

Савеня Дмитрий Николаевич, старший преподаватель,
УО «Брестский государственный технический
университет», г. Брест

Плосконосов Владимир Николаевич, канд. техн. наук, доцент,
профессор, УО «Брестский государственный
технический университет», г. Брест

ТВЕРДЕНИЕ БЕТОНА НА ОСНОВЕ НАПРЯГАЮЩЕГО ЦЕМЕНТА В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

HARDENING OF CONCRETE ON THE BASIS OF SELF-STRESSING CEMENT IN WINTER CONDITIONS

Аннотация

Приведены результаты исследования самоупреждения цемента марки НЦ-4-42.5 по СТБ 1335-2002 типа М в интервале температур 20 ± 5 °C и 3 ± 2 °C. Установлено, что при кратковременном прогреве бетона при 38 ± 2 °C происходит стабилизация процесса самоупреждения. Определены благоприятные временной (8 часов) и температурный ($+35 \dots +40$ °C) интервалы для прогрева бетонов на основе напрягающегося цемента.

Abstract

The results of studying cement grade NC-4 according STB 42.5 1335-2002 Type M self-stressing at the temperature range of 20 ± 5 °C and 3 ± 2 °C are given. The stabilization of self-stressing process in case of short-termed heating of concrete at 38 ± 2 °C is stated. The favorable time (8 hours) and thermal ($+35 \dots +40$ °C) intervals for heating or concrete based on self-straining cement are defined.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи, которые выполняют напрягающие цементы при возведении строительных конструкций и сооружений, расширяют возможности объемного напряжения арматуры в монолитных и сборно-монолитных конструкциях [7]. В результате повышения технологичности производства монолитных работ снижаются трудозатраты в сравнении с механическими способами натяжения арматуры в условиях строительной площадки. Снижение трудозатрат в свою очередь повышает скорость возведения конструкций.

Однако оптимальные условия твердения бетона на основе напрягающегося цемента (НЦ) ограничиваются высоким содержанием

влаги в твердеющем бетоне и температурой окружающей среды 20 ± 5 °С. Механизм расширения НЦ типа М основан на образовании трисульфатной формы гидросульфоалюмината кальция, для чего необходима 31 молекула воды. При недостаточном содержании влаги в бетоне происходит перекристаллизация гексагональной формы гидроалюмината кальция в кубическую с образованием прежде всего моносульфоалюмината кальция, что приводит к уменьшению в объеме гидратных новообразований и, как следствие, к значительным усадочным деформациям. При температуре среды ниже +15 °С замедляется гидратация основных клинкерных минералов и создается благоприятная среда для образования гидросульфоалюмината кальция состава $C_3A(CS)_3H_{31}$ с последующим расширением бетона [5]. В результате низкие прочностные показатели бетона и интенсивный рост деформаций расширения в начальные сроки твердения приводят к разрушению цементной матрицы [2].

Для достижения проектных значений самонапряжения бетона на НЦ также необходимо обеспечить строго определенное соотношение компонентов С : А : CS (оксид кальция : алюминаты : сульфаты) [3, 6]. Причем на это соотношение существенно влияет температурный фактор [5]. Для достижения необходимого показателя прочности бетонов на НЦ важным также является соответствие скорости взаимодействия расширяющих компонентов С : А : CS : Н и компонентов портландцемента.

Процесс формирования структуры цементного камня НЦ – многостадийный процесс: в начальной стадии необходимо обеспечить строго определенные условия для гидратации основных минералов портландцементного клинкера с формированием определенной начальной структуры. Далее на фоне гидратации портландцемента активно протекает процесс гидратации расширяющегося компонента – взаимодействие гипса с алюминатными минералами с образованием этtringита. Последующий третий этап характеризуется стабилизацией расширения и постепенного восстановления нарушенных контактов, уплотнения структуры, ее «залечиванием» вследствие заполнения пор и микротрещин гидратными новообразованиями. Очень важно, чтобы расширение происходило при уже достаточной прочности цементного камня, но в таком состоянии, когда он способен без спада прочности следовать за расширением структуры [2].

