

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-141-155](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-141-155)
УДК 691.32:620.193.01

EDN: OBMIJU

РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫЕ СО ЩЕЛОЧАМИ ЗАПОЛНИТЕЛИ: КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА БЕТОНА

Н.К. РОЗЕНТАЛЬ¹, д-р техн. наук
Г.В. ЧЕХНИЙ^{2,✉}, канд. техн. наук
А.Н. РОЗЕНТАЛЬ¹

¹ АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

² Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Один из видов коррозии бетона вызван химическим взаимодействием аморфного кремнезема в заполнителе со щелочами цементного камня. Процесс развивается медленно, повреждения бетона обнаруживаются лишь через несколько лет с момента завершения строительства. Первоначально повреждения, вызванные щелочной коррозией бетона, обнаруживали в крупных сооружениях – плотинах, мостах, дорожных покрытиях. Ремонт и защита поврежденных бетонных сооружений сложен. Настоящая статья посвящена вопросам предотвращения и защиты конструкций, повреждаемых названным видом коррозии.

Цель. Оценка методов защиты бетона от внутренней щелочной коррозии.

Материалы и методы. Приведены результаты определения реакционной способности заполнителей из щебня и песка различных месторождений. Испытан метод защиты от щелочной коррозии пропиткой бетона раствором нитрата лития. Для ускорения пропитки применена обработка бетона постоянным электрическим током.

Результаты. Показана неравноценность результатов, полученных стандартными методами испытаний. Показано, что наиболее надежными являются результаты, полученные длительными, не менее одного года, испытаниями бетона на исследуемых заполнителях и цементах. Оценена возможность ремонта бетона с признаками щелочной коррозии путем пропитки растворами литиевых соединений с наложением электрического тока.

Выводы. Выполнены исследования расширения бетона вследствие щелочной коррозии заполнителей, полученных из различных месторождений. Подтверждена необходимость длительных испытаний бетонов на заполнителях конкретных поставщиков с учетом особенностей применяемых цементов и минеральных добавок. Проверена возможность защиты бетона от щелочной коррозии введением добавок соединений лития, в том числе с использованием электрического тока. Наложение тока ускоряет пропитку бетона растворами солей лития, однако создает определенные трудности. Пропитка наружного слоя создает предпосылки для растрескивания наружного пропитанного слоя бетона вследствие разности деформаций наружного слоя и внутренних слоев, не подвергшихся пропитке. При подозрении на реакционную способность заполнителя со щелочами цемента рекомендуется вводить в состав бетона тонкомолотые кремнеземсодержащие добавки для связывания щелочей и предотвращения развития повреждения бетона.

Ключевые слова: щелочная коррозия бетона, реакционноспособный кремнезем, методы испытаний, литиевые соединения, метод пропитки, обработка электрическим током

Для цитирования: Розенталь Н.К., Чехний Г.В., Розенталь А.Н. Реакционноспособные со щелочами заполнители: коррозия и защита бетона. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;43(4):141–155. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-141-155](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-141-155)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 01.07.2024

Поступила после рецензирования 05.08.2024

Принята к публикации 08.08.2024

ALKALI-REACTIVE AGGREGATES: CORROSION AND PROTECTION OF CONCRETE

N.K. ROZENTAL¹, Dr. Sci. (Engineering)

G.V. CHEKHNI^{2,✉} Cand. Sci. (Engineering)

A.N. ROZENTAL¹

¹JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

²Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

Introduction. One type of concrete corrosion is caused by the chemical interaction of amorphous silica in aggregates with alkalis in the cement paste. This process develops slowly, and damage to the concrete is often detected only several years after construction is completed. Initially, damage caused by alkali-silica reaction was observed in large structures such as dams, bridges, and road pavements. Repairing and protecting damaged concrete structures is considered a complex process. The present paper addresses issues related to the prevention and protection of structures affected by this type of corrosion.

Aim. To evaluate methods for protecting concrete from internal alkali corrosion.

Materials and methods. The paper presents the results of determining the reactivity of aggregates from crushed stone and sand of various deposits. A method for protecting against alkali corrosion using lithium nitrate solution for impregnating concrete was tested in the process. To accelerate the impregnation process, concrete was treated with a direct current.

Results. The study demonstrates the inconsistency of results obtained through standard testing methods. The most reliable results are achieved through long-term testing (at least one year) of concrete made with the studied aggregates and cements. The study involved assessing feasibility of repairing concrete with signs of alkali corrosion through impregnation with lithium compound solutions while applying electric current.

Conclusions. The expansion of concrete due to alkali corrosion from aggregates sourced from various deposits has been investigated. The study confirmed the necessity for long-term testing of concretes using aggregates of specific suppliers, considering the characteristics of the applied cements and mineral additives. The authors examined the potential for protecting concrete from alkali corrosion through the introduction of lithium compound additives, including the use of current. The application of current accelerates the impregnation of concrete with lithium salt solutions; however, it poses certain challenges. Impregnation of the outer layer

creates conditions for cracking due to differences in deformation between the outer layer and the inner layers that have not undergone impregnation. If the reactivity of the aggregate with cement alkalis is suspected, it is recommended to introduce finely ground silica-containing additives into the concrete to bind alkalis and prevent the development of concrete damage.

