

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2019, №4, Том 6 / 2019, No 4, Vol 6 <https://t-s.today/issue-4-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/12SATS419.pdf>

DOI: 10.15862/12SATS419 (<http://dx.doi.org/10.15862/12SATS419>)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Ерофеев В.Т., Круглов В.М., Ватин Н.И., Аль Дулайми Салман Давуд Салман Интеллектуальные композиты и их использование для получения самовосстанавливающихся бетонов // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №4, <https://t-s.today/PDF/12SATS419.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/12SATS419

**For citation:**

Erofeev V.T., Kruglov V.M., Vatin N.I., Al-Dulaimi Salman Dawood Salman (2019). Intelligent composites and their use for self-healing concrete. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/12SATS419.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/12SATS419

**УДК 678:691.32**

**Ерофеев Владимир Трофимович**

ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева», Саранск, Россия  
Декан «Архитектурно-строительного» факультета  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru

**Круглов Валерий Михайлович**

ФГБАУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия  
Профессор  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: tu@miit.ru

**Ватин Николай Иванович**

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет имени Петра Великого»  
Санкт-Петербург, Россия  
Профессор  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: vatin\_ni@spbstu.ru

**Аль Дулайми Салман Давуд Салман**

Министерство высшего образования и научных исследований, Ирак, Багдад  
Соискатель  
E-mail: vatin\_ni@spbstu.ru

**Интеллектуальные композиты  
и их использование для получения  
самовосстанавливающихся бетонов**

**Аннотация.** Показано, что во время эксплуатации железобетонные конструкции очень часто подвержены растрескиванию, что приводит к ухудшению качества и ожидаемого срока их эксплуатации. Традиционными способами восстановления и усиления конструкций являются методы наращивания, пропитки структуры бетона полимерными и другими материалами, нанесение монолитных покрытий или приклеивание металлических полимерных и других элементов. Известные способы ремонта характеризуются высокой трудоемкостью исполнения, дороговизной и т. д. Показано, что существует насущный экономический стимул

для разработки бетона способного самостоятельно восстанавливаться и устранять повреждения. В последнее время к мировой практике наметились тенденции создания новых материалов, способных и активному взаимодействию с внешними факторами, такие материалы получили название «интеллектуальных». Применение «интеллектуальных» материалов позволяет контролировать и прогнозировать состояние различных конструкций и сооружений, в требуемый момент времени и даже на труднодоступных участках значительно повысить ресурс инженерных систем и их надежность. Показано, что к настоящему времени разработаны различные химические методы создания самовосстанавливающихся бетонов.

Одной из прорывных технологий в области получения эффективных материалов и конструкций на их основе являются биотехнологии, основанных на использовании микроорганизмов. Многие исследователи изучали применение вырабатываемого бактериями кальцита для повышения срока эксплуатации сооружений на основе бетонов и восстановления зданий посредством устранения трещин, повышения прочности бетона, снижения проницаемости, уменьшения водопоглощения. В статье приведен обзор работ иностранных специалистов в этих направлениях.

Показано, что некоторые направления по проблеме «самовосстанавливающиеся» материалов нуждаются в дальнейшей разработке и в первую очередь следует уточнить насколько эффективно осаждение выработанных бактериями минералов влияет на свойства бетонов, уплотняет трещины.

**Ключевые слова:** долговечность бетона; интеллектуальные композиты; трещины; залечивание трещин; химические и биологические методы

## Введение

### 1. Постановка проблемы

Бетон различных видов используют для изготовления широкой номенклатуры строительных материалов, изделий и конструкций [1–20].

Качество бетонных конструкций главным образом зависит от трех параметров: прочности, проницаемости и устойчивости к действию агрессивных сред. Во время эксплуатации бетонные конструкции очень часто подвергаются растрескиванию, что приводит к ухудшению качества и сокращению ожидаемого срока их эксплуатации. Трещины могут возникать на любой стадии эксплуатации вследствие отсутствия стабильности объема в бетоне или под воздействием внешних факторов, таких как экстремальные нагрузки, неблагоприятные условия окружающей среды, неправильный порядок производства строительных работ или ошибки конструирования. Микротрещины способствуют проникновению в бетонную матрицу воды и других примесей, таких как хлорид- и сульфат-ионы, обуславливающие преждевременное разрушение матрицы, коррозию встроенной арматуры и пр., что в свою очередь понижает прочность сооружения [21–27]. При распространении в бетоне трещин проводятся осмотры и ремонт путем их заполнения шпатлевками на основе эпоксидной смолы, латексными и другими связующими веществами, приклеивания стеклопластиковых, металлических и других элементов и иными способами. Однако традиционные приемы имеют множество неблагоприятных особенностей, таких как разные коэффициенты теплового расширения бетона и усиливающего материала, недостаточная степень сцепления, опасность для окружающей среды и здоровья, а также высокая себестоимость. В этой связи существует насущный экономический стимул для разработки бетона, способного самостоятельно восстанавливаться и устранять повреждения. Самовосстанавливающиеся материалы – это особый тип материалов, регенерирующих свои прочностные свойства после незначительного разрушения в течение срока службы.

В последние годы, наряду с постоянным совершенствованием существующих материалов, обуславливающих существенный технический и экономический эффект благодаря уникальному сочетанию свойств, наметились тенденции создания новых материалов, способных к активному взаимодействию с внешними факторами [29–39]. Такие материалы получили название «интеллектуальных». Они способны «ощущать» свое физическое состояние, внешние воздействия и особым образом реагировать на эти «ощущения», т. е. способны осуществлять самодиагностику по возникновению и развитию дефекта, его устранение и стабилизировать свое состояние в критических зонах.

## **2. Краткий анализ достижений и публикаций, в которых рассматривается решение данной проблемы**

Вследствие многообразия свойств «интеллектуальных» материалов их применение позволит контролировать и прогнозировать состояние различных конструкций и сооружений в требуемый момент времени и даже на труднодоступных участках, значительно повысить ресурс систем и их надежность [40–52].

Исследователи разрабатывали различные химические методы создания самовосстанавливающегося бетона [53–64]. Согласно некоторым предложениям восстанавливающее средство заключали внутрь микрокапсул. При растрескивании бетона они разрушались, высвобождая восстанавливающее средство, которое заполняло трещины. Испытано множество восстанавливающих средств, таких как эпоксидные смолы, цианакрилаты, растворы диоксида кремния в щелочи и др. Выявлено, что материал может восстановить свою механическую прочность почти в такой же степени, как и при цементировании трещин вручную. Такие средства обладают некоторыми общими качествами, а именно низкой вязкостью для обеспечения более широкой области ремонта и отличного сцепления между поверхностями трещины, а также достаточной капиллярной силой для перемещения восстанавливающего средства вглубь трещины. При использовании микрокапсул после израсходования всей капсулы в этом месте в бетоне образуется постоянная полость. Капиллярные трубки, которые используются в медицине для взятия анализа крови, также могут применяться для «лечения» бетона в качестве инкапсулирующих трубок. Еще одним методом является использование непрерывных стеклянных трубок для заделывания больших трещин, которые позволяют заменять восстанавливающее средство, а также можно предусмотреть подачу дополнительного средства. В то же время утверждается, что при использовании некоторых химических веществ, которые изначально предназначены для уплотнения трещин, бетон становится более хрупким. Следовательно, при реализации этого подхода существует вероятность снижения срока службы бетона.