Протекание процессов деформации расширения и полнота реакций НЦ могут быть обеспечены только при наличии строго определенных внешних температурно-влажностных факторов среды. Это требование ограничивает область применения НЦ, особенно в монолитном строительстве при низких температурах среды. Известно,

что при температурах $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже необходимо создавать благоприятный температурно-влажностный режим твердения бетона на основе портландцемента путем применения различных методов его выдерживания. Из всех методов наиболее широко применяется «метод термоса», при использовании которого бетонная смесь предварительно нагревается и укладывается в утепленную опалубку. До достижения бетоном необходимой прочности либо для конструкций с высоким модулем поверхности применяется искусственный прогрев бетонной смеси в опалубке.

«Метод термоса», в частности, согласно уравнению теплового баланса регламентирует прежде всего максимально возможную начальную температуру бетонной смеси, величина которой ограничена теплотермиями и сроками схватывания при транспортировании и укладке бетонной смеси в опалубку.

Вопросу влияния повышенных температур на процессы твердения бетонов на НЦ посвящен ряд исследований [3, 4 и др.], но все они выполнены для ТВО в заводских условиях, когда период от нагрева до укладки бетонной смеси в формы не сопоставим с временными параметрами в монолитном строительстве. Очевидно, заводское приготвление теплых бетонных смесей на НЦ и последующая их доставка на строительную площадку невозможны ввиду очень большой скорости протекания процессов их схватывания и твердения, следовательно, прогрев бетонной смеси можно выполнить только непосредственно перед укладкой ее в опалубку на строительной площадке.

При производстве монолитных бетонных работ «методом термоса» решающее значение имеет экзотермия химических реакций гидратации входящих в состав цемента минералов. В этом случае бетоны на НЦ имеют преимущество по сравнению с бетонами на портландцементе (ПЦ), поскольку экзотермия бетонов на НЦ выше, чем экзотермия бетонов на ПЦ. В бетонах на НЦ к тепловой энергии при гидратации силикатных клинкерных минералов на начальной стадии добавляется экзотермия гидратации и формирования алюминатной составляющей и последующего образования этtringита. Образование этtringита сопровождается выделением в среднем 490 кДж/кг тепловой энергии [1]. Теплота экзотермии может также быть рассчитана по количеству связанных в этом соединении алюминатов [3].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В расчетах в качестве типового состава был принят состав напругающего цемента марки НЦ-4-42.5 по (СТБ 1335-2002). Вещественный состав цемента ПЦ : ГЦ : Г=81 : 10 : 9 (в % по массе). Использован портландцемент Красносельского цементного завода

марки ПЦ 500–Д0 (ГОСТ 10178-85). Минералогический состав – C_3S – 56...57 %, C_2S – 70...22 %, C_3A – 5 %, C_4AF – 16 %, CS – 3 %. В качестве расширяющего компонента были приняты двухводный гипс 1-го сорта Сауришского карьера и глиноземистый цемент Пашийского цементного завода (ГОСТ 969); количество Al_2O_3 в его составе – 38,65 %.

Физико-механические испытания энергии самоупругения были проведены в соответствии с СТБ 1335 на цементе марки НЦ-4-42.5 (СТБ 1335-2002). Для приготовления цементно-песчаных образцов использовался песок с модулем крупности $M_k = 2,3$. Вода для приготовления образцов соответствует требованиям СТБ 1114. Образцы выдерживались в термокамере.

Для определения показателя самоупругения были смоделированы температурные и изолированные от внешней среды условия твердения бетона в опалубке (табл. 1). Эталонные образцы выдерживались в стандартных условиях в соответствии с СТБ 1335.

