

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 666.97 (063)

*КРАМАР ЛЮДМИЛА ЯКОВЛЕВНА, докт. техн. наук, профессор,
kramar-l@mail.ru*

*Южно-Уральский государственный университет,
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76,*

*КУДЯКОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
kudyakow@mail.tomsknet.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2,*

*ТРОФИМОВ БОРИС ЯКОВЛЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
tbya@mail.ru*

*ШУЛДЯКОВ КИРИЛЛ ВЛАДИМИРОВИЧ, аспирант,
kirill-shuld@ya.ru*

*Южно-Уральский государственный университет,
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76*

ЦЕМЕНТНЫЕ ТЯЖЕЛЫЕ БЕТОНЫ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА СКОРОСТНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

При строительстве скоростных автомобильных дорог используются цементные бетоны с повышенной прочностью и стойкостью к различным внешним циклическим воздействиям. В статье приведены результаты исследования влияния пластифицирующих добавок СП-1, Glenium ACE 430, комплексных добавок СП-1 + микрокремнезем и Glenium ACE 430 + микрокремнезем на свойства цементных бетонов при различных механических, в том числе и циклических, воздействиях. Установлено, что наибольший прирост прочности на сжатие, растяжение при раскалывании и изгибе, а также стойкость в условиях циклического механического воздействия достигается в цементных бетонах с комплексной добавкой Glenium ACE 430 + микрокремнезем. Циклические механические нагрузки бетонов вызывают кристаллизацию аморфизированных гидросиликатов кальция или перекристаллизацию первичных гидратов с выделением портландита. Комплексная добавка Glenium ACE 430 + микрокремнезем способствует сохранению аморфизированной структуры из гидросиликатов кальция и повышению стойкости бетонов при циклическом механическом воздействии на покрытиях скоростных автомобильных дорог.

Ключевые слова: цементный бетон; поликарбоксилат Glenium ACE 430; суперпластификатор СП-1; микрокремнезем; водопоглощение; прочность на сжатие, растяжение при раскалывании и изгибе, циклических нагружениях; долговечность; микроструктура.

*LYUDMILA YA. KRAMAR, DSc, Professor,
kramar-l@mail.ru*

*National Research South Ural State University,
76, Lenin Ave., 454080, Chelyabinsk, Russia,*

*ALEKSANDR I. KUDYAKOV, DSc, Professor,
kudyakow@mail.tomsknet.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia,*

*BORIS YA. TROFIMOV, DSc, Professor,
tbya@mail.ru*

*KIRILL V. SHULDYAKOV, Research Assistant,
kirill-shuld@ya.ru*

*National Research South Ural State University,
76, Lenin Ave., 454080, Chelyabinsk, Russia*

CEMENT HEAVY CONCRETES FOR HIGHWAY CONSTRUCTION

Cement concretes with increased strength and resistance to external cyclic loads are used in highway construction. The paper presents investigation results on the influence of SP-1 and Glenium ACE 430 plasticizers and SP-1 + silica fume, Glenium ACE 430 + silica fume complex additives on the properties of cement concrete under various mechanical exposures including the cyclic load. Cyclic load tests show that the greatest increase in compressive strength, splitting and bending tension and also in the resistance to cyclic loads is achieved in cement concretes with Glenium ACE 430 + silica fume additive. Cyclic mechanical loads cause the crystallization of amorphized calcium hydrosilicates or recrystallization of primary hydrates with the release of portlandite. Glenium ACE 430 + silica fume additive facilitates the retention of the amorphized structure of calcium hydrosilicates.

Keywords: cement concrete; Glenium ACE 430 polycarboxylate; SP-1 superplasticizer; silica fume; water absorption; compressive strength; splitting tension; bending tension; cyclic load; durability; microstructure.

Введение

Современное развитие России зависит от состояния транспортной инфраструктуры. Увеличивается потребность в высокоскоростных автомобильных дорогах. Интенсивность грузоперевозок автомобильным транспортом с каждым годом возрастает, а нагрузка на автомобильных дорогах составляет в среднем от 2500 до 7000 автомобилей в сутки. Значительная часть автомобильных магистралей имеет асфальтобетонное покрытие с низким сроком эксплуатации. Фактический межремонтный срок службы дорог федеральной дорожной сети составляет 3–4 года [1, 2]. По данным Росавтодора, только 52,8 % федеральных дорог отвечают современным нормативным требованиям [3].

Перспективными в строительстве автомобильных дорог за рубежом являются покрытия из цементных тяжелых бетонов, обладающие повышенными прочностными характеристиками и долговечностью. При высоких уровнях нагрузки цементобетонные покрытия служат в 2,5–4 раза больше, чем асфальтобетонные [4, 5]. В развитых странах автомобильные дороги с покрытиями из цементных бетонов составляют: в Бельгии 41 %, США 35 %, Германии 31 %, Китае 22 %, а в России только 9 % [3, 5].

