

временных технологий виртуальных бетонов, на основе которых могут быть разработаны новые методы прогнозирования свойств реального материала.

Технология получения высокоэффективных бетонов должна стать более точной, надежной и простой в конечной реализации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. К.Г. Красильников, Л.В. Никитина, Н.Н. Скоблинская. Физико-химия собственных деформаций цементного камня. – М.: Стройиздат.– 1980 – 256с.1
2. D.P. Bentz. Three-Dimensional Computer Simulation of Portland Cement Hydration and Microstructure Development, *J. Am. Ceram Soc.*, **80** [1] 3-21 (1997).
3. E.J. Garboczi, K.A. Snyder, J.F. Douglas and M.F. Thorpe, *Phys. Rev.* **E52**, 819 (1995)
4. J. Kertesz, *J. Phys. Lett.* **42**, L393 (1981); W.T. Elam, A.R.Kerstein, and J.J. Rehr, *Phys. Rev. Lett.* **52**, 1516 (1984); S.B. Lee and S. Torquato, *J. Chem. Phys.* **89**, 3258 (1988).
5. W.-G. Lei, "Rheological studies and percolation modeling of microstructure development of fresh cement paste", PhD Thesis (University of Illinois, Department of Materials Science and Engineering, 1995).
6. E.J. Garboczi and D.P. Bentz. Computer Simulation and Percolation Theory Applied to Concrete. NIST, 1999.
7. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979.– 344 с.
8. Красильников К.Г., Подвальный А.М., Сегалов А.Е. О собственных деформациях пористых тел// Коллоидный журнал.– 1974.– том.– №2.– С. 266-271.
9. Тур В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона. Брест: БПИ, 1998.– 244 с.
10. Красильников К.Г., Никитина Л.В. Природа объемных деформаций при твердении расширяющихся цементов// Физико-химические исследования цементного камня и бетона: Сб. тр./ Под ред. А.Е. Десова.– Москва: Стройиздат, 1972.– С. 4–20.
11. Никитина Л.В, Лапшина А.И., Красильников К.Г. Зависимость между условиями кристаллизации этtringита и развитием деформаций расширения при твердении сульфатосодержащих цементов// Физико-химические исследования цементного камня и бетона: Сб. тр./ Под ред. А.Е. Десова.– Москва: Стройиздат, 1972.– С. 4–20.

УДК 666.9

Блещик Н.П., Щербицкая Е.В.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ И ВЫДЕРЖИВАНИЯ ДЛИННОМЕРНЫХ МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ ВЫСОТОЙ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ 300 мм

При разработке новых конструктивных систем многоэтажных зданий с высокими потребительскими качествами и минимальным ресурсопотреблением возникла необходимость в разработке нового конструктивного решения длинномерных (пролетом от 9 и более метров) многопустотных плит увеличенной высоты поперечного сечения (300 мм), предназначенных для применения в перекрытиях многоэтажных зданий стеновых и каркасных систем с широким шагом (более 6 метров). Наряду с решением этой задачи в процессе выполнения научно – исследовательских работ [1] определялись и малоэнергоёмкие режимы выдерживания изделий в камерах тепловой обработки с разработкой технологического регламента изготовления плит для летних и зимних условий производства.

Энергосберегающие режимы тепловлажностной обработки преднапряженных многопустотных плит необходимо было назначать исходя из условия получения требуемой прочности бетона (передаточной, отпускной, проектной) с учетом особенностей, связанных с наличием напрягаемой арматуры, и при соблюдении требований к качеству и долговечности изделий. При этом следовало стремиться к максимальному ускорению твердения бетона при минимально возможных затратах энергетических ресурсов.

Технологический процесс тепловой обработки бетона обычно состоит из четырех этапов: предварительное выдерживание перед термообработкой $\tau_{пр.в}$; подъем температуры от уровня окружающей среды (или смеси) до максимально заданной $\tau_н$; тепловая обработка при максимально заданной температуре (изотермический процесс) $\tau_{из}$ и остывание изде-

лий до распалубки $\tau_{осм}$.

Предварительное выдерживание изделий из жестких бетонных смесей перед пропариванием создает условия для применения более жестких режимов прогрева (причем следует учесть, что при немедленной распалубке изделий скорость подъема температуры не должна превышать 20⁰С/ч) [2]. Чем выше марка цемента и класс бетона, жесткость бетонной смеси, а также температура предварительного выдерживания, тем меньше оптимальная продолжительность этого этапа. Введение химических добавок – ускорителей твердения приводит к сокращению, а пластификаторов и суперпластификаторов, при уменьшении В/Ц и равной удобоукладываемости смеси не изменяет оптимальной длительности предварительного выдерживания [3].