Keywords: alkaline corrosion of concrete, reactive silica, test methods, lithium compounds, impregnation method, treatment by current

For citation: Rozental N.K., Chekhni G.V., Rozental A.N. Alkali-reactive aggregates: corrosion and protection of concrete. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;43(4):141–155. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-141-155](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-141-155)

Authors contribution statement

All authors made equal contributions to the study and the publication.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 01.07.2024

Revised 05.08.2024

Accepted 08.08.2024

Повреждение бетона в крупных сооружениях при правильно подобранном составе бетона и качественном выполнении бетонных работ впервые обнаружили в Калифорнии в плотине Паркер через два года после ее строительства. В бетоне появилась сетка трещин. Затем такую же сетку трещин обнаружили в устоях мостов, в бетонных покрытиях дорог и аэродромов, конструкциях зданий. Исследования бетона, в котором появлялись трещины, выполнил американский ученый Стентон [1]. Он сообщил о разрушении 10 км бетонного покрытия дороги после 2 лет эксплуатации.

Микроскопические исследования Стентона показали, что в бетоне вокруг частиц кремнистого заполнителя (гравия) образуется белая кайма, в которой содержатся щелочь и кремний. Цемент содержал более 0,6 % соединений щелочных металлов. Содержание щелочей в цементе увеличилось, когда в него стали вводить пыль цементных печей, содержащую до 20 % щелочей. Щелочи могут проникать в бетон также с грунтовыми водами. В бетоне крупный заполнитель (гравий) имел включения аморфного и тонкокристаллического опала и халцедона. Поверхность заполнителя разрушалась с образованием оболочки из геля, содержащего кремнезем, гидросиликаты кальция, натрия и калия. В присутствии воды такая оболочка набухала, создавала в структуре бетона растягивающие напряжения, в результате в бетоне возникали трещины. Такие повреждения бетона были зарегистрированы в 11 штатах США в крупных сооружениях из монолитного бетона, в 24 гидросооружениях и ряде мостов. Сооружения были построены из бетона с большим содержанием щелочей в цементе, с использованием заполнителей, содержащих реакционноспособный кремнезем. Разрушения наблюдали также в случае использования в качестве заполнителя доломитизированного известняка. Отмечалось накопление щелочей в катодных зонах фундаментов опор контактной сети.

В штатах Джорджия и Алабама (США) на 294 автодорожных мостах, возведенных из бетона, изготовленного с использованием цемента, содержащего 0,5–1 % щелочных

соединений и гравий из различных пород, образовались трещины. Белая кайма из геля была обнаружена в 170 местах. При использовании других заполнителей белая кайма отсутствовала. Образование трещин снижало морозостойкость бетона.

В последующие годы подобные повреждения бетонных сооружений были зарегистрированы во Франции, Испании, Индии, Бразилии, Дании и в ряде других стран. В Дании ввиду массового характера повреждений бетонных сооружений был создан Национальный комитет по проблеме щелочестойкости бетона [2]. В дальнейшем функцию координации исследований щелочной коррозии бетона с реакционноспособным заполнителем взял на себя РИЛЕМ.

В нашей стране исследования щелочной коррозии бетона развивались с конца 1950-х годов. В статье [3] сообщается, что при проектировании гидротехнических сооружений стали запрещать применять гравий и щебень местных месторождений, если имелось подозрение на их потенциальную реакционную способность. Были обследованы гидроэлектростанции, построенные с использованием в бетоне потенциально реакционного гравия. В бетоне плотин Дубоссарской ГЭС (на Днестре), Камской и Воткинской ГЭС на Каме щелочной коррозии после десятилетней эксплуатации не обнаружено, хотя в заполнителях содержание растворимого в щелочах кремнезема превышало 200 ммоль/л [3]. Сообщается, что в течение 30 лет в плотинах на реках Каме, Белой, Днестре и Пруте щелочная коррозия бетона отсутствовала, хотя в заполнителях было до 30–60 % кремнистых пород и от 150 до 900 ммоль/л растворимого кремнезема. Щелочная коррозия была обнаружена лишь в сооружении мола Ульяновского порта на Волге. При зимнем бетонировании сооружения использовали щелочесодержащие соли. Отсутствие повреждений от щелочной коррозии объяснили применением цементов с пуццолановыми добавками (трепела, опоки, диатомита, траса, шлаков в количестве 5–20 %). За рубежом пуццолановые добавки при изготовлении цемента длительное время не применяли, но за период 1940–1990 гг. о щелочной коррозии бетона было опубликовано более 600 статей.

В работе [3] авторами сделан вывод, что при расходе цемента 250–260 кг/м³ и содержании активных минеральных добавок в цементе в размере 20 % щелочная коррозия бетона не возникала.

В статье [4] автор сообщает об обследовании бетона гидротехнических сооружений на реках Каме, Белой, Днестре, выполненных в 1973–1979 гг. Возраст сооружений был 3–25 лет. Бетон был изготовлен на портландцементе с различным содержанием щелочей. Количество активных минеральных добавок (трепела, опоки и шлаков) составляло от 7 до 15 %. Средний расход цемента – 220–320 кг/м³. Заполнителем являлся гравий, содержащий ПРС-кремни от 15 до 60 %, и песок, включающий зерна кремня от 5 до 30 %. Согласно результатам химического анализа содержание растворимого кремнезема равнялось 108–248 ммоль/л. В зернах кремня из отложений гравия и песка реки Белой количество растворимого в щелочах кремнезема равнялось 394–454 ммоль/л. Обследования показали отсутствие щелочной коррозии бетона. Автор рекомендует полностью исключить применение в бетоне кварцитовых опалово-халцедоновых песчаников. Для бетона, подвергающегося воздействию мороза, в случае применения ПРС-заполнителей (гравия или щебня) и портландцемента с содержанием щелочей более 0,6 % исследователь рекомендует использовать портландцементы, содержащие не менее 10 % активных минеральных добавок (трепела, опоки, диатомита и т. п.) и в зависимости от содержания щелочей в цементе указывает максимальный допустимый расход цемента (табл. 1).

