

**SELECTION OF OPTIMAL GRAIN COMPOSITION
OF ROAD CONCRETE AGGREGATES
USING COMPUTER SIMULATION**

V.V. Belov, M.A. Smirnov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The difficult-to-reconcile requirements of high plasticity of concrete mixes and high performance of road concrete can only be met by applying scientific principles of forming a concrete matrix structure with the highest possible aggregate grain density, with continuous granulometry, and the use of a complex of additives (microfillers and chemical additives with plasticizing and air-entraining properties (to create reserve porosity)). To achieve this goal of forming a concrete matrix structure with the highest possible aggregate grain density, patented methods and computer programs developed at the Department of Production of Building Materials and Structures (PBS) TvGTU were used.

Keywords: micro level reinforcement, optimal granulometry, tightest particle packing, software package modeling

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BELOV Vladimir Vladimirovich – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

SMIRNOV Matvey Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V., Smirnov M.A. Selection of optimal grain composition of road concrete aggregates using computer simulation // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 4 (28), pp. 12–17.

УДК 691.328

РАЗРАБОТКА САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

Ю.Ю. Курятников
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Курятников Ю.Ю., 2025

Аннотация. Решение проблемы возникновения трещин в железобетоне возможно при использовании для изготовления изделий и конструкций самовосстанавливающегося бетона. Рассмотрена возможность применения и регулирования аутогенного механизма

самовосстановления бетона. Исследования направлены на то, чтобы усилить этот природный потенциал с помощью специальных добавок, обладающих пуццолановой активностью.

Ключевые слова: самовосстанавливающийся бетон, аутогенный механизм, минеральные добавки, долговечность.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-4-17-23

Бетон и бетонные смеси являются одними из самых распространенных и популярных материалов, предназначенных для всех видов строительных работ. Без использования бетонных смесей и железобетонных изделий невозможно представить массовое строительство по всему миру. Но, несмотря на грандиозные масштабы применения бетона в строительстве, материал имеет склонность к образованию трещин и повреждений при воздействии на него внешних факторов, из-за чего снижается его долговечность. Основными причинами появления трещин могут быть усадочные деформации, перепад температур окружающей среды, напряжение от внутренних сил, коррозия бетона и арматуры. Таким образом, обеспечение долговечности бетонных (железобетонных) конструкций является одной из главных проблем в строительстве на сегодняшний день.

Решение проблем возникновения трещин возможно при использовании для изготовления изделий и конструкций самовосстанавливающегося бетона. Существует ряд разработок, ориентированных на создание технологических приемов, позволяющих получить материал, который способен к самовосстановлению своей несущей способности в ходе использования [1, 2].

Впервые самовосстанавливающийся бетон был задействован при строительстве спасательной станции на озере в Нидерландах. Позже был построен мост Zeelandbrug, который является одним из самых длинных мостов в Нидерландах и используется для автомобильного и пешеходного движения. Применение самовосстанавливающегося бетона позволило увеличить долговечность мостовой конструкции и снизить затраты на обслуживание. В Токио, столице Японии, технология производства этого бетона реализуется при возведении многоэтажных офисных зданий. В Германии для строительства метрополитена в городе Мюнхене был использован самовосстанавливающийся бетон для заливки тоннелей и подземных станций. В Швеции такой бетон используется для изготовления бетонных конструкций в рамках экологических проектов по восстановлению рек и водоемов. Это позволяет создавать устойчивые к воздействию агрессивных факторов окружающей среды бетонные сооружения [3]. Данные примеры демонстрируют разнообразные области применения самовосстанавливающегося бетона и его успешное использование в различных строительных проектах по всему миру.

Процесс самовосстановления структуры бетона может происходить по следующим механизмам: биологическому и аутогенному (автономному). Биологический механизм с использованием бактерий осуществляется по такому принципу [3, 4]:

1. Лактат кальция вместе с бактериями помещается в капсулы из биоразлагаемого пластика диаметром 2–4 мм.

