

Внутренняя коррозия бетона как фактор снижения долговечности объектов транспортного строительства



Т. М. Петрова,
докт. техн. наук,
профессор, заведующая
кафедрой «Строительные
материалы и технологии»
Петербургского
государственного
университета путей
сообщения (ПГУПС)



Ю. А. Сорвачева,
ассистент, инженер
кафедры «Строительные
материалы и технологии»
ПГУПС

Разрушение подрельсовых железобетонных конструкций может быть вызвано процессами, возникающими внутри тела бетона. В частности, если в портландцементе превышено содержание щелочей, а также в заполнителях присутствуют реакционноспособные минералы, вероятно возникновение внутренней коррозии бетона, которая, в свою очередь, угрожает долговечности железобетонных конструкций транспортного строительства.

Внимание к проблеме повышения долговечности бетонных и железобетонных конструкций растет с каждым годом.

Подрельсовые железобетонные конструкции в процессе эксплуатации подвергаются воздействию различных, как внешних, так и внутренних факторов, которые оказывают значи-

тельное влияние на их долговечность. При этом даже небольшие отклонения от технологии производства бетонных и железобетонных конструкций, изменение химико-минералогического состава используемых материалов, а также ухудшение условий эксплуатации могут привести к значительным повреждениям.

Таблица 1. Примеры разрушения железобетонных конструкций

Вид конструкции	Местонахождение	Год строительства	Год обнаружения повреждений	Возраст, лет
Мост	США, Канзас	1934	1942	8
	США, Вашингтон	1919–1920	1923	3
	Германия	1965–1966	1968	2
Автодорожное покрытие	США, Калифорния	1927	1932	5
		1932	1941	9
	США, Вашингтон	1930–1931	1939	8–9
	США, Небраска	1931	1932	1
	Германия, Раштадт	1985	1996	11
	Германия, Дармштадт – Франкфурт	1993	2004	11
	Германия, Менхофдрайек – Франкфурт	1997	2004	7
Германия, Притувакл – Пархим	1994–1996	2002	8	
Фундамент опор контактной сети железных дорог	СССР	–	–	3
Железобетонные подрельсовые конструкции	Германия	–	–	2–5
	Россия	2001	2004	3

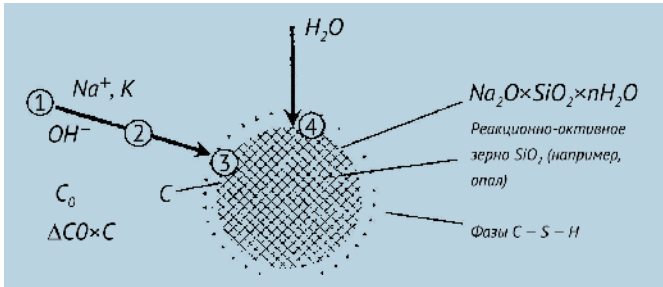


Рис. 1. Реакция «щелочь — кремниевая кислота»: 1 — образование гидроксидов щелочных металлов; 2 — диффузия ионов к месту реакции; 3 — ионный обмен и ионная реакция; 4 — водопоглощение и процесс набухания.

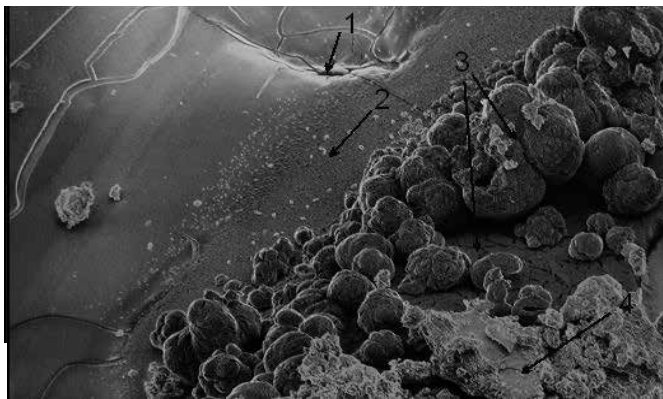


Рис. 2. Щелочесиликатная реакция в бетоне ($\times 2600$): 1 — щелочесиликатный гель; 2 — переходная зона; 3 — щелочесиликатная реакция при различных реакционных состояниях; 4 — матрица вяжущего вещества.

