

Заключение. В результате регрессионного анализа получены оптимальные показатели, характеризующие эффективность развития внутрисистемной технологической специализации.

Произведенный анализ динамики производственных показателей деятельности ООО «Облик» за период 2002-2007г.г. показал, что рост объемов СМР, выполненных собственными силами, в 2007г. достигнут преимущественно за счет экстенсивных факторов (рост численности работающих), когда как в 2006г. рост объемов был достигнут в основном за счет интенсивных факторов (рост производительности труда).

Предложенная методика может быть использована при анализе структурных изменений выполняемых СМР при планировании производственной программы строительных систем основного звена управления (трест, объединение).

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Банди Б. Основы линейного программирования. - М.: Радио и связь, 1989.
2. Бояринцев Г.А. Исследование вопросов развития технологической специализации в стройтресте №8 г.Брест: Информ. листок. - Бр.:Брест. центр науч.-техн. информ., 1988.
3. Бояринцев Г.А., Халавчук В.С. Влияние структурных изменений СМР на производственные показатели деятельности ООО «Облик». - Вестник БрГТУ.-2008 - №1: Строительство и архитектура.
4. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. - М.: Наука, 1988.
5. Короткое Е.А., Березин В.П. Специализация в строительстве. - М.: Стройиздат, 1997.
6. Шмойловой, Р.А. Теория статистики/ проф. Шмойловой Р.А. - М.: "Финансы и статистика", 1996.

Материал поступил в редакцию 20.01.09

BOJARINTSEV G.A., HALAVCHUK V.S. Development of technological specialisation as the factor of effective functioning of building systems

The offered technique can be used at the analysis of structural changes carried out civil and erection works at planning of the production program of building systems of the basic control link (trust, association).

УДК 691.32: 539.3/4

Леонович С.Н., Литвиновский Д.А.

МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКИ ПОВРЕЖДЕННОГО БЕТОНА

Введение. Как известно, бетон хорошо работает при высокой температуре благодаря своей высокой огнестойкости и низкой теплопроводности, что обеспечивает медленное протекание термических переходных процессов в элементах конструкции. Тем не менее, при повышении температуры в материале происходит ряд химико-физических превращений [1]: высвобождение физически связанной воды при температуре выше 100°C; разложение гидратов солей кремниевой кислоты при температуре выше 300°C и дегидратация портландита при температуре выше 500°C. Разложение или превращение некоторых заполнителей начинается при различных температурах (высвобождение связанной воды, $\alpha \rightarrow \beta$ SiO₂ - превращение кварца, разложение известняка). В то же время, противоположные по знаку деформации заполнителя (расширение) и цементного камня (сжатие в результате высушивания) приводит к формированию развитой сети микротрещин в переходной зоне между этими двумя фазами. В некоторых случаях тепловая деформация и рост давления паров приводят к растрескиванию, в результате чего более глубокие слои бетона подвергаются огневому воздействию, увеличивая тем самым скорость теплопередачи.

Эти явления значительно ослабляют механические характеристики материала. Прочность бетона на сжатие при температуре ниже 500°C снижается медленно, при температуре выше 500°C быстро [2]. Характер упомянутых трансформаций необратим, поэтому разрушение остается неизменным после охлаждения до комнатной температуры, и между «горячими» и «остаточными» механическими свойствами обычно имеются незначительные отличия.

Что касается других определяющих параметров, то, как правило, наблюдается более значительное снижение модуля упругости, тогда как прочность на растяжение более чувствительна к температуре [2]. Однако разрушение может быть частично компенсировано возросшей способностью термически поврежденного бетона к неупругой деформации за счет более мягкого снижения когезионных напряжений вдоль трещин и почти постоянной энергии разрушения в результате возросшей шероховатости и ветвистости трещин [3]. Эти благо-

приятные факторы представляют особый интерес при рассмотрении механизмов сопротивления, действующих под влиянием работы материала при растяжении, как в случае сдвиговой прочности балок и плит [4], прочности сцепления арматурных стержней и крепежных деталей [5] и чувствительности к растрескиванию [6].

