

6. F., Schrefler B.A. // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 2006. - 195: 5707-5729.
7. Felicetti, R. Mechanical behavior of HPC and UHPC in direct tension at high temperature and after cooling. / Felicetti R., Gambarova P.G., Natali Sora M.P. and Khoury G.A. // Proc. 5<sup>th</sup> Symposium on Fibre-Reinforced Concrete BEFIB 2000, Lyon (France), September 13-15, 2000. - p. 749-758.
8. RILEM TC 129-MHT 2000. Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. / Tensile strength for service and accident conditions, Materials and Structures, V.33, May, p. 219-223.

Материал поступил в редакцию 20.01.09

### LEONOVICH S.N., LITVINOVSKIY D.A. Fracture mechanics of thermally-damaged concrete

The mechanical properties of thermally-damaged concrete have been the subject of many investigations in the last fifty years. Nonetheless, a noteworthy impulse in this field has been promoted in recent times by the advent of high-performance concrete, because the wide range of materials at issue makes the well-established references difficult to be generalized. This is particularly true for the tensile response, due to the challenging experimental conditions and to the still not standardized test methods. In this paper the results collected by the authors on a number of different concrete mixes are drawn together with the twofold objective to clarify the relations among the most common direct- and indirect-testing techniques and to sketch any possible general trend in the tensile properties of ordinary and special concretes exposed to high temperature.

УДК 624.012.45

Плосконов В.Н., Савеня Д.Н., Кривеня А.В.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНОВ НА НАПРЯГАЮЩЕМ ЦЕМЕНТЕ

Важной задачей в области технологии бетона является обеспечение напряженно-деформативного состояния как сборных, так и монолитных железобетонных конструкций. Эта задача, в частности, решается использованием бетонов на напрягающем цементе. Бетоны же на напрягающем цементе являются сложными, длительно развивающимися физико-химическими системами, свойства которых определяются характеристиками и количеством отдельных компонентов цементного камня и прежде всего гидросульфатоалюминатом кальция и других расширяющихся при гидратации соединений.

Однако одним из главных условий для обеспечения проектных параметров данных бетонов наряду с назначением оптимального вещественного состава напрягающих цементов является выдерживание строго определенных внешних условий среды и прежде всего нормального температурно-влажностного режима твердения. Несоблюдение физико-химических параметров вяжущего, его минералогического состава, учитывающего температурно-влажностные условия среды, технологических параметров бетонной смеси, как правило, могут явиться причиной развития больших усадочных деформаций и потери проектных значений самонапряжения и прочности бетона, даже полного его разрушения.

Известно, что при бетонировании монолитных конструкций в условиях строительной площадки, например, при низких положительных и отрицательных температурах среды предусматривают ряд специальных мероприятий, обеспечивающих получение проектных параметров бетона в заданные сроки и, в частности, предварительный подогрев бетонной смеси до укладки ее в опалубку (метод термоса), или искусственный обогрев в опалубке. В заводских же условиях для ускорения процессов гидратации бетона на портландцементе используется его тепловлажностная обработка (ТВО).

Для изготовления монолитных и сборных конструкций из бетона на напрягающем цементе и применение его в различных областях строительства необходима отлаженная технология производства и прежде всего благоприятный режим его выдержки. В условиях строительной площадки, а также при заводской технологии сборного железобетона для сокращения процесса их изготовления, в частности, применяется режим тепловлажностной обработки. Однако для бетонов на напрягающем цементе применение ТВО недостаточно изучено, а имеющиеся немногочисленные исследования имеют противоречивые выводы. Например, некоторые авторы [2, 3] считают, что кристаллизация этtringита происходит по двум последовательным механизмам: по кристаллизационному в жидкой фазе в начальный период гидратации, не вызывающему расширение системы (пассивный период) и в дальнейшем, на второй стадии – по топомическому механизму реакции взаимодействия гипса с алюминатными компонентами с увеличением объема цементного камня (ак-

тивный этtringит). Внешняя деформация цементного камня зависит не только от количества образовавшегося «активного» этtringита, но и от жесткости силикатной матрицы, от соотношений жесткости силикатного и сульфатоалюминатного компонентов [1].

Для бетонов на напрягаемом цементе весьма актуальной в любых условиях среды является задача согласования в расширяющейся структуре скоростей процессов набора прочности и собственно расширения. Прочность должна развиваться параллельно процессу расширения с такой скоростью, чтобы быть достаточной для восприятия собственных напряжений без разрушения структуры, в то же время, не оказывая непреодолимое сопротивление собственным деформациям структуры. Обеспечить подобные условия среды для бетонов на напрягающем цементе в условиях строительной площадки достаточно сложно.