2. С помощью химически активных добавок эти капсулы внедряются в бетонную смесь.

3. При нормальных условиях использования капсулы сохраняют свою целостность, и бактерии находятся в состоянии анабиоза. Однако при появлении микротрещин структура капсул нарушается, что приводит к попаданию влаги в повреждение и выводит бактерии из анабиоза, активируя их.

4. Затем наступает быстрый рост численности бактерий, потребляющих кальций лактата. Бактерии выделяют известняк как продукт своей жизнедеятельности, который затем заполняет микротрещины.

Процесс восстановления трещины при биологическом механизме представлен на рис 1.

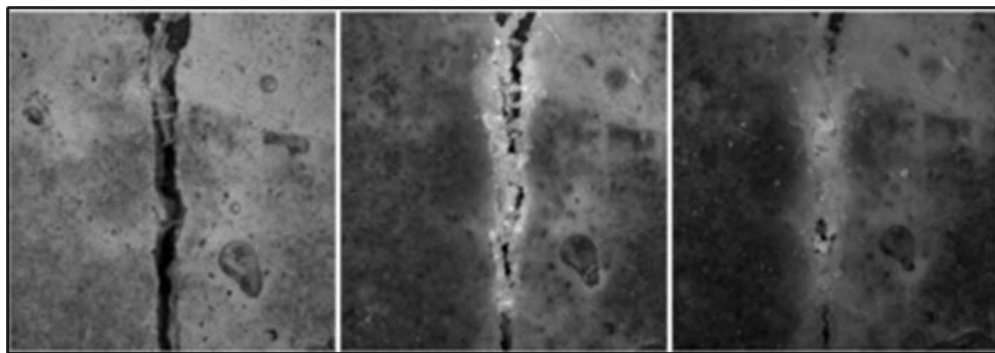
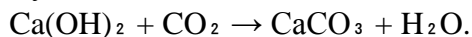


Рис. 1. Процесс восстановления трещины

Аутогенное заживление происходит благодаря продолжающимся химическим и физическим процессам внутри самого бетона в основном за счет двух явлений: гидратации непрореагировавших частиц цемента размером 70 мкм и выше, карбонизации продуктов гидратации [5, 6].

В любом затвердевшем бетоне остается часть цементных частиц, которые не полностью прореагировали с водой (негидратированный цемент). Когда появляется трещина, в нее проникает вода (например, из дождя или влажного воздуха). Эта вода вступает в контакт с непрореагировавшими частицами цемента, и процесс гидратации возобновляется. Вновь образующиеся гидраты (кристаллы) растут и постепенно заполняют полость трещины.

Параллельно протекает процесс карбонизации продуктов гидратации цемента. Углекислый газ CO_2 реагирует с водой, проникшей в трещину, образуя слабую угольную кислоту (H_2CO_3). Эта кислота реагирует с гидроксидом кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) – одним из продуктов гидратации цемента. В результате реакции образуется карбонат кальция (CaCO_3) – нерастворимое соединение, которое осаждается и также закупоривает трещину. Реакция карбонизации имеет следующий вид:



Механизм аутогенного заживления эффективен только для трещин шириной до 0,3 мм. С ростом ширины трещины эффективность резко падает. Процесс невозможен без доступа воды. Циклическое увлажнение и высыхание способствует более интенсивному заживлению. В молодом бетоне больше непрореагировавшего цемента, поэтому его потенциал к самозалечиванию выше. Цементы с более высоким содержанием алита (C_3S) обычно имеют больший потенциал заживления, так как при их гидратации образуется больше гидроксида кальция.

Аутогенный механизм – это врожденная, естественная способность бетона к самовосстановлению, и его сложно контролировать и регулировать. Современные исследования направлены на то, чтобы усилить этот природный потенциал, например, с помощью специальных добавок, увеличивающих количество непрореагировавшего цемента, или путем оптимизации состава бетонной смеси.

