

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-2-8-22

^{1,*}Иноземцев С.С., ¹До Т.Ч., ²Королев Е.В.¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

*E-mail: inozemtsevss@mail.ru

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ФУНКЦИЕЙ САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты анализа научно-технической литературы, отражающий отечественный опыт исследований самовосстановления строительных материалов, которые представлены в изданиях, включенных в международные библиографические и реферативные базы данных. Тенденция изменения количества публикаций за 10 лет свидетельствует об экспоненциальном росте интереса исследователей к способности самовосстановления, при этом большая часть работ (более 50 %) опубликованы в области материаловедения. Общее количество публикаций отечественных авторов за десять лет, посвященных самовосстановлению, составляет 206 работ, из которых 49 % в области материаловедения.

Анализ статей в изданиях, включенных в международные библиографические и реферативные базы данных, опубликованных отечественными авторами, показывает, что для реализации эффекта самовосстановления предлагаются методы создания структуры материала, который содержит дополнительные элементы в виде резервного объема структурообразующего вещества. В качестве таких элементов выступают капсулы или функциональные слои с восстанавливающим агентом, при разрушении которых запускается процесс восстановления (залечивания). Так же представлены работы, где эффект восстановления достигается за счет собственного потенциала вяжущего, который не был полностью реализован на начальном этапе структурообразования. Среди материалов, в которых авторами предложена реализация эффекта самовосстановления, рассматриваются композиты на основе гидравлического минерального вяжущего (цемента) и органического вяжущего (битума) или полимера. При этом математическое описание механизмов самовосстановления в большинстве случаев отсутствует.

Ключевые слова: самовосстановление, самозалечивание, бетон, асфальтобетон, капсулы.

Введение. Долговечность всегда являлась объектом пристального внимания как разработчиков, так и эксплуатационников, оказывая существенное влияние на стоимость объекта и затраты в эксплуатационный период. Высокие требования в строительстве способствуют поиску новых эффективных технических решений, которые бы позволили увеличить качество и долговечность объектов строительства, а также снизить энергетические и финансовые затраты по их содержанию и эксплуатации [1–12]. Очевидно, что срок службы строительных конструкций зависит как от условий их эксплуатации, так и от свойств материала, из которого они произведены, в том числе способности сопротивляться внешним воздействующим факторам [13–21].

С развитием строительной отрасли возрастает потребность в использовании материалов, обладающих уникальным набором свойств, которые способствуют как увеличению функциональной эффективности конструкций, так и снижению материалоемкости производства. Новым перспективным направлением в строительном материаловедении в области увеличения сроков

службы, является разработка материалов, обладающих функцией самовосстановления, то есть способности восстанавливать собственную функциональность в конструкции, предусмотренной его назначением [22, 23].

Анализ международных библиографических и реферативных баз данных показывает, что интерес исследователей к способности самовосстановления (self-healing) в различных отраслях науки с каждым годом возрастает. Пропорционально возрастает количество публикаций как в области материаловедения в целом, так и прикладные работы по самовосстановлению бетонов и асфальтобетонов. Тенденция изменения количества публикаций за 10 лет представлена на рисунке 1.

Тенденция изменения количества публикаций за 10 лет свидетельствует об экспоненциальном росте интереса исследователей к тематике самовосстановления, при этом большая часть работ – 52,5 %, опубликованы в области материаловедения (47,5 % опубликованных работ относятся к областям – медицина, биология и т. п.). Среди публикаций в области материаловедения

14,9 % работ посвящены способности самовосстановления в бетонах, а лишь 4,9 % – в асфальтобетонах. Небольшое количество работ, посвященных асфальтобетонам, обусловлено как отсутствием надежных технологических решений по осуществлению восстановления структуры, так и наличием принципиальных отличий асфальтобетонов от строительных материалов на минеральных вяжущих веществах.

Важно отметить, что интерес ученых к данному направлению наблюдается по всему миру как в странах Европы, Северной Америки, Азии, так и стран Южной Америки. Доли публикаций авторов из разных стран с наибольшим вкладом в общую публикационную активность представлены в таблице 1.

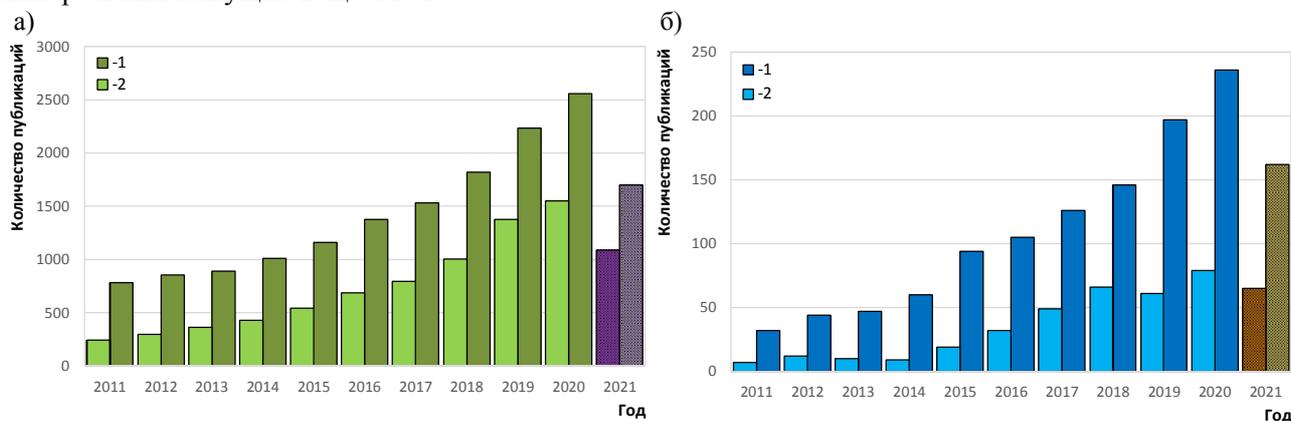


Рис. 1. Изменение количества публикаций по направлению:
 (а) 1 – «self-healing»; 2 – «self-healing» в материаловедении;
 (б) 1 – «self-healing» в бетонах; 2 – «self-healing» в асфальтобетонах
 (по данным www.scopus.com от июля 2021 года)

Таблица 1

Доля публикаций по направлению самовосстановления ученых из разных стран

Область исследований	Доля публикаций ученых из страны, %					
	Китай	США	Нидерланды	Великобритания	Юж. Корея	Россия
Бетоны	17,8	8,3	5,7	4,7	3,4	0,8
Асфальтобетоны	36,5	9,7	9,2	6,5	1,9	1,0

Лидерами в области научных исследований по числу публикаций, посвященных самовосстановлению в области строительного материаловедения, является Китай и США, вклад которых составляет 17,8 % и 8,3 % статей, соответственно,

посвященных бетонам, а асфальтобетонам – 36,5 % и 9,7 %, соответственно. В России так же наблюдается увеличение количества публикаций, посвященных технологии самовосстановления (рис. 2).

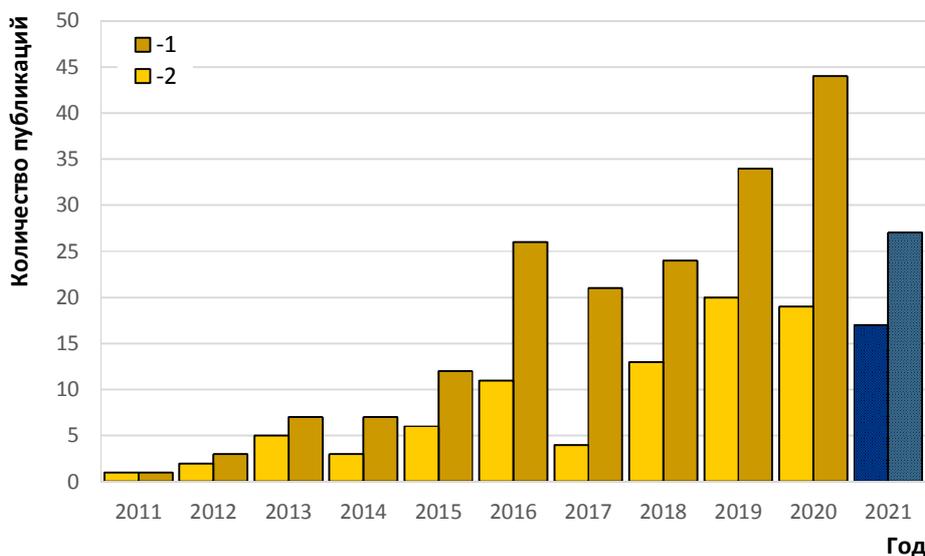


Рис. 2. Изменение количества публикаций по направлению:
 1 – «self-healing»; 2 – «self-healing» в материаловедении (по данным www.scopus.com от июля 2021 года)

Общее количество публикаций, посвященных самовосстановлению, отечественными авторами за десять лет составляет 206 работ, из которых 49 % в области материаловедения. При этом стоит отметить, что динамика изменения количества публикаций во времени имеет хотя и положительный тренд, но по темпам, отстающий от общемирового, в том числе в области асфальтобетонов.