Цементобетонные дорожные покрытия обладают следующими преимуществами [1, 3, 5]:

- повышенный срок службы – от 25 до 50 лет (долговечность асфальтобетонных покрытий не превышает 12 лет);

- стоимость 1 км автомобильных дорог с цементобетонным покрытием примерно 26 млн руб., а асфальтобетонных – 25 млн руб. В перспективе цементобетонные дорожные покрытия будут стоить на 25 % дешевле асфальтобетонных за счет длительного срока безремонтной эксплуатации;

- высокий коэффициент сцепления колес с основанием и устойчивость к истиранию;

- высокая прочность на сжатие и изгиб, при малой деформативности, независимо от температуры и влажности среды, что обеспечивает отсутствие колеи при эксплуатации цементобетонных дорог.

В настоящее время в России вопрос строительства автомобильных дорог с высокими эксплуатационными характеристиками является актуальным. Планируется до 2020 г. построить не менее 120 000 км дорог с бетонными покрытиями. Покрытия автомобильных дорог должны быть морозо- и химически стойкими, а также выдерживать длительные циклические нагружения на сжатие и изгиб [6, 7]. Производство высокофункциональных цементных бетонов с классом по прочности на сжатие В60 и выше в настоящее время не вызывает затруднений [8, 9]. Принято считать, что стойкость покрытий автомобильных дорог из цементных бетонов к кратковременным циклическим воздействиям хорошо согласуется с его прочностью при изгибе. Эти воздействия формируют в цементном камне бетона напряжения, которые вызывают и развивают трещины. Исходя из этого, основной задачей при разработке цементных бетонов для строительства скоростных автомобильных дорог является увеличение прочности бетона при изгибе ($R_{изг}$) с 4–5 до 6–6,5 МПа, что позволит повысить срок службы дорожного покрытия с 20 до 50 лет [5, 8, 10].

Известны различные способы увеличения прочности при изгибе дорожных бетонов – в основном, это микроармирование фиброй [10–14]. Однако увеличить прочностные характеристики бетона можно также путем модифицирования структуры цементного камня в бетоне химическими или электрофизическими способами [6–9, 15].

В различных условиях эксплуатации дорожного бетона гидратные новообразования, формирующие структуру цементного камня, а именно гидросиликатный гель и кристаллические соединения (гидроалюминаты кальция, портландит и этtringит), в различной степени откликаются на воздействия окружающей среды, в том числе и циклические механические нагружения. Например, гидросиликатный гель способствует уменьшению концентрации напряжения,

что приводит к повышению прочности, а также долговечности цементных материалов [15]. Кристаллические фазы являются концентраторами напряжения, что способствует образованию трещин и разрушению структуры. Установление закономерностей по влиянию факторов на кристаллизацию цементного геля и разрушение цементного камня при циклических воздействиях является важной задачей в технологии высокофункциональных бетонов [6, 8].

Цель работы – исследование влияния различных модифицирующих добавок на физические и механические характеристики бетонов при различных режимах внешнего воздействия.

Материалы и методы

Для проведения экспериментальных исследований использовались следующие материалы:

– цемент ЦЕМ I 42,5 Н, НГ 28 %, изготовитель ООО «Дюккерхофф Коркино цемент» (ГОСТ 31108–2016);

– гранодиоритовый щебень Новосмолинского карьера фракция 5–10, марка по прочности – 1400, истираемости – И1 и морозостойкости – F400 (ГОСТ 8267–93);

– песок месторождения «Хлебороб», крупный, $M_{кр} = 2,73$ (ГОСТ 8736–2014);

– суперпластификатор на основе поликарбоксилата – Glenium ACE 430 (ACE), изготовитель фирма BASF, Германия;

– нафталинформальдегидный суперпластификатор (СП-1), изготовитель ООО «Полипласт УралСиб», г. Первоуральск;

– гранулированный микрокремнезем (МК) с пуццолановой активностью 1575 мг/г и $S_{уд} = 1500$ м²/кг, г. Новокузнецк (ТУ 5743-048-02495332–96).

Объект исследований – тяжелый цементный бетон по ГОСТ 26633–2015. Эффективность состава тяжелого бетона с модифицирующими добавками устанавливалась по ГОСТ 30459–2008. Испытание бетона на водопоглощение проводилось по ГОСТ 12730.3–78, а определение прочностных характеристик – по ГОСТ 10180–2012. Циклические прочностные испытания проводили на образцах призмах при уровне нагружения 0,8–0,9 от разрушающей нагрузки на испытательной машине WAW-600kN. Физико-химические исследования цементного камня в бетоне после циклических нагружений проводились с использованием дериватографа системы Luxx STA 409 PC немецкой фирмы Netzsch и электронного микроскопа JSM-6460LA.