С целью предотвращения возникновения трещин при тепловой обработке при изготовлении многопустотных плит в силовых формах предусматривают предварительное выдерживание не превышающее 1 часа [4].

При изготовлении изделий по агрегатно – поточной технологии арматуру натягивают на упоры силовой формы, которую подвергают тепловой обработке совместно с изделием. На стадии подъема температуры вследствие температурных деформаций поддона на свободных участках арматуры возникают дополнительные напряжения, способствующие вытягиванию арматуры из бетона. При наличии сцепления это нарушает анкеровку арматуры с бетоном, а в дальнейшем при передаче усилия обжатия на бетон приводит к образованию продольных трещин и увеличению зоны передачи напряжений. Дотяжка арматуры при наличии раннего сцепления вызывает и растяги-

Блещик Николай Павлович, д.т.н., профессор каф. технологии строительного производства Белорусского национального технического университета.

Щербицкая Е.В., ассистент каф. технологии строительного производства Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220027, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 65.

вающие напряжения в бетоне, которые могут превысить предельную растяжимость бетона, что приведет к появлению трещин уже при тепловой обработке. Для изделий из бетона высокой прочности, у которых к началу подъема температуры уже имеется высокая структурная прочность и сцепление арматуры с бетоном, такое ухудшение может оказаться особенно значительным. Поэтому повышение проектной прочности бетона для получения требуемой передаточной прочности (в процентах от класса) сразу после тепловой обработки может оказаться нецелесообразным и отрицательно повлиять на качество изделия. Исходя из вышеизложенного, скорость подъема температуры для изделий, изготавливаемых по агрегатно – поточной технологии принята 10⁰С/ч [5].

При назначении температуры изотермического прогрева следует учитывать и то, что с ее увеличением уменьшается сцепление арматуры и растет градиент температуры. В этой связи, а также с целью достижения наибольшей экономии тепловой энергии целесообразно температуру изотермического прогрева ограничить 60⁰С.

Заключительный этап тепловой обработки – охлаждение пустотного настила, лучше всего производить медленно в закрытой камере. Передачу усилия обжатия в целях предотвращения образования технологических трещин при охлаждении следует производить на горячий бетон.

Как видно, совсем не безразлично, какой режим тепловой обработки следует применять при изготовлении данных изделий. Поэтому, исходя из вышеперечисленного, были разработаны энергосберегающие режимы тепловой обработки предварительно напряженных многпустотных плит перекрытия, которые при заданном составе бетона рекомендуется рассчитывать в следующей последовательности.

Принимается средняя температура t_{cp} и ориентировочное время тепловой обработки бетона t_{np} в сутках с учетом вышеперечисленных особенностей. Принимается передаточная и отпускная прочности бетона на сжатие в процентах ($P_{н.}$, $P_{omn.}$) от требуемой прочности бетона, соответствующей проектной марке. При назначении распалубочной прочности бетона следует учитывать, что при изменении ее с 50 до 70% от $f_{c.cube.28}$ расход тепловой энергии возрастает в (1,5-2) раза [4]. Поэтому нужно стремиться к минимизации ее возможного значения, учитывая последующий прирост при выдерживании в цехе или на складе готовой продукции при положительных температурах наружного воздуха.

Устанавливаются температурные режимы выдерживания изделий после тепловой обработки.

Рассчитывается количество воды, поглощенной заполнителем, по формуле

$$B_n = \left(G_{кр} W_{кр} + G_m W_m \right) \cdot 10^{-2} \quad (1)$$

где $G_{кр}$, G_m – масса соответственно крупного и мелкого заполнителей, кг/м³;

$W_{кр}$, W_m – водопоглощение соответственно крупного и мелкого заполнителей, %.

Рассчитывается эффективное водоцементное отношение в бетоне без учета воды, поглощенной заполнителем, W_6 по формуле

$$W_6 = (B - B_{II}) / Ц, \quad (2)$$

где B – общее содержание воды в бетоне, кг/м³;

$Ц$ – содержание цемента в бетоне, кг/м³.

