного окисленного графена улучшило электропроводящие свойства бетона как гибридного материала широкого применения. Образцы гибридного композита – модифицированного оксидом графена бетона марки М15, – продемонстрировали снижение удельного сопротивления с начала нагружения до 550–600 Ом и возврат к исходным значениям после разгрузки. Предел текучести составил около 40–50 кН. Для кубических образцов повышение чувствительности к внешним нагрузкам требовало повышенной влажности. Измерения, проведенные как двухзондовым методом, так и цифровым мультиметром, показали обнаружение нагрузки влажным материалом даже при надавливании пальцем (1 Н).

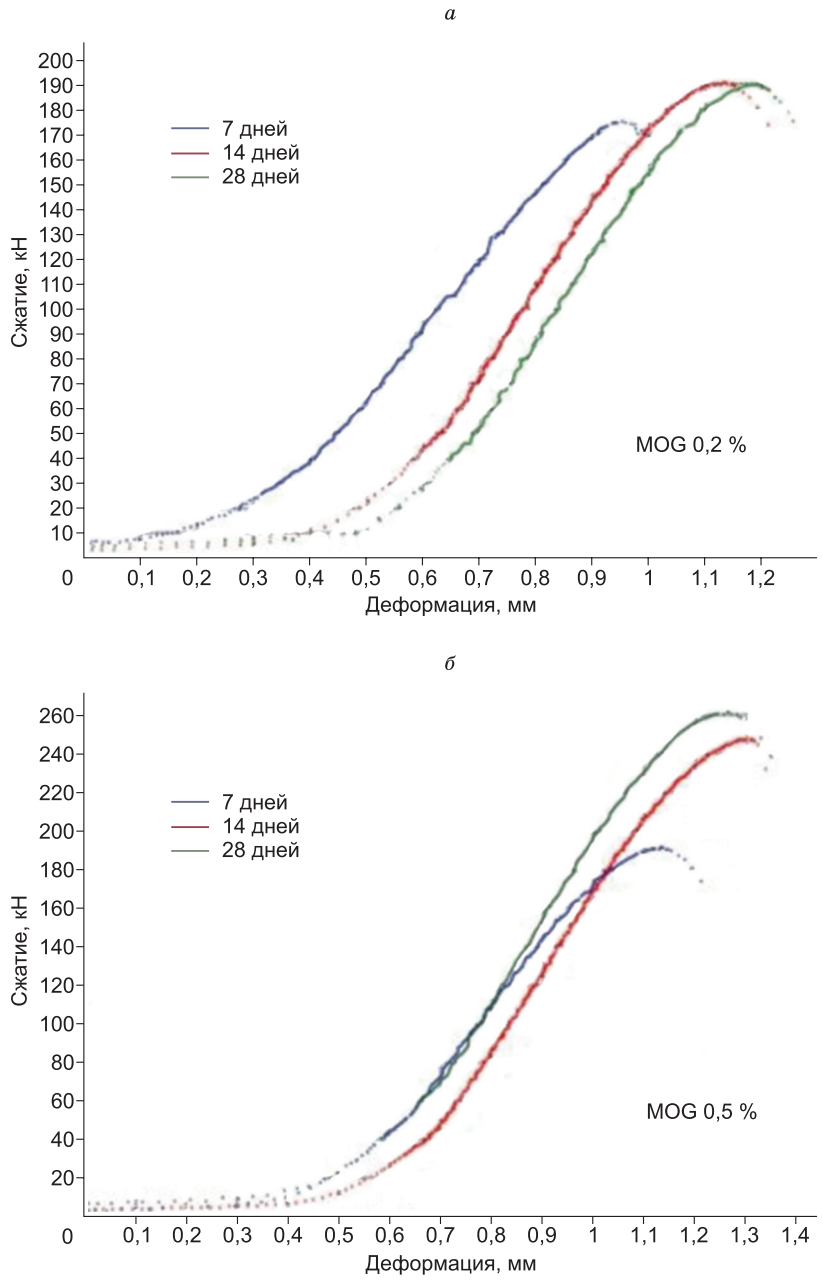

Рис. 3. Диаграммы деформации ОГ-бетонного композита при испытании на сжатие в течение 7, 14 и 28 дней при концентрациях ОГ, мас.%: 0,2 (*а*), 0,5 (*б*)

Fig. 3. Deformation diagrams of OG-composite under compression test after 7, 14 and 28 days at OG concentrations of: *а*) 0.2%; *б*) 0.5%

Введение восстановленного оксида графена значительно улучшило электропроводящие свойства бетона, открывая широкие перспективы применения благодаря возможности:

– электромагнитного экранирования в жилых и промышленных зданиях;

– экономичного обогрева дорожных покрытий, полов внутри помещений, предотвращения обледенения за счет резистивного или индукционного нагрева;

– мониторинга механических напряжений и деформаций для обеспечения целостности и эффективности эксплуатации конструкции;

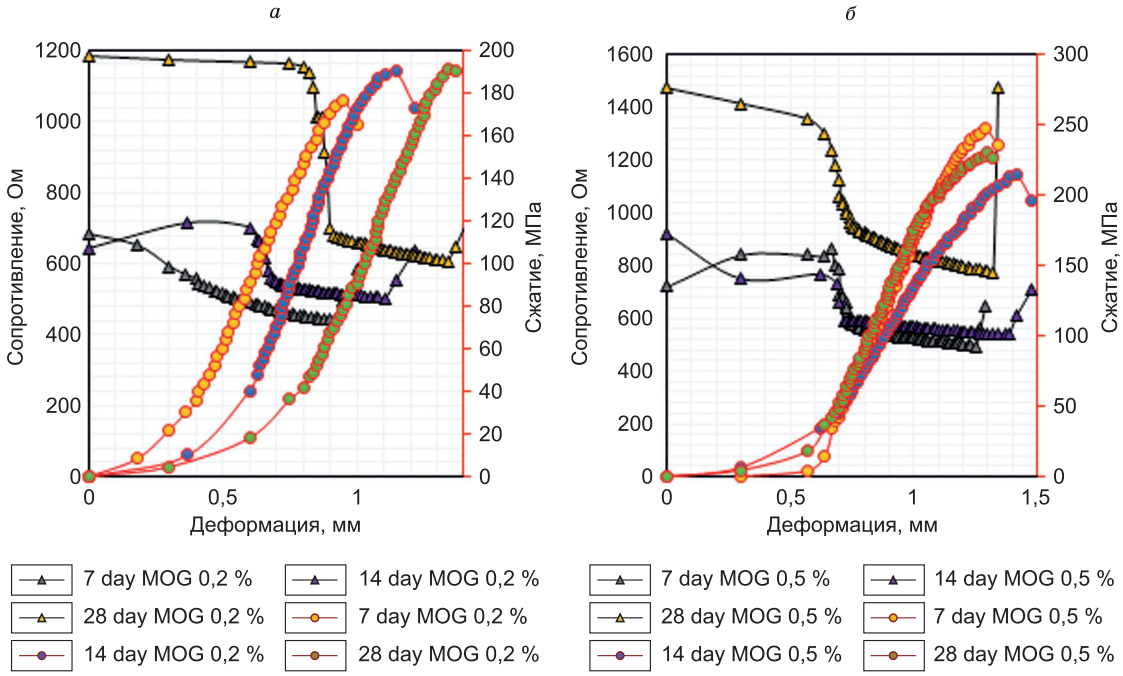

Рис. 4. Диаграммы внутреннего сопротивления и деформации образцов в течение 7, 14 и 28 дней отверждения с содержанием ОГ 0,2 (*а*) и 0,5 мас.% (*б*)

Fig. 4. Diagrams of internal resistance and deformation of samples during 7, 14, and 28 days of solidification with 0.2% (*а*) and 0.5% (*б*) OG content