Судя по опыту эксплуатации транспортных конструкций из бетона и железобетона, деструктивные процессы в бетоне могут возникать при отсутствии каких-либо агрессивных факторов во внешней среде. При этом многолетние наблюдения за состоянием таких конструкций показали, что разрушения вызывались процессами, возникающими внутри тела бетона, в связи с взаимодействием щелочей цемента с аморфным кремнеземом, содержащимся в заполнителе [1].

Разрушения конструкций вследствие реакции «щелочь — кремниевая кислота»

В начале 1950-х гг. разрушающее действие этой реакции на бетон было отмечено в Австралии, а с середины 1950-х гг. разрушение конструкций зафиксировали во многих странах мира: Канаде, Дании, Исландии, Южной Африке и др.

В Дании разрушение бетона, вызываемое этой причиной, приняло настолько массовый характер, что был создан Национальный комитет по проблеме щелочестойкости бетона.

Чаще всего разрушениям подвергались такие конструкции, как мосты, автодорожные покрытия, железобетонные подрельсовые конструкции, фундаменты опор, реже — здания.

Например, в Германии повреждения и разрушения железобетонных шпал из-за внутренней коррозии бетона привели к миллиардным потерям.

В таблице 1 приведены сведения о некоторых разрушениях конструкций, обусловленных внутренней коррозией бетона [2–5].

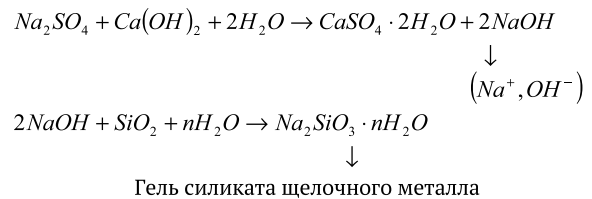
Механизм реакции между щелочами цемента и кремнеземом заполнителя

Скорость процессов внутренней коррозии и вызываемых ею изменений структуры бетона может быть различной и за-

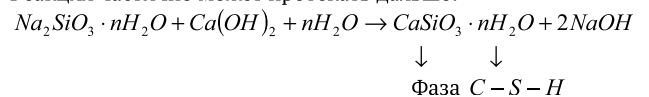
висит от ряда факторов: содержание щелочей в цементе, вид реакционноспособных составляющих в заполнителях, качество бетона, толщина конструкций, температурно-влажностные условия их твердения и эксплуатации.

Последовательность прохождения реакции «щелочь — кремниевая кислота» может быть представлена в виде схемы (рис. 1) [3].

Процесс сопровождается протеканием следующих реакций:



Реакция частично может протекать дальше:



При наличии реакционноспособных составляющих в заполнителях коррозионное взаимодействие может возникнуть и в случае действия щелочей извне или при введении в состав бетона щелочесодержащих добавок.

Как правило, при замещении кремниевой кислоты солями щелочных металлов в конце реакции вновь высвобождается щелочной металл в виде гидроксида, чтобы снова вступить в реакцию в более глубоких слоях зерна реакционноспособного заполнителя. Это обстоятельство обуславливает опасность данной реакции.

Механизм протекания щелочесиликатной реакции представлен на электронном снимке (рис. 2).

Известно, что абсолютно инертных заполнителей не существует. Все заполнители в большей или меньшей степени реагируют с цементным камнем. Реакция между кремниевой кислотой и раствором гидроксида протекает в любых случаях. Однако к повреждениям бетона она приводит только при реакционно активном SiO_2 и высоком содержании Na_2O -эквивалента. Растворимость кремниевой кислоты зависит от показателя pH среды, температуры, кристаллического состояния модификации SiO_2 . При этом содержание Na_2O и K_2O приводит к общему содержанию щелочи.