Результаты исследования

Для проведения исследований использовалось пять серий бетонных образцов: контрольный бездобавочный, с поликарбоксилатным ACE и нафталинформальдегидным СП-1 пластификаторами, а также с комплексными добавками ACE+МК и СП-1+МК. Контрольный состав бетона с содержанием цемента 480 кг на 1 м³, В/Ц = 0,33 при подвижности смеси П2.

Свойства бетонов оценивались по показателям: водопоглощение (открытая пористость), прочность бетона на сжатие, растяжение при раскалывании и изгибе, а также по стойкости к циклическим нагружениям.

Результаты исследования водопоглощения бетонных образцов в возрасте 28 сут, а также 2 и 4 года приведены на рис. 1.

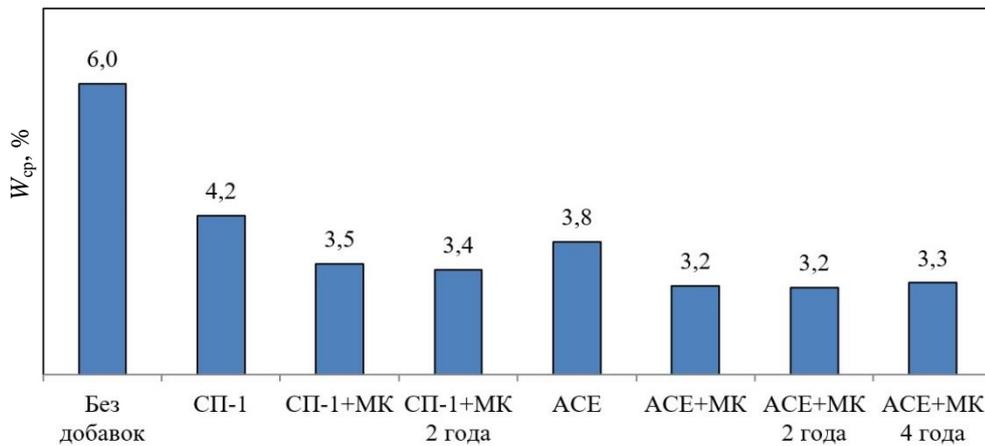


Рис. 1. Водопоглощение бетонных образцов

Из полученных данных следует, что при введении в бетонную смесь суперпластификаторов АСЕ и СП-1 водопоглощение бетона снизилось с 6,0 до 4,2 и 3,8 % соответственно. Учитывая прямую связь значений водопоглощения и открытой пористости, можно сделать вывод о существенном уменьшении в модифицированном бетоне количества открытых пор. Если рассматривать влияние отдельно пластифицирующих добавок на открытую пористость, то наибольшей эффективностью по снижению водопоглощения обладает поликарбоксилатный пластификатор. Наименьшее водопоглощение имеют бетоны, модифицированные комплексными добавками АСЕ+МК и СП-1+МК. Водопоглощение бетонных образцов с этими добавками, хранившихся при стандартных условиях (температура 20 ± 2 °С и относительная влажность воздуха 95 ± 5 %), в течение 28 сут почти в 2 раза меньше, чем в бездобавочном бетоне. Водопоглощение бетонных образцов через 2 и 4 года остается примерно на одном уровне. Ранее проведенными исследованиями [7] было установлено, что при введении в бетонную смесь суперпластификатора СП-1 формируется структура цементного камня из гидросиликатов кальция, склонных к кристаллизации. Добавка же АСЕ способствует аморфизации структуры цементного камня бетона, снижению скорости его старения при циклических воздействиях в процессе эксплуатации. При этом повышается морозостойкость и стойкость к попеременному увлажнению и высушиванию.

Результаты исследований влияния модифицирующих добавок на прочностные характеристики бетона представлены на рис. 2–5.

Используемые пластифицирующие добавки по-разному влияют на прочностные показатели бетона при сжатии (рис. 2). Так, введение добавки АСЕ способствует некоторому увеличению прочности на сжатие по сравнению с добавкой СП-1. Эта закономерность сохраняется и при введении комплексной добавки СП-1 + МК, а также при увеличении времени твердения.