Как показали наши исследования, скорость и характер химических реакций гидратации и структурообразования бетона на напрягающем цементе при тепловлажностной их обработке существенно отличаются от бетонов, твердеющих в нормальных условиях среды. Это отмечается и другими авторами. В частности, Михайловым В.В. [2] установлено, что ТВО в течение двух часов при температуре +100°C после 18...24 ч выдержки бетона в нормальных условиях не приводит к процессам расширения системы, однако при последующем выдерживании бетона после ТВО в нормальных условиях возобновляется и интенсивно ускоряется процесс его расширения. Однако Михайловым В.В. установлено, что возобновление расширения бетона после ТВО возможно только при строго определенном соотношении в цементе алюмината кальция, сульфата кальция и окиси кальция: (2 : 1 : 0,5) [2]. Им установлено, что расчет состава расширяющегося компонента необходимо вести не в предположении получения трисульфата, а в предположении получения моносульфата кальция, при этом не только увеличивается энергия самонапряжения, но и существенно сокращается время до стабилизации самонапряжения.

Исследованиями Будникова П.П. и Кравченко И.В. [3] установлено, что при гидратации цемента в сульфатной среде большое влияние на кристаллизацию и устойчивость гидросульфатоалюмината кальция оказывает концентрация в жидкой фазе гидроксида кальция. Однако известно, что растворимость извести с повышением температуры снижается.

Г. Калоузек [2] установлено, что стабильность трисульфата кальция в сильной степени зависит от температуры и он является единственно устойчивой фазой в цементном камне только при нормальной температуре; при температуре же +5°C его количество уже незначительно, а преобладает моносульфатная форма.

В ряде же работ [4, 5] утверждается, что только трисульфатная форма является стабильной и она распадается только в определенных,

**Плосконов В.Н.**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

**Савеня Д.Н.**, аспирант кафедры технологии бетонов и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

**Кривеня А.В.**, магистрант кафедры технологии бетонов и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Строительство и архитектура

**Таблица 1.** Влияние температурно-влажностной обработки цементно-песчаных образцов на напрягаемом цементе на величину их самонапряжения

Время твердения (сут)	Самонапряжение (МПа) при режиме температурно-влажностной обработки (6 час)		
	нормальный + 20 °С	при температуре + 40 °С	при температуре + 70 °С
3	1,08	2,02	0,66
14	3,00	1,48	0,47
28	4,10	0,81	0,02

**Таблица 2.** Влияние температурно-влажностной обработки цементно-песчаных образцов на напрягаемом цементе на величину прочности при сжатии

Время твердения (сут)	Прочность при сжатии (МПа) при режиме температурно-влажностной обработки (6 час)		
	нормальный + 20 °С	при температуре +40 °С	при температуре +70 °С
3	9,1	11,6	10,3
14	16,6	30,0	27,3
28	27,3	49,1	37,6

редких случаях; другие [3] считают, что в присутствии избытка гидроксида кальция всегда образуется низкосульфатная форма, являющаяся устойчивой фазой в цементном камне. Анализ многочисленных исследований показал, что одни авторы [4, 5] считают образовавшуюся при гидратации напрягающего цемента трехсульфатную форму гидросульфатоалюмината кальция устойчивой только при определенных условиях, которая, как правило, перекристаллизуется в более устойчивую моносульфатную форму. Другие, наоборот, утверждают, что стабильной формой является только высокосульфатная форма, которая может распадаться только в определенных условиях. Третьи считают, что при избытке гидроксида кальция всегда образуется низкосульфатная форма, являющаяся устойчивой фазой; наконец, некоторые ученые допускают возникновение и существование в системе твердеющего напрягающего цемента гидросульфатоалюминатов кальция двух и даже трех форм.

Все вышесказанное показывает, насколько процесс гидратации напрягающего цемента является сложным, зависящим от многообразия состава цемента и особенно параметров внешней среды. Поэтому нами были выполнены исследования влияния тепловлажностной обработки на прочность, свободное линейное расширение и самонапряжение бетонов на напрягающем цементе в предположении «термосного» их выдерживания в условиях строительной площадки.

Для опытов цементно-песчаные образцы размером 4х4х16 см выполнялись на напрягаемом цементе НЦ-3 состава - 83 : 10 : 7 (портландцемент : глиноземистый цемент : гипс). Исследуемые образцы до ТВО хранились до набора ими прочности 15 МПа в герметичных условиях (в полиэтиленовых мешках), а затем выдерживались по трем режимам:

- водное хранение в течение 28 суток при нормальной температуре (контрольная серия образцов);
- тепловлажностная обработка при температуре +40°С в течение 6 час после трехсуточной выдержки образцов в нормальных условиях;
- то же с последующей тепловлажностной обработкой при температуре +70°С в течение 6 час.

После ТВО исследуемые образцы выдерживались в нормальных температурных условиях (в полиэтиленовых мешках) до 28 суток от начала затворения.