Материалы и методы. В настоящей работе используется комплекс общенаучных логических методов исследования, основанных на теоретическом анализе технологических решений, представленных в научно-технической литературе, информационных ресурсах разработчиков и средствах массовой информации, в том числе патентах, научных статьях и научных отчетах.

Основная часть. В статье [24] по результатам оценки перспектив применения самовосстанавливающихся материалов и технологий на их основе авторами сделан вывод, что самовосстанавливающийся материал рассматривается, как

инструмент для увеличения срока службы различной продукции в области строительства, дорожной отрасли, автомобилестроения, резинотехнической и лакокрасочной промышленности. Отмечается, что наиболее простыми материалами, где может быть реализована технология самовосстановления, являются полимеры и композиты на их основе.

В работах [25, 26] представлены результаты исследования слоистых композитов с боросилоксановой матрицей, в которых один или несколько слоев обеспечивают способность самовосстановления. В качестве матрицы предложен боросилоксан, обладающий вязкими свойствами при статической нагрузке и эластичными свойствами – при кратковременной или ударной нагрузке, что позволяет реализовать функцию самовосстановления. Механизм самовосстановления основывается на направленном массопереносе к дефекту (рис. 3).

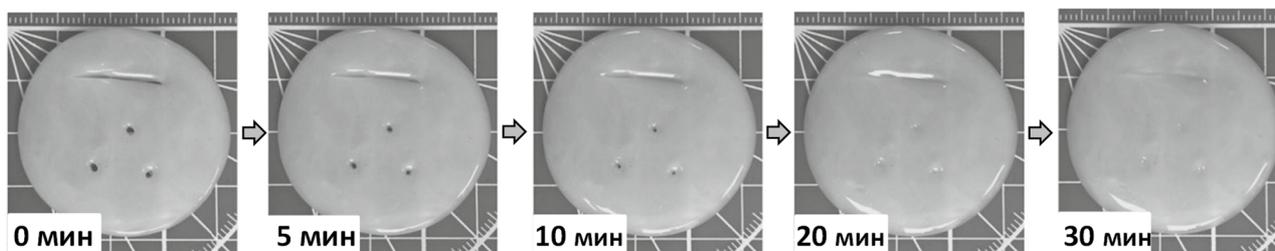


Рис. 3. Заживление образца боросилоксанового композита после пореза и прокола через 0; 5; 10; 20; 30 мин

Доказано, что заживление слоистого композита с боросилоксановой матрицей после прокола диаметром 0,8–2,5 мм обеспечивает герметичность за короткий промежуток времени, через 1–2 секунды, а восстановление изначальной сплошности структуры достигается через 40 минут.

В 2019 году авторами получен патент [27] на композиционный слоистый самозалечивающийся материал для изготовления конструкций, которым необходима защита от возникновения дефектов, в частности для изготовления конструкций с внутренней атмосферой, например, для герметичных объектов. Изобретение относится к слоистым композитам, содержащим два внешних гибких слоя и композитный слой, состоящий из органосилоксановой матрицы и наполнителя, а также дополнительно содержит слой из боросилоксанового олигомера или полимера, расположенного между композитным слоем и внешним гибким слоем. При этом внешние гибкие слои включают материал, обладающий сродством к органосилоксанам. Представленные ва-

рианты материалов могут быть армированы стеклотканью или углеродными, базальтовыми, арамидными волокнами или смесью волокон.

В статье [28] представлены результаты исследования эффекта самозалечивания высокопрочного бетона, подвергнутого деструкции при циклическом замораживании (рис. 4). В работе для исследуемых образцов бетона осуществлялась оценка степени деструкции и степени самозалечивания. Степень деструкции определялась по отношению показателя физических свойств (предел прочности) до начала замораживания и после 37 циклов замораживания-оттаивания. Степень самозалечивания рассчитывалась, как отношение значения показателя физических свойств (предел прочности) после периода отдыха (восстановления), к значению до начала этого периода.

Показано, что для исследуемых образцов бетона наблюдается закономерное снижение прочности под влиянием деструктивных процессов, связанных с замораживанием-оттаиванием, которое частично компенсируется ростом прочности в результате самозалечивания в период отдыха.

Причиной наблюдаемого эффекта является особенности структуры цементного камня и бетона, а также потенциале негидратированного цемента (клинкерный фонд), который обуславливает способность обратимого изменения свойств. Так, в модифицированном высокопрочном бетоне на

28 суток отмечается степень гидратации цемента $\alpha = 0,5 \dots 0,6$ (норма $\alpha = 0,8 \dots 0,9$), что свидетельствует о нереализованном клинкерном фонде. Поэтому в исследуемых бетонах структурообразующие процессы преобладают над деструктивными, и проявляется эффект самозалечивания.

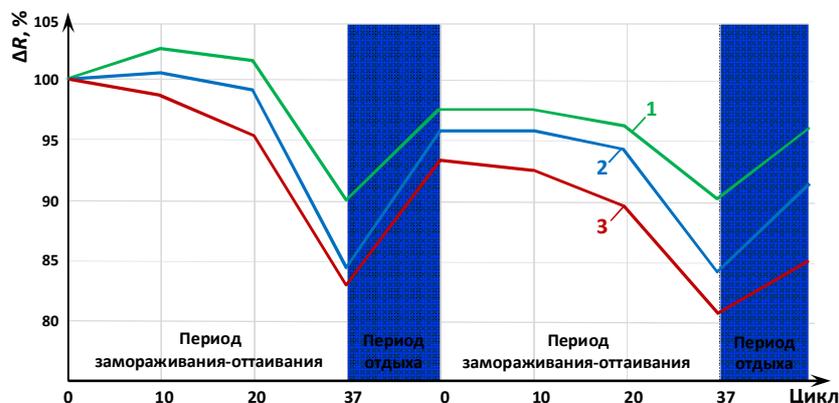


Рис. 4. Кинетика изменения прочности образцов бетона: 1 – состав с органоминеральным модификатором и кремнийорганической эмульсией; 2 – состав органоминеральным модификатором; 3 – контрольный состав

Результаты исследования самозалечивания трещин в глиноцементнобетонных (ГЦБ) диафрагмах земляных плотин (ЗП), выполненных методом буросекущих свай в качестве противофильтрационного элемента (ПФЭ), представлены в работе [29]. Для реализации эффекта самозалечивания и обеспечения фильтрационной прочности плотины в случае образования трещины ПФЭ, в конструкции переходных зон предусматривается устройство специального «залечивающего» слоя. При образовании трещины в ГЦБ и дальнейшем ее раскрытии образуется градиент напора в сторону полости дефекта, который превышает критическое значение градиента напора для «залечивающего» слоя. В результате материал залечивающего слоя увлекается фильтрационным потоком в образовавшуюся полость трещины и заполняет ее, восстанавливая сплошность ПФЭ плотины. В качестве материала залечивающего слоя авторами предлагается использовать песчаный грунт с крупностью частиц менее 5 мм.