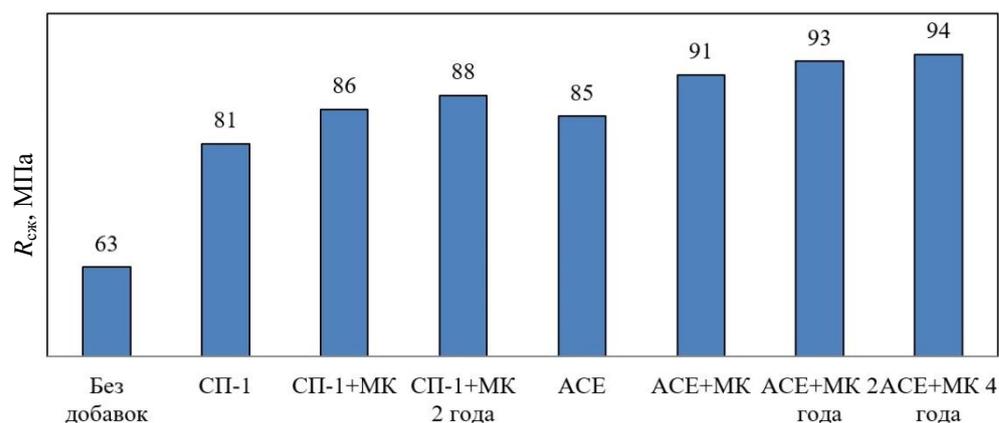


Рис. 2. Прочность бетона на сжатие

Из анализа результатов испытания образцов бетона на растяжение при изгибе (рис. 3) следует, что в бетонах с комплексной добавкой АСЕ+МК прочность при изгибе повышается на 40 % по сравнению с контрольными образцами. Чуть меньше прирост прочности наблюдается в бетонах с комплексной добавкой СП-1+МК.

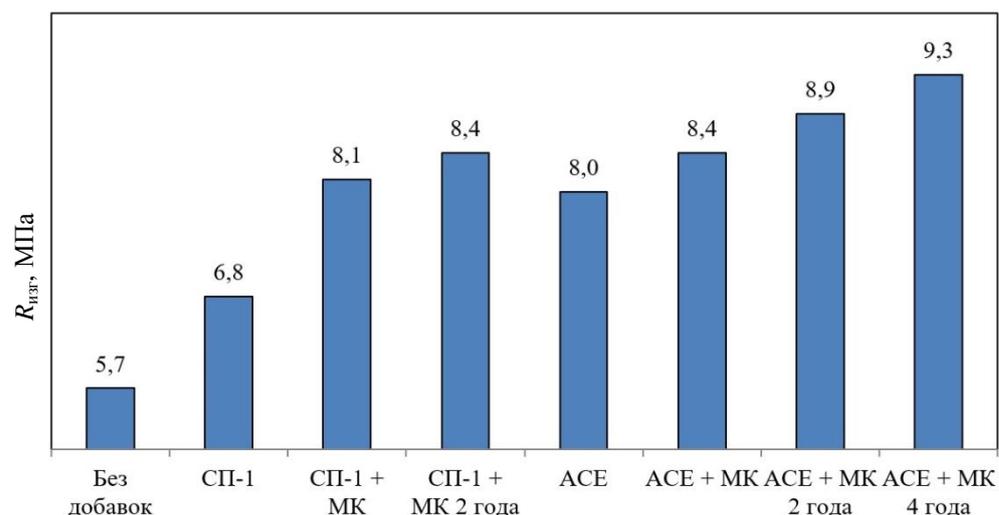


Рис. 3. Прочность бетона на растяжение при изгибе

Результаты испытаний и оценки прочности на растяжение при раскалывании приведены на рис. 4.

В образцах бетона, модифицированного добавкой АСЕ, значение прочности на растяжение при раскалывании выше, чем в бетоне с добавкой СП-1. При введении комплексной добавки АСЕ+МК обеспечивается максимальное значение прочности бетона на растяжение при раскалывании. При длительном твердении, до 4 лет, в бетонах с добавкой АСЕ+МК получен прирост прочно-

сти при раскалывании на 10–15 %, а для бетонов с добавкой СП-1+МК эта характеристика с течением времени изменяется незначительно.