Требования к материалам для изготовления железобетонных шпал

На основе экспериментальных данных и обследований бетона эксплуатируемых сооружений в ряде европейских стран было установлено, что в большинстве случаев при использовании цементов с содержанием щелочей более 0,6 % в пересчете на Na_2O происходят характерные разрушения бетонных сооружений. В связи с этим в некоторых европейских нормах допустимый предел содержания щелочей в цементах равен 0,6 %.

В исследованиях заполнителей использовался химический метод определения количества растворимого в щелочах кремнезема. В качестве критического значения было принято 50 ммоль/л. В дальнейшем с накоплением экспериментального материала было установлено, что некоторые породы и минералы, содержащие более 50 ммоль/л растворимого в щелочах кремнезема, не вызывают опасных деформаций бетона. В связи с этим остро встает вопрос о необходимости не только строго контроля содержания щелочей в цементах и аморфного кремнезема в заполнителях, но и оценки сочетаемости применяемых материалов.

Таблица 2. Формы реакционно-способного кремнезема в породах, которые могут участвовать в реакции «щелочь – кремниевая кислота»

Реактивный компонент	Физическая форма	Горная порода, в которой обнаружен реактивный компонент
Опал	Аморфная	Опаловый известняк (например, кремнистый известняк, глина, халцедоновая разновидность кварца)
Вулканическое стекло	Аморфная	Риолит, андезит, дацит, туф, синтетическое стекло
Халцедон	Плохо кристаллизованный кварц	Кремнистый известняк, песчаник, сланец и пылевидный кварц
Кристобалит (тридимит)	Кристаллическая	Опаловые породы, андезиты, изверженные породы
Кварц	Кристаллическая	Кварцит, пески, песчаники, многие изверженные и метаморфические породы

В России требования к материалам для изготовления шпал устанавливаются в ОСТ 32.152-2000 «Шпалы железобетонные предварительно напряженные для железных дорог колеи 1520 мм Российской Федерации. Общие технические условия» и ГОСТ 10629-88 «Шпалы железобетонные предварительно напряженные для железных дорог колеи 1520 мм. Технические условия». По сравнению с техническими требованиями, принятыми в Европе для подобных конструкций в EN 13230, они более мягкие – в частности, не включают информацию о возможном проявлении внутренней коррозии бетона, бетонных и железобетонных конструкций.

Если европейскими нормами предусмотрено обязательное определение щелочестойкости мелких и крупных заполнителей, то на предприятия, выпускающие шпалы для Российских железных дорог, поставляются цементы, отличающиеся по химико-минералогическо-

му составу и содержанию щелочей. Так, минимальное содержание щелочей в них в пересчете на Na_2O соответствует 0,5, максимальное – более 1,2, что в 2 раза превышает допустимый предел содержания щелочей в цементе, рекомендуемом европейскими производителями для обеспечения безопасного применения реакционноспособного заполнителя.

В паспортах на заполнители, поставляемые на российские предприятия-изготовители, чаще всего отсутствуют сведения о наличии аморфных разновидностей диоксида кремния, растворимых в щелоках. Между тем известны случаи, когда повреждение конструкций было вызвано ненадлежащим сочетанием щелочности цементов и состава заполнителей.

Факторы, влияющие на протекание реакции «щелочь – кремниевая кислота»

Большинство горных пород, применяемых в качестве заполнителей для

бетона, характеризуются значительным содержанием кремнезема. Было обнаружено, что расширение бетона, происходящее вследствие реакции «щелочь – кремниевая кислота», зависит от различных форм кремнезема и гранулометрического состава реакционных частиц [2; 6; 7].

В таблице 2 приведен перечень основных минералов и пород, которые могут встретиться среди заполнителей для бетона и являются потенциально реакционноспособными.