В данной работе для усиления аутогенного механизма в состав бетона вводилась комплексная органо-минеральная добавка: молотый доменный шлак / высокоактивный метакраун ВМК-45, сульфаталюминатная добавка, расширяющая добавка (РД) и суперпластификатор Readi-mix RM-304. Для проверки данной гипотезы были изготовлены бетоны разных составов вяжущей части (таблица).

Составы вяжущей части самовосстанавливающихся бетонов

№ п/п	Вяжущая часть, %				Вяжущая часть / песок по массе
	Цемент	Шлак	ВМК	РД	
1	90	—	—	10	1:2,5
2	80	10	—	10	1:2,5
3	70	20	—	10	1:2,5
4	60	30	—	10	1:2,5
5	50	40	—	10	1:2,5
6	85	—	5	10	1:2,5
7	80	—	10	10	1:2,5
8	75	—	15	10	1:2,5

В результате эксперимента были установлены зависимости предела прочности на сжатие, предела прочности на растяжение при изгибе, коэффициента трещиностойкости, коэффициента размягчения от содержания вышеуказанных компонентов вяжущей части бетона.

Исследования способности бетона к самовосстановлению проводились на образцах мелкозернистого бетона размером 10 x 10 x 10 см. Образцы разных составов твердели в нормальных условиях в течение 28 сут. Затем на образцах были получены трещины шириной до 0,2 мм путем нагружения под прессом. Нагрузка подбиралась экспериментально до появления первых трещин. Ширину трещин измеряли щупом (ГОСТ 882) в наиболее широком месте и маркировали. После этого образцы помещали в камеру нормального твердения (температура 20 ± 2 °C, влажность 95–100 %) и каждые 7 сут измеряли ширину маркированных трещин. Испытание продолжалось до тех пор, пока трещины не закрылись. Оптимальный состав, на котором трещины закрылись в течение 28–56 сут соответствует 10 % ВМК и 10 % РД (рис. 2).



Рис. 2. Процесс восстановления трещины с добавкой ВМК

Механизм гидратации цемента с молотым доменным шлаком – это синергетический процесс, в котором портландцементный клинкер выполняет роль каталитического активатора, создавая щелочные условия для раскрытия вяжущего потенциала шлака. Под действием щелочи стекловидная структура шлака разрушается. В результате гидратации смешанного цемента образуются гидросиликаты кальция (C-S-H) и гидрогранаты ($C_3AS_xH_{6-2x}$), происходит снижение количества $Ca(OH)_2$ за счет пуццолановых реакций. C-S-H фаза, образующаяся из шлака, часто имеет более низкое соотношение Ca/Si, чем C-S-H из чистого клинкера. Такая фаза имеет более мелкопористую структуру, которая уплотняет матрицу цементного камня и обладает повышенной стойкостью к химическим агрессиям.

Механизм гидратации цемента с добавкой высокоактивного метакеолина (ВМК) – это сложный процесс синергетического взаимодействия, который кардинально меняет микроструктуру и свойства цементного камня. ВМК ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) – аморфный продукт, полученный путем кальцинации каолинита. Реакции между компонентами цементного камня и ВМК протекают быстрее, чем при использовании доменного шлака. Высокая активность ВМК обусловлена большой удельной поверхностью и разрушенной кристаллической решеткой.

В первую очередь при затворении водой портландцемента с указанными активными минеральными добавками гидратируется его клинкерная часть с наиболее мелкими зернами. Во вторую очередь в результате гидратации и гидролиза клинкерных минералов раствор насыщается гидроксидом кальция, который взаимодействует с алюминатной и силикатной составляющими шлака или метакеолина, действуя на них как щелочной активатор, благодаря чему происходят гидролиз и гидратация шлаковой составляющей цемента или метакеолина с образованием гидроалюминатов, гидросиликатов кальция и их смесей различного состава.

Пуццолановая реакция между шлаковыми или метакеолиновыми составляющими и гидроксидом кальция цемента может протекать длительное время (годами), продолжая увеличивать плотность и прочность. В третью очередь гидратируются на протяжении десятилетий крупные клинкерные зерна размером более 80 мкм, прореагировав с водой за это время на незначительную глубину.