Авторами [30] проведен сравнительный анализ материалов на основе неорганических вяжущих, среди которых рассматривались портландцемент, магнезиальный оксихлоридный цемент и гипс. Отмечается, что во всех рассматриваемых системах наблюдается самовосстанавливающий эффект, проявляющийся в разной степени для каждого вида вяжущего. Так, в образцах на основе портландцемента трещины заполняются гидроксидом кальция, который со временем может карбонизироваться, в образцах магнезиального оксихлоридного цемента трещины заполняются гидроксидом магния, а в образцах гипса –

дигидратом гипса. Однако, несмотря на заполнение трещин, прочность образцов восстанавливается незначительно, и автор отмечает необходимость использования дополнительных мер по залечиванию.

Авторами статьи [31] предложен новый метод получения пористых композитов с повышенной прочностью и способностью самовосстановления бетонной конструкции. Суть метода заключается, во-первых, в создании плотной и высокопрочной структуры материала и, во-вторых, во введении химически активного минерального материала, входящего в состав мелкодисперсного наполнителя (сульфида железа). Такое сочетание обеспечивает формирования этрингитоподобных железосодержащих гидратов кальция в объеме бетона в процессе трещинообразования.

Коллектив автора опубликовал работу [32], в которой было предложено использовать метод ионно-плазменной обработки для управления сорбционной способностью природных цеолитов, которые предполагается применять в качестве носителей активных биомодификаторов (бактерий *Bacillus pasteurii*), обеспечивающих бетоны способностью к самовосстановлению. В работе показана большая эффективность предлагаемого метода модифицирования сорбентов в сравнении с традиционным методом термической обработки. А в работе [33] представлены результаты исследования способности строительных материалов на основе портландцемента и гипсового вяжущего к самовосстановлению при использовании капсул с аэробными бактериями. Отмечается существенное влияние на реологические свойства цементно-песчаных растворов при

добавлении биологических поверхностно-активных веществ, входящих в состав клеток микроорганизмов, а также установлено влияние содержания капсул на время схватывания и физико-механические свойства получаемого композита. Так же доказано [34], что использование в качестве носителя активного биомодификатора высокопористого цеолита позволяет реализовать в цементных композитах технологию самовосстановления, позволяющей с помощью продуктов жизнедеятельности бактерий кольматировать дефекты.

Авторы в работе [35] рассматривают способность уробактерий к осаждению карбоната кальция с целью использования при получении самозалечивающегося бетона, залечивании трещин и реставрации бетонных сооружений. Проведенный скрининг микроорганизмов позволил выявить наиболее активные уробактерии, *Lysinibacillus macroides* и *Bacillus licheniformis*, из гиперсоленых озер. Использование данных видов бактерий позволяет реализовать технологию биокальцинирования в составе цементной смеси

и повысить прочность цементного камня и снизить пористость и водопоглощение. Авторами отмечается высокая и длительная активность бактериальных препаратов при залечивании дефектов в цементном камне.

В работе [36] исследовано девять видов бактерий, способных к осаждению карбоната кальция в процессе жизнедеятельности, которые пригодны для создания биомодифицированных материалов. Установлено, что все рассматриваемые бактерии проявляют высокую активность биоминерализации CaCO_3 , которая возрастает с ростом pH в содержащей мочевины среде. Выделено пять штаммов, способных к полному заполнению дефектов карбонатом кальция (*Bacillus licheniformis* DSMZ 8782, *Bacillus cereus* 4b, *Staphylococcus epidermidis* 4a, *Micrococcus luteus* BS52, *Micrococcus luteus* 6).

В обзоре [37] собрана информация об участии представителей различных физиологических групп микроорганизмов в формировании наноразмерных частиц минералов карбоната кальция (рис. 5).

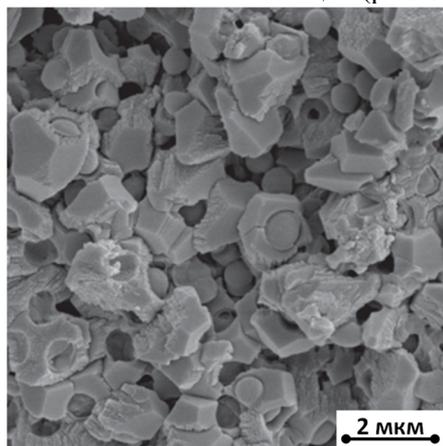


Рис. 5. Микрофотография образца биоцемента, полученного с использованием бактерии *Sporosarcina pasteurii* [37]

Показано, что этот процесс наиболее изучен у представителей групп аэробных микроорганизмов, тогда как информации об участии анаэробных микроорганизмов гораздо меньше. Отмечено, что среди рассмотренных способностью к образованию карбоната кальция обладают представители различных групп микроорганизмов: оксигенных и аноксигенных фототрофных микроорганизмов, аэробных органотрофных бактерий, в том числе аммонифицирующих бактерий,

Sporosarcina pasteurii → *Bacillus pumilus* → *Bacillus megaterium* → *Lysinibacillus sphaericus*.

Интенсивность осаждения рассчитывается по коэффициенту закрытия трещин.

В работе [39] представлены результаты практической апробации технологии биомоди-

а также ряд анаэробных микроорганизмов, таких как сульфатредуцирующие бактерии, метаногены, микроорганизмы, осуществляющие анаэробное окисление метана и денитрифицирующие бактерии.

На основании сравнительного анализа интенсивности бактерий по активности в процессе осаждения карбоната кальция в области дефектов авторами [38] ранжированы по эффективности в следующем порядке по убыванию:

фицированного цементного раствора при устройстве нефтяных скважин Чунгуан (Chunguang) в Китае, проведенной в рамках совместной исследовательской работы отечественными и зарубежными учеными. Для приготовления цементного

раствора использовались сточные воды молочных промышленных предприятия, которые выполняли функцию питательной среды для активной жизнедеятельности бактерий и осаждения карбоната кальция. Отмечается повышенная плотность и прочность получаемых композитов в сравнении с традиционными составами.

Реализация технологии самовосстановления в асфальтобетонах с использованием капсул, содержащих активные кальций осаждающие виды бактерий, сопряжена с рядом технологических сложностей. Так, приготовление асфальтобетонной смеси осуществляется при температурах более 120 °С и бактерии в капсулах в таких условиях не способны будут выжить. Поэтому в качестве восстанавливающего агента в капсулах для реализации самовосстановления в асфальтобетонах необходимо использовать альтернативные виды модификаторов, учитывающих особенности применяемого вяжущего.

В условиях разработки технологического решения для обеспечения самовосстановления асфальтобетонов в работе [40] предложены критерии качества, с помощью которых можно оценить эффективность самовосстанавливающей способности. В качестве характеристик, позволяющих оценить эффективность восстановления эксплуатационного состояния асфальтобетона с помощью технологии самовосстановления, предложены: степень восстановления эксплуатационного состояния структуры; своевременность инициирования процесса самовосстановления; скорость процесса восстановления эксплуатацион-

ного состояния структуры; долговечность эксплуатационного состояния после самовосстановления.

В работе [41] в качестве вещества, применяемого для создания капсул (инкапсулятора), рассмотрен альгинат натрия. Его использование для приготовления альгинатного раствора и эмульсии восстановителя на его основе, позволяет получать кальций альгинатные капсулы. Технологический процесс синтеза капсул с помощью альгината натрия состоит из четырех этапов: приготовление альгинатного раствора; приготовление альгинатной эмульсии восстановителя; деление альгинатной эмульсии на отдельные капли; закрепление отдельных капель альгинатной эмульсии через раствор кальциевой соли; сушка альгинатных капсул. Показано, что альгинаты являются эффективным компонентом, позволяющим реализовать технологию инкапсулирования модификаторов (восстановителей) для самовосстанавливающихся асфальтобетонов.

Учитывая высокую температуру приготовления асфальтобетонной смеси, важным требованием к инкапсулированному модификатору является термическая стойкость как стенок капсул, так восстанавливающего агента. В работе [42] представлены исследования термомеханических свойств кальций альгинатных капсул с восстановителем для асфальтобетонов. Показано, что при приготовлении асфальтобетонной смеси воздействие температур от 140 до 170 °С приводит к снижению прочности капсул при воздействии температуры (рис. 6).