Тем не менее, благоприятное влияние пониженной хрупкости следует также учитывать при описании сопротивления материала при растяжении посредством методик непрямых испытаний (изгиб, раскалывание и т.д.), поскольку фактическое снижение прочности может в некоторой степени маскироваться лучшими «конструктивными» характеристиками образцов бетона малого размера. По этой причине для определения характеристик материала часто предпочтительными являются хорошо контролируемые испытания в реальных условиях. Однако, поскольку испытания на простое растяжение при высокой температуре вряд ли возможны, эти испытания выполняются при остаточных условиях [7].

Эти общие тенденции изменяются в зависимости от состава смеси. В частности, прочность некоторых бетонов может снижаться при 500°C буквально до нуля [4], в то время как другие бетоны сохраняют значительную часть своей начальной прочности [1]. Поведение высококачественных бетонов более разнообразно: высокопрочный бетон обычно более чувствителен к температуре из-за его высокой жесткости, низкой пористости и меньшего количества дефектов; преимущество газобетона является мягкий и термически стабильный заполнитель, но он склонен к взрывному растрескиванию; самоуплотняющийся бетон более склонен к высушиванию и деформации ползучести в цементном камне.

1. Материалы и методики испытаний. За последние годы было осуществлено множество исследовательских проектов по различным типам термически поврежденного бетона. Поскольку во всех случаях целью было исследование определяющего поведения материала, важной задачей являлось исключение всех возможных конструктивных факторов, таких как тепловые градиенты и растрес-

Леонович С.Н., д.т.н., профессор, зав. кафедрой технологии строительного производства Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

Литвиновский Д.А., аспирант кафедры технологии бетонов и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

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

квивание. По этой причине термические циклы были достаточно медленными, чтобы обеспечить почти равномерное распределение тепловых повреждений внутри образца (скорость нагрева $v_h = 0,5 - 2 \text{ }^\circ\text{C/мин}$).

Учитывая небольшие отличия от «горячей» характеристики, большинство испытаний проводились в остаточном состоянии для полного контроля над условиями испытаний и точной регистрации результатов. Рассматриваются следующие типы бетона:

1. Высококачественные бетоны для массивных конструкций.

Исследованы две марки бетона для проверки эффективности их использования в конструкции вторичной защитной оболочки атомной электростанции (совместно с профессором Ульрихом Шнайдером).

2. Тяжелый бетон обычной прочности с различными заполнителями.

3. Легкий бетон обычной прочности с различными заполнителями.

Самыми значимыми факторами [2], влияющими на характеристики исследованных при высокой температуре марок бетона, являются: тип заполнителя (ТА); максимальный размер заполнителя (d_{\max}); массовое соотношение заполнитель/мелкозернистая фракция (a/f); соотношение вода/связующее вещество (w/b); прочность при сжатии при температуре окружающего воздуха (f_c^{20}).

Влияние типа заполнителя (ТА) на характеристики бетона в напряженном состоянии при высокой температуре двояко. Природа заполнителя, т.е. его минералогический состав, обычно влияет на ослабление механических свойств бетона при высокой температуре. С другой стороны, текстура заполнителя (дробленый или естественный круглый) может влиять на его характеристики разрушения, в особенности на энергию разрушения.

Другими важными параметрами являются максимальный размер заполнителя (d_{\max}) и соотношение заполнитель/мелкозернистая фракция (a/f): первый по причине его роли в перекрывающем действии над трещинами, второй по причине его влияния на шероховатость поверхности трещины. Более того, соотношение заполнитель/мелкозернистая фракция, как, оказывается, имеет значительное влияние на ослабление прочности бетона, подверженного действию высокой температуры, поскольку относительное ослабление для тощих смесей меньше, чем для жирных [2].

Ослабление прочности при сжатии для рассматриваемых марок бетона является функцией температуры. Результаты имеют большой разброс, поскольку температура - не лучший параметр для количественного представления теплового повреждения. Известно, что одна и та же температура может быть более или менее разрушительной в зависимости от характеристик бетона. Если необходимо сравнить бетоны с различными характеристиками, более целесообразно обратиться к параметру повреждения D определяемому на основании снижения модуля упругости:

$$D(T) = 1 - E(T)/E^{20} \quad (1)$$

Прочность при сжатии обычно менее чувствительна к высокой температуре, чем модуль упругости.