По данным исследований, опал признается наиболее реакционноспособным минералом и его присутствие в заполнителе в количестве даже до 1 % может привести к процессам разрушения бетона [4].

На рис. 3 представлена зависимость расширения образцов мелкозернистого бетона в возрасте 6 месяцев от содержания потенциально реакционноспособных минералов в заполнителе.

Механизмы, вызывающие реакцию «щелочь – кремниевая кислота» и, как следствие, расширение бетона, достаточно сложны. Общеизвестно, что повреждение из-за этой реакции возможно при наличии трех условий:

- достаточное количество щелочей (Na и/или K);
- реакционная форма кремнезема в заполнителе для бетона;
- достаточная относительная влажность воздуха (не менее чем 80 %).

На причинно-следственной диаграмме К. Ишикавы представлены факторы, которые способствуют возникновению и развитию реакции «щелочь – кремниевая кислота» (рис. 4).

Представленная диаграмма дает возможность оценить и по возможности устранить факторы, способствующие возникновению и развитию разрушительных последствий реакции «щелочь – кремниевая кислота».

Поскольку щелочная коррозия зависит от состава как цемента, так и заполнителя, на ее развитие оказывает влияние соотношение между ними, а также условия эксплуатации сооружений. Например, влажность существенно сказывается на скорости этого процесса, о чем свидетельствуют разрушения мостов, железобетонных подрельсовых конструкций, тоннелей и т. д. Если железобетонные конструкции были изготовлены при низком водоцементном отношении и они эксплуатировались при низкой

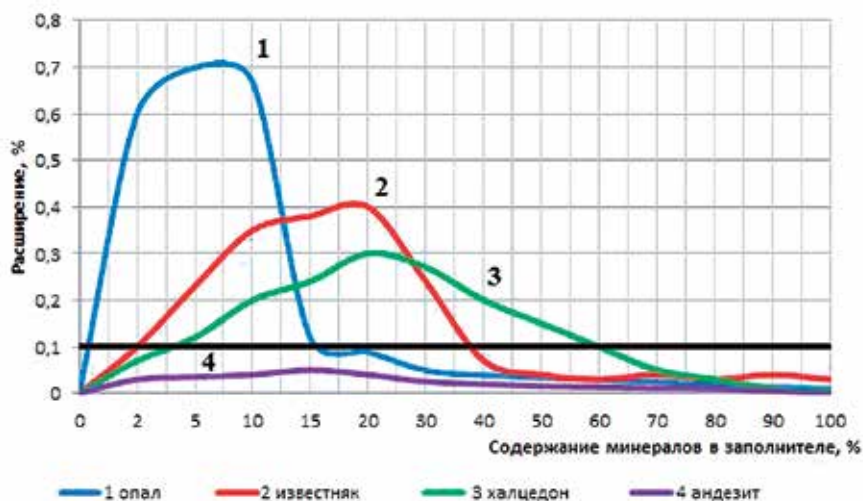


Рис. 3. Влияние содержания различных минералов и пород на расширение образцов мелкозернистого бетона в возрасте 6 месяцев: 1 – опал; 2 – известняк; 3 – халцедон; 4 – андезит.

