

УДК 666.972:620.192.4

А. В. НАЗАРОВА^а, АЛ-МАРШДИ КОСАЙ САХИБ РАДИ^б, Д. С. КОВАЛЕНКО^а^а ГОУ «Луганский национальный аграрный университет», ^б «Эль-Касим Грин Университет», Ирак

ЭФФЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ МИНИМИЗАЦИИ УСАДОЧНОГО ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В ЦЕМЕНТОБЕТОНЕ

Аннотация. Рассмотрены типы и механизмы возникновения усадочных деформаций цементного бетона и наиболее эффективные способы борьбы с усадочным трещинообразованием. Установлено, что в естественных условиях армирования, сцепления с основанием жесткой дорожной одежды, взаимодействие с другими конструкциями влажностная усадка в цементном бетоне приводит к возникновению внутренних напряжений, превышающих прочность бетона при растяжении, что является причиной образования трещин. Наличие трещин приводит к снижению долговечности железобетонных изделий, так как развивается химическая коррозия цементного бетона и арматурой стали. Предложены бетоны с компенсированной усадкой, которые содержат комплекс добавок, снижающих усадку, расширяющиеся цементы, синтетические волокна.

Ключевые слова: усадка, пластическая, аутогенная, влажностная, термическая, карбонизационная, трещинообразование, полимеры, внутренний уход, водонасыщенный заполнитель.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Одной из главных причин трещинообразования в бетоне является его объемные изменения, вызванные усадкой. От свойств бетона проявлять усадочные деформации в значительной степени зависит его плотность и стойкость в различных средах, прочность (особенно при растяжении) и сопротивляемость образованию трещин. Наличие трещин в бетонных и железобетонных конструкциях снижает их долговечность вследствие попадания различных агрессивных веществ в эти трещины, что приводит к развитию коррозии бетона и арматурной стали [1]. Ремонт и восстановление бетона, как правило, связаны с высокими показателями трудоемкости и капитальных затрат, поэтому более экономичными являются мероприятия по предотвращению или минимализации трещинообразования в бетоне.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В современном бетоноведении выделяют пять основных видов усадки бетона: пластическую, аутогенную, влажностную, термическую и карбонизационную. Сложность прогнозирования величины полной усадки, как правило, связана с тем, что каждая ее составляющая обусловлена различными ведущими эффектами. Поэтому многие исследователи упрощают модель, рассматривая только влажностную и аутогенную [2].

Пластическая усадка может приводить к образованию трещин на поверхности бетона конструкций с большим модулем открытой поверхности. Она происходит в свежееотформованном бетоне в период от начала до конца схватывания. Величина этой усадки зависит от температуры и относительной влажности окружающего воздуха, скорости ветра и температуры бетона [3].

В последнее время гораздо больше внимания уделяется усадке в раннем возрасте, так как это может быть причиной образования трещин, когда бетон характеризуется минимальной прочностью при растяжении и модулем упругости, чтобы выдерживать внутренние напряжения (период между 24 и 48 ч после схватывания считается критическим [4]):

$$\sigma_t = E \cdot (\varepsilon_s - \varepsilon_c) \geq f_t \quad (1)$$

где σ_t – напряжение растяжения,
 E – модуль упругости,
 $\varepsilon_c, \varepsilon_s$ – относительные деформации ползучести и усадки соответственно,
 f_t – предел прочности бетона при растяжении.

Такая проблема более актуальна для высококачественных бетонов с низким значением В/Ц = 0,3...0,4, чем для обычных бетонов [5]. Высокопрочные бетоны, как правило, имеют большой расход цемента и пуццолановых добавок, а также содержат недостаточное количество воды затворения для того, чтобы обеспечить заполнение крупных капилляров, необходимых для поддержания реакций гидратации и пуццолановой реакции, поэтому даже при низком значении В/Ц склонны к высокой усадке [6].