2. Экспериментальные вопросы при испытании термически поврежденного бетона на растяжение. Общеизвестно, что самым простым методом испытаний для определения характеристик растяжения бетона является испытание на простое растяжение. Несмотря на простоту в своей сущности, на это испытание оказывает сильное влияние закрепление концов образца. Предотвращение или допущение вращения концов образца влияет на его способность к изгибу из-за потери устойчивости, вызванной разупрочнением материала.

В результате возможно раскрытие трещин вдоль одной стороны поперечного сечения излома, в то время как другая сторона подвергается сжатию. Этот эффект особенно заметен в слабо поврежденных высокопрочных бетонах, сочетающих неоднородность, вызванную температурными дефектами, и значительную хрупкость (резкое разупрочнение).

Этого явления можно избежать, создавая почти равномерное раскрытие трещины с использованием специально сконструированных испытательных стенов и достаточно коротких образцов [3;4], но их вряд ли можно применять внутри горячей печи [8]. Таким образом, влияние условий испытания в общем случае менее значимо по сравнению с влиянием формы образца и граничных условий. Исходя из этого, остаточные испытания с закрепленным концом на данный момент представляются самым объективным способом определения характеристик разрушения всех видов бетона: от неповрежденного до полностью поврежденного материала.

Испытание на простое растяжение с закрепленным концом не только дает возможность точно оценить прочность бетона на растяжение (пиковое напряжение на кривой напряжение-раскрытие трещины), но также позволяет определить наклон ветви разупрочнения, что является показателем снижения когезионного напряжения, связанного с увеличением раскрытия трещины. Как уже отмечалось, термическое повреждение делает трещину более разветвленной и извилистой, а также значительно сглаживает постпиковую характеристику.

Одним из следствий более низкой характеристики является большее соответствие между испытаниями на простое растяжение при закрепленных и шарнирно опертых концах в случае сильно поврежденных бетонов. Кроме того, большее зацепление берегов трещины преобладает над тенденцией к раскрытию, что является результатом возросшей деформируемости поврежденного материала. Явным указанием на совместное действие этих противоположных тенденций являются возрастающие значения отношения модуля упругости E к наклону кривой разупрочнения K при возрастающих уровнях повреждения. Это отношение эквивалентно характеристической длине Хиллерборга, т.е. ширине зоны полностью развившегося процесса разрушения, где, как считается, трещина может раскрыться, но все еще в состоянии передавать когезионные напряжения.

Этот параметр имеет ключевое значение для анализа результатов непрямых методов испытаний, учитывая различную длину трещин, образующихся при таких испытаниях. В случае изгиба эквивалентная прочность материала обычно вычисляется по пиковому моменту M_{\max} при предельном допущении упруго-хрупкой характеристики растяжения, что обосновано для неповрежденного бетона. На самом деле после зарождения трещины имеет место некоторое устойчивое ее распространение, и эквивалентная прочность оказывается выше истинной прочности при растяжении. Разница возрастает до 3 раз для малых образцов сильно поврежденного бетона, что указывает на глубокое распространение зоны процесса, подверженной почти равномерному когезионному напряжению. В таких условиях допущение об идеальной пластичности представляется более близким к реальной картине напряжений в поперечном сечении излома.

Кроме того, на характеристику изгиба значительное влияние оказывает высота сечения балки, а повышенная пластичность материала проявляется более в лабораторных образцах, чем в масштабе реальных конструктивных элементов.

Лучшая ситуация при испытаниях на раскалывание благодаря большей равномерности раскрытия трещины при пике нагрузки, особенно в случае коротких цилиндров, которые менее подвержены распространению трещины по толщине образца. Также в этом случае эквивалентная прочность материала вычисляется с допущением упругого материала, хотя имеется некоторая неупругая деформация в зонах напряжений образца, работающих на растяжение или сжатие. Сравнение с фактической прочностью материала показывает небольшое отклонение при возрастающей температуре, причем повышенная пластичность оказывает не существенное влияние на оценку снижения прочности.