Одной из прорывных технологий в области получения эффективных строительных материалов являются биотехнологии, основанные на использовании микроорганизмов. К настоящему времени на высоком научно-технологическом уровне разработаны материалы, получаемые посредством микробиологического синтеза. К ним в первую очередь относятся древесные пластики, клеи, биосуперпластификаторы и пенобетоны [65].

Многие исследователи изучали применение вырабатываемого бактериями кальцита для повышения срока эксплуатации цементных сооружений и восстановления зданий [66; 73] посредством устранения трещин, повышения прочности бетона, снижения проницаемости, уменьшения водопоглощения. Обзор работ в данных направлениях приведен ниже.

### 3. Получение самовосстанавливающихся бетонов путем внесения микробиологической добавки в минеральные вяжущие

#### 3.1 Обработка с целью устранения трещин [25; 74–78]

Показано, что более эффективную ликвидацию трещин за счет применения микроорганизмов по сравнению с традиционными способами ремонта можно провести с использованием почвенных бактерий вида *Bacillus pasteurii*, иммобилизованных и защищенных в полиуретановом полимере, извести, тонком кремнеземном порошке и золе-уносе. В результате прочность на сжатие и жесткость восстановленного бетона значительно повысились. Прочность на сжатие была примерно на 5 % выше, чем в образцах с отсутствием иммобилизации микроорганизмов в пустотах материала.

Подтверждена положительная перспектива использования выработанного бактериями *Bacillus sphaericus* карбоната для устранения трещин в бетоне. Установлена полная герметизация искусственно созданных трещин шириной 0,3 мм и глубиной 10 мм и отмечено, что проницаемость бетона стала значительно меньше, чем при заделывании трещин цементным раствором. При обработке кальцитом микробиологического происхождения прочность на сжатие обработанных образцов может быть восстановлена до 84 %.

#### 3.2 Повышение механических характеристик бетона [79–82]

В зарубежной практике проведены испытания с целью изучения целесообразности применения биологического бетона для повышения прочности на сжатие бетона и цементного раствора. В ходе экспериментальных исследований в бетонную смесь вводили различные микроорганизмы. Изучалось включение в цементный раствор бактерий вида *Bacillus pasteurii* в различных концентрациях. На 7-й и 28-й день наблюдалось значительное увеличение прочности на сжатие бетонов, обусловленное наличием в матрице достаточного количества органических веществ благодаря бактериальной биомассе. При исследовании влияния нового типа термофильных анаэробных микроорганизмов вида *Shewanella* на прочность на сжатие образцов цементного раствора установлено, что на 28-й день повышение этого показателя достигнуто на 25–30 %. Другие ученые выбрали для внедрения в образцы бетона бактерии видов *Bacillus pseudofirmus* и *Bacillus cohnii* и обнаружили 10 % увеличение прочности на сжатие, а при введении бактерии вида *Sporosarcina pasteurii*, в цементный раствор, отмечено увеличение прочности на сжатие на 17 %. 22 % увеличение прочности наблюдали исследователи в результате обработки образцов цементного раствора микроорганизмами вида *Arthrobacter crystallopoietes*. Из четырех выбранных видов микроорганизмов, а именно *Sporosarcina soli*, *Bacillus massiliensis*, *Arthrobacter crystallopoietes* и *Lysinibacillus fusiformis*, самое большое повышение прочности обусловили бактерии вида *Arthrobacter crystallopoietes*. Между тем при смешивании бактерий *Bacillus sp.* СТ-5 с цементным раствором отмечено увеличение прочности на сжатие образцов на 36 %. Изучено влияние бактерий вида *Sporosarcina pasteurii* на прочность на сжатие цементного бетона с добавкой золы-уноса. При этом указывается о максимальном увеличении этого параметра – на 22 %. В этом исследовании в цемент вводили добавки золы-уноса (в количестве 10, 20 и 30 % по массе) и три различные концентрации бактериальных клеток (103, 105 и 107 клеток/мл). Увеличение прочности на сжатие происходило за счет осаждения кальцита на поверхности бактериальных клеток и оседания этих клеток в порах. Также проведены многочисленные исследования механических свойств бетона с добавлением восстанавливающего средства на основе бактерий, не обладающих уrolитической активностью. В ходе исследования в качестве макромасштабных механических измерений для оценки механических свойств бетона в процессе его разрушения и восстановления проведены испытания на изгиб с приложением сосредоточенной нагрузки в

четырёх точках и измерение скорости ультразвукового импульса. Кроме того, определялась нанотвёрдость вдавливанием шарика в качестве наномеханического испытания для исследования наномеханических свойств осажденных минералов и силы их сцепления с бетоном. Экспериментальные результаты показали, что на эффективность затягивания трещин сильное влияние оказывает источник кальция. Испытания на определение скорости ультразвукового импульса и на изгиб с приложением нагрузки в четырёх точках показали, что максимальный эффект заживления (т. е. максимальный коэффициент восстановления прочности при изгибе и максимальный модуль упругости) был получен при двухкомпонентном самовосстановлении в присутствии глутамата кальция. Определены изгибные характеристики, модифицированных ЕСС – материалов с добавлением микроорганизмов. После растрескивания и заживления трещин смеси с добавлением биологического восстанавливающего средства демонстрировали несколько лучшее возобновление прочности при изгибе и изгибающей способности по сравнению с контрольными смесями, не включавшими восстанавливающее средство биологического происхождения.

### 3.3 Снижение проницаемости бетона [24; 29; 83–85]

Важной характеристикой, которая влияет на длительность срока эксплуатации бетона, является проницаемость. В бетон с высокой проницаемостью просачиваются вода и загрязняющие вещества, которые влияют на структурную целостность и в итоге на долговечность бетона. Поэтому бетон с низкой проницаемостью имеет более длительный срок эксплуатации. Так как осаждение бактерий происходит главным образом на поверхности, то отложения кальцита можно рассматривать как образование изолирующего слоя. Проницаемость можно изучать по результатам испытаний на карбонизацию, поскольку известно, что снижение газопроницаемости вследствие обработки поверхности приводит к повышению устойчивости к карбонизации и проникновению хлоридов. Получены данные о повышении устойчивости бетона к действию щелочи, циклам замораживания – оттаивания, усадке при высыхании и уменьшению проницаемости, которые наблюдаются при добавлении бактериальных клеток. Проведены исследования проницаемости бетона от образования осадка карбоната кальция путем внесения микроорганизмов вида *Bacillusphaericus* в образцы из цементного раствора. В этом случае наблюдалось значительное снижение проницаемости по сравнению с необработанными образцами цементного раствора. Отмечено значительное снижение водопроницаемости образцов цементного раствора, обработанных бактериями вида *Sporosarcina pasteurii*. Считается, что более низкая проницаемость образцов с инкорпорированными бактериями может быть обусловлена наличием более плотной межфазной границы, образованной между заполнителем и бетонной матрицей вследствие осаждения кальцита. Влияние на водопроницаемость бетона бактерий вида *Bacilluspasteurii* показало аналогичный результат. Кроме того, по сравнению с необработанным образцом образцы цементного раствора с инкорпорированными бактериями *Bacillussp.* СТ-5 продемонстрировали 6-кратное снижение поглощения воды. В другом исследовании наблюдали 8-кратное уменьшение проницаемости хлорид-ионов в ходе изучения влияния бактерий вида *Sporosarcina pasteurii* на цементный бетон с добавкой золы-уноса. Считается, что такое снижение проницаемости может быть связано с наличием в бетоне осажденного кальцита. Кроме того, сообщается о снижении водопроницаемости на 68 %, когда для исследования процессов самовосстановления в образец цементного раствора поместили инкапсулированные в гидрогель споры *Bacillussphaericus*.