В таких бетонах очень быстро формируется сеть микрокапилляров, которые высасывают воду из крупных капилляров в процессе интенсивной гидратации цемента [5], когда происходит уменьшение объема продуктов гидратации в сравнении с объемом исходных ингредиентов (контракция Ле-Шаталье или химическая усадка). Химическая усадка обуславливает формирование тонкой пористости и, как следствие, появление менисков, имеющих большой радиус кривизны и создающих высокие сжимающие напряжения на стенки пор вследствие обезвоживания, что приводит к самовысушиванию и образованию пустых пор в материале, когда уже произошло схватывание. Эти процессы создают условия для развития так называемой аутогенной усадки – изменения объема, который происходит в изотермических условиях в бетонном образце, помещенном в герметичное пространство, исключая обмен с окружающей средой. В дальнейшем существует тесная корреляция между внутренней влажностью и аутогенной усадкой бетона [1].

Аутогенная усадка высококачественных бетонов, если ее не контролировать, может достигать больших значений деформаций в течение всего лишь 24 часов (до величины $\varepsilon = -250 \cdot 10^{-6}$ и более), что приводит к раннему трещинообразованию, если усадка проявляется в стесненных условиях. Обезвоживание пор отражается не только на возникновении усадки, но и на кинетике гидратации вяжущего, лимитируя ее степень [6]. При этом минеральные добавки, в частности микрокремнезем, увеличивают снижение относительной влажности и значения аутогенной усадки цементного камня на ранних стадиях твердения, а молотый доменный граншлак – на поздних [1].

В разных слоях бетона с различной внутренней влажностью отмечено значительное отличие в степени гидратации. Из тонких конструкций влага удаляется практически равномерно. Лимитирующим фактором химической реакции между минералами и водой затворения является отношение объема воды к объему цемента. В упрощенной форме, если это соотношение составляет 1,2, то вся вода связывается цементом, и продукты гидратации могут заполнить все пространство, первоначально занимаемое водой затворения. Это соотношение приблизительно соответствует В/Ц = 0,4 (по массе). Если В/Ц ниже 0,4, часть цемента всегда будет оставаться негидратированной. Примерно 0,2 В/Ц – химически связано с цементом, другие 0,2 В/Ц – гелевая вода [1]. Следует отметить, что если уровень относительной влажности в поровом пространстве снижается ниже 80 %, то гидратация прекращается [7]. Недостаточный влажностный уход приводит к увеличению пористости бетона вследствие низкой степени гидратации цемента (α) в соответствии с моделью Пауэрса:

$$V_p = \frac{100w}{c} - 36,15\alpha. \quad (2)$$

Залогом роста прочности бетона является поддержание надлежащей внутренней влажности. При полном насыщении цементного камня влагой гидратация цемента проходит полно и длительное время, что улучшает показатели водонепроницаемости и морозостойкости бетона. В то же время бетон без влажностного ухода достигает лишь 40 % прочности в возрасте 180 суток от контрольного образца (180 суток влажностного твердения). Уход в течение трех суток обеспечивает 60 % прочности; 28 суток – 95 %. При надлежащем влажностном уходе в процессе гидратации цемента поры заполняются продуктами гидратации, снижается открытая пористость и проницаемость бетона.

В отличие от влажностной усадки аутогенную усадку невозможно уменьшить путем внешнего ухода за бетоном. Так, полив поверхности бетонной конструкции водой малоэффективен вследствие ограниченного проникания влаги в плотную структуру бетона [1]. По этой причине общепринято, что методы, основанные на введении дополнительного количества воды (к тому количеству, что рассчитывается по водоцементному отношению, исходя из требуемой прочности), более эффективны для данного вида бетонов. Согласно [4] количество воды, необходимое для достижения максимальной

степени гидратации в бетоне оценивается из расчетов, основанных на химической усадке и максимальной степени гидратации, теоретически достижимой в нормальном цементном тесте:

$$\left(\frac{B}{C}\right)_{\text{вы}} = 0,18 \left(\frac{B}{C}\right) \text{ при } B/C \leq 0,36, \quad (3)$$

где $(B/C)_{\text{вы}}$ – отношение массы воды для внутреннего ухода к массе цемента;
 (B/C) – водоцементное отношение бетонной смеси.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Если влажностная усадка развивается свободно, без стесненных условий, то это практически не приносит какого-либо существенного негативного влияния на строительные конструкции и дорожные покрытия. При наличии каких-либо стесненных условий (армирование, сцепление с основанием дорожного полотна, соединение с другими конструкциями и т. п.) влажностная усадка приводит к возникновению внутренних напряжений, превышающих прочность бетона на растяжение и вызывающих образование трещин.