Тем не менее, испытания на изгиб все еще остаются эффективным методом определения полной работы излома материала при условии, что особое внимание уделяется конструкции испытательного стенов. Важным аспектом, который следует учитывать, является прорезка паза в центре, оптимальная глубина которого определяется требованием локализации разрушения в одной трещине, сохраняя степень связи и предотвращая формирование значительных по

Таблица 1. Состав и характеристика бетона

№п/п	Тип бетона	Соотношение массовых долей Ц-П-ИГ	Цемент	Вода	Песок	Измельченный гранит	Цемент/вода	Вода/цемент	γ кг/куб.м	f_{cube} МПа
1	Тяжелый бетон, кварцевый песок,	1:2,7:5,6	240	156	640	1347	1,54	0,65	2260	23,1
2	измельченный гранит	1:1,5:3,8	354	158	583	1240	2,24	0,45	2270	41,3
3	Легкий бетон, кварцевый песок,	1:0,77:2,7	500	175	385	1247	2,86	0,35	2210	50,5
4	глиноземистый заполнитель	1:2,3:0,8	395	200	925	321	1,98	0,51	1689	21,1
5		1:2,3:0,8	400	168	930	325	2,38	0,42	1710	36,7

Таблица 2. Влияние температуры и типа бетона на коэффициенты интенсивности напряжений K_{IC} и K_{IIC}

	20°C	80°C	120°C	200°	400°C	600°
1	<u>0,309</u>	<u>0,185</u>	<u>0,170</u>	<u>0,155</u>	<u>0,133</u>	<u>0,117</u>
	4,06	3,05	2,92	2,64	2,07	1,62
2	<u>0,423</u>	<u>0,275</u>	<u>0,241</u>	<u>0,228</u>	<u>0,199</u>	<u>0,169</u>
	4,98	3,98	3,78	3,34	2,69	2,44
3	<u>0,482</u>	<u>0,337</u>	<u>0,299</u>	<u>0,275</u>	<u>0,236</u>	<u>0,212</u>
	5,15	4,38	4,12	3,84	3,09	2,65
4	<u>0,255</u>	<u>0,115</u>	<u>0,102</u>	<u>0,112</u>	<u>0,090</u>	<u>0,079</u>
	2,82	1,51	1,44	1,55	1,16	0,99
5	<u>0,356</u>	<u>0,178</u>	<u>0,150</u>	<u>0,160</u>	<u>0,139</u>	<u>0,114</u>
	3,63	2,21	2,09	2,14	1,63	1,36

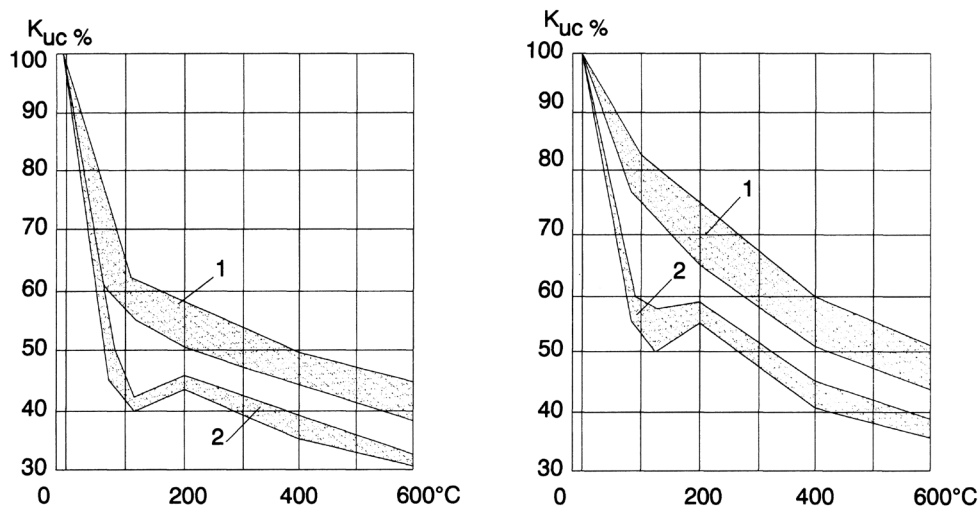


Рис. 1. Влияние коэффициентов интенсивности напряжений K_{IC} и K_{IIC} на температуру: 1 - тяжелый гранитный заполнитель, 2 - легкий пористый искусственный заполнитель

размеру трещин при тепловом воздействии. Вторым важным аспектом является точное измерение действительного прогиба балки из-за роста значений неупругой локальной усадки от нагрузочных роликов. Наконец, нужно правильно учесть работу, выполняемую собственным весом образца, поскольку при растущих температурах образец разупрочняется, предшествующие разрушению перемещения становятся значительными. Работой, выполняемой собственным весом, больше нельзя пренебрегать, и собственный вес может даже вызвать преждевременное разрушение образца.