### 3.4 Уменьшение водопоглощения бетона [29; 33; 41; 46; 80]

При выполнении исследований наблюдалось четырехкратное сокращение поглощения воды бетоном с добавкой золы-уноса, в который вводились бактерии. Испытание на водопоглощение на 7-й день проводили согласно стандарту ASTM C 642. Было замечено, что при введении бактерий в бетон с добавкой золы-уноса его водопоглощающая способность уменьшается по мере увеличения концентрации бактерий. Максимальное снижение показателя наблюдалось при концентрации бактерий 105 клеток/мл для всех образцов бетона с добавкой золы-уноса, включая образец, который содержал ее в бетоне, в количестве 10 %. Водопоглощение этого образца составило 3,25 % (минимум). Наличие бактерий привело к значительному снижению поглощения воды по сравнению с контрольными образцами. Осаждение слоя карбоната кальция на поверхности и внутри пор бетонных образцов обусловило уменьшение водопоглощения. Значение коэффициента сорбции для 28-дневных биологически обработанных образцов цементного раствора с добавлением тонкого кремнеземного порошка и без него было на 42–48 % и на 57–64 % ниже, чем соответствующее значение для необработанных образцов. Полученные результаты свидетельствуют, что в случае обычных образцов даже при значительном снижении сорбционной способности бактериальная обработка образцов с трещинами не уменьшала величину этого параметра до того же значения, что и у образцов без трещин. Значения коэффициентов сорбции образцов, с добавлением тонкого кремнеземного порошка, подвергнутых бактериальной обработке, были очень близки к значениям коэффициентов сорбции биологически обработанных образцов без трещин.

### 3.5 Уменьшение коррозионного разрушения армированного бетона [31; 33; 38; 42; 50; 59; 65; 78; 84]

Одной из основных причин потери несущей способности или устойчивости строительных конструкций считается коррозия стали в бетоне. Проницаемость и коррозия взаимосвязаны, поскольку проницаемость обуславливает проникновение в бетон хлорид-ионов и примесей, что влечет за собой коррозию стали и, следовательно, влияет на продолжительность срока службы бетона. Отмечено, что осаждение карбоната кальция способствовало понижению проницаемости по причине закупоривания путей проникновения примесей в бетонную матрицу.

Выявлено значительное снижение коррозии стальной арматуры за счет уменьшения просачивания воды и хлорид-ионов в результате осаждения кальцита, выработанного микроорганизмами *Sporosarcina pasteurii* и *Bacillus* sp. CT-5.

### 3.6 Заключение

Из обзора литературы видно, что до настоящего времени в большинстве случаев бактериальный бетон применяли для обработки с целью ликвидации последствий трещинообразования. Это нельзя считать чисто «самовосстановлением», поскольку его применяли после растрескивания. Проведено всего несколько исследований истинного самовосстановления бактериального бетона. В проведенных исследованиях выявлено эффективное закупоривание трещин и восстановление механической прочности бетона, обусловленное наличием в матрице достаточного количества органических веществ, благодаря присутствию микробной биомассы. Также осуществлено незначительное количество экспериментов по самовосстановлению, модифицированных ЕСС-материалов с добавлением микроорганизмов. Результаты исследований свидетельствуют о том, что иммобилизованные бактерии являются промежуточным звеном при осаждении минералов. Установлено, что бактерии и некоторые виды необходимых питательных веществ не оказывают отрицательного

влияния на прочностные характеристики бетона. Из этого сделан вывод о потенциальной возможности залечивания трещин в бетоне под контролем бактерий в результате образования минерального осадка.

### Выводы

1. Бетонные конструкции часто подвергаются растрескиванию, что приводит к ухудшению качества и сокращению ожидаемого срока их эксплуатации. Трещины могут возникать на любой стадии эксплуатации вследствие отсутствия стабильности объема в бетоне или под воздействием внешних факторов, таких как экстремальные нагрузки, неблагоприятные условия окружающей среды, неправильный порядок производства строительных работ или ошибки конструирования. Микротрещины способствуют проникновению в бетонную матрицу воды и других примесей, таких как хлорид- и сульфат-ионы, обуславливающие преждевременное разрушение матрицы, коррозию встроенной арматуры и пр., что в свою очередь понижает прочность сооружения.

2. Показано, что традиционными способами восстановления и усиления железобетонных изделий и конструкций, имеющих трещины и другие дефекты, являются методы наращивания, пропитки структуры бетона полимерными и другими композитами, а также нанесения монолитных покрытий или приклеивания металлических, полимерных и других элементов. Отмечены недостатки традиционных методов восстановления бетонных и железобетонных конструкций.

3. Существует насущный экономический стимул для разработки бетона, способного самостоятельно восстанавливаться и устранять повреждения. Выделены интеллектуальные самовосстанавливающиеся материалы относятся к особым типам материалов, регенерирующих свои прочностные свойства после незначительного разрушения в течение срока службы.

4. Показаны преимущества автономного внутреннего механизма самовосстановления посредством осаждения кальцита, выработанного введенными в состав бетона микроорганизмами. Однако некоторые направления этой концепции нуждаются в дальнейшей разработке.

5. Несмотря на то, что до сих пор не достигнут качественный прорыв в области самовосстановления бетона, это очень перспективное направление исследований, а потенциальная возможность получения прибыли огромна. Следует уточнить, насколько эффективно осаждение выработанных бактериями минералов уплотняет трещины больших размеров, то есть насколько снижается проницаемость растрескавшегося бетона, чтобы предотвратить коррозию встроенной арматуры и таким образом увеличить срок эксплуатации строительного материала. Кроме того, необходимо выбрать виды бактерий, которые остаются жизнеспособными при внедрении в бетонную матрицу, по крайней мере, в течение предполагаемого срока службы конструкции.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Современная технология бетона. Баженов Ю.М. // Бетон и железобетон – взгляд в будущее нау. тр. III Всерос. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону (Москва, 12–16 мая 2014 г.): в 7 т. Т.7: Пленарные доклады. – М.: МГСУ, 2014. – С. 23–28.
2. Белов В.В., Смирнов М.А. Формирование оптимальной макроструктуры строительной смеси // Строительные материалы, 2009, № 9. – С. 88–90.