Таблица 1

Параметры выдерживания бетонных образцов

№ партии	Температура моделируемой среды, °С	Продолжительность выдерживания в моделируемой среде	Температура хранения, °С	Условия хранения	Температура воды затворения, °С
1	20 ± 5	28 сут.	20 ± 5	Водное	20
2	38 ± 2	8 ч	3 ± 2	В термокамере	20
3	70 ± 2	8 ч	3 ± 2	В термокамере	20

Эталонный образец 1-й партии для испытания марки цемента хранился в стандартных условиях твердения в течение 28 суток. Образцы 2-й и 3-й партии выдерживались без доступа влаги в течение первые двух суток и в период тепловой выдержки, а затем до 28-суточного срока твердения – в изолированных условиях при температуре 3 ± 2 °С. Далее в течение трех месяцев все образцы хранились на открытом воздухе и во влажном грунте.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Для практических расчетов величины экзотермии при гидратации напрягающего цемента в зависимости от его минералогического и вещественного состава с учетом данных [1] и наших расчетов могут быть использованы данные, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

**Доля участия клинкерных минералов портландцемента
и сульфоалюминатной составляющей в экзотермии
напрягающего цемента при его твердении
в кДж/кг на 1 % минерала
(по данным Кинда В.А., Окорочкова С.Д., Вольфсон С.Л.)**

Срок твер- дения	Минералы				
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	ГСАК
3 сут.	0,929	0,159	1,517	-0,119	0,195
7 сут.	1,093	0,231	2,069	-0,414	0,446
28 сут.	1,142	0,243	2,299	+0,140	0,491
3 мес.	1,183	0,253	2,458	+0,332	0,509
6 мес.	1,220	0,445	2,457	+0,382	0,533
1 год	1,296	0,532	2,525	+0,400	0,558

Как видно из табл. 3, при использовании напрягающего цемента в массивных монолитных конструкциях необходимо учитывать модуль поверхности, так как в начальный период (первые сутки) происходит пикообразное тепловыделение НЦ. Необходимо также отметить, что с повышением температуры с 20 до 60 °С тепловыделение усиливается в течение первых 6...12 часов.

Таблица 3

**Тепловыделение цемента марки НЦ-4-42.5 (СТБ 1335-2002)
во времени при заданной температуре**

Температура, °С	Тепловыделение цемента кДж/кг за время твердения, сут.							
	0,25	0,5	1	2	3	7	14	28
5	22	38	54	108	140	137	244	248
10	45	82	101	150	207	278	314	338
20	66	111	174	232	284	319	354	388
40	148	207	247	288	314	365	388	—
60	223	264	248	331	365	366	—	—

Перегрев бетона в начальный период приводит к потере энергии самонапряжения, так как этрингит переходит в моносульфоалюминат кальция. Показатель энергии самонапряжения в данном случае является определяющим, и его неполная реализация или потеря

ограничивают возможность применения бетона на основе напрягающего цемента в опалубочных системах с низким модулем поверхности.

Как видно из рис. 1, показатель самонапряжения при изотермическом выдерживании образцов при температуре $38 \pm 2^\circ\text{C}$ был реализован полностью на вторые сутки (кривая 2 рис. 1). После прогрева образцы выдерживались в изолированных условиях при температуре $3 \pm 2^\circ\text{C}$. Усадка образцов происходила в результате недостатка влаги. После 28-суточного хранения образцы были помещены во влажный грунт, что отразилось на графике самонапряжения в виде стабилизации деформаций. Необходимо отметить, что максимальный показатель самонапряжения (кривая 2) был достигнут на вторые сутки, а эталонного образца – через 14 суток.

При температуре $70 \pm 2^\circ\text{C}$ произошло снижение энергетических характеристик НЦ по сравнению с эталонным образцом на 75 % в первые сутки (кривая 3 рис. 1) и на 105 % – в 28-е сутки. Это обусловлено температурным воздействием. При указанных температурах происходит перекристаллизация этtringита в моносulьфоалюминат кальция.

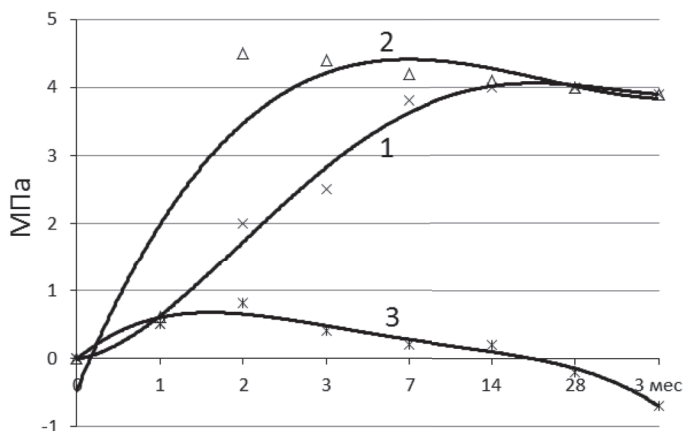


Рисунок 1. Самонапряжение цементно-песчаных образцов на основе НЦ-4-42.5 (СТБ 1335-2002) с режимом выдерживания образцов партии 1, 2, 3 согласно табл. 1