3. Результаты экспериментов. Относительное снижение прочности на растяжение соответствует относительному снижению модуля упругости. Это не является неожиданным, поскольку любая возможная нелинейность или перераспределение из-за конструктивных эффектов исключены при испытаниях на простое растяжение с закрепленными концами.

Однако вышеупомянутые конструктивные эффекты становятся очевидными в случае рассмотрения прочности на растяжение при изгибе. Эта методика испытаний допускает некоторое перераспределение напряжений по поперечному сечению и, таким образом, приводит к более высоким кажущимся значениям прочности при растяжении. То же происходит с прочностью на раскалывание, несмотря на то, что в этом случае стелд для испытаний допускает меньшее перераспределение напряжений по сравнению с испытаниями на изгиб.

Объяснение роста прочности на изгиб и прочности на раскалывание можно найти в зависимости энергии разрушения от термического повреждения: в отличие от других свойств при большом разномобразии рассматриваемых здесь бетонов энергия разрушения не уменьшается монотонно с температурой. В определенном диапазоне значений термического повреждения D (обычно между 150 и 350°C) она даже возрастает. Эта тенденция объясняет повышенную

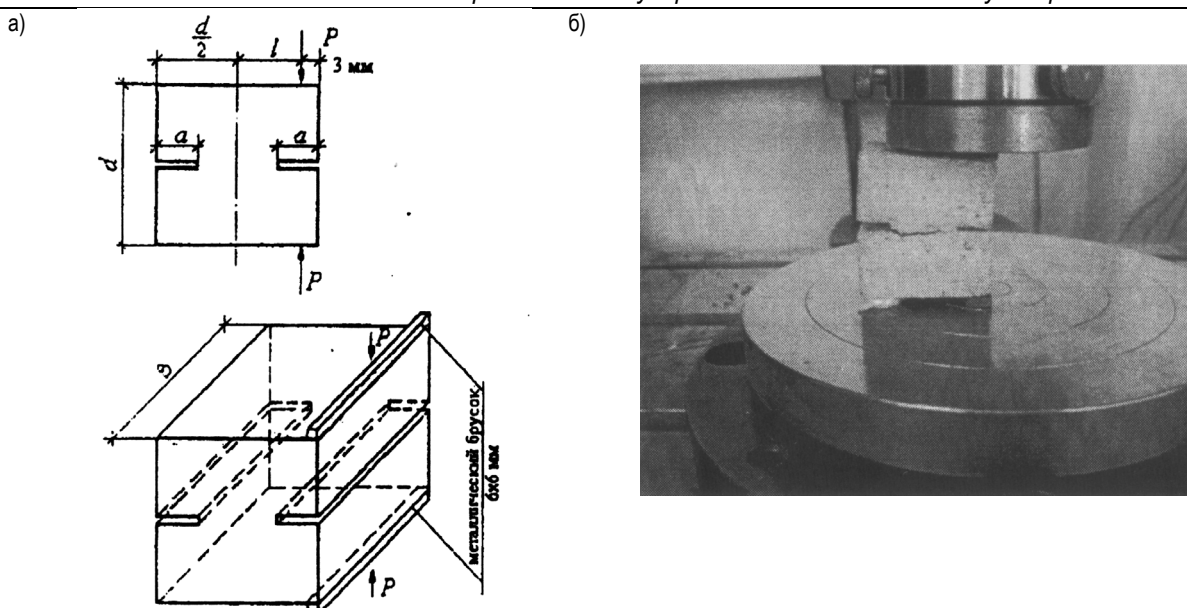


Рис. 2. Схема испытания кубов с пазами для определения K_{IC} и K_{IIC} (а) и фрагмент испытания в прессе (б)

Таблица 3. Составы бетона

Бетон обычной прочности	Цемент	360кг/м ³
	Водо-цементное отношение	0,65
	Заполнитель <4 мм	1686кг/м ³
	Микрокремнезем	0
Высокопрочный бетон	Цемент	600
	Водо-цементное отношение	0,35
	Заполнитель <4 мм	1576,6кг/м ³
	Микрокремнезем	15%

пластичность конструктивных образцов при высокой температуре и, в результате, рост непрямой прочности при растяжении.