3. Део С. Аспекты применения металлической фибры. Исследование применения фибры для изделий из бетона / С. Део // СРІ – Междунар. бетон. пр-во. – 2011. – №4. – С. 46–56.
4. Lesovik R.V. Fine-grained concrete reinforced with polypropylene fiber / R.V. Lesovik, S.V. Klyuev, V.T. Erofeeva, A.V. Durachenko // Scientific-Research Journal of Applied Sciences. 2015. 10 (10), p. 624–628.
5. Erofeev V.T. Composites of frame structures for buildings and structures in aggressive environments // Engineering Procedure. 2016. 165, S. 1444–1447.
6. Баженов Ю.М., Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы / Ю.М. Баженов // Строительные материалы. – 2014. – № 3. – С. 6–15.
7. Калашников В.И., Ерофеев В.Т., Тараканов О.В. Суспензионно наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения // Известия высших учебных заведений. Строительство – 2016 – №4 (688) с. 30–37.
8. Калашников В.И., Ерофеев В.Т., Тараканов О.В., Архипов В.П. Концепция стратегического развития пластифицированных порошково-активированных бетонов нового поколения // Высокопрочные цементные бетоны: технологии, конструкции, экономика (ВПБ-2016): Сборник тезисов докладов междуур. науч.-техн. конф. – 2016 – с. 36.
9. Erofeev V.T., Rodin, A.I., Yakubnin, V.V., Bogatov, A.D., Bochkin, V.S., Chedodajkin, A.M. Alkali – activated slag binders from rock – wool production wastes. Magazine of Civil Engineering. 2018. 82(6). Pp. 219–227. DOI: 10.18720/MCE.82.20.
10. Erofeev V.T., Rodin, A.I., Kravchuk, A.S., Kaznacheev, S.V., Zaharova, E.A. Bio stable silicic rock-based glass ceramic foams. Magazine of Civil Engineering. 2018. 84(8). Pp. 48–56. DOI: 10.18720/MCE.84.5.
11. Высокоэффективные самоуплотняющиеся порошково-активированные песчаные бетоны и фибробетоны / Калашников В.И., Володин В.М., Ерофеева И.В., Абрамов Д.А. // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1–2. С. 114–115.
12. Хозин В.Г., Боровских И.В., Авзалов Э.Р. Влияние базальтового волокна на прочность и деформативные свойства тонкозернистого высокопрочного бетона / Механика разрушения строительных материалов и конструкций. 2014. С. 349–353.
13. Фаликман В.Р. Новые эффективные высокопрочные бетоны / В.Р. Фаликман // Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии. – 2011. – № 1. – С. 48–54.
14. Взгляд в будущее бетона / А.В. Ушеров-Маршак // Строительные материалы. 2014. № 3, С. 4–6.
15. Новые модифицированные бетоны в конструкциях высотных зданий / С.С. Каприелов, А.В. Шенфельд, Г.С. Кардумян // II Международный форум архитектуры, строительства, реконструкции городов, строительных технологий и материалов, 11–13 нояб. 2008 г. – М., 2008. г. Москва. – С. 29–38.



16. Concentration of stress on holes in a plate of different resistant material Shafigullin L.N., Treschev A.A., Romashina A.V., Erofeev V.T. *Astra Salvensis*. 2017. Т. 2017. С. 213–225.
17. Calculation of reinforced concrete shell of positive Gaussian curvature, given different resistance of concrete and cracking / Shafigullin L.N., Treschev A.A., Telichko V.G., Erofeev V.T. // *Astra Salvensis*. 2017. Т. 2017. С. 77–91.
18. Frame construction composites for building and structures in aggressive environments / Erofeev V. // *Procedia Engineering* (see books). 2016. Т. 165. P. 1444–1447.
19. Resistance in filamentous fungi filled by epoxy adhesive and matrix composition used in carcass concrete / Lenov V.V., Yerofeev V.T., Salimov V.F. // *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2015. No 3 (27). С. 65–72.
20. Development of the recommendations on selection of glass-fiber reinforced polyurethanes for vehicle parts / Shafigullin L.N., Bobrishev A.A., Shafigullin A.N., Erofeev V.T., Treschev A.A. // *International journal of applied engineering research*. 2015. Т. 10. No. 23. С. 43758–43762.
21. Прочность и параметры разрушения цементных композитов: монография / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, В.Т. Ерофеев, Ю.П. Скачков. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. – 360 с.
22. Коротких Д.Н. Трещиностойкость современных цементных бетонов (проблемы материаловедения и технологии): монография / Д.Н. Коротких. – Воронеж: Воронеж. ГАСУ, 2014. – 141 с.
23. Чернышов Е.М., Коротких Д.Н., Кесарийский А.Г. Оценка параметров процесса трещинообразования в структуре современных бетонов методом лазерной голографической интерферометрии // *Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов: сб. докл. 6-й Международной конф.* СПб., 2012.
24. AASHTO T277, (1993), “Electrical Indication of Chloride Resistance of Concrete”, American Association of Highway and Transportation Government Officials.
25. Achal V., Mukherjee A., Reddy M.S. (2010a). “Biocalcification of *Sporosarcina pasteurii* using a corn solution as a nutrient source”, *Industrial Biotechnology*, Vol. 6, No. 3, p. 170–174.
26. Arabi N.S., Mustafa K.N.B., Al Mattarneh H. and Al-Qadi K.N.S., (2009), “Statistical models for the hardened properties of self-compacting concrete”, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, Volume 2. No. 4, p. 764–770.
27. ASTM C87, (2002), “Standard Test Method for Concrete Bending Strength (Using a Simple Beam with a Third Point Load)”, American Society for Testing and Materials.
28. Achal V., Mukherjee A. and Reddy M.S. (2011a). “Microbiological concrete: a way to increase the durability of concrete buildings”, *Journal of Civil Engineering Materials*, vol. 23, No. 6, p. 7–10. 730–734.
29. Achal V., Mukherjee A. and Reddy M.S. (2011b). “The effect of calcining bacteria on the permeability of concrete structures”, *Journal of Industrial Microbiology, Biotechnology*, no. 38, No. 9, p. 1229–1234.

30. Bang S.S., Galinat J.K. and Ramakrishnan V. (2001), “Calcite Precipitation by Polyurethane Immobilized Sporosarcina pasteurii”, *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 28, No. 4, p. 404–409.
31. De Muynck, W., Debrouwer, D., De Belie, N., and Verstraete, W. (2008b), “Bacterial carbonate deposits improve the durability of cementitious materials”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, No. 7, p. 1005–1014.
32. De Muynck W., De Belie N. and Verstraete W. (2010), “Microbial carbonate deposition in building materials: a review”, *Ecological Engineering*, Vol. 36, No. 2, p. 118–136.
33. Edwardsen, C., (1999), “Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete”, *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 7, p. 488–454.
34. Emmons, P.H. and Sordyl, D.J., (2006), “State of the Concrete Repair Industry and Vision for the Future”, *Bulletin Repair Bulletin*, pp. 7–14.
35. Ying, Yang., Lepech, M.D., and Li, V.C., (2005) “Self-healing of engineering cement composites during cyclic wetting and drying”, *Proc. International Workshop on Durability of Reinforced Concrete under Combined Mechanical and Climatic Stresses*, Qingdao, China, p. 231–242.
36. De Meynck V., Cox K., Beli N.D. and Verstrate W. (2008a), “Bacterial Carbonate Precipitation as an Alternative to Surface Treatment of Concrete”, *Construction Building Materials*, Vol. 22, No. 5, p. 875–885.
37. Rodriguez-Navarro S., Rodriguez-Gallego M., Checkron K. and Gonzalez-Munoz, M.T., (2003), “Preservation of Decorative Stone Using Biomineralization Caused by *Myxococcusxanthus*”, *Applied Environmental Microbiology*, Vol. 69, No. 4, p. 2182–2193.
38. Sahmaran, M., and Li, V.C., (2009), “Strength Properties of an ECC Microcrack Containing Large Flash Volumes”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 39, NO.11, p. 1033–1043.
39. Лесовик В.С. Геоника (геометика). Примеры реализации в строительном материаловедении / В.С. Лесовик. – Белгород. Изд-во БГТУ, 2014. – 206 с.
40. Zhong V. and Yao V. (2003). "The effect of the degree of damage on self-healing concrete". *Building construction materials*. 22, No. 2, p. 1137–1142.
41. Van J., Van Tittelboom K., De Beli N., and Verstrate W. (2012b), “Use of Silica Gel or Polyurethane Immobilized Bacteria for Self-Healing Concrete,” *Construction Building Materials*, Vol. 26, No. 1, p. 532–40.
42. Le Metayer L., Castanier K.G., Oriol G., Lubier J.F. and Pertuiso, J.P., (1999), “The Use of Bacterial Carbonatogenesis for the Protection and Regeneration of Limestones in Buildings and a Historic Estate,” *Sediment Geology* Vol. 126, Nos. 1–4, p. 25–34.
43. Kitis M., Kaplan S.S., Karakai E., Yigit N.O., Chivelekoglu G., (2007), “Adsorption of natural organic substances from pumice-coated iron water”, *Chemosphere*, Vol. 66, No. 1, p. 130–138.
44. Freyermuth, C.L., (2001), “Life Cycle Cost Analysis for Large Segmental Bridges”, *Concrete International*, Vol. 23, No. 2, p. 89–95.
45. Guadalupe Sierra-Beltran, M., Jonkers, H.M. and Schlangen, E., (2014), “Characterization of a Concrete-Based Sustainable Mortar for Concrete Repair”, *Construction and Building Materials*, Vol. 67, No. 9, p. 344–352.