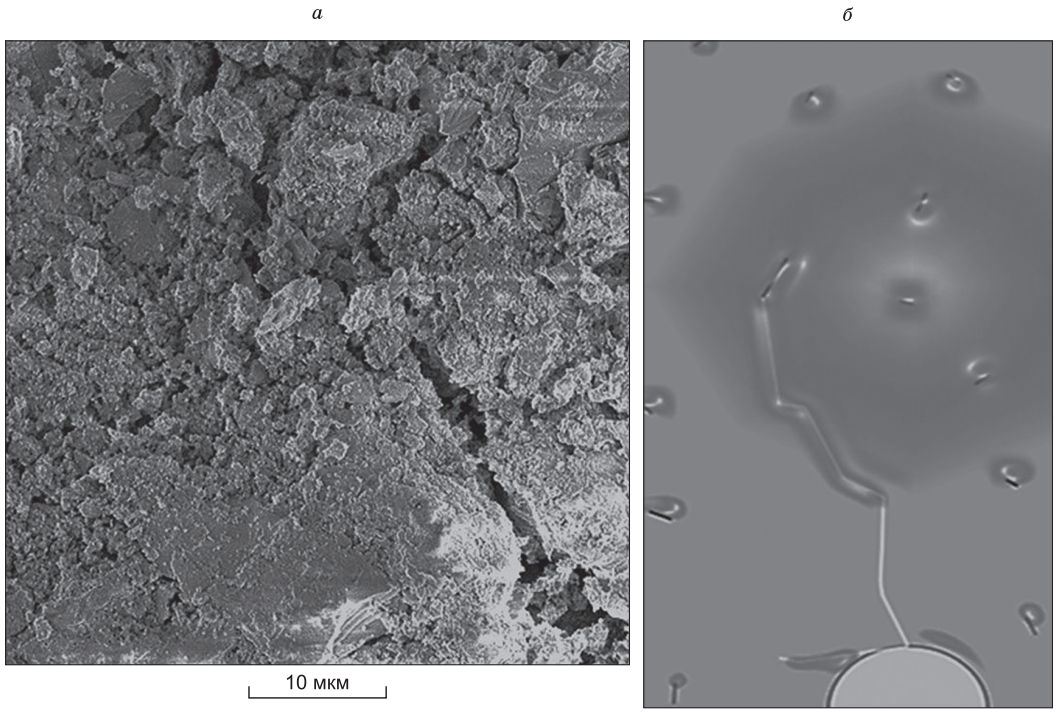

Рис. 5. Изображение поверхности разрушенного образца из бетона, предварительно модифицированного восстановленным ОГ с трещиной (*а*), и визуализация результата стохастического моделирования роста трещины (*б*) в образце ОГ-композита под действием сжимающей нагрузки

Fig. 5. Image of the surface of a fractured specimen showing a crack (*а*) and a visualization of the stochastic modeling of crack growth (*б*) in a sample of OG-composite subjected to a compressive load test

– обеспечения защиты от коррозии и морозного растрескивания железобетонных конструкций, подверженных воздействию агрессивных сред;

– накопления энергии в качестве емкостного элемента для использования в виде батарей и суперконденсаторов;

– использования в качестве беспроводной зарядки на дороге для электромобилей, с целью увеличения пробега.

Список литературы / References

1. Yu T., Remennikov A.M. Novel hybrid FRP tubular columns for sustainable mining infrastructure: Recent research at University of Wollongong. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2014;24(3):311–316. http://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.03.004

2. Das P.P., Chaudhary V., Singh R.K., et al. Advancement in hybrid materials, its applications and future challenges: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2021;47(13): 3794–3801. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.009

3. Gomez-Romero P., Pokhriyal A., Rueda García D., et al. Hybrid Materials: A metareview. *Chemistry of Materials*. 2023; 36(1):8–27. https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.3c01878

4. Ashby M.F., Bréchet Y.J.M. Designing hybrid materials. *Acta Materialia.* 2003;51(19):5801–5821. https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00441-5

5. Bisong M.S., Lepov V.V., Landrine T. Physico-mechanical characteristics and multiscale stochastic modeling of cement mortar reinforced with oil palm mesocarp fibers. *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*. 2022;88(5):62–70. https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-5-62-70

6. 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

7. Sandip Ku. Khatua, Pritam Ku. Sahoo, Kumari K., et al. Behavioural study of graphene oxide/functionalized graphene on bamboo fiber reinforced composite. *Materials Today: Proceedings*. 2021;47(13):3633–3636. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.100.

8. Агунов А.В., Терёхин И.А., Баранов И.А. Анализ применения электропроводящих бетонов в электроэнергетике. *Транспортные системы и технологии*. 2021;7(2):5–15. https://doi.org/10.17816/transsyst2021725-15

Agunov A.V., Terekhin I.A., Baranov I.A. Analysis of the application of electric conducting concrete in the power industry. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(2):5–15. (In Russ.) https://doi.org/10.17816/transsyst2021725-15

9. Karamov D.N., Minarchenko I.M., Kolosnitsyn A.V., Pavlov N.V. Installed capacity optimization of autonomous photovoltaic systems under energy service contracting. *Energy Conversion and Management*. 2021;240:114256. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114256

10. Лепов В.В., Дьячковский И.И. Моделирование разрушения композиционного материала на основе ледовой матрицы. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(2):313–325. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-313-325

Lepov V.V., Dyachkovsky I.I. Modeling of ice-matrix composite fracture. *Arctic and Subarctic Natural Resources.* 2024;29(2): 313–325. (In Russ.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-313-325

11. Wu Y., Wang T., Duan J., Song L. Mesoscale numerical study of size effect on concrete fracture characteristics based on FDEM. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2025;25(1): 46–51. https://doi.org/10.56748/ejse.24667.