В отечественных работах наиболее полно результаты исследований щелочной коррозии бетона изложены в работах В.М. Москвина и Г.С. Рояка [5–8]. Авторы считают, что решать вопрос о применении в бетоне заполнителя, содержащего реакционноспособного кремнезема более 50 ммоль/л в сочетании с цементом, содержащим менее 0,6% щелочей, следует только после испытаний – измерения деформаций, которые не должны превышать 0,05% через 6 месяцев и 0,1% через 12 месяцев. Заметим, что В.М. Москвин пишет, что разрушение бетона может наступить и через 10–16 лет.

В России вопросы коррозии и защиты от щелочной коррозии регулирует ГОСТ 8269.0-97 [9]. В стандарте приведен перечень реакционноспособных со щелочами пород и минералов (табл. 2).

В [9] приведены виды потенциально реакционноспособных со щелочами пород и минералов, которые выявляются на шлифах при петрографической разборке.

В России широко распространены горные породы, содержащие минералы, способные взаимодействовать со щелочами. К ним относятся магматические породы: граниты и гранитоидиориты с деформированным кристаллическим кварцем и выветрившимися включениями

Таблица 1

Максимальный допустимый расход цемента при различном содержании щелочей в цементе [4]

Table 1

Maximum allowable cement content at various alkali contents in cement [4]

Максимальное допустимое содержание щелочей в цементе, %	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Количество портландцемента в бетоне, кг/м ³	500	400	375	330	300	270	250

Таблица 2

Виды потенциально реакционноспособных пород и минералов по ГОСТ 8269.0-97 [9]

Table 2

Types of potentially reactive rocks and minerals according to State Standard 8269.0-97 [9]

Минералы	Реакционноспособные породы	Минимальное содержание минерала, % по массе, при котором возможна щелочная коррозия бетона
Опал	Базальты и другие лавы, известняки, роговики, сланцы опаловидные	0,25
Стекло кислое аморфное	Обсидианы, перлиты, липариты, дациты, андезиты-дациты, андезиты, туфы и аналоги этих пород, имеющие стекловидную основу	3,0
Халцедон криптомикр-кристаллический	Кремни, известняки, доломиты, песчаники с опалохалцедоновым и халцедонокварцевым цементом, яшмы, роговики	5,0
Кристобалит, тридимит кристаллические	Расплавы, состоящие из кремнезема, полученные плавлением	1,0
Кварц выветрелый деформированный	Кварцевые витрофиры, кварциты, песчаники, вулканические и метаморфические горные породы	3,0

полевых шпатов; риолиты, дациты, андезиты, трахиандезиты и базальты, содержащие силикатное и базальтовое стекло, в разной степени девитрифицированное, а также немного тридимита, кристобалита и опала, обсидиан, цинериты (вулканический пепел), ретинит (богатое водой риолитовое стекло) и стекло, богатое кремнеземом, часто с микротрещинами. Они включают гнейсы и сланцы, которые характеризуются открытыми контактами зерен и содержанием деформированного решетчатого кварца, микрокварца, полевого шпата и слюдистых минералов. Опасными разновидностями метаморфических пород являются кварциты, метапесчаники и амфиболиты, содержащие опалиновый кремнезем и вторичный микрокристаллический кварц, а также кварцевые сланцы, метагрейваки, филлиты и родственные породы, содержащие опалиновый кремнезем и микрокристаллический кварц. К потенциально реакционно-опасным осадочным породам относятся известняки, доломитовые известняки и доломиты, содержащие халцедон и опал в промежуточных слоях в микрозернистых или мелкодисперсных формах.

В России горными породами, содержащими потенциально химически активный кремнезем, являются песчаники в Среднем Поволжье и отложения кремня, состоящего из гравия и песка (Урал, Восточная Сибирь, Северо-Запад европейской части страны). На Дальнем Востоке, в Приморье, на острове Сахалине и на Камчатке некоторые кислые породы (андезиты и т. д.) считаются потенциально реакционноспособными. Крупные запасы магматических пород расположены в Ленинградской области, Карелии и на Урале. Гравийно-песчаные месторождения расположены в основном в европейском регионе Российской Федерации и недоступны в большинстве районов Сибири [10, 11]. Среди месторождений, особенно в Центральной и Северо-Западной зонах России, значительные объемы щебня добываются в залежах, образовавшихся в результате ледникового перемещения горных масс. Из этих отложений сложены моренные (флювиогляциальные) отложения в Московской, Тверской, Смоленской областях и Клинско-Дмитровской гряде. Минеральный состав камней в этих отложениях довольно разнообразен. В их состав входит большое количество кремня, а также опалы и другие некристаллические и микрокристаллические минералы, в основном содержащие аморфный диоксид кремния.