Результаты исследований (табл. 1) показали, что при тепловлажностной обработке при температуре +40 °С существенно снижается величина самонапряжения бетона (почти в четыре раза); а при температуре +70 °С самонапряжение практически отсутствует.

Снижение величины самонапряжения бетона на напрягающем цементе можно объяснить частичной (при +40°С) и практически полной (при +70°С) перекристаллизации образовавшейся до тепловлажностной обработки трехсульфатной формы гидросульфатоалюмината кальция на моносульфатную форму. Следовательно, бетон на НЦ при высокотемпературной тепловлажностной обработке практически теряет главный параметр бетона – расширение и самонапряжение.

В то же время цементно-песчаные образцы на НЦ в возрасте 28 суток после ТВО (6 час.) и дальнейшем нормальном твердении по

сравнению с контрольными образцами, твердевшими только в нормальных условиях (без ТВО) показали значительно большую прочность при сжатии (табл. 2). Так прочность материала образцов, подверженных ТВО при температуре +40 °С в среднем выше на 40%, а при температуре +70 °С – на 9%.

Существенное повышение прочности при мягких режимах ТВО (+40 °С) можно объяснить большей степенью гидратации силикатной составляющей цемента и уплотнением структуры цементного камня этtringитом. В то же время незначительное увеличение прочности по сравнению с контрольными образцами при более жестких режимах ТВО (+70 °С) обусловлено наложением двух противоположно направленных процессов: увеличение степени гидратации цемента и деструкции цементного камня при жестких режимах ТВО (+70 °С) и вследствие рекристаллизации этtringита в моносульфатную форму гидросульфатоалюмината кальция.

Результаты исследований по самонапряжению и прочности бетона на НЦ хорошо согласуются с экспериментальными данными по его свободному линейному расширению. Образцы, которые подвергались ТВО при температуре +40°С с последующим их твердением до 28 суток в нормальных условиях имели свободное расширение в среднем 0,15%; а образцы, твердевшие в аналогичных условиях, но подверженных ТВО при температуре +70°С, практически не имели деформаций расширения (0,05%).

Известно, что бетон на НЦ очень чувствителен при твердении к влажности среды. Так, в наших исследованиях образцы, которые выдерживались после ТВО в воде, к 28 суткам имели свободное расширение и самонапряжение в среднем на порядок выше по сравнению с образцами, хранившихся в полиэтиленовых мешках. В последнем случае недостаток свободной воды для обеспечения благоприятных условий гидратации в процессе твердения существенно повлиял на баланс между объемами гидросиликатной и гидросульфатоалюминатной фазами в структуре цементного камня бетона на НЦ.

На основании анализа результатов выполненных исследований можно сделать следующие основные **выводы**:

1. Для сокращения сроков твердения бетона на НЦ возможно применение ТВО в заводских условиях, применения метода «термоса» или искусственного прогрева бетона на строительной площадке только при мягких ее режимах (не выше +40 °С). Только при этих условиях формируется устойчивая трехсульфатная форма гидросульфатоалюмината кальция и при не происходит рекристаллизации этtringита и, следовательно, обеспечивается проектная величина самонапряжения бетона на НЦ.
2. При более жестких режимах ТВО происходит существенное (в 3...4 раза) снижение величины самонапряжения бетона на НЦ, а при температуре +70°С – оно практически отсутствует и бетон на НЦ подобен бетону на обычном портландцементе.
3. Для обеспечения максимальной реализации химической энергии напрягающего цемента и в условиях строительной площадки необходимо обеспечить на всей стадии твердения бетона свободное поступление воды.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Филимонова Н.В. Моделирование структуры и собственных деформаций расширяющихся сульфаталюминатных цементных систем. Диссертация. – Брест, 2006.
2. Михайлов В.В., Литвер С.Л. Расширяющийся и напрягающий цементы и самонапряженные конструкции. – М.: Стройиздат, 1974/ - 389 с.
3. Будников П.П., Кравченко И.В. Исследование процессов гидратации и твердения расширяющихся цементов. Труды НИИЦ, вып. 4. Госстройиздат. - М., 1951. - 42 с.
4. Ларионова З.М., Образование гидросульфаталюмината кальция и его влияние на основные свойства быстротвердеющего цемента. - М.: Госстройиздат, 1959. - 9 с.
5. Мчедлов-Петросян О.П., Филатов Л.Г. Расширяющиеся составы на основе портландцемента.-М.: Стройиздат, 1965. -139 с.