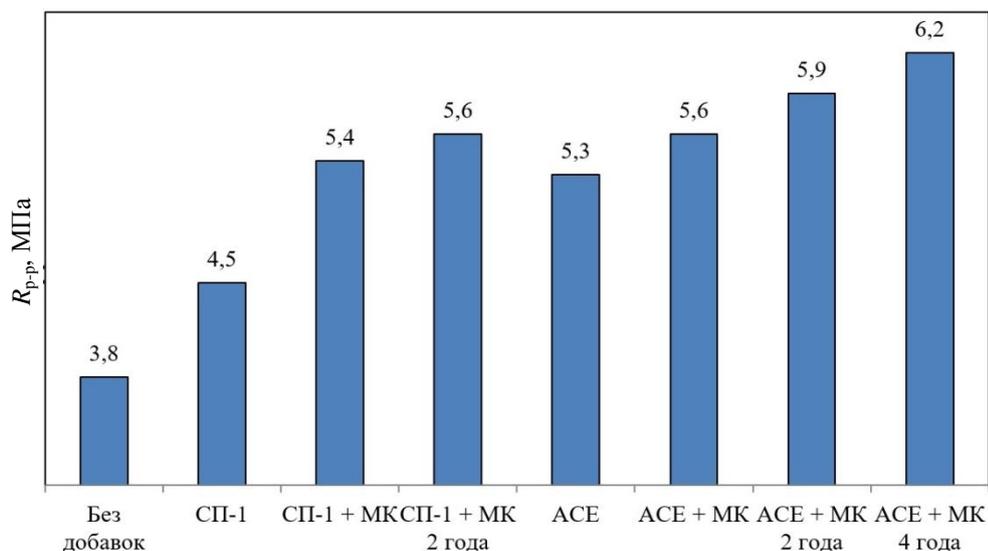


Рис. 4. Прочность бетона на растяжение при раскалывании

Установленные закономерности изменения механической прочности бетонов с модифицирующими добавками подтвердились и при испытании образцов призм. Полученные результаты по призмочной прочности приведены на рис. 5.

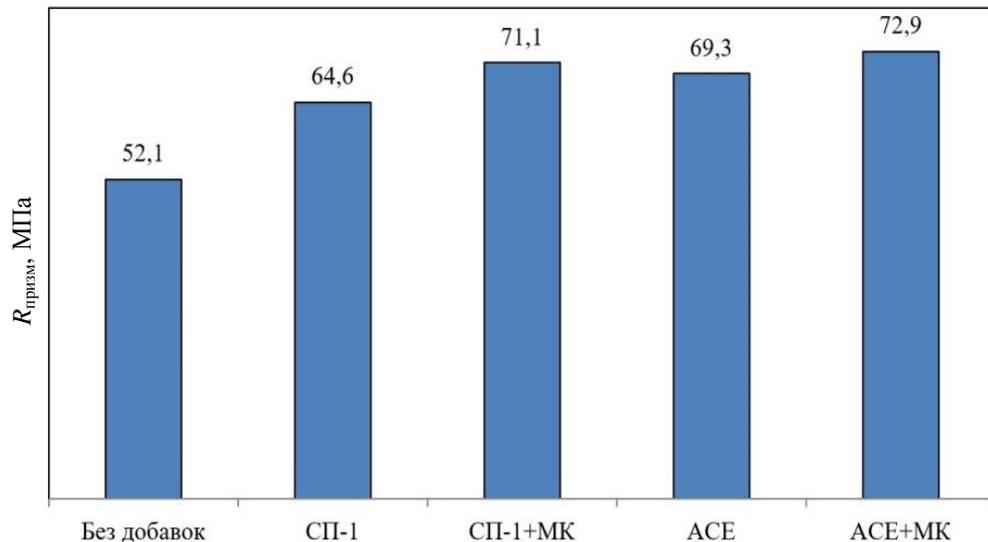


Рис. 5. Призмочная прочность бетона

Влияние циклического воздействия на прочностные характеристики бетонов с модифицирующими добавками определялось с использованием бе-

тонных образцов призм при максимальной нагрузке 0,9 от разрушающей. Результаты исследований приведены на рис. 6. Наибольшее количество циклов нагружения выдержали образцы бетона с комплексными добавками АСЕ+МК (241) и СП-1 +МК (151), что характеризует их высокую стойкость к разрушению и долговечность. Для установления механизма разрушения бетона с модифицирующими добавками при циклических механических воздействиях проводили электронно-микроскопические и дифференциально-термические исследования изменения структуры цементного камня бетона (рис. 7 и 8).