Рассчитывается объемная концентрация цементного теста в бетоне $m_{m.6}$ по формуле

$$m_{т.б} = 1 - \frac{G_m}{\rho_m} - \frac{G_{кр}}{\rho_{кр}}, \quad (3)$$

где ρ_m , $\rho_{кр}$ – соответственно плотность (истинная) мелкого и крупного заполнителей, кг/м³.

Рассчитываются значения функциональных коэффициентов $\Phi_{f.1}$, $\Phi_{f.2}$, определяющих отношение прочности бетона в возрасте одних и двух суток к соответствующей активности цемента, по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{f.1} &= (8 \cdot W_6 - 3,5) \cdot m_{m.6} - 7,22 \cdot W_6 + 5,15; \\ \text{при } W_6 &\leq 0,3; \\ \Phi_{f.1} &= (-435 \cdot W_6^3 + 705 \cdot W_6^2 - 365 \cdot W_6 + 57,8) \cdot m_{m.6} - \\ &- 7,22 \cdot W_6 + 5,15; \\ \text{при } W_6 &> 0,3; \end{aligned} \right\} (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{f.2} &= 2,57 - 3,9 \cdot (W_6 - 0,3)^{0,55} - \\ &- 3,3 \cdot (W_6 - 0,144) \cdot (m_{m.6} - 0,2). \end{aligned} \right\} (5)$$

Определяются или принимаются по [4] значения коэффициентов $K_{f.m.1}$ и $K_{f.m.2}$, характеризующих отношение кубиковой прочности бетона на сжатие с химическими добавками к соответствующей прочности бетона без добавок, твердеющих в нормальных условиях в течение одних и двух суток.

Рассчитывается прогнозируемая прочность бетона на сжатие (кубиковая), твердеющего в нормальных условиях в течение одних и двух суток, по формулам:

$$f_{c.cube.1.n.6} = f_{ц.1} \cdot k_{f.m.1} \cdot \Phi_{f.1}; \quad (6)$$

$$f_{c.cube.2.n.6} = f_{ц.2} \cdot k_{f.m.2} \cdot \Phi_{f.2}. \quad (7)$$

Рассчитывается значение функционального коэффициента $K_{f.t.m.o}$, определяющего отношение прочности бетона на сжатие после тепловой обработки к прочности бетона, твердеющего в нормальных условиях в течение того же времени, по формуле

$$K_{f.t.m.o} = K_{цв.6} \cdot K_{C_3A} \cdot \left[D_{mo} + (C_{mo} - D_{mo}) \cdot \left(\frac{t_{np} - 0,5}{27,5} \right)^{0,18} \right], \quad (8)$$

где

$$K_{цв.6} = \left[1,1 + 104 \cdot (Ц \cdot 10^{-3})^{5,6} \right] \times \left[0,15 + 2,5 \cdot (W_6 - 0,24) \right] \quad (9)$$

$$K_{C_3A} = 1 \text{ при } C_3A \text{ от } 3 \text{ до } 5 \%;$$

$$K_{C_3A} = 1,07 - 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot t_{cp} \text{ при } C_3A \text{ св. } 5 \text{ до } 9 \%; \quad (10)$$

$$D_{mo} = 1 + 7 \cdot 10^{-2} (t_{cp} - 20); \quad (11)$$

$$C_{mo} = 0,7 + 9,5 \cdot 10^{-2} t_{cp}^{0,385}. \quad (12)$$

Рассчитывается требуемая прочность бетона в 28-суточном возрасте по формуле

$$f_{c.cube.28}^G = \frac{f_{c.cube}^G}{1 - 1,64 \cdot v}, \quad (13)$$

где $f_{c.cube}^G$ – гарантированная прочность бетона по СНБ 5.03.01 или класс бетона по СНиП 2.03.01;

v – коэффициент вариации прочности бетона на осевое сжатие, который принимается по данным статистического контроля прочности бетона, или равным 0,135 при их отсутствии.

Рассчитывается общая продолжительность тепловой обработки по формуле

$$\tau_{10} = 10^{a_{10}}, \quad (14)$$

в которой

$$a_{10} = \frac{1}{n_{нв}} \cdot \lg \frac{P_p \cdot f_{c.cube.28}}{100 \cdot K_{f.t.m.o} \cdot f_{c.cube.1нв}}, \quad (15)$$

$$n_{нв} = 3,32 \cdot \lg \frac{f_{c.cube.2.HB}}{f_{c.cube.1.HB}}, \quad (16)$$

P_p – передаточная прочность бетона на сжатие в процентах от требуемой прочности бетона в 28-суточном возрасте.