12. Liu Y., Liu X., Zhang H., Zhu F. A size effect model combining both surface effects and the Fracture Process Zone (FPZ) for rocks under uniaxial compression. *Applied Sciences*. 2024;14(20):9413. https://doi.org/10.3390/app14209413

13. Yuxia Suo, Rongxin Guo, Haiting Xia, et al. A review of graphene oxide/cement composites: Performance, functionality, mechanisms, and prospects. *Journal of Building Engineering*. 2022;53:104502. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104502.

14. Polverino S., Del Rio Castillo A.E., Brencich A., et al. Few-layers graphene-based cement mortars: production process and mechanical properties. Sustainability. 2022;14(2):784. https://doi.org/10.3390/su14020784

15. Papanikolaou I., Arena N., Al-Tabbaa A. Graphene nanoplatelet reinforced concrete for self-sensing structures – A lifecycle assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*. 2019;240:118202. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118202

16. Gokhale D.G.K., Kaish A.B.M.A. Recent trends in incorporating graphene coated sand in self-sensing cementitious composites. *Materials Proceedings*. 2023;14(1):48. https://doi.org/10.3390/IOCN2023-14544

17. Wang Z., Wang Z.-J., Ning M., et al. Electro-thermal properties and Seebeck effect of conductive mortar and its use in self-heating and self-sensing system. *Ceramics International*. 2017;43(12):8685–8693. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.03.202.

18. Hu Y.G., Awol J.F., Chen S., et al. Experimental study of the electrical resistance of graphene oxide-reinforced cement-based composites with notch or rebar. *Journal of Building Engineering*. 2022;51:04331. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104331.

19. Lavagna L., Santagati A., Bartoli M., et al. Cement-based composites containing oxidized graphene nanoplatelets: effects on the mechanical and electrical properties. *Nanomaterials*. 2023;13(5):901. https://doi.org/10.3390/nano13050901

20. Андреев А.Н. Моделирование процессов теплопроводности в однонаправленно армированных композитных средах. *Вестник Кемеровского государственного университета*. 2015;62(2-1):6–10.

Andreev A.N. Modeling the thermal conductivity processes in unidirectionally reinforced composite environments. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015;62(2-1): 6–10. (In Russ.)

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, SPIN: 1397-6725, e-mail: wisecold@mail.ru

ПОПОВ Дмитрий Николаевич, инженер лаборатории инновационных технологий «Север»; аспирант, https://orcid.org/0000-0001-9639-7601, Scopus Author ID: 58879397600, SPIN: 6042-8027, e-mail: dmiitryy09@gmail.com

АНИСИМОВ Андрей Сергеевич, аспирант, e-mail: bspaladin@yandex.ru

Вклад авторов

Лепов В.В. — разработка концепции, методология, программное обеспечение, проведение исследования, редактирование рукописи, визуализация, руководство исследованием, администрирование проекта; **Попов Д.Н.** — верификация данных, проведение исследования, создание черновика рукописи; **Анисимов А.С.** — методология, создание черновика рукописи

Конфликт интересов

Один из авторов – доктор технических наук, главный научный сотрудник Лепов Валерий Валерьевич является членом редакционного совета журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

About the authors

LEPOV, Valeriy Valerievich, Dr. Sc. (Eng.), Chief Researcher, https://orcid.org/0000-0003-2360-7983, ResearcherID: F-9875-2011, Scopus Author ID: 6508081764, SPIN: 1397-6725, e-mail: wisecold@mail.ru

POPOV, Dmitry Nikolaevich, Engineer of Innovative Technologies Laboratory “Sever”; Post-graduate Student, https://orcid.org/0000-0001-9639-7601, Scopus Author ID: 58879397600, SPIN: 6042-8027, e-mail: dmiitryy09@gmail.com

ANISIMOV, Andrey Sergeevich, Post-graduate Student, e-mail: bspaladin@yandex.ru

Authors’ contribution

Lepov V.V. – conceptualization, methodology, software, formal analysis, investigation, visualization, supervision, project administration; **Popov D.N.** – validation, investigation, original draft; **Anisimov A.S.** – methodology, original draft

Conflict of interest

One of the authors – Valeriy V. Lepov, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher is a member of the Editorial Board for the journal “Arctic and Subarctic Natural Resources”. The authors are not aware of any other potentail conflict of interest relating to this maniscript.

Поступила в редакцию / Submitted 16.06.2025
Поступила после рецензирования / Revised 24.07.2025
Принята к публикации / Accepted 30.07.2025