Таким образом, в процессе эксплуатации изделия гидроалюминаты, гидросиликаты кальция и их смеси различного состава будут заполнять объем появляющихся трещин в бетоне при выполнении следующих условий, а именно при наличии:

воды в трещинах в достаточном количестве для «вторичного запуска» процесса гидратации;

гидроксида кальция, образующегося при поздней гидратации «крупных» зерен клинкера;

алюминатной и силикатной составляющих шлака или метакеолина;

сульфоалюминатной расширяющейся добавки РД-Н. Расширяющая добавка (РД-Н) – это тонкоизмельченная смесь, состоящая из сульфоалюминатных и сульфатных компонентов. Добавка будет действовать на стекловидную составляющую шлаков как дополнительный активатор гидратации и твердения (сульфатная активизация).

положительной температуре воздуха. Повышение температуры приведет к ускорению самовосстановления бетона из-за ускорения реакции гидратации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жукова Г.Г., Сайфулина А.И. Исследование применения самовосстанавливающегося бетона // *Construction and Geotechnics*. 2020. Т. 11. № 4. С. 58–68.
2. Кодзоев М.Х., Исаченко С.Л. Самовосстанавливающийся бетон // *Бюллетень науки и практики*. 2018. Т. 4. № 4. С. 287–290.
3. De Belie N., Gruyaert E., Al-Tabbaa A [et al.]. Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures // *Advanced Materials Interfaces*. 2018. No. 5 (17), pp.152–160.
4. Асонова А.В. Новый взгляд на бетон. Самовосстанавливающийся гибкий бетон. *IX Всероссийский фестиваль науки: Сборник докладов в 2 томах*. Нижний Новгород: НГАСУ. 2020. Т. 1. С. 16–18.
5. Hearn N., Morley C.T. Self-sealing property of concrete – Experimental evidence // *Materials and Structures*. 1997. Vol. 30, pp. 404–411.
6. Self-Healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications / Ed. S.K. Ghosh. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009. 291 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КУРЯТНИКОВ Юрий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Курятников Ю.Ю. Разработка самовосстанавливающегося бетона // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 4 (28). С. 17–23.

DEVELOPMENT OF SELF-REPAIRING CONCRETE

Yu.Yu. Kuryatnikov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The problem of cracks in reinforced concrete can be solved by using self-healing concrete for the production of products and structures. The possibility of using and

regulating the autogenous mechanism of self-healing in concrete has been considered. Research is aimed at enhancing this natural potential using special additives with pozzolanic activity.

Keywords: self-healing concrete, autogenous mechanism, mineral additives, and durability.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KURYATNIKOV Yuri Yuryevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kuryatnikov Yu.Yu. Development of self-repairing concrete // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 4 (28), pp. 17–23.

УДК 697.92

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ УСТРОЙСТВА ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ В ОДНОКВАРТИРНОМ ЖИЛОМ ДОМЕ ПЛОЩАДЬЮ ДО 150 М²

А.В. Левиков

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Левиков А.В., 2025

Аннотация. В статье проанализированы проектные решения устройства принудительной вентиляции для жилого дома заданной планировочной схемы с использованием приточно-вытяжной вентиляции и приточных клапанов в стенах. Выявлены недостатки и достоинства каждого проектного решения, в частности отмечены существенные сложности применения приточно-вытяжных установок в домах площадью до 150 м². Представлены проектные рекомендации для независимой настройки системы вентиляции в каждом отдельном помещении.

Ключевые слова: вентиляция, естественная вентиляция, принудительная вентиляция, приточно-вытяжная вентиляция, вентиляционный клапан.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-4-23-27

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия человек большую часть времени проводит в помещениях [1]. Условия внутреннего микроклимата помещения все больше заменяют природные. Параметры этого микроклимата нормируются ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» и включают в себя влажность воздуха, его подвижность и температуру. Обеспечение данных параметров достигается, в частности, за счет организации системы вентиляции: естественной или принудительной.