Сырьем для производства щебня служат магматические, осадочные и метаморфические породы, а также крупногабаритный гравий из песчано-гравийных смесей. В других регионах (Татарстан, Краснодарский край, Московская и Нижегородская области) доступны только породы средней и низкой прочности. В Башкортостане, Пермском крае, Ростовской, Свердловской и Челябинской областях есть месторождения, пригодные для производства щебня любой марки. В европейском регионе России магматические породы представлены только в 14 из 46 источников. В некоторых других регионах доступны только осадочные породы и песчано-гравийные смеси [12]. Вулканические породы в дальневосточных регионах России изучены довольно подробно. Среди этих пород значительное число проявляет реакционную способность по отношению к щелочам цемента [13].

В общем виде механизм повреждения бетона вследствие реакции щелочей, растворяющих реакционноспособный кремнезем заполнителя (РЩК), представляют следующим образом. При затворении бетонной смеси водой щелочи, присутствующие в цементе в виде Na_2SO_4 и K_2SO_4 и соединений NC_8A_3 и $\text{KC}_{23}\text{S}_{12}$, отдают в раствор ионы натрия и калия. Состав образующегося в бетоне геля непостоянный. Анализом гелеобразных продуктов из бетона дорожного покрытия обнаружено в одном случае 2,4–3,48 % Na_2O и 6,96–7,3 %

K_2O , в другом 3,28 % Na_2O и 5,28 % K_2O . Преобладает калийная щелочь. Щелочи реагируют с диоксидом кремния, находящимся в заполнителе в аморфной или микрокристаллической форме с нарушенной кристаллической структурой, а также с глиноземом. Образуются гелеобразные продукты, способные набухать в присутствии влаги и при этом увеличиваться в объеме. Набухание геля вызывает механическое напряжение в бетоне. В результате в конструкции из бетона образуются трещины, понижается прочность бетона вплоть до его разрушения. Процесс развивается медленно. Повреждение бетона может быть обнаружено через несколько лет после бетонирования железобетонной конструкции. Картина разрушения бетона может не отличаться от картины разрушения при замораживании и оттаивании бетона или при воздействии агрессивной сульфатной среды.

В НИИЖБ были исследованы заполнители, поступавшие в Москву на заводы ЖБИ. Исследовали заполнители месторождений Абрамово, Академическое, Вяземское, Орешкинское [14]. В табл. 3 приведены результаты определения содержания растворимого SiO_2 в пробах заполнителей из указанных месторождений.

В испытаниях использовали портландцементы Белгородского, Воскресенского и Мальцовского цементных заводов (табл. 4).

Результаты испытаний тремя методами по ГОСТ 8269.0-97 [9] приведены в табл. 5.

Таблица 3

Результаты определения содержания растворимого SiO_2 в пробах из приведенных месторождений

Table 3

Results of soluble SiO_2 content determination in samples from the specified deposits

Наименование месторождения	Фракции, мм	Содержание растворимого SiO_2 , ммоль/л
Абрамово (щебень из гравия)	5-10	294, 250
	10-20	274
Академическое (щебень из гравия)	5-10	230
	10-20	377, 465
Вяземское (щебень из гравия)	5-10	339, 361, 364
	10-20	142, 302, 406, 437, 508 533, 594, 682
Орешкинское (щебень из гравия)	5-10	120, 144, 137, 338
	10-20	201, 241, 255, 261, 684
Вяземское (песок)	0-5	21, 52

Таблица 4

Минералогический состав клинкера

Table 4

Mineralogical composition of clinker

Цементный завод	Содержание минералов в клинкере, %				Содержание щелочей R_2O , %
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	
Белгородский	64	17	7	15	0,62
Воскресенский	62	12	8	13	1,05
Мальцовский	63	15	6,5	13	0,56

Таблица 5

Результаты испытаний заполнителей химическим, ускоренным и длительным методами

Table 5

Results of aggregate testing using chemical, accelerated, and long-term methods

№	Материал	Оценка реакционной способности заполнителей тремя методами по ГОСТ 8269.0-97 [9]		
		Химический метод. Количество растворимого SiO ₂ , ммоль/л, и оценка	Ускоренный метод. Деформации, %, Отличие последнего результата от трех предыдущих, % и оценка	Длительные испытания. Деформации, %, и оценка
1	Сланец камчатский	19,9 Нереакц.	0,145 – Реакц.	0,063 Реакц.
2	Кварцитопесчаник	19,2 Нереакц.	0,061 14 Нереакц.	–
3	Щебень из гравия Лиственничного месторождения	20,5 Нереакц.	0,123 – Реакц.	–
4	Щебень Рыборецкого месторождения. Карелия. Кварцитопесчаник	38,6 Нереакц.	0,072 16 Реакц.	0,019 Нереакц.
5	Песок Охотского месторождения	46,7 Нереакц.	0,192 – Реакц.	–
6	Песок Вяземского месторождения	52,0 Реакц.	0,070 17 Реакц.	0,163 Реакц.
7	Песок Вятского месторождения. Перлит	72,5 Реакц.	0,012 5 Нереакц.	–
8	Перлит Камчатский	134,0 Реакц.	0,106 – Реакц.	0,071 Реакц.
9	Пемза Камчатская	134,0 Реакц.	0,047 13 Реакц.	0,027 Нереакц.
10	Щебень из гравия Орешкинского месторождения	201,5 Реакц.	0,125 Реакц.	0,015 Нереакц.
11	Щебень из гравия Абрамовского месторождения	214,3 Реакц.	0,041 – Нереакц.	0,020 Нереакц.
12	Щебень из гравия ТПИ-1	345,0 Реакц.	0,051 – Нереакц.	0,022 Нереакц.
13	Щебень из гравия Вяземского месторождения	437,2 Реакц.	0,034 7 Нереакц.	0,016 Нереакц.
14	Щебень из гравия Вяземского месторождения	672,4 Реакц.	0,033 – Нереакц.	–