46. Bang S.S., Galinat J.K. and Ramakrishnan V. (2001), “Calcite precipitation caused by polyurethane immobilized *Sporosarcina pasteurii*”, *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 28, No. 4, p. 404–409.
47. Jonkers H.M., (2007), “Self-healing concrete: an abiological approach, Self-healing materials: an alternative approach to 20 centuries of material science”, Springer, pp. 195–204.
48. Lee, V.S. (1998), “Engineering Cement Composites – Specialized Composites Using Micromechanical Modeling in Fiber Concrete: Present and Future,” Canadian Civil Engineering Society, Montreal, p. 64–97.
49. Lee V.S. and Jan E.H., (2007) “Self-healing materials: an alternative approach to the 20th century of materials science”, in: Zwaag S van der, editor, Springer, pp. 161–193.
50. Nabil B., Aissa A. and Aguida B.I. (2011), “Using a new approach (experiment design method) to study various procedures to avoid cracking concrete in hot climates under shrinkage conditions”, *Journal of Advanced Concrete Technologies*, Volume 9, No. 2, p. 149–157.
51. Sierra-Beltran, M.G., Jonkers, H.M., and Schlangen, E., (2014), “Characterization of Biologically Based Sustainable Mortar for Concrete Repair”, *Construction and Building Materials*, Vol. 67, No. 9, p. 344–352.
52. Xu, Jing, Yao, Wu., I. Jiang, Zhengwu, (2014), “Non-Ureolytic Deposition of Bacterial Carbonates as a Surface Treatment Strategy for Cement Materials”, *Journal of Civil Engineering Materials*, vol. 26, No. 5, p. 983–991.
53. Xu, Jing., And Yao, Wu., (2014), “Multilevel Mechanical Quantification of Self-healing Concrete Containing a Treatment Agent Based on Non-Ureolytic Bacteria”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 64, No. 10, p. 1–10.
54. Stocks-Fischer S., Galinat J.K. and Bang S.S., (1999), “Microbiological Precipitation of  $\text{CaCO}_3$ ”, *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 31, No. 11, p. 1563–1571.
55. Palin D., Victor V. and Yonkers H.M. (2014), “Towards a Cost-Effective Self-healing Bacteria-Based Marine Concrete”, “Concrete Solutions” – Grantham et al. (Eds), Taylor & Francis Group, London, pp. 105–108.
56. Kitis M., Kaplan S.S., Karakai E., Yigit N.O., Chivelekoglu G., (2007), “Adsorption of natural organic substances from pumice-water coated with iron”, *Chemosphere*, Vol. 66, No. 1, p. 130–138.
57. Hossein, K.M.A., (2004), “Properties of Cement and Lightweight Concrete Based on Volcanic Pumice”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 2, p. 283–291.
58. Claudia S., Ricardo S., Loreto M.V. and Mauricio L. (2014), “Quantification of the Chemical and Biological Deposition of Calcium Carbonate: Self-Healing Effectiveness in a Chemical Composition Containing a Reinforced Mortar,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 50, No. 7, p. 10–15.
59. Kim, H.K., Park, S.J., Han, J.I., and Lee, H.K. (2013), “Microbial-mediated Calcium Carbonate Deposition on Normal and Lightweight Concrete”, *Construction Building Materials*, Vol. 38, No. 1, p. 1073–1082.
60. Van J.Ya., Snoeck D., Vlierberg S.V., Verstrate V. and De Beli N., (2014b), “The Use of Hydrogel Encapsulated Carbonate Precipitating Bacteria to Achieve Realistic Self-Healing in Concrete”, *Construction and Building Materials*, issue 68, p. 110–119.

61. Xu, Jing., And Yao, Wu., (2014), “Multilevel Mechanical Quantification of Self-healing Concrete Containing a Treatment Agent Based on Non-Ureolytic Bacteria”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 64, No. 10, p. 1–10.
62. Соломатов В.И., Черкасов В.Д., Ерофеев В.Т. Строительные биотехнологии и биоконпозиты. – М.: Изд-во МИИТа, 1998. – 166 с.
63. Jonkers H.M. and E. Schlangen (2008), “Development of self-healing bacteria-based concrete”, *Custom-made concrete structures – a new solution for society*, p. 425–430.
64. Jonkers H.M., Teissen A., Muizer G., Kopuroglu O. and Schlangen E., (2010) “The use of bacteria as a self-healing agent for the development of sustainable concrete”, *Environmental Engineering* Vol. 36, No. 2, p. 230–235.
65. Palin D., Victor V. and Yonkers H.M. (2014), “Towards a Cost-Effective Self-healing Bacteria-Based Marine Concrete”, “Concrete Solutions” – Grantham et al. (Eds), Taylor & Francis Group, London, pp. 105–108.
66. Rafat S., Navnet Kaur S. (2011). "The influence of ureolytic bacteria on the properties of concrete." *Construction and building materials*. 25, No. 10, p. 3791–3801.
67. Raijiwala D.B., (2008), “Bacterial Concrete: Self-healing Concrete”. *Journal of Civil Engineering*, ICFAI University, No. 2, p. 56–63.
68. Ramachandran S.K., Ramakrishnan V. and Bang S.S. (2001), “Concrete Reconstruction Using Microorganisms”, *ACI Materials Journal*, Vol. 98, No. 1, p. 3–9.
69. Ramakrishnan V., Bang, S.S., Deo, K.S. (1998), “A New Method for Repairing Cracks in High-Strength Concrete Using Bacteria”, In: *Proc International Conference on High-Strength High-Strength Concrete*, Perth, Australia p. 597–618.
70. Sarmast M., Farpurkal M.Kh., Sarshmeshmepur M. and Egbal M.K. (2014), “Micromorphological and biocalcification effects of *sporosarcina pasteurii* and *sporosarcina ureae* in sandy soil columns”, *Journal of Agricultural Sciences and Technology*, No. 14, p. 681–693.
71. Achal V., Mukherjee A. and Reddy M.S. (2011a). “Microbiological concrete: a way to increase the durability of concrete buildings”, *Journal of Civil Engineering Materials*, vol. 23, No. 6, p. 7–10. 730–734.
72. Jagadeesha, Kumar, B.G., Prabhakara, R., and Pushpa, H., (2013), “Biomining of calcium carbonate with various bacterial strains and their use in repairing cracks in concrete”, *International Journal of Advances in Engineering and Technology*. Vol. 6, No. 1, p. 201–213.
73. Van Tittelboom, C., De Beli, N., De Münck, W. and Verstrate, V., (2010), “Using Bacteria to Repair Cracks in Concrete”, *Cement Concrete Research*, Vol.40, No., 1, p. 157–166.
74. Victor V. and Yonkers H.M. (2011), “Quantifying Crack Healing in New Self-healing Bacteria-Based Concrete”, *Cement Concrete Composite*, Vol. 33, No. 7, p. 763–770.
75. Zemskov S.V., Yonkers H.M. and Vermolen F.J., (2012), “Mathematical Model of the Bacterial Self-Repair of Cracks in Concrete”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 25, No. 1, p. 4–12.
76. Ghosh P., Mandal S., Chattopadhyay B.D. and Pal S. (2005), “Using Microorganisms to Improve Strength of Cement Mortar”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 10, p. 1980–1983.