Важным преимуществом концепции равновесных испытаний является то, что вычисляемые по полностью равновесным диаграммам деформирования энергетические и силовые параметры разрушения бетона инвариантны относительно условий испытания. Они остаются неизменными при варьировании в широких пределах таких характеристик испытаний, как жесткость испытательной машины, скорость статического нагружения, размеры сечения образца, длина начальной трещины (надреза) и длина развивающейся после старта макротрещины, длина расчетной части образца, схема нагружения. Гораздо быстрее и проще провести неравновесное испытание.

Неравновесные испытания подразделяются на эксперименты с устойчивым ростом трещины, когда она растет с увеличением внешней нагрузки постепенно, и с неустойчивым (как в задаче Гриффитса), когда моменты старта трещины и полного разрушения образца совпадают.

Рассмотрим пример использования неравновесной методики определения величины K_{IC} на бетонных кубах размером 50х50 с надрезами – инициаторами трещины, проведенном совместно с проф. Ульрихом Шнайдером (Институт строительных материалов и технологий, Венский технический университет).

Каждая серия образцов (при семи суток выдержки) с иницирующими надрезами испытывалась при температурах 20°С, 300°С и

400°С, контрольные шесть кубов без надрезов подвергались испытаниям при тех же температурах. Скорость нагрева составляла 2°С/мин. Предусматривается испытание кубов по схеме внецентренного сжатия на прессе с помощью двух опор из металлических брусков размером поперечного сечения 6х6 мм (рис. 2). Величина K_{IC} вычисляется с использованием результатов испытаний:

$$K_{IC} = \frac{P}{Bd^{1/2}} \left[18,3 \left[\left(\frac{a}{d} \right)^{1/2} - 430 \left(\frac{a}{d} \right)^{3/2} + 3445 \left(\frac{a}{d} \right)^{5/2} - 11076 \left(\frac{a}{d} \right)^{7/2} + 12967 \left(\frac{a}{d} \right)^{9/2} \right] \right], \quad (1)$$

где P - нагрузка, разрушающая образец, в МН; B - толщина образца; d - высота либо ширина образца; a - глубина надреза (все размеры в метрах).

Разрушение куба происходит неустойчиво по плоскости движущейся трещины между двумя надрезами. Результаты испытаний образцов двух составов (табл. 3) приведены в таблицах 4 и 5.

По результатам вышеприведенных испытаний можно заключить, что метод неравновесных испытаний кубов с иницирующими надрезами дает вполне адекватную картину трещиностойкости и вязкости разрушения обычного и высокопрочного бетона при высоких температурах.

Таблица 4. Результаты испытания бетонов обычной прочности

Бетон обычной прочности		
Температура [°C]	$f_{c,7}$ [Н/мм]	$K_{I,C}$ [Н/мм ^{3/2}]
20	22,92	0,12
300	26,21	0,14
400	25,34	0,13

Таблица 5. Результаты испытания высокопрочного бетона

Высокопрочный бетон		
Температура [°C]	$f_{c,7}$ [Н/мм]	$K_{I,C}$ [Н/мм ^{3/2}]
20	61,90	0,32
300	93,57	0,49
400	81,64	0,43

Примечание: $f_{c,7}$ - прочность при семи сутках выдержки

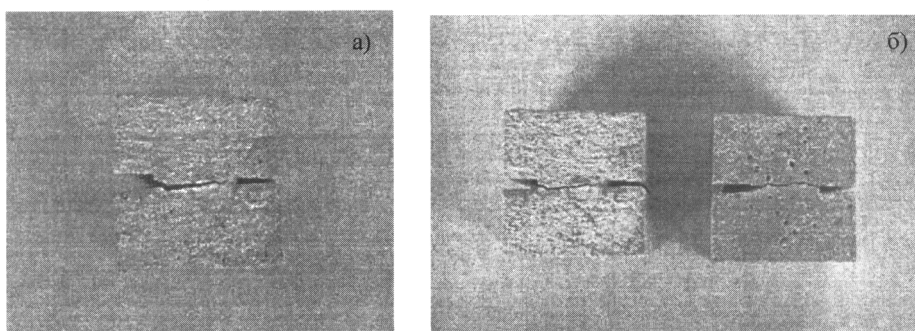


Рис. 4. Результаты испытания кубов при 20 °С: а) из бетона обычной прочности, б) из высокопрочного бетона