Материал поступил в редакцию 02.03.09

## PLOSKONOSOV V.N., SAVENJA D.N., KRIVENJA A.D. Research heat a moisture processings of concrete on straining cement

In article the data of researches on influence heat a moisture processings of concrete on straining cement is cited at various temperatures of environment at them hardening. It is shown that at temperatures above +40°C the size of self-pressure and free expansion of concrete on HЦ in comparison with the concrete hardening at normal temperaturno-vlazhnostnyh conditions, essentially decrease; and at temperatures of environment +70°C and above specified parametres practically are absent also concrete on NC is similar to concrete on usual portland. At heats of environment hardening the specified phenomena are caused recrystallization reek in the monosulphatic form hydro sulphate of aluminium calcium.

УДК 624.012.35:69.057.43

Рак Н.А.

## ОБОБЩЕННЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ МЕСТНОМ СЖАТИИ ПО ОТЕЧЕСТВЕННЫМ И ЗАРУБЕЖНЫМ НОРМАМ

**Введение.** Железобетонные конструкции являются в настоящее время основным видом несущих конструкций зданий и сооружений по масштабам применения в строительстве Республики Беларусь. Обеспечение надежности и долговечности железобетонных конструкций является неперенным условием повышения их эффективности.

Надежность и долговечность конструкций должны быть обеспечены выполнением требований нормативных документов по проектированию, качеством проектирования, качеством изготовления конструкций, качеством возведения (монтажа), выполнением требований по режиму эксплуатации.

Надежность и долговечность конструкций должны быть при проектировании обеспечены соответствующим выбором начальных показателей качества материалов (бетона и арматуры), назначением соответствующих геометрических параметров конструкции (размеров сечений, количество и расположение арматуры). При выбранных начальных показателях качества материалов определение соответствующих геометрических параметров конструкции выполняется по расчетным зависимостям норм.

Предельное усилие, воспринимаемое конструкцией, определяется по расчетным зависимостям, приведенным в используемых при проектировании нормативных документах. Таким образом, включаемые в нормативные документы методы расчета в значительной степени определяют надежность и долговечность железобетонных конструкций.

В связи с этим включаемые в нормативные документы методы расчета должны удовлетворять ряду требований. В-первых, методы расчета должны основываться на результатах экспериментальных исследований, выполненных при широком варьировании параметров материалов и геометрических параметров конструкций. Во-вторых, расчетные зависимости должны в максимальной степени отражать реальное напряженно деформированное состояние конструкции и схему разрушения, а также содержать геометрические параметры конструкций и характеристики материалов, поддающиеся контролю. В-третьих, расчетные зависимости должны обладать математической простотой, достигаемой, однако, при обязательном обеспечении необходимой точности и надежности. В-четвертых, структура расчетных зависимостей должна позволять путем введения дополнительных коэффициентов учитывать при необходимости особенности работы вид бетона конструкций, изготовленных из бетонов различных видов (тяжелого трехкомпонентного бетона, тяжелого мелко-

зернистого бетона, легкого бетона и т.д.).

В данной статье дана классификация методов расчета прочности бетонных элементов при местном сжатии, используемых в нормативных документах различных стран. Дана оценка соответствия методов расчета действительному характеру напряженного состояния бетона в области местного сжатия. С использованием банка экспериментальных данных (БЭД) оценена точность и надежность методов расчета прочности бетонных элементов при местном сжатии, используемых в нормативных документах различных стран.

**Классификация расчетных зависимостей норм.** Выполнен анализ расчетных зависимостей, представленных в нормативных документах СССР, Республики Беларусь, Российской Федерации и других стран (всего 28 документов). Следует отметить, что в большинстве нормативных документов из большого многообразия возможных схем приложения нагрузки на нагружаемой плоскости конструкции представлена только концентричная схема. Это обусловлено тем, что она наиболее часто встречается в расчетах конструкций, а также тем, что именно по этой схеме выполнено большинство экспериментальных исследований, т.е. имеется наиболее представительная выборка экспериментальных данных. Другие схемы приложения представлены только в нормах СССР, Республики Беларусь, Российской Федерации, Польши, Литвы. Дальнейшее сопоставление расчетных зависимостей выполнялось только для концентричной схемы нагружения.

Анализ расчетных зависимостей, представленных в нормативных документах различных стран, показал, что все зависимости можно условно разделить на две группы.

Первая группа (таблица 1) содержит зависимости 22 нормативных документов, приведенные к общему виду

$$f_{cud} = k \cdot f_{cd} \cdot \eta \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq \omega_{u,max} \cdot f_{cd}, \quad (1)$$

где  $f_{cud}$  – прочность бетона при местном действии сжимающей нагрузки;  $f_{cd}$  – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию;  $k$  – коэффициент, характеризующий повышение прочности бетона при расчете местного сжатия;  $A_{c0}$  – площадь бетона, на которую приложена местная сжимающая нагрузка;  $A_{c1}$  – условная площадь

**Рак Николай Александрович**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Белорусского национального технического университета. Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.