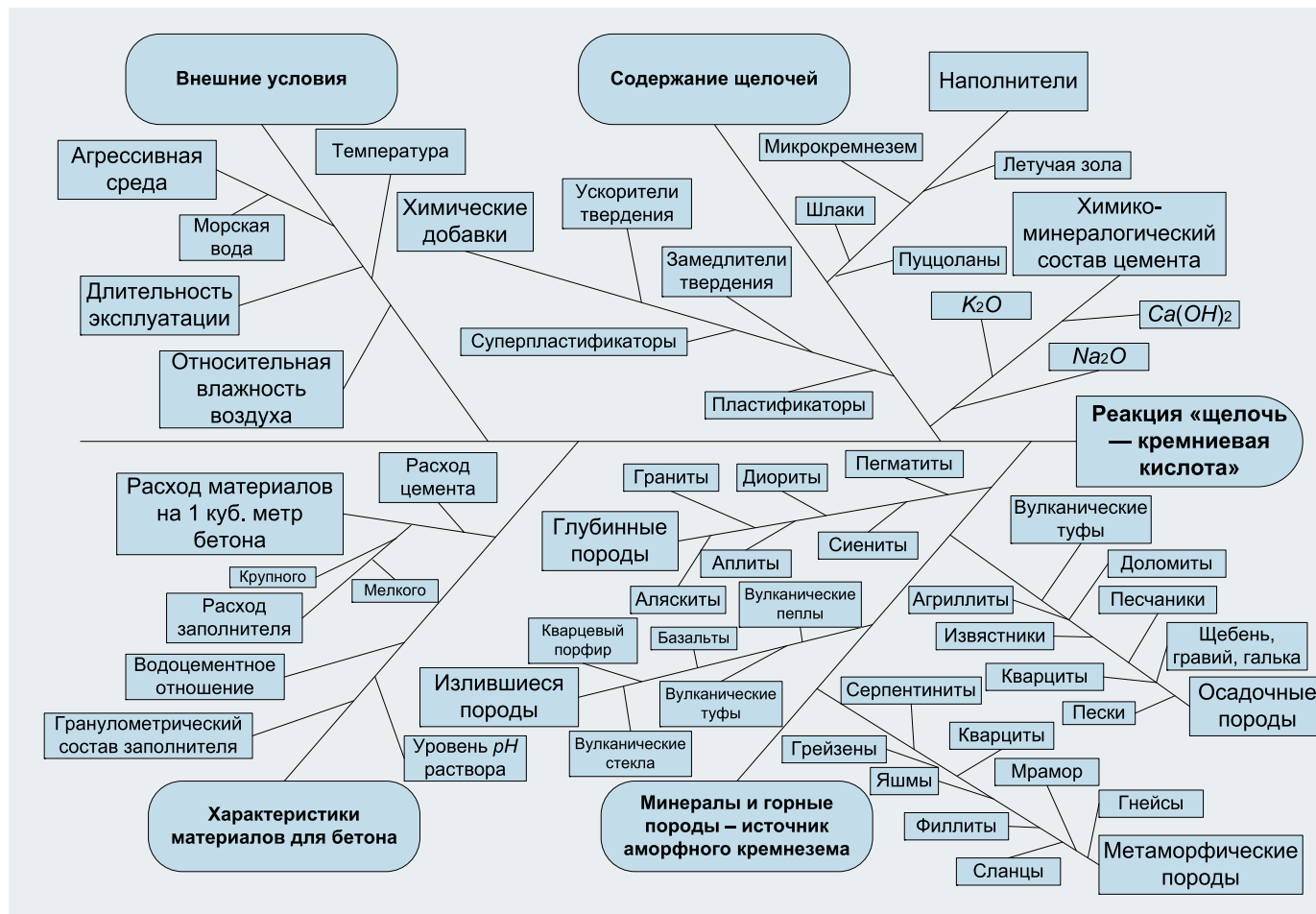


Рис. 4. Факторы, влияющие на возникновение реакции «щелочь — кремниевая кислота»



Рис. 5. Повреждения шпал



Рис. 6. Трещины на шпалах (крупные и мелкие сетевидные)

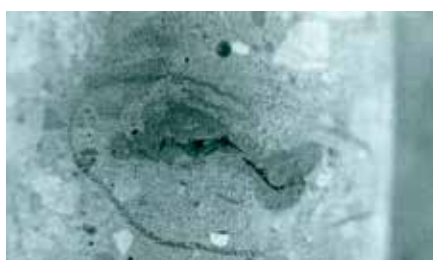
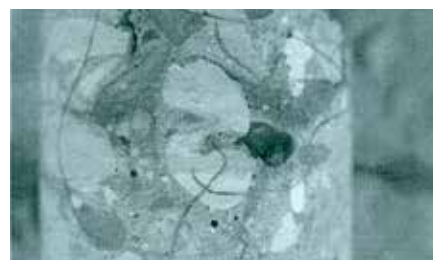


Рис. 7. Зерна крупного заполнителя, разрушившиеся с выделением геля



относительной влажности воздуха, деформации расширения не наблюдаются, однако повышение влажности приводит к развитию таких деформаций [8].