77. Ma, Hui., Qian S., and Zhang Z., (2014), “The Effect of Self-Healing on the Permeability and Mechanical Properties of Medium Early Strength Cement Composites”, *Building and Construction Materials*, Volume 68, No. 10, p. 92–101.
78. Navnet S., Rafat S., and Anita R. (2012), “The effect of bacteria on compressive strength, water absorption, and fast permeability for concrete chlorides with fly ash”, *Building Materials*, vol. 28, No. 1, p. 351–356.
79. Srinivasa Reddy, V., Joti Kumar, K.S., Seshagiri Rao, M.V. and Sasikala. (2011), "Strengthening the Strength of Cement Mortar Using Microorganisms – An Experimental Study", *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, Vol. 4, No. 6, p. 933–936.
80. Navneet C. and Rafat S., (2013), “Permeability of Concrete Made from Fly Ash and Silica: The Effect of Ureolytic Bacteria”, *Construction and Building Materials*, Vol. 49, No. 12, p. 161–174.
81. Srinivasa Reddy, V., Joti Kumar, K.S., Seshagiri Rao, M.V. and Sasikala (2013), Study of the permeability characteristics of self-healing embedded bacterial concrete, *International Journal of Recent Technology and Engineering*, Vol. 6, No. 1, p. 119–125.
82. Koch G., Brongers M., Thompson N., Wirmani U. and Payer J. (2002), “Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States”, Technical Report, Turner-Fairbank Center for Highway Research.

**Erofeev Vladimir Trofimovich**

Mordovia state university, Saransk, Russia  
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru

**Kruglov Valeriy Mihailovich**

Russian university of transport, Moscow, Russia  
E-mail: tu@miit.ru

**Vatin Nikolay Ivanovich**

Peter the great Saint Petersburg state polytechnic university, Saint Petersburg, Russia  
E-mail: vatin\_ni@spbstu.ru

**Al-Dulaimi Salman Dawood Salman**

Ministry of higher education and scientific research, Iraq, Baghdad  
E-mail: salmoon-1985@mail.ru

## Intelligent composites and their use for self-healing concrete

**Abstract.** It is shown that during operation reinforced concrete structures are very often susceptible to cracking, which leads to a deterioration in the quality and expected life of them. The traditional methods of restoration and strengthening of structures are methods of building up, impregnating the structure of concrete with polymer and other materials, applying monolithic coatings or gluing metal polymer and other elements. Known repair methods are characterized by high complexity of execution, high cost, etc. It is shown that there is a pressing economic incentive for the development of concrete capable of self-repairing and repairing damage. Recently, tendencies toward the creation of new materials that are capable of actively interacting with external factors have been outlined towards world practice; such materials have received the name “intellectual”. The use of "intelligent" materials allows you to monitor and predict the state of various structures and structures, at the required time and even in hard-to-reach areas, significantly increase the resource of engineering systems and their reliability. It has been shown that to date, various chemical methods have been developed for creating self-healing concrete. One of the breakthrough technologies in the field of obtaining effective materials and structures based on them are biotechnologies based on the use of microorganisms. Many researchers have studied the use of calcite produced by bacteria to increase the life of concrete-based structures and restore buildings by eliminating cracks, increasing the strength of concrete, reducing permeability, and reducing water absorption. The article provides an overview of the work of foreign specialists in these areas.

It is shown that some areas on the problem of “self-healing” materials need further development and, first of all, it should be clarified how efficiently the deposition of minerals generated by bacteria affects the property of concrete, compacts cracks.

**Keywords:** concrete durability; intelligent composites; cracks; crack healing; chemical and biological methods

### REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M. (2014). *Sovremennaya tekhnologiya betona. [Modern concrete technology.]* Moscow: Moscow State University of Civil Engineering, pp. 23–28.
2. Belov V.V., Smirnov M.A. (2009). The formation of the optimal macrostructure of the building mixture. *Building materials*, 9, pp. 88–90 (in Russian).

3. Deo S. (2011). Aspects of the use of metal fiber. The study of the use of fiber for concrete products. *CPI – International Concrete Production*, 4, pp. 46–56 (in Russian).
4. Lesovik R.V., Klyuev S.V., Erofeeva V.T., Durachenko A.V. (2015). Fine-grained concrete reinforced with polypropylene fiber. *Scientific-Research Journal of Applied Sciences*, 10(10), pp. 624–628.
5. Erofeev V.T. (2016). Composites of frame structures for buildings and structures in aggressive environments. *Engineering Procedure*, 165, pp. 1444–1447.
6. Bazhenov Yu.M., Chernyshov E.M., Korotkikh D.N. (2014). Structuring of structures of modern concrete: defining principles and technological platforms. *Building materials*, 3, pp. 6–15 (in Russian).
7. Kalashnikov V.I., Erofeev V.T., Tarakanov O.V. (2016). Suspension-filled concrete mixes for powder-activated concrete of a new generation. *News of higher educational institutions. Construction*, 4(688), pp. 30–37 (in Russian).
8. Kalashnikov V.I., Erofeev V.T., Tarakanov O.V., Arkhipov V.P. (2016). Kontsepsiya strategicheskogo razvitiya plastifitsirovannykh poroshkovo-aktivirovannykh betonov novogo pokoleniya // Vysokoprochnye tsementnye betony: tekhnologii, konstruksii, ehkonomika (VPB-2016). [*The concept of strategic development of plasticized powder-activated concrete of a new generation // High-strength cement concretes: technologies, designs, economics (VPB-2016).*] p. 36.
9. Erofeev V.T., Rodin A.I., Yakubnin V.V., Bogatov A.D., Bochkin V.S., Chedodajkin A.M. (2018). Alkali – activated slag binders from rock – wool production wastes. *Magazine of Civil Engineering*, 82(6), pp. 219–227. DOI: 10.18720/MCE.82.20.
10. Erofeev V.T., Rodin A.I., Kravchuk A.S., Kaznacheev S.V., Zaharova E.A. (2018). Bio stable silicic rock-based glass ceramic foams. *Magazine of Civil Engineering*, 84(8), pp. 48–56. DOI: 10.18720/MCE.84.5.
11. Kalashnikov V.I., Volodin V.M., Erofeeva I.V., Abramov D.A. (2015). Highly effective self-compacting powder-activated sand concrete and fiber concrete. *Modern problems of science and education*, 1–2, pp. 114–115 (in Russian).
12. Khozin V.G., Borovskikh I.V., Avzalov Eh.R. (2014). The influence of basalt fiber on the strength and deformation properties of fine-grained high-strength concrete. *Mechanics of the destruction of building materials and structures*, pp. 349–353 (in Russian).
13. Falikman V.R. (2011). New effective high-strength concrete. *Concrete and reinforced concrete. Equipment. Materials Technology*, 1, pp. 48–54. (in Russian).
14. Usharov-Marshak A.V. (2014). A look into the future of concrete. *Building materials*, 3, pp. 4–6 (in Russian).
15. Kapriyelov S.S., Shenfel'd A.V., Kardumyan G.S. (2008). Novye modifitsirovannye betony v konstruktsiyakh vysotnykh zdaniy. [*New modified concrete in high-rise buildings.*] Moscow, pp. 29–38.
16. Shafigullin L.N., Treshev A.A., Romashina A.V., Erofeev V.T. (2017). Concentration of stress on holes in a plate of different resistant material. *Astra Salvensis*, (2017), pp. 213–225.
17. Shafigullin L.N., Treshev A.A., Telichko V.G., Erofeev V.T. (2017). Calculation of reinforced concrete shell of positive Gaussian curvature, given different resistance of concrete and cracking. *Astra Salvensis*, (2017), pp. 77–91.
18. Erofeev V. (2016). Frame construction composites for building and structures in aggressive environments. *Procedia Engineering (see books)*, (165), pp. 1444–1447.