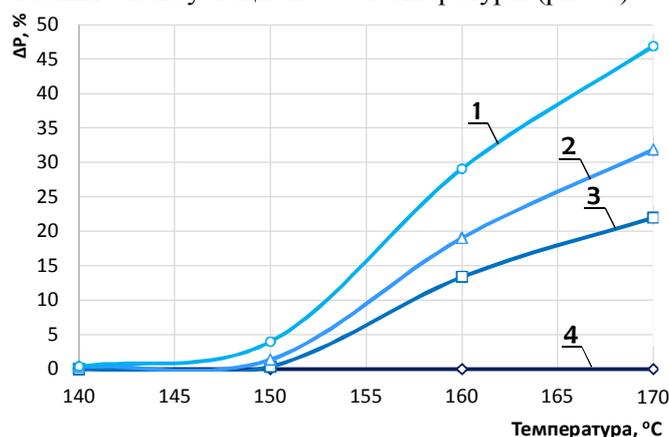


Рис. 6. Зависимость относительного изменения разрушающей нагрузки от температуры воздействия на капсулы при экспозиции: 1 – контрольный; 2 – 1 час; 3 – 2 часа; 4 – 4 часа

Отмечается, что влияние температуры 140 °С на прочность капсул незначительно, а при 150 °С прочность снижается всего на 4 %. Установлено, что изменения структуры альгината кальция происходят при температуре выше 155 °С. Таким образом, меньшее влияние на физико-механические свойства капсул оказывает температура, не

превышающая 150 °С, что позволяет использовать инкапсулированный модификатор в составе асфальтобетона при приготовлении горячих асфальтобетонных смесей.

Установлена рецептурная граница, в приближении которой соотношение компонентов обеспечивает получение структурированных систем, что может быть

использовано при проектировании составов для инкапсулирования различных типов восстанавливающих агентов [43, 44]. Указанная рецептурная граница описывается зависимостью изменения соотношением O/A (восстановитель/альгинат натрия), при котором достигается максимальная степень структурируемости эмульсий, от содержания альгината натрия в системе и имеет вид: $O/A = 26,734x^{-2,543}$ (здесь x – содержание альгината натрия). Отмечается, что получение

структурированных эмульсий обеспечивает большую стойкость альгинатных эмульсий к сегрегации, время начало которой определяется соотношением O/A и может быть описано зависимостью $t_d = -0,5216 \cdot O/A + 10,25$. Показано, что структура стабильных альгинатных эмульсий характеризуется средним размером частиц дисперсной фазы от 5 до 7 мкм, среднее расстояние между которыми от 7 до 9 мкм (рис. 7).

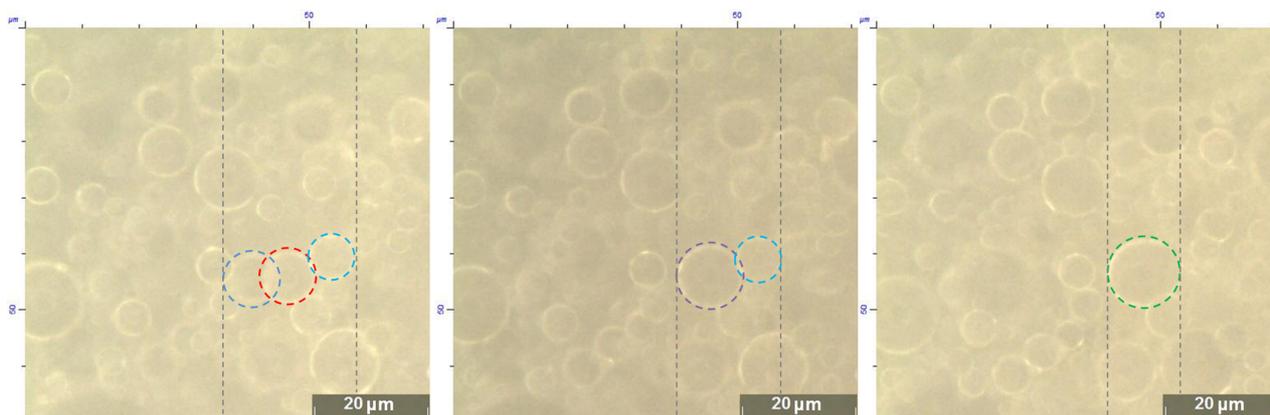


Рис. 7. Микрофотография процесса объединения частиц эмульсии (слева направо)

Со временем наблюдается изменение гранулометрического состава альгинатной эмульсии, появляющееся вследствие естественных процессов броуновского движения и агрегирования дисперсной фазы. При этом в течение 5 дней в среднем диаметр частиц увеличивается на 28 %, а вязкость – в 4 раза.

В работе [45] рассмотрена возможность использования в качестве восстанавливающего

агента активного полимерного компонента для реализации технологии самовосстанавливающегося асфальтобетона. Установлено, что эффективным восстанавливающим агентом, способным заменить традиционные восстановители на основе углеводородных масел, является тиолсодержащий уретановый AR-полимер. AR-полимер является восстановителем, инкапсулирование которого возможно с помощью альгинатной технологии (рис. 8).

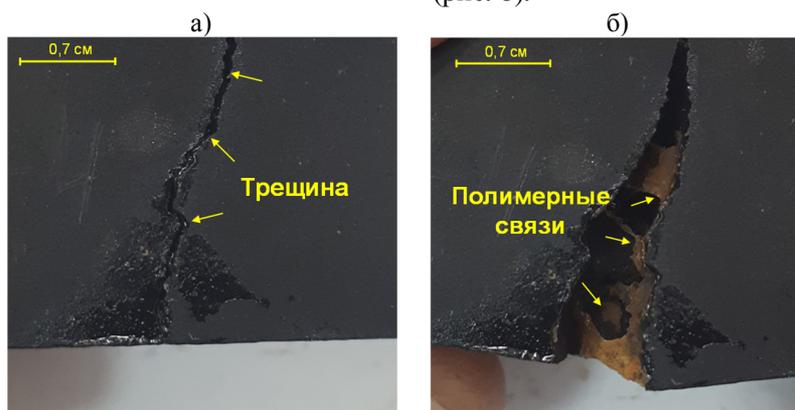


Рис. 8. Залеченная трещина до (а) и после (б) нагружения

Объем восстановителя в капсуле ограничивается максимальным допустимым значением 83 ± 1 %, которое можно достичь с помощью альгинатной технологии. Доказано, что вид и свойства восстанавливающего агента не оказывает влияния на изменение механических свойств капсул. Уменьшение содержания альгината натрия с

3,33 до 2,08 % приводит к снижению прочности капсул на 2...6 % при различных соотношениях RA/A (восстанавливающий агент/альгинат натрия). Наибольшая эффективность капсул при максимальном содержании AR-полимера в качестве

восстанавливающего агента и большей прочностью достигается для эмульсий, содержащих 2,50 % альгината натрия при $RA/A = 5,0 \pm 0,2$.

Разработка технических решений по реализации технологии самовосстановления в материалах является основным направлением научно-исследовательских работ, которое также сопряжено с решением задачи оценки эффективности таких решений. Отсутствие общей теории самовосстановления способствует появлению различных подходов по оценке эффекта самовосстановления. Наиболее простым и часто используемым методом является расчет относительного изменения показателя физико-механических свойств материала после и до процесса восстановления [22–24, 28–31].

В работах [40, 45] предложена методика расчета коэффициента восстановления (healing efficiency), учитывающего относительную разницу потери прочности, термопластичного композита с применением инкапсулированного модификатора и без него. Предложенный коэффициент восстановления отражает влияние инкапсулированного модификатора на изменение прочности исследуемого композита, поэтому для оценки эффективности самовосстанавливающегося материала необходимо учитывать, как свойства в начальный период времени, так и их скорость изменения в условиях эксплуатации. Отмечено также, что проблема выбора оптимального показателя свойств материала для оценки эффекта восстановления и усовершенствования методики расчета с учетом продолжительности периода восстановления является не решенной и требует дополнительных масштабных исследований.