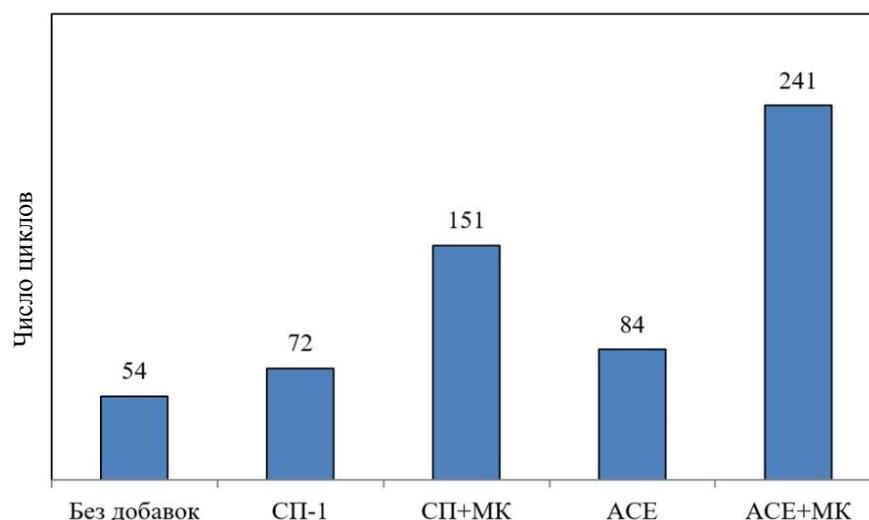


Рис. 6. Устойчивость образцов бетона при циклическом нагружении

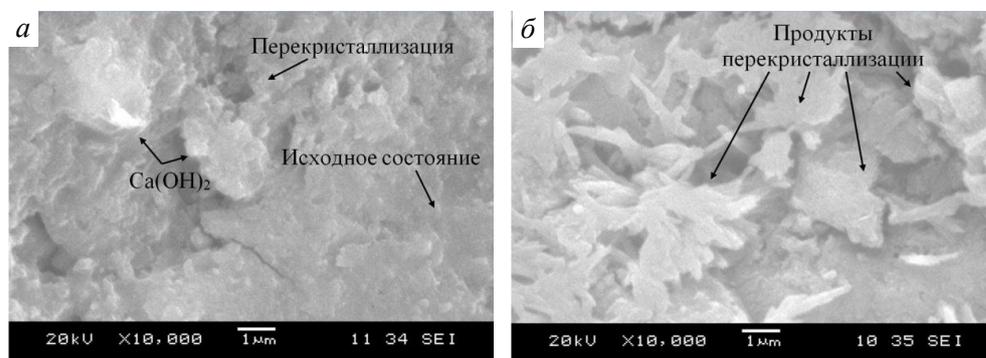


Рис. 7. Микроструктура бетонов после циклического испытания при нагрузке 0,9 $R_{\text{призм}}$:
 а – АСЕ+МК; б – СП-1+МК

Данные о структуре и фазовом составе цементного камня свидетельствуют о том, что благодаря преимущественно аморфному состоянию цементного камня с комплексной добавкой АСЕ+МК бетон лучше противостоит циклическим воздействиям по сравнению с более закристаллизованной структурой с добавкой СП-1+МК.

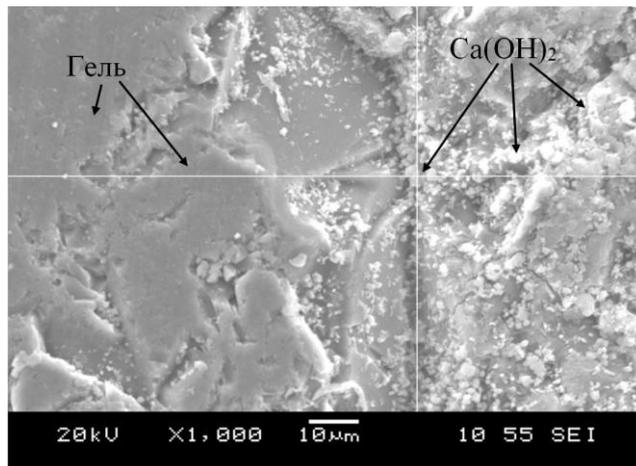


Рис. 8. Микроструктура бетона с добавкой АСЕ+МК после 1000 циклов нагружения до $0,8 R_{\text{призм}}$

После 1000 циклов внешнего механического воздействия при нагрузке до 0,8 от разрушающей (без разрушения образца) в цементном камне бетона с комплексной добавкой АСЕ+МК интенсифицируются процессы кристаллизации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (рис. 8). По данным дифференциально-термического анализа в цементном камне после длительных циклических механических воздействий количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$ повысилось с 2,1 до 4,5–5 %.

Структура цементного камня бетона, модифицированного комплексной добавкой АСЕ+МК, длительное время остается аморфизированной [15], что обеспечивает ему высокую устойчивость к циклическим воздействиям. В бетонах с комплексной добавкой СП-1+МК изменяется структура цементного камня, что влияет на прирост прочностных характеристик и стойкость к разрушению (долговечность). Таким образом, разрушение цементного камня бетона при циклических механических воздействиях начинается с процессов кристаллизации малоустойчивых фаз и перекристаллизации структурообразующих минералов, что приводит к снижению эксплуатационных характеристик покрытия цементных автомобильных дорог.

Разработаны рекомендации по практическому использованию научных результатов в технологии цементных бетонов для строительства высокоскоростных автомобильных дорог.