19. Lenov V.V., Yerofeev V.T., Salimov V.F. (2015). Resistance in filamentous fungi filled by epoxy adhesive and matrix composition used in carcass concrete. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*, 3(27), pp. 65–72.
20. Shafigullin L.N., Bobrishev A.A., Shafigullin A.N., Erofeev V.T., Treschev A.A. (2015). Development of the recommendations on selection of glass-fiber reinforced polyurethanes for vehicle parts. *International journal of applied engineering research*, 23(10), pp. 43758–43762.
21. Maksimova I.N., Makridin N.I., Erofeev V.T., Skachkov Yu.P. (2015). Prochnost' i parametry razrusheniya tsementnykh kompozitov: monografiya. [*Strength and fracture parameters of cement composites: monograph.*] Saransk: Mordovian University Press, p. 360.
22. Korotkikh D.N. (2014). Treshchinostoykost' sovremennykh tsementnykh betonov (problemy materialovedeniya i tekhnologii): monografiya. [*Crack resistance of modern cement concrete (problems of materials science and technology): monograph.*] Voronezh: Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, p. 141.
23. Chernyshov E.M., Korotkikh D.N., Kesariyskiy A.G. (2012). Otsenka parametrov protsessa treshchinoobrazovaniya v strukture sovremennykh betonov metodom lazernoy golograficheskoy interferometrii. [*Estimation of crack formation parameters in the structure of modern concrete using laser holographic interferometry.*] Saint Petersburg.
24. AASHTO T277 (1993). Electrical Indication of Chloride Resistance of Concrete. *American Association of Highway and Transportation Government Officials*.
25. Achal V., Mukherjee A., Reddy M.S. (2010). Biocalcification of *Sporosarcina pasteurii* using a corn solution as a nutrient source. *Industrial Biotechnology*, 3(6), pp. 170–174.
26. Arabi N.S., Mustafa K.N.B., Al Mattarneh H., Al-Qadi K.N.S. (2009). Statistical models for the hardened properties of self-compacting concrete. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(2), pp. 764–770.
27. ASTM C87 (2002). Standard Test Method for Concrete Bending Strength (Using a Simple Beam with a Third Point Load). *American Society for Testing and Materials*.
28. Achal V., Mukherjee A., Reddy M.S. (2011). Microbiological concrete: a way to increase the durability of concrete buildings. *Journal of Civil Engineering Materials*, 6(23), pp. 7–10, 730–734.
29. Achal V., Mukherjee A., Reddy M.S. (2011). The effect of calcining bacteria on the permeability of concrete structures. *Journal of Industrial Microbiology, Biotechnology*, 9(38), pp. 1229–1234.
30. Bang S.S., Galinat J.K., Ramakrishnan V. (2001). Calcite Precipitation by Polyurethane Immobilized *Sporosarcina pasteurii*. *Enzyme and Microbial Technology*, 4(28), pp. 404–409.
31. De Muynck W., Debrouwer D., De Belie N., Verstraete W. (2008). Bacterial carbonate deposits improve the durability of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 7(38), pp. 1005–1014.
32. De Muynck W., De Belie N., Verstraete W. (2010). Microbial carbonate deposition in building materials: a review. *Ecological Engineering*, 2(36), pp. 118–136.
33. Edwardsen C. (1999). Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete. *ACI Materials Journal*, 7(96), pp. 488–454.



34. Emmons P.H., Sordyl D.J. (2006). State of the Concrete Repair Industry and Vision for the Future. *Bulletin Repair Bulletin*, pp. 7–14.
35. Ying Yang., Lepech M.D., Li V.C. (2005). *Self-healing of engineering cement composites during cyclic wetting and drying*. Qingdao, China, pp. 231–242.
36. De Meynck V., Cox K., Beli N.D., Verstrate W. (2008). Bacterial Carbonate Precipitation as an Alternative to Surface Treatment of Concrete. *Construction Building Materials*, 5(22), pp. 875–885.
37. Rodriguez-Navarro S., Rodriguez-Gallego M., Checkron K., Gonzalez-Munoz M.T. (2003). Preservation of Decorative Stone Using Biomineralization Caused by *Myxococcusxanthus*. *Applied Environmental Microbiology*, 4(69), pp. 2182–2193.
38. Sahmaran M., Li V.C. (2009). Strength Properties of an ECC Microcrack Containing Large Flash Volumes. *Cement and Concrete Research*, 0.11(39), pp. 1033–1043.
39. Lesovik V.S. (2014). Geonika (geometika). Primery realizatsii v stroitel'nom materialovedenii. [*Geonics (Geometry). Implementation examples in building materials science.*] Belgorod: Publishing House Belgorod State Technological University, p. 206.
40. Zhong V., Yao V. (2003). The effect of the degree of damage on self-healing concrete. *Building construction materials*, 2(22), pp. 1137–1142.
41. Van J., Van Tittelboom K., De Beli N., Verstrate W. (2012). Use of Silica Gel or Polyurethane Immobilized Bacteria for Self-Healing Concrete. *Construction Building Materials*, 1(26), pp. 532–40.
42. Le Metayer L., Castanier K.G., Oriol G., Lubier J.F., Pertuiso J.P. (1999). The Use of Bacterial Carbonatogenesis for the Protection and Regeneration of Limestones in Buildings and a Historic Estate. *Sediment Geology*, 1–4(126), pp. 25–34.
43. Kitis M., Kaplan S.S., Karakai E., Yigit N.O., Chivelekoglu G. (2007). Adsorption of natural organic substances from pumice-coated iron water. *Chemosphere*, 1(66), pp. 130–138.
44. Freyermuth C.L. (2001). Life Cycle Cost Analysis for Large Segmental Bridges. *Concrete International*, 2(23), pp. 89–95.
45. Guadalupe Sierra-Beltran M., Jonkers H.M., Schlangen E. (2014). Characterization of a Concrete-Based Sustainable Mortar for Concrete Repair. *Construction and Building Materials*, 9(67), pp. 344–352.
46. Bang S.S., Galinat J.K., Ramakrishnan V. (2001). Calcite precipitation caused by polyurethane immobilized *Sporosarcina pasteurii*. *Enzyme and Microbial Technology*, 4(28), pp. 404–409.
47. Jonkers H.M. (2007). Self-healing concrete: an abiological approach, Self-healing materials: an alternative approach to 20 centuries of material science. *Springer*, pp. 195–204.
48. Lee V.S. (1998). Engineering Cement Composites – Specialized Composites Using Micromechanical Modeling in Fiber Concrete: Present and Future. *Canadian Civil Engineering Society, Montreal*, p. 64–97.
49. Lee V.S., Jan E.H. (2007). *Self-healing materials: an alternative approach to the 20th century of materials science*. In: Zwaag S van der, editor, Springer, pp. 161–193.
50. Nabil B., Aissa A., Aguida B.I. (2011). Using a new approach (experiment design method) to study various procedures to avoid cracking concrete in hot climates under shrinkage conditions. *Journal of Advanced Concrete Technologies*, 2(9), pp. 149–157.