Необходимо также отметить, что количество продуктов гидратации, образовавшееся на начальной стадии твердения, определяется степенью гидратации цемента к 28-м суткам. Известно также, что плотная сольватная оболочка, образовавшаяся из продуктов гидратации на зернах цемента на начальном этапе, затрудняет процесс диффузии воды

к зерну цемента и снижает интенсивность гидратации [1]. В результате показатели деформаций самонапряжения для кривой 3 рис. 1 снижались во времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тепловыделение напрягающего цемента происходит интенсивно в первые сутки в интервале 6–12 часов и зависит от начальной температуры и модуля поверхности. С повышением температуры увеличивается и тепловыделение НЦ, что необходимо учитывать при проектировании опалубки для массивных монолитных конструкций с низким модулем поверхности.

Максимальная реализация энергии расширения для бетона на НЦ может быть достигнута при температуре не выше $+35 \dots +40$ °С. Превышение указанного диапазона температур ведет к потере энергии самонапряжения, а в длительном периоде один-три месяца в естественных условиях – к усадке. Прогрев цементно-песчаных образцов на начальном этапе при температуре 38 ± 2 °С в течение 8 часов позволяет достичь заданного показателя самонапряжения в 1-е сутки прогрева.

Прогрев бетона можно проводить после достижения проектного значения самонапряжения с целью стабилизации деформаций расширения. Такой механизм позволяет регулировать сроки расширения за счет перекристаллизации этtringита в моносulfоалюминат кальция.

Практически рассчитаны величины экзотермии гидратации напрягающего цемента марки НЦ-4-42.5 (СТБ 1335-2002) с учетом его минералогического и вещественного состава, которые показали, что в начальный период (первые сутки) происходит пикообразное тепловыделение НЦ.

Список использованных источников

1. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, В.С. Колокольчиков. – М. : Стройиздат, 1979. – 479 с.
2. Красильников, К.Г. Физико-химия собственных деформаций цементного камня / К.Г. Красильников, Л.В. Никитина, Н.Н. Скоблинская. – М. : Стройиздат, 1980. – 256 с.
3. Михайлов, В.В. Расширяющийся и напрягающий цементы и самонапряженные железобетонные конструкции / В.В. Михайлов, С.Л. Литвер. – М. : Стройиздат, 1974. – 312 с.
4. Плосконосов, В.Н. Исследование тепловлажностной обработки бетонов на напрягающем цементе / В.Н. Плосконосов, Д.Н. Савеня,

- А.В. Кривеня // Вестн. Брестск. гос. тех. ун-та. Строительство. Прикладные науки. – 2009. – № 1. – С. 53–56.
5. Плосконосов, В.Н. Исследование кинетики твердофазового расширения материалов напрягающего цемента в условиях низких положительных температур / В.Н. Плосконосов, Д.Н. Савеня // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров республики Беларусь: новые технологии, ресурсо- и энергосбережение в строительной отрасли: материалы XV Междунар. науч.-метод. семинара, Полоцк, 27-28 ноября 2008 г. / Полоцк гос. ун-т; под ред. Д.Н. Лозовского [и др.]. – Полоцк, 2008. – 283 с.
 6. Тейлор, Х. Химия цемента. / Х. Тейлор ; перевод с англ. – М. : Мир, 1996. – 560 с.
 7. Тур, В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкции при применении напрягающего бетона / В.В. Тур. – Брест : Изд. БПИ, 1998. – 244 с.
 8. Цемент напрягающий. Технические условия: СНБ 1335 – 2002. – Введ. 28.06.02 – Минск : Министерство архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2002. – 17 с.

Статья поступила в редколлегию 28.10.2013