Заключение

1. Цементные бетоны с добавкой АСЕ имеют меньшее водопоглощение по сравнению с бетонами, модифицированными добавкой СП-1, при одинаковых В/Ц и подвижности бетонной смеси.

2. Комплексные добавки, включающие суперпластификатор и микрокремнезем, являются более эффективными модификаторами структуры цементного камня по сравнению с пластификаторами. Наибольший прирост кубиковой и призмной прочности на сжатие, растяжение при раскалывании и изгибе получен в бетонах, модифицированных комплексной добавкой АСЕ+МК.

3. При длительном циклическом нагружении цементных бетонов с комплексными добавками наблюдается кристаллизация или перекристаллизация первичных гидратных фаз цементного камня.

4. В бетонах с комплексной добавкой АСЕ+МК при длительных циклических механических воздействиях в большей степени сохраняется аморфная структура гидросиликатов, по сравнению с бетонами, модифицированными СП-1+МК, и обеспечивается более высокая стойкость от циклического механического разрушения покрытий автомобильных дорог.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Якобсон, М.Я.* Некоторые проблемы обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций / М.Я. Якобсон // Популярное бетоноведение : сб. тезисов Международной конференции. – СПб., 2007. – С. 41–42.
2. *Базилевич, А.Л.* Температурная сегрегация асфальтобетонных смесей при строительстве дорожных покрытий / А.Л. Базилевич, А.И. Кудяков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2009. – № 1. – С. 116–122.
3. *Актуальность и перспективы применения цементобетона* в дорожном строительстве / М.Я. Якобсон, А.А. Кузнецова, А.С. Введенская, А.В. Бычков // Системные технологии. – 2016. – № 1 (18). – С. 132–140.
4. *Трофимов, Б.Я.* Бетон для современных автомагистралей / Б.Я. Трофимов, К.В. Шулдяков // Наука ЮУрГУ : материалы 68-й научной конференции. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2016. – С. 199–206.
5. *Носов, В.П.* Цементобетон в дорожном строительстве. Состояние. Проблемы. Перспективы / В.П. Носов // Перспективы и эффективность применения цементобетона в дорожном строительстве : Международный семинар. – М., 2002. – С. 5–9.
6. *Трофимов, Б.Я.* Принципы повышения стойкости бетона при морозной и сульфатной агрессии путем модифицирования гидратных соединений : автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Л., 1991. – 50 с.
7. *Superplasticizer Effect on Cement Paste Structure and Concrete Freeze-Thaw Resistance* / K.V. Shuldyakov, L.Ya. Kramar, B.Ya. Trofimov, I.M. Ivanov // Advanced Materials in Technology and Construction (AMTC-2015). AIP Conf. Proc. – doi 10.1063/1.4937881. – 2016. – 1698. – P. 070011-1-070011-6.
8. *Баженов, Ю.М.* Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М. : Изд-во АСВ, 2006. – 368 с.
9. *Улучшение качества цементного камня* путем многочастотной ультразвуковой активации воды затворения / А.И. Кудяков, А.Г. Петров, Г.Г. Петров, К.В. Иконникова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 3. – С. 143–152.
10. *A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties* / Dehui Wang, Caijun Shi, Zemei Wu, Jianfan Xiao, Zhengyu Huang, Zhi Fang // Construction and Building Materials. – 2015. – V. 96. – P. 368–377.
11. *Технология и состав углеродофибробетона* с повышенной однородностью прочностных показателей / А.И. Кудяков, В.С. Плевков, В.В. Белов, А.В. Невский, К.Л. Кудяков // Вопросы материаловедения. – 2016. – № 1. – С. 66–72.
12. *Совершенствование технологии изготовления базальтофибробетона* с повышенной однородностью / А.И. Кудяков, В.С. Плевков, К.Л. Кудяков, А.В. Невский, А.С. Ушакова // Строительные материалы. – 2015. – № 10. – С. 44–48.
13. *Tiberti, G.* Reinforcement optimization of fiber reinforced concrete linings for conventional tunnels / G. Tiberti, F. Minelli, G. Pizzari // Composites Part B: Engineering. – 2014. – V. 58. – P. 199–207.
14. *Nobili, A.* Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement / A. Nobili, L. Lanzoni, A. M. Tarnation // Construction and Building Materials. – 2013. – V. 47. – P. 888–895.

15. Влияние добавки «МК-поликарбоксилатный суперпластификатор» на гидратацию цемента, структуру и свойства цементного камня / К.В. Шульдяков, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, Н.А. Мамаев // Цемент и его применение. – 2013. – № 2. – С. 114–118.