51. Sierra-Beltran M.G., Jonkers H.M., Schlangen E. (2014). Characterization of Biologically Based Sustainable Mortar for Concrete Repair. *Construction and Building Materials*, 9(67), pp. 344–352.
52. Xu Jing, Yao Wu., I. Jiang, Zhengwu (2014). Non-Ureolytic Deposition of Bacterial Carbonates as a Surface Treatment Strategy for Cement Materials. *Journal of Civil Engineering Materials*, 5(26), pp. 983–991.
53. Xu Jing, Yao Wu. (2014). Multilevel Mechanical Quantification of Self-healing Concrete Containing a Treatment Agent Based on Non-Ureolytic Bacteria. *Cement and Concrete Research*, 10(64), pp. 1–10.
54. Stocks-Fischer S., Galinat J.K., Bang S.S., (1999). Microbiological Precipitation of CaCO<sub>3</sub>. *Soil Biology and Biochemistry*, 11(31), pp. 1563–1571.
55. Palin D., Victor V., Yonkers H.M. (2014). *Towards a Cost-Effective Self-healing Bacteria-Based Marine Concrete*. London: “Concrete Solutions” – Grantham et al. (Eds), Taylor & Francis Group, pp. 105–108.
56. Kitis M., Kaplan S.S., Karakai E., Yigit N.O., Chivelekoglu G. (2007). Adsorption of natural organic substances from pumice-water coated with iron. *Chemosphere*, 1(66), pp. 130–138.
57. Hossein K.M.A. (2004). Properties of Cement and Lightweight Concrete Based on Volcanic Pumice. *Cement and Concrete Research*, 2(34), pp. 283–291.
58. Claudia S., Ricardo S., Loreto M.V., Mauricio L. (2014). Quantification of the Chemical and Biological Deposition of Calcium Carbonate: Self-Healing Effectiveness in a Chemical Composition Containing a Reinforced Mortar. *Cement and Concrete Composites*, 7(50), pp. 10–15.
59. Kim H.K., Park S.J., Han J.I., Lee, H.K. (2013). Microbial-mediated Calcium Carbonate Deposition on Normal and Lightweight Concrete. *Construction Building Materials*, 1(38), pp. 1073–1082.
60. Van J.Ya., Snoeck D., Vlierberg S.V., Verstrate V., De Beli N. (2014). The Use of Hydrogel Encapsulated Carbonate Precipitating Bacteria to Achieve Realistic Self-Healing in Concrete. *Construction and Building Materials*, (68), pp. 110–119.
61. Xu Jing., Yao Wu. (2014). Multilevel Mechanical Quantification of Self-healing Concrete Containing a Treatment Agent Based on Non-Ureolytic Bacteria. *Cement and Concrete Research*, 10(64), pp. 1–10.
62. Solomatov V.I., Cherkasov V.D., Erofeev V.T. (1998). Stroitel'nye biotekhnologii i biokompozity. [*Building Biotechnologies and Biocomposites.*] Moscow: Moscow Institute of Transport Engineers Publishing House, p. 166.
63. Jonkers H.M., Schlangen E. (2008). Development of self-healing bacteria-based concrete. *Custom-made concrete structures – a new solution for society*, pp. 425–430.
64. Jonkers H.M., Teissen A., Muizer G., Kopuroglu O., Schlangen E. (2010). The use of bacteria as a self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Environmental Engineering*, 2(36), pp. 230–235.
65. Palin D., Victor V., Yonkers H.M. (2014). *Towards a Cost-Effective Self-healing Bacteria-Based Marine Concrete*. London: “Concrete Solutions” – Grantham et al. (Eds), Taylor & Francis Group, pp. 105–108.
66. Rafat S., Navnet Kaur S. (2011). The influence of ureolytic bacteria on the properties of concrete. *Construction and building materials*, 10(25), pp. 3791–3801.
67. Raijiwala D.B. (2008). Bacterial Concrete: Self-healing Concrete. *Journal of Civil Engineering, ICFAI University*, 2, pp. 56–63.

68. Ramachandran S.K., Ramakrishnan V., Bang S.S. (2001). Concrete Reconstruction Using Microorganisms. *ACI Materials Journal*, 1(98), pp. 3–9.
69. Ramakrishnan V., Bang, S.S., Deo, K.S. (1998). *A New Method for Repairing Cracks in High-Strength Concrete Using Bacteria*. In: Proc International Conference on High-Strength High-Strength Concrete, Perth, Australia, pp. 597–618.
70. Sarmast M., Farpurkal M.Kh., Sarshmeshmepur M., Egbal M.K. (2014). Micromorphological and biocalcification effects of *sporosarcina pasteurii* and *sporosarcina ureae* in sandy soil columns. *Journal of Agricultural Sciences and Technology*, 14, pp. 681–693.
71. Achal V., Mukherjee A., Reddy M.S. (2011). Microbiological concrete: a way to increase the durability of concrete buildings. *Journal of Civil Engineering Materials*, 6(23), pp. 7–10, 730–734.
72. Jagadeesha, Kumar B.G., Prabhakara R., Pushpa H. (2013). Biomineralization of calcium carbonate with various bacterial strains and their use in repairing cracks in concrete. *International Journal of Advances in Engineering and Technology*, 1(6), pp. 201–213.
73. Van Tittelboom C., De Beli N., De Münck W., Verstrate, V. (2010). Using Bacteria to Repair Cracks in Concrete. *Cement Concrete Research*, 1(40), pp. 157–166.
74. Victor V., Yonkers H.M. (2011). Quantifying Crack Healing in New Self-healing Bacteria-Based Concrete. *Cement Concrete Composite*, 7(33), pp. 763–770.
75. Zemskov S.V., Yonkers H.M., Vermolen F.J. (2012). Mathematical Model of the Bacterial Self-Repair of Cracks in Concrete. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1(25), pp. 4–12.
76. Ghosh P., Mandal S., Chattopadhyay B.D., Pal S. (2005). Using Microorganisms to Improve Strength of Cement Mortar. *Cement and Concrete Research*, 10(35), pp. 1980–1983.
77. Ma Hui., Qian S., Zhang Z. (2014). The Effect of Self-Healing on the Permeability and Mechanical Properties of Medium Early Strength Cement Composites. *Building and Construction Materials*, 10(68), pp. 92–101.
78. Navnet S., Rafat S., Anita R. (2012). The effect of bacteria on compressive strength, water absorption, and fast permeability for concrete chlorides with fly ash. *Building Materials*, 1(28), pp. 351–356.
79. Srinivasa Reddy V., Joti Kumar K.S., Seshagiri Rao M.V., Sasikala (2011). Strengthening the Strength of Cement Mortar Using Microorganisms – An Experimental Study. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 6(4), pp. 933–936.
80. Navneet C. and Rafat S., (2013), “Permeability of Concrete Made from Fly Ash and Silica: The Effect of Ureolytic Bacteria”, *Construction and Building Materials*, Vol. 49, No. 12, p. 161–174.
81. Srinivasa Reddy, V., Joti Kumar, K.S., Seshagiri Rao M.V., Sasikala (2013). Study of the permeability characteristics of self-healing embedded bacterial concrete. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 1(6), pp. 119–125.
82. Koch G., Brongers M., Thompson N., Wirmani U., Payer J. (2002). Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States. *Technical Report, Turner-Fairbank Center for Highway Research*.