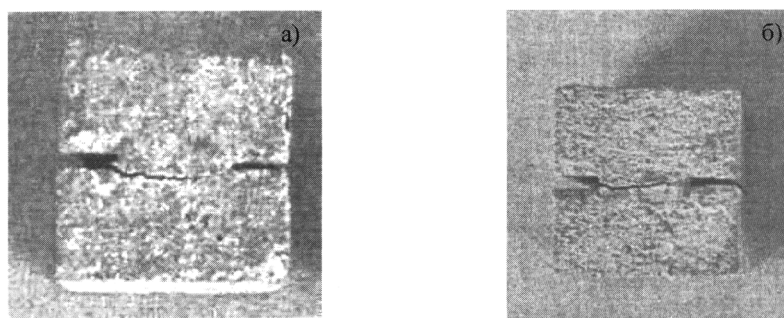


Рис. 5. Результаты испытания кубов при 300 °С: а) из бетона обычной прочности; б) из высокопрочного бетона

Выводы. Проанализированы способы измерения прочности при растяжении испытанием на простое растяжение с закрепленными концами, испытанием при раскалывании, на изгиб в широком диапазоне температур.

По результатам вышеприведенных испытаний можно заключить, что метод неравновесных испытаний кубов с инициирующими надрезами дает вполне адекватную картину трещиностойкости и вязкости разрушения обычного и высокопрочного бетона при высоких температурах.

Испытание образцов с инициирующими надрезами (семь суток выдержки) показывает на увеличение прочности бетона при нагреве до 300 °С вследствие ускоренного процесса созревания, а с увеличением прогрева до 400 °С происходят разрушительные процессы с уменьшением достигнутой прочности.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Khoury, G.A. Effect of Fire on Concrete and Concrete Structures. / Khoury G.A. // Progress in Structural Engineering Materials, 2000, - pp. 429-447.

2. RILEM-Committee 44-PHT, 1985. Behaviour of Concrete at High Temperatures. / Technical Report Ed. by U. Schneider, Dept. of Civil Engineering, Gesamthochschule, Kassel Universitat, Kassel (Germany), 122 pp.

3. Felicetti, R. On the Residual Properties of High Performance Siliceous Concrete Exposed to High-Temperature. / Felicetti R., Gambarova P.G. // Special Volume in honor of Z.P. Bazant's 60th Anniversary, Prague, March 27-28, 1998. Ed. Hermes (Paris). - 167-186.

4. Felicetti, R. On the residual behavior of HPC slabs subjected to high temperature. / Felicetti R., Gambarova P.G. // Proc. PCyFHWA/FIB Int. Symp. On HPC and 46th Annual PCI Convention, Orlando (Florida), Sept. 25-27, 2000. pp. 598-607.

5. Bamonte, P. Residual Capacity of Undercut Fasteners Installed in Thermally-Damaged Concrete. / Bamonte P., Gambarova P.G., Gorla A. & Niglia A. // Proc. of the 2nd International fib Congress, June 2006, Naples (Italy), Vol.1, 234- 235 (12-page paper on CD).

6. Gawin, D. Towards prediction of the thermal spalling risk through a multiphase porous media model of concrete. / Gawin D., Pesavento 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. 5th 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

Плосконосов 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 гидросульфоалюминатом 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 самоупругения 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 топохимическому механизму реакции взаимодействия гипса с алюминат-

ными компонентами с увеличением объема цементного камня (активный этtringит). Внешняя деформация цементного камня зависит не только от количества образовавшегося «активного» этtringита, но и от жесткости силикатной матрицы, от соотношений жесткости силикатного и сульфоалюминатного 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 самоупругения, но и существенно сокращается время до стабилизации самоупругения.

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

Г. Калоузеком [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.

Плосконосов 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