REFERENCES

1. *Yakobson M.Ya.* Nekotorye problemy obespecheniya dolgovechnosti betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksii [Some problems of ensuring the durability of concrete and reinforced concrete structures]. *Proc. Int. Conf. 'Popular Concrete Science'*. 2007. Pp. 41–42. (rus)
2. *Bazilevich A.L., Kudyakov A.I.* Temperaturnaya segregatsiya asfal'tobetonnykh smesei pri stroitel'stve dorozhnykh pokrytii [Temperature segregation of asphalt-concrete mixtures in road surface construction]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2009. No. 1. Pp. 116–122. (rus)
3. *Yakobson M.Ya., Kuznetsova A.A., Vvedenskaya A.S., Bychkov A.V.* Aktual'nost' i perspektivy primeniya tsementobetona v dorozhnom stroitel'stve [Urgency and prospects for cement concrete in road construction]. *Sistemnye tekhnologii*. 2016. No. 1 (18). Pp. 132–140. (rus)
4. *Trofimov B.Ya., Shuldyakov K.V.* Beton dlya sovremennykh avtomagistrali [Concrete for modern highways] *Proc. 68th Sci. Conf. 'Science in South Ural State University'*. 2016. Pp. 199–206. (rus)
5. *Nosov V.P.* Tsementobeton v dorozhnom stroitel'stve. Sostoyanie. Problemy. Perspektivy [Cement concrete in road construction. Condition. Problems. Prospects]. *Proc. Int. Seminar 'Prospects and Effectiveness of Cement Concrete Application in Road Construction'*. 2002. Pp. 5–9. (rus)
6. *Trofimov B.Ya.* Printsipy povysheniya stoikosti betona pri moroznoi i sul'fatnoi agressii putem modifitsirovaniya gidratnykh soedinenii [Improvement of concrete frost resistance and sulphate aggression by modifying hydrate compounds. DSc Abstract]. 1991. 50 p. (rus)
7. *Shuldyakov K.V., Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Ivanov I.M.* Superplasticizer effect on cement paste structure and concrete freeze-thaw resistance. *Advanced Materials in Technology and Construction (AMTC-2015)*. DOI 10.1063/1.4937881. 2016. Pp. 070011-1–070011-6.
8. *Bazhenov Yu.M., Dem'yanova V.S., Kalashnikov V.I.* Modifitsirovannye vysokokachestvennye betony [Modified high-quality concretes]. Moscow: ASV Publ., 2006. 368 p. (rus)
9. *Kudyakov A.I., Petrov A.G., Petrov G.G., Ikonnikova K.V.* Uluchshenie kachestva tsementnogo kamnya putem mnogochastotnoi ul'trazvukovoi aktivatsii vody zatvoreniya [Improvement of quality of cement stone by multi-frequency ultrasonic activation of mixing water]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 3. Pp. 143–152. (rus)
10. *Dehui Wang, Caijun Shi, Zemei Wu, Jianfan Xiao, Zhengyu Huang, Zhi Fang.* A review on ultra high performance concrete: Pt. II. Hydration, microstructure and properties. *Construction and Building Materials*. 2015. V. 96. Pp. 368–377.
11. *Kudyakov A.I., Plevkov V.S., Belov V.V., Nevskii A.V., Kudyakov K.L.* Tekhnologiya i sostav uglerodofibrobetona s povyshennoi odnorodnost'yu prochnostnykh pokazatelei [Technology and composition of carbon-fiber reinforced concrete with increased uniformity of strength indicators]. *Voprosy materialovedeniya*. 2016. No. 1. Pp. 66–72. (rus)
12. *Kudyakov A.I., Plevkov V.S., Kudyakov K.L., Nevskii A.V., Ushakova A.S.* Sovershenstvovanie tekhnologii izgotovleniya bazal'tofibrobetona s povyshennoi odnorodnost'yu [Perfection of the technology of production of basalt fiber concrete with increased homogeneity]. *Stroitel'nye materialy*. 2015. No. 10. Pp. 44–48. (rus)
13. *Tiberti G., Minelli F., Pizzari G.* Reinforcement optimization of fiber reinforced concrete linings for conventional tunnels. *Composites Part B: Engineering*. 2014. V. 58. Pp. 199–207.
14. *Nobili A., Lanzoni L., Tarnation A.M.* Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement. *Construction and Building Materials*. 2013. V. 47. Pp. 888–895.
15. *Shuldyakov K.V., Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Mamaev N.A.* Vliyanie dobavki MK – polikarboksilatnyi superplastifikator na gidratatsiyu tsementa, strukturu i svoistva tsementnogo kamnya [Effect of silica fume–polycarboxylate superplasticizer additive on cement hydration, structure and properties of cement stone]. *Tsement i ego primenenie*. 2013. No. 2. Pp. 114–118. (rus)