Использование химических добавок в составе бетонной смеси, с одной стороны, позволяет снизить водоцементное отношение, но, с другой стороны, оказывает непредсказуемое воздействие на развитие деформаций расширения бетона и, как следствие, внутренней коррозии бетона.

Разрушение железобетонных шпал

Мы проанализировали причины разрушения шпал, которое было отмечено через 3 года после их укладки в путь.

Разрушение сопровождалось появлением трещин с разной шириной раскрытия (рис. 5, 6).

На фотографиях образцов-кернов, выбуренных нами из конструкций при обследовании одного из участков пути, видны зерна крупного заполнителя, разрушившиеся с выделением геля, что является одними из характерных признаков реакции «щелочь — кремниевая кислота» (рис. 7).

Исследования реакционной способности заполнителя ускоренным ме-

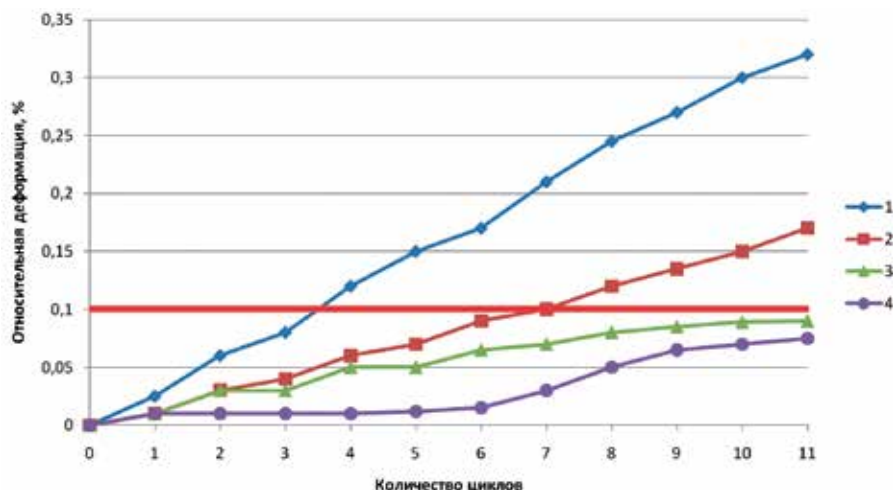


Рис. 8. График зависимости относительной деформации бетона от времени выдержки в 1М растворе NaOH при $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Состав образцов: 1 – портландцемент, содержание щелочей 0,89, заполнитель 1 (исходные материалы, на которых были изготовлены поврежденные шпалы); 2 – тот же цемент, заполнитель 2; 3 – тот же цемент, заполнитель 3; 4 – тот же цемент, заполнитель 4.

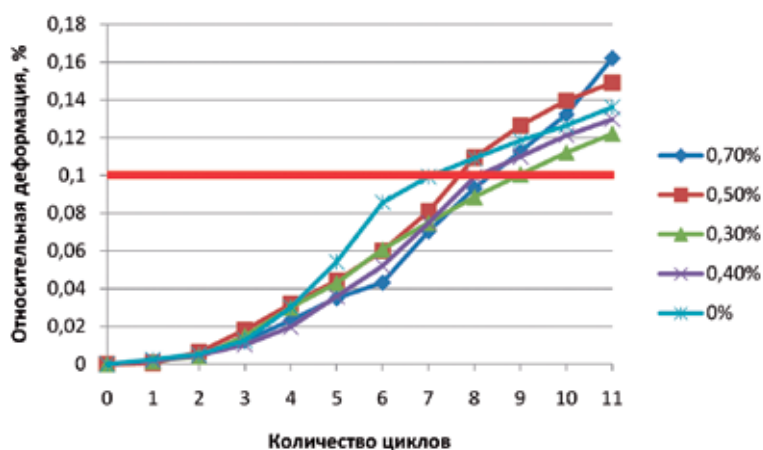


Рис. 9. График зависимости относительной деформации бетона от количества введенной добавки