Для снижения усадки при высыхании бетона широко используется химическая добавка SRA в сочетании с расширяющимся агентом. Это суперпластификатор на основе акрилатного полимера со встроенной в структуру молекулы с группой SRA (на основе полиэтиленгликоля), которая при повышении pH поровой жидкости в процессе гидратации цемента отщепляется от базовой молекулы, вызывая снижение поверхностного натяжения жидкости.

Первая публикация по бетонам с добавкой SRA – 1983 г. Goto, Sato (Япония). Эта добавка дает значительное снижение свободной усадки или снижения количества и протяженности трещин в случае стесненной усадки, особенно в сочетании с расширяющимся агентом, т. е. способствует созданию бетонов с компенсированной усадкой.

Компенсация усадки путем применения расширяющих добавок сульфоалюминатного типа или СаО типа является одной из эффективных мер, так как базируется на расширении бетона при образовании этtringита. Важно отметить, что получить бетоны с компенсированной усадкой при использовании расширяющих агентов можно только в условиях водного твердения. Распыление воды на поверхности бетона высокого положительного эффекта не даст. Это следует принимать во внимание, так как обеспечить водное твердение для большинства железобетонных конструкций практически невозможно.

Для того, чтобы удобно регулировать содержание расширяющегося агента в бетоне, разработаны различные типы расширяющихся добавок как самостоятельных компонентов бетонных смесей. Однако, поскольку для формирования этtringита (например, сульфоалюминатная расширяющаяся добавка) необходимо большое количество воды, то расширение в значительной мере зависит от влажностного ухода. Обычный влажностный уход, по крайней мере семь суток после формирования, рекомендован для бетона, содержащего сульфоалюминатную расширяющуюся добавку для получения достаточного расширения. Таким образом, применение такой добавки в бетонах без надлежащего водного ухода может быть неэффективным. Кроме того, для высокопрочного бетона с низкой проницаемостью или массивного бетона вода может иметь ограниченное проникание в бетон и, следовательно, быть недостаточной для полной гидратации расширяющейся добавки с высокой водопотребностью даже при обеспечении внешнего влажностного ухода [8].

Наиболее эффективным средством борьбы с трещинообразованием в высокопрочных бетонах, вызванным аутогенной усадкой, является внутренний уход путем введения равномерно распределенных по всему объему бетона микровключений, содержащих свободную воду, выполняющих функцию «водных резервуаров», т. е. материалов с высокой адсорбирующей способностью. В настоящее время существует два основных метода, доступных для внутреннего ухода за бетоном. Первый предполагает использование предварительно насыщенных водой пористых заполнителей (ПЗ) для того, чтобы создать внутренний источник воды, который может заменить воду, потребляемую химической усадкой при гидратации цемента. Этот внутренний уход реализуется при гидратации цемента путем переноса воды из относительно крупных пор пористого заполнителя в тонкие поры цементной пасты [1]. При этом для более равномерного распределения в объеме цементной пасты «водных резервуаров» более предпочтительным является мелкий пористый заполнитель [6]. Второй метод основан на использовании полимеров со сверхвысокой поглощающей способностью (SAP) [4] или целлюлозных волокон. Полимеры (SAP) добавляются в бетон в виде порошка и в процессе перемешивания поглощают воду, образуя таким образом микроскопические водяные поры [9].

Количество предварительно водонасыщенного заполнителя V_w рассчитывается исходя из показателя химической усадки цементной пасты, содержания и степени гидратации вяжущего, количества и вида пуццолановой добавки:

$$V_w = \frac{C_f \cdot CS \cdot \alpha_{\max}}{\rho}, \quad (4)$$

где C_f – расход цемента, кг/м³;
 CS – химическая усадка, 0,06 кгВ / кг Ц;
 α_{\max} – максимальная степень гидратации цемента;
 ρ – плотность воды, 1 000 кг/м³.

Очень важно, чтобы поглощающая способность агента внутреннего ухода была точно определена, так как вариация этого показателя оказывает влияние на его дозировку. Кроме того, такие неточности могут существенно изменять результат влияния внутреннего ухода на предотвращение аутогенной усадки и рост прочности бетона.