Таблица 5. Продолжение
 Table 5. Continuation

№	Материал	Оценка реакционной способности заполнителей тремя методами по ГОСТ 8269.0-97 [9]		
		Химический метод. Количество растворимого SiO_2 , ммоль/л, и оценка	Ускоренный метод. Деформации, %, Отличие последнего результата от трех предыдущих, % и оценка	Длительные испытания. Деформации, %, и оценка
15	Щебень из гравия Вяземского месторождения	533,2 Реакц.	0,064 12 Нереакц.	–
16	Щебень из гравия Академического месторождения	464,7 Реакц.	0,077 14 Нереакц.	–
17	Гравий ТПИ-2	1014 Реакц.	0,071 Трещины. Реакц.	Разрушение через 3 мес. Реакц.
18	Яшма Сахалинская	1082 Реакц.	0,022 4 Нереакц.	0,028 Нереакц.
19	Стекло Пирекс	4768 Реакц.	Трещины Через 7 сут. Реакц.	Разрушение через 3 мес. Реакц.

Химическим методом по [9] определяли количество растворимого в щелочах диоксида кремния. Ускоренными и длительными методами определяли деформации образцов. Согласно стандарту [9] критериями стойкости заполнителей к щелочам являются:

- содержание растворимого в щелочах диоксида кремния не более 50 ммоль/л. Показатель введен в ГОСТ 8267-93 [15], ГОСТ 8736-2014 [16], ГОСТ 26633-2015 [17];
- деформации расширения в ускоренных испытаниях в растворе 1М NaOH при температуре 80 °С – не более 0,1 %, отличие последнего значения деформаций от трех предыдущих – не более чем на 15 %;
- деформации расширения в длительных испытаниях (12 мес.) во влажной среде при температуре 38 °С – не более 0,04 %;
- полученные результаты испытаний не подтвердили тезис, что реакционноспособные пески не вызывают деформаций бетона.

Образцы для ускоренного метода испытаний готовили из мелкозернистого бетона состава Ц:П = 1:2,25 размерами 25 × 25 × 254 мм. Для длительных испытаний – образцы из бетонной смеси Ц:П:Щ = 1:1:2,28 размерами 70 × 70 × 280 мм.

С учетом разработок РИЛЕМ ускоренные испытания с определением деформаций выполняли в дистиллированной воде, в 1М растворе хлорида натрия и в растворе щелочи. Испытания в воде и растворе хлорида натрия не выявили преимуществ по сравнению с испытаниями в растворе щелочи.

Было испытано 19 видов заполнителей различных поставщиков с содержанием растворимого в щелочах кремнезема от 19,2 до 1082 ммоль/л. Для сравнения было использовано стекло Пирекс с содержанием растворимого кремнезема 4768 ммоль/л. Помимо химического, использовали ускоренный и длительный методы испытаний.

Анализ полученных результатов показал:

- в 9 случаях совпадение результатов, полученных ускоренным и длительным методами, и в 3 случаях не совпадение;

- результаты, полученные химическим анализом и длительными испытаниями, совпали в 5 случаях и в 7 случаях не совпали. Если принять за наиболее достоверные оценки, полученные в длительных испытаниях, то оценки, получаемые химическим и ускоренным методами, требуют дополнительной проверки в длительных испытаниях.

Испытания песков, показавших химическим методом высокую реакционную способность со щелочами, не подтвердили утверждение [3], что пески не вызывают щелочной коррозии бетона. Считаем, что пески, как и крупный заполнитель, должны подвергаться длительным испытаниям.

В.М. Москвин отмечает на поверхности бетона возникновение пятнистости при взаимодействии щелочей с реакционноспособным кремнеземом. Образование пятен на поверхности образцов наблюдалось и в наших испытаниях.

В.М. Москвин и Г.С. Рояк [8] показали, что защита бетона от щелочной коррозии, помимо прочих мер защиты, может осуществляться введением в бетон дисперсного кремнезема в виде золы-уноса 20–30 % от массы цемента, доменного шлака – 40–50 %. Максимальное расширение образцов наблюдали при введении в песок опала в количестве не более 5 % от веса песка. При введении в песок опала в нарастающем количестве сначала деформации бетона увеличиваются, затем снижаются. При содержании опала или халцедона до 100 % деформации бетона сводились к нулю. Прямая зависимость расширения бетона от содержания опала в песке не обнаружена. Это означает, что испытание песка следует выполнять при реальном содержании опала в мелком заполнителе. Прогнозирование расширения бетона в зависимости от содержания опала в песке недопустимо. При постоянном количестве опала 2%-ное расширение бетона увеличивалось с увеличением количества щелочей. С увеличением размера зерен опала 0,2; 1,4; 3,75 мм расширение бетона уменьшалось. Г.С. Рояк показал, что расширение бетона с реакционноспособным заполнителем максимально во влажных условиях, но небольшое в воде. На воздухе при влажности 50–55 % наблюдается усадка бетона.