тодом с измерением деформаций на исходных материалах, применявшихся на предприятии, подтвердили, что деформации расширения образцов превышали 0,1 % – предельную границу реакционной способности заполнителя (рис. 8, зависимость 1). Для сравнения на этом же графике приведены данные об относительной деформации бетонов, изготовленных на других по составу заполнителях (зависимости 2–4).

Анализ показал, что только два вида заполнителя (3 и 4) позволяют избежать проявления внутренней коррозии бетона и снижения долговечности конструкций при использовании в качестве вяжущего вещества цемента с повышенным содержанием щелочей.

В ходе исследования возможности снизить потенциальную реакционную способность щелочей цемента с кремнеземом заполнителя в состав бетонной смеси на основе исходных материалов был введен один из гиперпластифика-

торов, изготовленных на основе поликарбоксилатов, используемый при производстве железобетонных конструкций в количестве от 0,3 до 0,7 % (рис. 9).

Судя по результатам исследования, введение гиперпластификатора в таком количестве не исключает протекания реакции «щелочь – кремниевая кислота», а при увеличении количества добавки усиливаются деформации расширения бетона. Для снижения расхода цемента и увеличения плотности материала можно использовать добавку в количестве 0,3–0,4 %, но в сочетании либо с заполнителем, содержащим меньшее количество аморфного кремнезема, либо с цементом с низким содержанием щелочей.

Заключение

Результаты исследования указывают, что необходимо строго контролировать как содержание щелочей в цементах, используемых для изготовления шпал,

так и наличие в заполнителях реакционноспособных минералов. Эти данные должны указываться в паспортах качества материалов, поступающих на заводы по производству железобетонных шпал. При производстве железобетонных шпал необходим также строгий контроль расхода цемента на 1 кубометр бетона, так как высокое содержание цемента в бетоне не только не экономично, но и способствует протеканию реакции «щелочь – кремниевая кислота».

Необходимым условием высокой долговечности транспортных конструкций является оценка факторов, влияющих на возможность возникновения щелочесиликатной реакции. С целью предупреждения разрушительных последствий внутренней коррозии бетона материалы, применяемые для изготовления железобетонных конструкций транспортного строительства, следует оценивать с точки зрения совместимости, т. е. потенциальной способности крупного и мелкого заполнителя реагировать со щелочами цемента. Кроме того, необходим анализ влияния химических добавок не только на физико-механические свойства, но и на деформации расширения бетона. ■

Литература

1. Stanton T. E. Influence of cement and aggregate on concrete expansion. Engineering News Record, Feb., n 1, 1940.
2. Рояк Г. С. Внутренняя коррозия бетона. Труды ЦНИИС. Вып. 210. М.: ЦНИИС, 2002. 156 с.
3. Штарк И., Вихт Б. Долговечность бетона / пер. с нем. / под ред. П. Кривенко Киев: Оранта, 2004. 301 с.
4. Жуков Ю. А. Влияние гидроокиси кальция на развитие деструктивных процессов в бетоне при щелочной коррозии. Автореф. ... канд. техн. наук. Л.: ЛИИЖТ, 1972. 19 с.
5. Stark J. Alkali-Kieselsäure-Reaktion. F.A. Finquer Institute für Baustoffkunde. 2008. 139 p.
6. Midness S., Young J. F., Darwin D. Concrete. 2nd Ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 2002. 142–154 pp.
7. Stanton T. E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. Proc., Amer. Soc. Civ. Eng., 1940. 1781–1811 p.
8. Рамачандан В., Фельдман Р, Бюудуэн Дж. Наука о бетоне. М.: Стройиздат, 1986. 278 с.