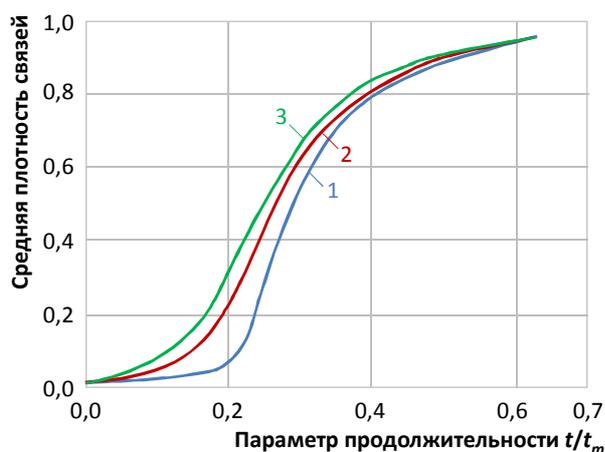


Рис. 9. Средняя плотность связей вдоль трещины после восстановления при податливости связей $c_0 = 0,01$ (1); $0,05$ (2); $0,1$ (3)

Предложенный подход может быть использован для исследования цикла формирования и залечивания трещин, оценки изменения коэффициентов

Процесс самозалечивания представляется собой ликвидацию трещин, по средством потенциала материала за счет формирования связей в концевой области дефектов, в результате которого восстанавливается функциональность (работоспособность). В цикле работ [46–48] предложена модель кинетики самозалечивания трещин, основанная на объединении подходов механики, физики и химии за счет использования кинетической термофлуктуационной теории и модели концевой области трещин. Моделирование процесса формирования связей (восстановления) описывается с использованием кинетического уравнения первого рода, характеризующее увеличение плотности связей $n_h(x,t)$ между поверхностями дефекта (трещины):

$$\frac{dn_h(x,t)}{dt} = \frac{n_0 - n_h(x,t)}{\chi \sqrt{\frac{u_x^2(x,t) + u_y^2(x,t)}{H}} \frac{\alpha h}{kT} \exp\left(\frac{U_h}{RT}\right)}, \quad (1)$$

где u_x и u_y – компоненты раскрытия трещины на краю концевой области; H – линейный размер, пропорциональный толщине зоны неоднородности на участке соединения материала; χ – эмпирический коэффициент; α – коэффициент учитывающий тип материала; h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; U_h – энергия активации восстановления связей; R – универсальная газовая постоянная; n_0 – максимальная плотность связей. При этом числитель уравнения характеризует интенсивность процесса восстановления связей, а знаменатель – время протекания этого процесса, результатом которого является изменение плотности связей и напряжений на концевой области трещины (рис. 9 и 10).

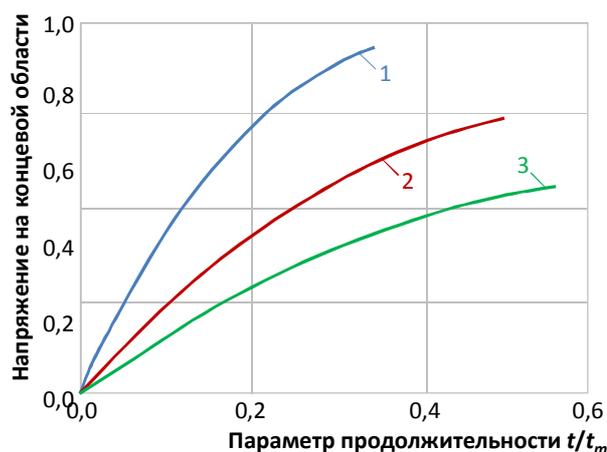


Рис. 10. Относительные напряжения на краю концевой области при восстановлении по длине трещины: 25 % (1); 50 % (2); 75 % (3)

интенсивности напряжений, сравнительного анализа различных способов самовосстановления, особенностей протекания этого процесса для различных типов материалов.

Так же актуальным вопросом при исследовании особенностей структурных связей в материале и его способности к их самостоятельному восстановлению является поиск и разработка методов, позволяющих определить показатели, характеризующие их количество, прочность, равномерность и т. п.

В работе [49] представлен анализ мирового опыта применения метода акустической эмиссии для исследования особенностей локальной перестройки структуры, особенностей химических реакций, в том числе коррозии; влияния магнитного и радиационного воздействия на структуру, а также фазовых превращений. Отражен опыт использования метода АЭ для исследования особенностей структуры материалов на основе органических вяжущих, в том числе асфальтобетонов. Сделан вывод о перспективности использования метода акустической эмиссии для описания изменений структуры асфальтобетона, происходящих в процессе самовосстановления.

Таким образом, работы отечественных исследователей в области самовосстановления строительных материалов преимущественно направлены на поиск технических решений по реализации технологии самостоятельного восстановления.

Выводы.

1. Интерес исследователей к способности самовосстановления в различных отраслях науки с каждым годом возрастает. Лидерами в области научных исследований по числу публикаций, посвященных самовосстановлению в области строительного материаловедения, является Китай и США. Доля статей, опубликованных российскими исследователями, в указанных направлениях составляет 0,8 % и 1,0 %, соответственно, посвященных бетонам и асфальтобетонам. При этом активность исследователей в разные годы изменяется волнообразно, что может свидетельствовать об отсутствии системного подхода при разработке указанного направления.

2. Анализ статей в изданиях, включенных в международные библиографические и реферативные базы данных, опубликованных отечественными авторами, можно сделать вывод, что для реализации эффекта самовосстановления предлагаются методы создания структуры материала, который содержит дополнительные элементы в виде резервного объема структурообразующего вещества. В качестве таких элементов выступают капсулы или функциональные слои с восстанавливающим агентом, при разрушении которых запускается процесс восстановления (залечивания). Так же представлены работы, где эффект восстановления достигается за счет собственного потенциала вяжущего, который не был

полностью реализован на начальном этапе структурообразования. Среди материалов, в которых авторами предложена реализация эффекта самовосстановления, рассматриваются композиты на основе гидравлического минерального вяжущего (цемента) и органического вяжущего (битума) или полимера. При этом математическое описание механизмов самовосстановления в большинстве случаев отсутствует.

3. Отсутствие единой системы оценки не позволяет объективно сравнивать эффективность различных технологических решений по реализации технологии самовосстановления в строительных материалах, а также производить оценку влияния управляющих рецептурно-технологических факторов на процесс самовосстановления и его результат, что затрудняет развитие и совершенствование существующих технических решений, и разработку новых более эффективных. При этом отсутствие научно обоснованных положений не позволяет дать определение понятию самовосстановления и описать в терминах материаловедения принцип проявления этого явления в материалах, что затрудняет формулирование условий для реализации функции самовосстановления и определение эффективных способов реализации в выбранной области исследования.

4. Для развития направления самовосстановления в строительных материалах необходимо получение научно обоснованных положений о явлении самовосстановления, условиях для реализации функции самовосстановления и определение эффективных способов реализации в выбранной области исследования. Основными задачами, требующими внимания исследователей в настоящий момент, являются:

- обоснование термина самовосстановление и формулирование теоретического описания этого явления в терминах материаловедения;
- выявления показателей свойств, позволяющих оценить эффект от самовосстановления;
- разработка репрезентативной методики для определения показателей свойств, позволяющей оценить эффект от самовосстановления;
- исследование особенностей собственного потенциала к самовосстановлению традиционных строительных материалов;
- определение граничных условий параметров структуры материалов, для которых может быть реализована функция самовосстановления с использованием отдельно взятой технологии самовосстановления;
- определение параметры дефектов или структурных преобразований материалов, возникающих при эксплуатации, на которые может оказать воздействие инкапсулированный модификатор.