Бетон, выдержанный на воздухе и затем помещенный в воду, увеличил расширение. При расширении 0,08 % появились трещины. Расширение при температуре 38 °С было больше, чем при 23 °С, при В/Ц = 0,5 больше, чем при 0,35 и 0,65.

Из приведенных результатов следует, что процесс щелочной коррозии достаточно сложен и любое изменение стандартов, касающихся щелочной коррозии, должно быть тщательно обосновано экспериментальными исследованиями.

Значительную работу выполнил Казанский архитектурно-строительный университет. Его специалистами изучено содержание реакционноспособного кремнезема в заполнителях и щелочей и минеральных добавок в цементах, поставляемых на стройки Татарстана [18, 19]. С учетом этих данных можно назначать составы бетона, не подверженные внутренней щелочной коррозии.

В последнее время в качестве меры защиты используются высокодисперсные добавки кремнезема или окиси алюминия. В работах [20–22] показано, что повреждение бетона вследствие РЩК можно предотвращать, вводя в состав бетона добавки лития Li_2CO_3 , LiF , LiCl , Li_2SiO_3 , LiNO_3 , Li_2SO_4 . Стандартной дозировкой предложено считать количество

солей лития, отвечающее соотношению $[Li^+] / [Na^+ + K^+] \geq 0,74$. В зависимости от качества заполнителя дозировка лития может быть увеличена в 1,5 раза. В.М. Москвин и Г.С. Рояк считают, что защитное действие лития связано с образованием малорастворимого силиката лития.

Существует проблема ремонта и защиты железобетонных конструкций, в которых процесс щелочной коррозии заполнителя вызвал образование трещин. За рубежом защиту поврежденных конструкций, корродирующих вследствие указанной причины, предложено решать путем пропитки бетона растворами литиевых соединений. Предложено три основных метода: вакуумная пропитка, пропитка с применением электрического тока, локальная пропитка. Вакуумную пропитку применяют при растрескивании бетона, пропитку с электрическим током – в отсутствии повреждения бетона и локальную – при ремонтных работах. Для ускорения процесса на стальную арматуру накладывается электрический потенциал от внешнего источника тока. Разность потенциалов между наложенным на поверхность анодом и стальной арматурой (катодом) равняется 40 В. Продолжительность обработки составляет 4–8 недель. После такой обработки содержание лития на глубине 6–19 мм равнялось 0,73–0,82 кг/м³ и на глубине 19–32 мм – 0,48–0,63 кг/м³, что считалось достаточным. При локальной обработке за один проход на поверхность наносили 0,24 л/м² при концентрации раствора 30 %. Раствор наносили по 2 раза в год в течение 3 лет. Глубина проникания раствора составляла 25–50 мм. К сожалению, в работе отсутствует информация о результатах длительных испытаний [20, 21, 23].

В НИИЖБ испытания защитного действия препаратов лития выполняли с наложением постоянного электрического тока. Использовали следующие соединения лития: гидроксид лития моногидрат $LiOH \times H_2O$; нитрат лития $LiNO_3$; формиат лития $LiCOOH \times H_2O$; ацетат лития $LiCOONH_3$. Из рассмотренных соединений наибольшее количество лития содержит гидроксид лития моногидрат – 16,59 %, а наибольшую растворимость нитрат лития – 72,6 г/100 г воды. Увеличение плотности тока до 0,5 А/дм² между анодом и катодом ускоряло накопление лития, однако вызвало повышение температуры бетона до 35–40 °С и сильную коррозию анода. Поскольку в качестве анода использовалась стальная арматура, обработка током высокой плотности становилась недопустимой [22]. В зарубежных публикациях мы не нашли информации о положительном влиянии такой обработки. Образование нерасширяющегося наружного слоя бетона, пропитанного нитратом лития, при нарастании деформаций в более глубоких слоях бетона, не содержащих лития, может вызвать растрескивание наружного слоя. В.М. Москвин указывает, что растяжение наружной оболочки конструкции может вызвать растрескивание наружного слоя бетона. Требуется соответствующая проверка.

Заключение

Обобщая приведенные результаты исследований НИИЖБ, отечественных и зарубежных авторов, можно сделать следующее заключение. Значительная часть результатов исследований щелочной коррозии бетона противоречива, что связано с большим разнообразием свойств заполнителей, цементов и средств защиты. Предупреждение опасного (до образования трещин в бетоне) расширения бетона от взаимодействия щелочей с кремнеземом заполнителя требует дальнейших исследований.

Большинство выводов связано с ограничением содержания щелочей в цементе и количеством и видом реакционноспособных компонентов в заполнителях. При этом даже при номинально одинаковом минералогическом и химическом составах горных пород свойства их компонентов в различных месторождениях могут существенно различаться.