Введение высокопористого заполнителя в плотную матрицу существенно влияет на механические характеристики бетона. В большинстве случаев отмечено отрицательное воздействие ПЗ на прочность бетона в раннем возрасте. Тем не менее влияние ПЗ на прочность зрелого бетона является переменным и зависит от типа заполнителя и его содержания, наличия химических добавок. Так, по данным [1], частичная замена (до 25 %) плотного песка водонасыщенным пористым не оказывает отрицательного влияния на прочность при сжатии. Кроме того, более низкий модуль упругости ПЗ и более совершенная контактная зона вокруг зерен заполнителя благодаря их пористой структуре поверхности обеспечивают снижение концентрации напряжений в контактной зоне, что снижает риск раннего трещинообразования в бетоне. Использование дробленого водонасыщенного керамзита способствует более полной гидратации вяжущего, получению более плотной структуры цементного камня, в результате чего на 18 % повышается прочность при сжатии, на 15...25 % снижаются деформации усадки и на 25 % повышается водонепроницаемость [10].

ВЫВОДЫ

Применение бетонов с компенсированной усадкой – наиболее эффективный способ предотвращения или минимизации трещинообразования в железобетонных конструкциях вследствие усадки. Для этого стесненное расширение должно быть больше по величине прогнозируемой усадки. Это достигается за счет использования инновационных материалов, таких как добавки, снижающие усадку (Shrinkage Reducing Admixtures – SRA), синтетические волокна, расширяющиеся цементы (добавки) и др. Отмечен положительный эффект совместного применения концепции внутреннего ухода в сочетании с добавкой SRA, что обеспечивает снижение аутогенной и влажностной усадки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hoff, G. C. The use of lightweight fines for the internal curing of concrete [Текст] / G. C. Hoff. – Report prepared for Northeast Solite Corporation. – Mississippi, Clinton : Hoff Consulting LLC, 2002. – 44 p.
2. Clarke, C. Concrete shrinkage prediction using maturity and activation energy [Текст] : Thesis submitted to the Faculty of the Graduated School of the University of Maryland, College Park, for the degree of Master of Science / Christopher Clarke. – [S. l. : s. n.], 2009. – 115 p.
3. Mora-Ruacho, J. Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete [Текст] / J. Mora-Ruacho, R. Gettu, A. Aguado // Cement and Concrete Research. – 2009. – Vol. 39. – P. 141–146.
4. Cusson, D. Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking [Текст] / D. Cusson, T. Hoogeveen // Cement and Concrete Research. – 2008. – Vol. 38. – P. 757–765.
5. Effects of shrinkage-reducing admixture in shrinkage compensating concrete [Текст] / M. Collepardi, A. Borsoi, S. Collepardi, JJ. Ogoumah Olagot, R. Troli // Concrete International. – 2005. – Vol. 27, No. 10. – P. 1–8.
6. Bentz, D. P. Protected paste volume in concrete. Extension to using saturated lightweight fine aggregate [Текст] / D. P. Bentz, K. A. Snyder // Cement and Concrete Research. – 1999. – Vol. 29, No. 11. – P. 1863–1867.
7. Jensen, O. M. Thermodynamic limitation of self-dessication [Текст] / O. M. Jensen // Cement and Concrete Research. – 1995. – Vol. 25, No. 1. – P. 157–164.
8. Mo, L. Effects of MgO-based expansive additive on compensating the shrinkage of cement paste under non-wet curing conditions [Текст] / L. Mo, M. Deng, A. Wang // Cement and Concrete Composites. – 2012. – Vol. 34. – P. 377–383.

9. Мещерин, В. Высокопрочные и сверхпрочные бетоны: технологии производства и сферы применения [Текст] / В. Мещерин // СтройПРОФИль. – 2008. – № 8(70). – С. 32–35.
10. Захезин, А. Е. Цементные дорожные бетоны с комплексными добавками на основе алифатических эпоксидных смол [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / А. Е. Захезин. – Челябинск : ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет», 2010. – 19 с.