Благодарности: исследования выполнены при поддержке Головного регионального центра коллективного пользования научным оборудованием и установками НИУ МГСУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика) как трансдисциплинарное направление исследований // Высшее образование в России. 2014. № 3. С. 77–83.
2. Elistratkin M.Y., Lesovik V.S., Alfimova N.I., Shurakov I.M. On the question of mix composition selection for construction 3d printing // Materials Science Forum. 2018. Т. 945 MSF. Pp. 218–225.
3. Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С., Зыкова В.В., Карпеня А.Н., Ким А.А., Финашенков Е.А. 3D-печать в строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 1 (52). С. 27–46.
4. Makul N., Fediuk R., Amran M., Zeyad A.M., Murali G., Vatin N., Klyuev S., Ozbakkaloglu T., Vasilev Yu. Use of recycled concrete aggregates in production of green cement-based concrete composites: a review // Crystals. 2021. Vol. 11. P. 232.
5. Лесовик В.С., Строкова В.В. О развитии научного направления "Наносистемы в строительном материаловедении" // Строительные материалы. 2006. № 9. С. 93–101.
6. Логанина В.И., Макарова Л.В., Тарасов Р.В., Давыдова О.А. Оптимизация состава композитов общестроительного назначения, модифицированных наноразмерными добавками // Региональная архитектура и строительство. 2010. № 2. С. 53–57.
7. Loganina V.I., Ryzhov A.D. Structure and properties of synthesized additive based on amorphous aluminosilicates // Case Studies in Construction Materials. 2015. Vol. 3. С. 132-136.
8. Fediuk R.S., Lesovik V.S., Svintsov A.P., Mochalov A.V., Kulichkov S.V., Stoyushko N.Y., Gladkova N.A., Timokhin R.A. Self-compacting concrete using pretreated rice husk ash // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 3 (79). Pp. 66–76.
9. Makarov D.B., Krasinikova N.M., Morozov N.M., Ayupov D.A., Borovskikh I.V., Khokhryakov O.V., Yagund E.M., Khozin V.G. Improving the quality of materials for highway construction. ARPN // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. № 11. 3035.
10. Хозин В.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К. Общая концентрационная закономерность эффектов наномодифицирования строительных материалов // Строительные материалы. 2015. № 2. С. 25–33.
11. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Shorstova E.S. Fiber concrete for 3-d additive technologies // Materials Science Forum. 2019. Vol. 974. Pp. 367–372.
12. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон: проблемы и перспективы // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 7. С. 51–54.
13. Fediuk R., Amran M., Vatin N., Vasilev Y., Lesovik V., Ozbakkaloglu T. Acoustic properties of innovative concretes: a review // Materials. 2021. № 14. Pp. 328.
14. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Features of the defectiveness of nanomodified high-strength lightweight concrete based on hollow microspheres // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 743 KEM. Pp. 68–72.
15. Lesovik V., Ayzenshtadt A., Frolova M., Lesovik R., Strokov V. «Green» composites for north- arctic region development // Open Ecology Journal. 2014. Vol. 7. Pp. 32–36.
16. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Increasing the Weathering Resistance of Asphalt by Nanomodification // Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp.147–157.
17. Котлярский Э.В., Гридчин А.М., Лесовик Р.В. факторы, способствующие разрушению структуры асфальтобетона в процессе эксплуатации дорожных асфальтобетонных покрытий. Белгород, 2012. 187 с.
18. Fediuk R., Kuzmin D., Cherneev A., Batarshin V., Garmashov I., Lesovik V., Ibragimov R. Concretes for underwater structures // Key Engineering Materials. 2018. Vol. 769 KEM. Pp. 3–8.
19. Nelyubova V.V., Strokov V.V., Sumin A.V., Jernovskiy I.V. the structure formation of the cellular concrete with nanostructured modifier // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 729. С. 99-103.
20. Панченко А.И., Харченко И.Я., Васильев С.В. Долговечность бетонов с компенсированной химической усадкой // Строительные материалы. 2019. № 8. С. 48–53.
21. Старцев В.О., Низина Т.А. Прогнозирование климатического старения эпоксидных полимеров по изменению цветовых показателей // Труды ВИАМ. 2015. № 12. С. 10.
22. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Review of road materials self-healing: problems and perspective // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 855. С. 012010.
23. Баженов Ю.М., Ерофеев В.Т., Салман А.Д. С.Д., Смирнов В.Ф., Фомичев В.Т. Технология самовосстановления железобетонных конструкций с помощью

микроорганизмов // Русский инженер. 2018. № 4 (61). С. 46–48.

24. Sitnikov N.N., Khabibullina I.A., Mashchenko V.I., Rizakhanov R.N. Prospects of Application of Self-Healing Materials and Technologies Based on Them // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. Vol. 9 № 5. Pp. 785–793.

25. Mashchenko V.I., Sitnikov N.N., Khabibullina I.A., Kuzmin M.K., Chausov D.N. Structure and properties of self-healing materials based on hydroxyl terminated polydimethylsiloxane and boric acid // Journal of Physics: Conference Series. International Interdisciplinary Scientific Conference on Advanced Element Base of Micro- and Nano-Electronics. 2002. Vol. 1560. Pp. 012037.

26. Sitnikov N.N., Khabibullina I.A., Mashchenko V.I., Shelyakov A.V., Mostovaya K.S., Vysotina E.A. Layered Self-Healing Composite Material with an Internal Functional Layer Based on Borosiloxane // Inorganic Materials: Applied Research. 2020. Vol. 11. Pp. 1051–1059.

27. Патент 2710623 С1, Российская Федерация, МПК В32В5/00. Композиционный слоистый самозалечивающийся материал / Ситников Н.Н., Хабибулина И.А., Ризакханов Р.Н.; заявитель и патентообладатель ГНЦ РФ ФГУП «Центр им. М.В. Келдыша». № 2019111370; заявл. 16.04.2019, Бюл. № 1. 11 с.

28. Каприелов С.С., Гольденберг А.Л., Тамразян А.Г. О самозалечивании высокопрочного бетона, подвергнутого деструкции при циклическом замораживании // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 5(371). С. 56–61.

29. Solskiy S.V., Orlova N.L., Velichko A.S. Crack self-healing in clay-cement concrete diaphragm of embankment dam // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 77(1). Pp. 3–12.

30. Chernykh T.N., Bondarenko S.A., Zimich V.V. Study of natural self-healing of materials based on inorganic binders. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering // International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. 2020. Vol. 962. 0220402020.

31. Tolstoy A., Gridchin A., Glagolev E., Lesovik R., Shapovalov N. Efficient Construction Composites for Construction in the North and the Arctic // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 147. Pp. 15–22.

32. Bruyako M., Grigorieva L., Grigorieva A., Ivanova I. Treatment of natural zeolites for increasing the sorption capacity // Solid State Phenomena. 2016. Vol. 871. Pp. 70–75.

33. Bruyako M., Grigoryeva L. Bioactive additives for self-healing of concrete

microstructure // Materials Science Forum. 2018. Vol. 945 MSF. Pp. 36–41.

34. Bruyako M., Grigor'eva A., Stepina I., Golotenko D., Podsevalova A. Biomodified building materials on the base of mineral binders // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 7th International Scientific Conference on Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education. 2020. Vol. 1030. 012005.

35. Kalenov S.V., Gradova N.B., Sivkov S.P., Khokhlachev N.S., Panfilov V.I. A preparation based on bacteria isolated from hypersaline environments to improve the functional and protective characteristics of concrete // Biotekhnologiya. 2020. Vol. 36. № 4. Pp. 21–28.

36. Golovkina D.A., Zhurishkina E.V., Ivanova L.A., Baranchikov A.E., Sokolov A.Y., Bobrov K.S., Masharsky A.E., Tsvigun N.V., Kopitsa G.P., Kulminskaya A.A. Calcifying Bacteria Flexibility in Induction of CaCO₃ Mineralization. Life. 2002. Vol.12. № 1. 317.

37. Namsaraev Z.B., Melnikova A.A., Rudenko A.P., Komova A.V. Processes of Nanosized Calcium Carbonate Formation by Microorganisms // Nanotechnologies in Russia. 2020. № 15. Pp. 20–27.

38. Strokova V.V., Dukhanina U.N., Balitsky D.A. Crack closure in a cement matrix using bacterial precipitation of calcium carbonate // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. Pp. 158–164.

39. Li L., Liu T., Jiang G., Fang C., Sun J., Zheng S., Liu H., Leusheva E., Morenov V., Nikolaev N. Field application of microbial self-healing cement slurry in Chunguang 17-14 well // Energies. 2021. Vol. 14(6). 1544.

40. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Indicators of the effectiveness of self-healing asphalt concrete // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. 02007.

41. Inozemtcev S.S., Do T.T. Sodium alginate application in self-healing technology for asphalt concrete. Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future // Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 160. Pp. 59–65.

42. Inozemtcev S.S., Korolev E.V., Do T.T. Thermal and Mechanical Properties of Calcium Alginate Capsules for Self-Healing Asphalt Concrete // Materials Science Forum. 2021. Vol. 1041. Pp. 101–106.

43. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Technological features of production calcium-alginate microcapsules for self-healing asphalt // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. 01008.

44. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Sodium alginate emulsions for asphalt concrete modifiers encapsulating: structural rheological properties //

Magazine of Civil Engineering. 2021. № 101(1). 10104.

45. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Active polymeric reducing agent for self-healing asphalt concrete // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1030. 012002.

46. Perelmuter M.N. Modeling of Crack Self-Healing Kinetics // Physical Mesomechanics. 2020. Vol. 23. № 4. Pp. 301–308.

47. Perelmuter M. Cracks self-healing – Physical and mathematical modeling // AIP Conference Proceedings. International Conference on Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology. 2020. Vol. 231014. 020248.

48. Perelmuter M. Application of the bridged crack model for evaluation of materials repairing and self-healing. Journal of Physics: Conference Series // International Conference Problems of Mathematical Physics and Mathematical Modelling. 2017. Vol. 130. 0120396.

49. Иноземцев С.С., Королев Е.В., До Т.Ч. Перспективы использования метода акустической эмиссии для исследования самовосстанавливающихся асфальтобетонов. Технические науки: проблемы и решения // Сб. ст. по материалам XXX Международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения». М.: Изд. «Интернаука», 2019. № 12(28). С. 157–164.

Информация об авторах

Иноземцев Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Строительного материаловедения. E-mail: inozemtsevss@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26.

До Тоан Чонг, аспирант кафедры Строительного материаловедения. E-mail: trongtoan007@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26.

Королев Евгений Валерьевич, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе. E-mail: prorektor_nr@spbgasu.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4

Поступила 04.10.2021 г.

© Иноземцев С.С., До Т.Ч., Королев Е.В., 2022

^{1,*}Inozemtcev S.S., ¹Do T.T., ²Korolev E.V.

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering

²Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

*E-mail: inozemtsevss@mail.ru

RUSSIAN EXPERIENCE OF RESEARCH IN THE FIELD OF BUILDING MATERIALS WITH THE FUNCTION OF SELF-HEALING

Abstract. The results of the analysis of scientific and technical literature, reflecting the experience of research of Russian scientists in the field of self-healing of building materials are shown. They are presented in publications included in international bibliographic and abstract databases. The tendency of changes in the number of publications over 10 years indicates an exponential growth in the interest of researchers in the ability of self-healing, most of the works (more than 50%) published in the field of materials science. The total number of publications by Russian authors over ten years devoted to self-healing is 206 works, of which 49% are in the field of materials science.

An analysis of articles in publications included in international bibliographic and abstract databases published by domestic authors shows that methods of creating a material structure, which contains additional elements in the form of a reserve volume of a structure-forming substance, are proposed to implement the self-healing effect. Such elements are capsules or functional layers with a reducing agent, the destruction of which triggers the recovery (healing) process. Works are presented where the recovery effect is achieved due to the binder's own potential, which is not fully realized at the initial stage of structure formation. The authors have proposed the implementation of the self-healing effect in composites based on a hydraulic mineral binder (cement) and an organic binder (bitumen) or polymer. At the same time, in most cases, there is no mathematical description of self-healing mechanisms.

Keywords: self-healing, concrete, asphalt concrete, capsules

REFERENCES

1. Lesovik V.S. Geonics (geomimetics) as a transdisciplinary area of research [Geonika (geomimetika) kak transdistsiplinarnoye napravleniye issledovaniy]. Higher education in Russia. 2014. No. 3. Pp. 77–83. (rus)
2. Elistratkin M.Y., Lesovik V.S., Alfimova N.I., Shurakov I.M. On the question of mix composition selection for construction 3d printing. Materials Science Forum. 2018. Vol. 945 MSF. Pp. 218–225.
3. Vatin N.I., Chumadova L.I., Goncharov I.S., Zykova V.V., Karpenya A.N., Kim A.A., Finashenkov E.A. 3D printing in construction [3D-pechat' v stroitel'stve]. Construction of unique buildings and structures. 2017. No. 1 (52). Pp. 27–46. (rus)
4. Makul N., Fediuk R., Amran M., Zeyad A.M., Murali G., Vatin N., Klyuev S., Ozbakkaloglu T., Vasilev Yu. Use of recycled concrete aggregates in production of green cement-based concrete composites: a review. Crystals. 2021. Vol. 11. 232.
5. Lesovik V.S., Strokova V.V. On the development of the scientific direction "Nanosystems in building materials science" [O razvitiy nauchnogo napravleniya "Nanosistemy v stroitel'nom materialovedenii"]. Construction Materials. 2006. No. 9. Pp. 93–101. (rus)
6. Loganina V.I., Makarova L.V., Tarasov R.V., Davydova O.A. Optimization of the composition of composites for general construction purposes modified with nanoscale additives [Optimizatsiya sostava kompozitov obshchestroitel'nogo naznacheniya, modifitsirovannykh nanorazmernymi dobavkami]. Regional architecture and construction. 2010. No. 2. Pp. 53–57. (rus)
7. Loganina V.I., Ryzhov A.D. Structure and properties of synthesized additive based on amorphous aluminosilicates. Case Studies in Construction Materials. 2015. Vol. 3. Pp. 132–136.
8. Fediuk R.S., Lesovik V.S., Svintsov A.P., Mochalov A.V., Kulichkov S.V., Stoyushko N.Y., Gladkova N.A., Timokhin R.A. Self-compacting concrete using pretreated rice husk ash Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 3 (79). Pp. 66–76.
9. Makarov D.B., Krasnikova N.M., Morozov N.M., Ayupov D.A., Borovskikh I.V., Khokhryakov O.V., Yagund E.M., Khozin V.G. Improving the quality of materials for highway construction. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. No. 11. 3035.
10. Khozin V.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K. General concentration regularity of the effects of nano-modification of building materials [Obshchaya kontsentratsionnaya zakonomernost' effektivov nanomodifitsirovaniya stroitel'nykh materialov]. Building materials. 2015. No. 2. Pp. 25–33. (rus)
11. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Shorstova E.S. Fiber concrete for 3-d additive technologies. Materials Science Forum. 2019. Vol. 974. Pp. 367–372.
12. Tamrazyan A.G. Concrete and reinforced concrete: problems and prospects [Beton i zhelezobeton: problemy i perspektivy]. Industrial and civil construction. 2014. No. 7. Pp. 51–54. (rus)
13. Fediuk R., Amran M., Vatin N., Vasilev Y., Lesovik V., Ozbakkaloglu T. Acoustic properties of innovative concretes: a review. Materials. 2021. No. 14. 328.
14. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Features of the defectiveness of nanomodified high-strength lightweight concrete based on hollow microspheres. Key Engineering Materials. 2017. 743 KEM. Pp. 68–72.
15. Lesovik V., Ayzenshtadt A., Frolova M., Lesovik R., Strokova V. «Green» composites for north- arctic region development. Open Ecology Journal. 2014. Vol. 7. Pp. 32–36.
16. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Increasing the Weathering Resistance of Asphalt by Nanomodification. Materials Science Forum. 2019. Vol. 945. Pp. 147–157.
17. Kotlyarsky E.V., Gridchin A.M., Lesovik R.V. Factors contributing to the destruction of the structure of asphalt concrete during the operation of road asphalt concrete pavements [Fakty, sposobstvuyushchiye razrusheniyu struktury asfal'tobetona v protsesse ekspluatatsii dorozhnykh asfal'tobetonnykh pokrytiy]. Belgorod. 2012. 187 p. (rus)
18. Fediuk R., Kuzmin D., Cherneev A., Batarshin V., Garmashov I., Lesovik V., Ibragimov R. Concretes for underwater structures. Key Engineering Materials. 2018. Vol. 769 KEM. Pp. 3–8.
19. Nelyubova V.V., Strokova V.V., Sumin A.V., Jernovskiy I.V. the structure formation of the cellular concrete with nanostructured modifier. Key Engineering Materials. 2017. Vol. 729. Pp. 99–103.
20. Panchenko A.I., Kharchenko I.Ya., Vasilev S.V. Durability of concrete with compensated chemical shrinkage [Dolgovechnost' betonov s kompensirovannoy khimicheskoy usadkoy]. Construction Materials. 2019. No. 8. Pp. 48–53. (rus)
21. Startsev V.O., Nizina T.A. Prediction of climatic aging of epoxy polymers based on changes in color indicators [Prognozirovaniye klimaticheskogo stareniya epoksidnykh polimerov po izmeneniyu tsvetovykh pokazateley]. VIAM Proceedings. 2015. No. 12. 10. (rus)

22. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Review of road materials self-healing: problems and perspective. 2020. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 855. 012010.
23. Bazhenov Yu.M., Erofeev V.T., Salman A.D.S.D., Smirnov V.F., Fomichev V.T. Self-healing technology of reinforced concrete structures using microorganisms [Tekhnologiya samovostanovleniya zhelezobetonnykh konstruktsey s pomoshch'yu mikroorganizmov]. Russian engineer. 2018. Vol. 61. No. 4. Pp. 46–48.
24. Sitnikov N.N., Khabibullina I.A., Mashchenko V.I., Rizakhanov R.N. Prospects of Application of Self-Healing Materials and Technologies Based on Them. Inorganic Materials: Applied Research. 2018. Vol. 9. No. 5. Pp. 785–793.
25. Mashchenko V.I., Sitnikov N.N., Khabibullina I.A., Kuzmin M.K., Chausov D.N. Structure and properties of self-healing materials based on hydroxyl terminated polydimethylsiloxane and boric acid. Journal of Physics: Conference Series. International Interdisciplinary Scientific Conference on Advanced Element Base of Micro- and Nano-Electronics. 2002. Vol. 1560. 012037.
26. Sitnikov N.N., Khabibullina I.A., Mashchenko V.I., Shelyakov A.V., Mostovaya K.S., Vysotina E.A. Layered Self-Healing Composite Material with an Internal Functional Layer Based on Borosiloxane. Inorganic Materials: Applied Research. 2020. Vol. 11. Pp. 1051–1059.
27. Sitnikov N.N., Khabibullina I.A., Rizakhanov R.N. Composite laminated self-healing material. Patent RF, no 2710623 C1, 2019.
28. Kaprielov S.S., Goldenberg A.E., Tamrazyan A.G. About self-healing high-strength concrete, underloaded destruction in cyclic freezing [Self-healing of high-strength concrete subjected to destruction by cyclic freezing]. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2017. No. 5 (371). Pp. 56–61. (rus)
29. Sol'skiy S.V., Orlova N.L., Velichko A.S. Crack self-healing in clay-cement concrete diaphragm of embankment dam. Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 77(1). Pp. 3–12.
30. Chernykh T.N., Bondarenko S.A., Zimich V.V. Study of natural self-healing of materials based on inorganic binders. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. 2020. Vol. 962. 0220402020.
31. Tolstoy A., Gridchin, A., Glagolev E., Lesovik R., Shapovalov N. Efficient Construction Composites for Construction in the North and the Arctic. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 147. Pp. 15–22.
32. Bruyako M., Grigorieva L., Grigorieva A., Ivanova I. Treatment of natural zeolites for increasing the sorption capacity. Solid State Phenomena. 2016. Vol. 871. Pp. 70–75.
33. Bruyako M., Grigoryeva L. Bioactive additives for self-healing of concrete microstructure. Materials Science Forum. 2018. Vol. 945 MSF. Pp. 36–41.
34. Bruyako M., Grigor'eva A., Stepina I., Golotenko D., Podsevalova A. Biomodified building materials on the base of mineral binders. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 7th International Scientific Conference on Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education. 2020. Vol. 1030. 012005.
35. Kalenov S.V., Gradova N.B., Sivkov S.P., Khokhlachev N.S., Panfilov V.I. A preparation based on bacteria isolated from hypersaline environments to improve the functional and protective characteristics of concrete. Biotekhnologiya. 2020. Vol. 36. No. 4. Pp. 21–28.
36. Golovkina D.A., Zhurishkina E.V., Ivanova L.A., Baranchikov A.E., Sokolov A.Y., Bobrov K.S., Masharsky A.E., Tsvigun N.V., Koptsa G.P., Kulminskaya A.A. Calcifying Bacteria Flexibility in Induction of CaCO₃ Mineralization. Life. 2002. Vol. 12. No. 1. 317.
37. Namsaraev Z.B., Melnikova A.A., Rudenko A.P., Komova A.V. Processes of Nanosized Calcium Carbonate Formation by Microorganisms. Nanotechnologies in Russia. 2020. No. 15. Pp. 20–27.
38. Strokova V.V., Dukhanina N., Balitsky D.A. Crack closure in a cement matrix using bacterial precipitation of calcium carbonate. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. Pp. 158–164.
39. Li L., Liu T., Jiang G., Fang C., Sun J., Zheng S., Liu H., Leusheva E., Morenov V., Nikolaev N. Field application of microbial self-healing cement slurry in Chunguang 17-14 well. Energies. 2021. Vol. 14(6). 1544.
40. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Indicators of the effectiveness of self-healing asphalt concrete. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. 02007.
41. Inozemtcev S.S., Do T.T. Sodium alginate application in self-healing technology for asphalt concrete. Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 160. Pp. 59–65.
42. Inozemtcev S.S., Korolev E.V., Do T.T. Thermal and Mechanical Properties of Calcium Alginate Capsules for Self-Healing Asphalt Concrete. Materials Science Forum. 2021. Vol. 1041. Pp. 101–106.

43. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Technological features of production calcium-alginate microcapsules for self-healing asphalt. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. 01008.

44. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Sodium alginate emulsions for asphalt concrete modifiers encapsulating: structural rheological properties. Magazine of Civil Engineering. 2021. No. 101(1). 10104.

45. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Active polymeric reducing agent for self-healing asphalt concrete. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1030. 012002.

46. Perelmuter M.N. Modeling of Crack Self-Healing Kinetics. Physical Mesomechanics. 2020. Vol. 23. No. 4. Pp. 301–308.

47. Perelmuter M. Cracks self-healing – Physical and mathematical modeling. AIP Conference Proceedings. International Conference on Physical

Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology. 2020. Vol. 231014. 020248.

48. Perelmuter M. Application of the bridged crack model for evaluation of materials repairing and self-healing. Journal of Physics: Conference Series. International Conference Problems of Mathematical Physics and Mathematical Modelling. 2017. Vol. 130. 0120396.

49. Inozemtsev S.S., Korolev E.V., Do T.T. Prospects for the use of the acoustic emission method for the study of self-healing asphalt concrete [Perspektivy ispol'zovaniya metoda akusticheskoy emissii dlya issledovaniya samovosstanavlivayushchikhsya asfal'tobetonov]. Technical sciences: problems and solutions: Sat. Art. based on the materials of the XXX International Scientific and Practical Conference "Engineering Sciences: Problems and Solutions.". M.: Ed. Internauka, 2019. No. 12 (28). Pp. 157–164. (rus)

Information about the authors

Inozemtcev, Sergey S. PhD. E-mail: inozemtsevss@mail.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe hw., 26.

Do Toan T. Postgraduate student E-mail: trongtoan007@gmail.com. National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe hw., 26.

Korolev, Evgeniy V. DSc, Professor. E-mail: prorektor_nr@spbgasu.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia, 190005, Saint-Peterburg, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 4.

Received 04.10.2021

Для цитирования:

Иноземцев С.С., До Т.Ч., Королев Е.В. Отечественный опыт исследования в области строительных материалов с функцией самовосстановления // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 8–22. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-2-8-22

For citation:

Inozemtcev S.S., Do T.T., Korolev E.V. Russian experience of research in the field of building materials with the function of self-healing. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 1. Pp. 8–22. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-2-8-22