Показано, что коррозионный процесс в бетоне может развиваться как при низком, так и при высоком содержании в крупном заполнителе и в песке реакционноспособных минералов. Приведены данные о заполнителях некоторых месторождений, содержащих породы и минералы, способные реагировать со щелочами цементов и химических добавок. Основные выводы различных исследований сводятся к ограничению количества щелочей в цементах и введению в цемент и бетон высокодисперсных кремнеземистых добавок, способных связывать щелочи, а также к введению в бетон соединений лития, главным образом нитрата лития. Другой мерой защиты считается предотвращение увлажнения бетона атмосферными осадками и капиллярного всасывания влаги из среды, окружающей бетонную конструкцию. В большинстве случаев требуются контрольные испытания бетона при подозрении на повышенное содержание щелочей в цементе и реакционной способности заполнителей.

Способ защиты железобетонных конструкций литиевыми соединениями с применением постоянного электрического тока требует дополнительного изучения. Приведены данные об испытаниях заполнителей из ряда месторождений, содержащих породы и минералы, способные реагировать со щелочами цементов и химических добавок. Требуются дальнейшие исследования стойкости бетона к воздействию щелочей с учетом особенностей бетона: содержания щелочей, реакционной способности заполнителей, добавок в бетон, заполнителей, полученных из различных месторождений.

Используемые в настоящее время химический и петрографический методы испытаний заполнителей и ускоренные методы испытаний бетона, изготовленного с указанными заполнителями, представляются недостаточными – нередко дают результаты, несовпадающие с результатами длительных испытаний бетона. Длительные испытания представляются наиболее надежными. При этом в реальных условиях эксплуатации конструкций в отдельных случаях разрушение начинается в сроки, значительно превышающие один год, т. е. существенно превышающие продолжительность нормированных длительных методов испытаний. Необходимы натурные испытания бетона в возведенных конструкциях. Следует возродить длительные натурные испытания бетонных образцов и конструкций в конкретных условиях эксплуатации. Продолжить совершенствование методик ускоренных испытаний бетона на стойкость к процессу щелочной коррозии.

Необходимы дополнительные исследования повышения стойкости бетона к щелочной коррозии путем введения в бетон воздухововлекающих, газообразующих и гидрофобизирующих добавок, оказывающих влияние на перенос водных растворов в бетоне, а также испытания бетонов с высокодисперсными кремнеземсодержащими добавками и метакатионом. Заслуживают внимания исследования, выполненные специалистами Казанского строительного университета. Ими изучены заполнители и цементы, поступающие на стройки региона, и на основании полученных результатов сделаны рекомендации по защите бетона от щелочной коррозии.

Список литературы

1. *Stanton T.E.* Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1942;107(1):54–84. <https://doi.org/10.1061/taceat.0005540>
2. *Викторов А.М., Ложкин А.Н.* Проблема щелочной коррозии бетонных плотин. Гидротехническое строительство. 1992;(11):52–53.
3. *Викторов А.М.* Причины щелочной коррозии бетонных плотин. Гидротехническое строительство. 1992;(11).
4. *Викторов А.М.* Предотвращение щелочной коррозии увлажняемого бетона. Бетон и железобетон. 1986;(8):36–38.
5. *Москвин В.М., Рояк Г.С.* Коррозия бетона при действии щелочей цемента на кремнезем заполнителей. Москва: Госстройиздат; 1962.
6. *Рояк Г.С.* О составе и гидратации щелочесодержащих фаз цемента. Цемент. 1958;(5):21–24.
7. *Рояк Г.С.* Щелочи в цементе и стойкость бетона. Бетон и железобетон. 1959;(7):295–299.
8. *Москвин В.М., Рояк Г.С.* Один из сложных вопросов коррозии бетона. Изв. Акад. стр-ва и архит. СССР. 1961;(4):48–53.
9. ГОСТ 8269.0-97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. Москва: Стандартинформ; 2018.
10. *Иванов Ф.М.* Внутренняя коррозия бетона. Бетон и железобетон. 1992;(8):8–10.
11. *Буянов Ю.Д., Харо О.Е., Буткевич Г.Р., Левкова Г.С.* Перспективы улучшения качества заполнителей бетона. Бетон и железобетон. 2005;(4):26–29.
12. *Лопатников М.И., Тедеев Т.Р.* Песчано-гравийные месторождения как возможные источники местного прочного сырья. Строительные материалы. 2007;(5):18–19.
13. *Буянов Ю.Д., Левкова Н.С.* Влияние качества заполнителей на долговечность и коррозионную стойкость конструкций. В: Долговечность и защита конструкций от коррозии: Сб. тр. Междунар. конф. Москва; 1999, с. 255–260.
14. *Розенталь Н.К., Любарская Г.В., Розенталь А.Н.* Испытание бетона на реакционноспособных заполнителях. Бетон и железобетон. 2014;(5):24–29.
15. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2018.
16. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2009.
17. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2005.
18. *Мубаракшин Р.К., Изотов В.С., Строгинов В.Ф.* О некоторых проблемах качества в строительной практике республики Татарстан. Известия Государственного Казанского архитектурно-строительного университета. 2009;(2):15–21.
19. *Изотов В.С.* Особенности щелочной коррозии и высолообразования в бетоне на смешанных вяжущих. Известия Государственного Казанского архитектурно-строительного университета. 2003;(1):68–69.
20. *Thomas M.D., Fournier B., Folliard K.J., Ideker J.H., Resendez Y.* The use of lithium to prevent or mitigate alkali-silica reaction in concrete pavements and structures. No. FHWA-HRT-06-133. Turner-Fairbank Highway Research Center; 2007.
21. *Whitmore D., Abbott S.* Use of an applied electric fields to drive lithium ions into alkali-silica reactive structure. In: Proceedings of the 11 International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Quebec, Canada; 2000, pp. 1089–1098.
22. *Розенталь Н.К., Чехний Г.В., Любарская Г.В., Розенталь А.Н.* Защита бетона на реакционноспособном заполнителе от внутренней коррозии соединениями лития. Строительные материалы. 2009;(3):68–71.
23. *McCoy W.J., Caldwell A.G.* New approach to inhibiting alkali-aggregate expansion. Journal of the American Concrete Institute. 1951;47(5):693–706. <https://doi.org/10.14359/12030>