Получено 19.12.2016

А. В. НАЗАРОВА ^a, АЛ-МАРШДИ КОСАЙ САХІБ РАДІ ^b, Д. С. КОВАЛЕНКО ^a
ЕФЕКТИВНІ СПОСОБИ МІНІМІЗАЦІЇ ЗСІДАНОГО ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ
В ЦЕМЕНТОБЕТОНІ

^a ДОУ «Луганський національний аграрний університет», ^b «Ель-Касим Грін Університет», Ірак

Анотація. Розглянуті типи і механізми виникнення зсіданих деформацій цементного бетону і найбільш ефективні способи боротьби з усадочним утворенням тріщин. Встановлено, що в природних умовах армування, зчеплення з основою жорсткого дорожнього одягу, взаємодії з іншими конструкціями вологісна усадка в цементному бетоні призводить до виникнення внутрішніх напружень, що перевищують міцність бетону при розтягуванні, що є причиною утворення тріщин. Наявність тріщин призводить до зниження довговічності залізобетонних виробів, оскільки розвивається хімічна корозія цементного бетону і арматурної сталі. Запропоновано бетоны з компенсованою усадкою, які містять комплекс добавок, що знижують усадку, розширюючи цементи, синтетичні волокна.

Ключові слова: усадка, пластична, аутогенна, вологісна, термічна, карбонізаційна, тріщиноутворення, полімери, внутрішній догляд, водонасичений заповнювач.

ANTONINA NAZAROVA ^a, AL-MARSHDI QOSAI SAHIB RADİ ^b,
DENIS KOVALENKO ^a
EFFECTIVE WAYS OF MINIMIZING OF SHRINKAGE CRACK FORMATION IN
CEMENT CONCRETE

^a SEI «Lugansk National Agrarian University», ^b Al-Qasim Green University, Iraq

Abstract. The types and mechanisms of shrinkage deformation of cement concrete and the most effective ways to combat shrinkage crack formation have been considered. It has been found out that in natural conditions reinforcement, a rigid coupling with the base of the pavement, the interaction with other constructions in humid cement concrete shrinkage gives rise to internal stresses exceed the tensile strength of the concrete, which lead to cracking. The presence of cracks leads to a decrease in the durability of concrete products because it is a chemical corrosion of cement concrete and reinforcement steel. Shrinkage-compensated concrete that contains complex additives, reducing shrinkage, expanding cements, synthetic fibers has been suggested.

Key words: shrinkage, plastic, autogenic, humid, heat, carbonization, cracking, polymers, domestic care, water-saturated filler.

Назарова Антонина Васильевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры строительных конструкций ГОУ «Луганский национальный аграрный университет». Научные интересы: бетоны с использованием отходов промышленности.

Ал-Маршди Косай Сахиб Ради – кандидат технических наук, преподаватель Эль-Касим Грин университета (Ирак). Научные интересы: модифицированные цементные бетоны для строительства автомобильных дорог.

Коваленко Денис Сергеевич – аспирант кафедры строительных конструкций ГОУ «Луганский национальный аграрный университет». Научные интересы: исследование техногенных сырьевых материалов в комплексе с современными модификаторами бетонов с целью повышения их эксплуатационных свойств и долговечности.

Назарова Антоніна Василівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри будівельних конструкцій ДОУ «Луганський національний аграрний університет». Наукові інтереси: бетоны з використанням відходів промисловості.

Ал-Маршді Косай Сахіб Раді – кандидат технічних наук, викладач Ель-Касим Грін університету (Ірак). Наукові інтереси: модифіковані цементні бетоны для будівництва автомобільних доріг.

Коваленко Денис Сергійович – аспірант кафедри будівельних конструкцій ДОУ «Луганський національний аграрний університет». Наукові інтереси: дослідження техногенних сировинних матеріалів у комплексі з сучасними модифікаторами бетонів з метою підвищення їх експлуатаційних властивостей і довговічності.

Nazarova Antonina – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Senior Researcher, Building Constructions Department, SEI «Lugansk National Agrarian University». Scientific interests: concretes with industrial wastes.

Al-Marshdi Qosai Sahib Radi – Ph.D. (Eng.), lecturer of the Al-Kasim Green University, Iraq. Scientific interests: modified cement concretes for automobile road construction.

Kovalenko Denis – post-graduate student, Building Constructions Department, SEI «Lugansk National Agrarian University». Scientific interests: research technogenic raw materials in combination with modern concrete modifiers to increase their operational properties and durability.