References

1. *Stanton T.E.* Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1942;107(1):54–84. <https://doi.org/10.1061/taceat.0005540>
2. *Viktorov A.M., Lozhkin A.N.* The problem of alkaline corrosion of concrete dams. Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo. 1992;(11):52–53. (In Russian).
3. *Viktorov A.M.* Causes of alkaline corrosion of concrete dams. Hydraulic engineering construction. 1992;(11). (In Russian).
4. *Viktorov A.M.* Prevention of alkaline corrosion of wetted concrete. Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete. 1986;(8):36–38. (In Russian).
5. *Moskvin V.M., Royak G.S.* Corrosion of concrete under the action of cement alkalis on silica fillers. Moscow: Gosstroyizdat Publ.; 1962. (In Russian).
6. *Royak G.S.* On the composition and hydration of alkali-containing phases of cement. Cement. 1958;(5):21–24. (In Russian).
7. *Royak G.S.* Alkalis in cement and the durability of concrete. Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete. 1959;(7):295–299. (In Russian).
8. *Moskvin V.M., Royak G.S.* One of the difficult issues of concrete corrosion. Izvestiya Akademii stroitel'stva i arkhitektury SSSR. 1961;(4):48–53. (In Russian).
9. State Standard 8269.0–97. Mauntainous rock road-metal and gravel, industrial waste products for construction works methods of physical and mechanical tests. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
10. *Ivanov F.M.* Internal corrosion of concrete. Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete. 1992;(8):8–10. (In Russian).
11. *Buyanov Yu.D., Khara O.E., Butkevich G.R., Levkova G.S.* Prospects for improving concrete aggregates. Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete. 2005;(4):26–29. (In Russian).
12. *Lopatnikov M.I., Tedeov T.R.* Sand and gravel deposits as possible sources of local durable raw materials. Stroitel'nye Materialy = Construction Materials. 2007;(5):18–19. (In Russian).
13. *Buyanov Yu.D., Levkova N.S.* The influence of the quality of aggregates on the durability and corrosion resistance of structures. In: Durability and protection of structures from corrosion. Proceedings of the International Conference. Moscow; 1999, pp. 255–260. (In Russian).
14. *Rosental N.K., Lyubarskaya G.V., Rosental A.N.* Testing of concrete on reactive aggregates. Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete. 2014;(5):24–29. (In Russian).
15. State Standard 8267-93. Crushed stone and gravel of solid rocks for construction works. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
16. State Standard 8736-2014. Sand for construction works. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2009. (In Russian).
17. State Standard 26633-2015. Heavy-weight and sand concretes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2005. (In Russian).
18. *Mubarakshin R.K., Stroginov V.F.* About some quality problems in the construction practice of the Republic of Tatarstan. News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. 2009;(2):15–21. (In Russian).
19. *Izotov V.S.* Features of alkaline corrosion and salinity formation in concrete on mixed binders. News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. 2003;(1):68–69. (In Russian).
20. *Thomas M.D., Fournier B., Folliard K.J., Ideker J.H., Resendez Y.* The use of lithium to prevent or mitigate alkali-silica reaction in concrete pavements and structures. No. FHWA-HRT-06-133. Turner-Fairbank Highway Research Center; 2007.
21. *Whitmore D., Abbott S.* Use of an applied electric fields to drive lithium ions into alkali-silica reactive structure. In: Proceedings of the 11 International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Quebec, Canada; 2000, pp. 1089–1098.
22. *Rosental N.K., Chekhni G.V., Lyubarskaya G.V., Rosental A.N.* Protection of concrete on a reactive aggregate from internal corrosion by lithium compounds. Stroitel'nye Materialy = Construction Materials. 2009;(3):68–71. (In Russian).
23. *McCoy W.J., Caldwell A.G.* New approach to inhibiting alkali-aggregate expansion. Journal of the American Concrete Institute. 1951;47(5):693–706. <https://doi.org/10.14359/12030>

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Константинович Розенталь, д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные сооружения, конструкции и материалы», АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: rosental08@mail.ru

Nikolai K. Rozental, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Department of Buildings, Structures, and Materials, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: rosental08@mail.ru

Галина Васильевна Чехний✉, канд. техн. наук, заведующий сектором коррозии бетона лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: chehniy@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-76-97

Galina V. Chekhniy✉, Cand. Sci. (Engineering), Head of Concrete Corrosion Section, Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: chehniy@mail.ru

tel.: +7 (499) 174-76-97

Александр Николаевич Розенталь, инженер-технолог, аспирант, Москва

e-mail: top 2003@mail.ru

Aleksandr N. Rozental, Process Engineer, Postgraduate Student, Moscow

e-mail: top 2003@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author