Принимаются продолжительность выдерживания бетона $\tau_{np.в}$, скорость подъема температуры среды в камере V_n ; скорость снижения температуры среды в камере $V_{осм}$; температура бетона в момент открытия камеры $t_{осм}$.

Рассчитывается продолжительность отдельных периодов тепловой обработки по формулам:

- продолжительность подъема температуры

$$\tau_n = \frac{t_{cp} + 15 - t_n}{V_n}; \quad (17)$$

- продолжительность остывания

$$\tau_{осм} = \frac{t_{cp} + 15 - t_{осм}}{V_{осм}}; \quad (18)$$

- продолжительность изотермического прогрева

$$\tau_{из} = \tau_{mo} \cdot 24 - \tau_{np.в} - \tau_n - \tau_{осм}. \quad (19)$$

Рассчитывается температура изотермии среды в камере по формуле

$$t_{из} = \frac{t_{cp} \cdot \tau_{mo} \cdot 24 - t_n \cdot (\tau_{np.в} + 0,5 \cdot \tau_n) - 0,5 \cdot t_{осм} \cdot \tau_{осм}}{0,5 \cdot \tau_n + \tau_{из} + 0,5 \cdot \tau_{осм}}. \quad (20)$$

Расчет продолжительности последующего выдерживания изделий для достижения отпускной прочности бетона выполняется в следующей последовательности.

Устанавливаются температурные режимы выдерживания изделий после тепловой обработки.

Принимается продолжительность выдерживания изделий $\tau_{ф.ц.}$ и температура окружающей среды $t_{ф.ц.}$ в формовочном цехе, а также устанавливается прогнозируемая температура окружающей среды $t_{c.з.н.}$ на складе готовой продукции для учета соответствующих температурно-влажностных условий для достижения при последующем складировании и хранении отпускной прочности к моменту отгрузки изделий с предприятия-изготовителя и требуемой прочности в установленные сроки.

Рассчитываются значения функциональных коэффициентов $K_{f.t.фц}$ и $K_{f.t.сгп}$ по формулам:

$$K_{f.t.фц} = K_{цвб} \cdot K_{c3A} \left[D_{фц} + (C_{фц} - D_{фц}) \cdot \left(\frac{\tau_{фц} - 0,5}{27,5} \right)^n \right]; \quad (21)$$

$$K_{f.t.сгп} = K_{цвб} \cdot K_{c3A} \left[D_{сгп} + (C_{сгп} - D_{сгп}) \cdot \left(\frac{\tau_{сгп} - 0,5}{27,5} \right)^n \right]. \quad (22)$$

Коэффициенты $K_{цвб}$ и K_{c3A} рассчитываются по формулам (9) и (10), а D_i и C_i – по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} D_{фц} &= 0,15 + 4,25 \cdot 10^{-2} \cdot t_{фц} \text{ при } t_{фц} \text{ от } 0 \text{ до } 20 \text{ }^\circ\text{C}; \\ D_{сгп} &= 0,15 + 4,25 \cdot 10^{-2} \cdot t_{сгп} \text{ при } t_{сгп} \text{ от } 0 \text{ до } 20 \text{ }^\circ\text{C}; \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} D_{фц} &= 1 + 7 \cdot 10^{-2} (t_{фц} - 20) \text{ при } t_{фц} \text{ более } 20 \text{ }^\circ\text{C}; \\ D_{сгп} &= 1 + 7 \cdot 10^{-2} (t_{сгп} - 20) \text{ при } t_{сгп} \text{ более } 20 \text{ }^\circ\text{C}; \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{фц} &= 0,7 + 9,5 \cdot 10^{-2} \cdot t_{фц}^{0,385}; \\ C_{сгп} &= 0,7 + 9,5 \cdot 10^{-2} \cdot t_{сгп}^{0,385}; \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где $\tau_{фц}$ – продолжительность выдерживания распалубленных изделий в формовочном цехе при температуре окружающей среды $t_{фц}$;

$n = 0,458$ при температуре окружающей среды от 0 до 20 °C;

$n = 0,18$ при температуре окружающей среды св. 20 до 50 °C.

Рассчитывается продолжительность твердения бетона в нормальных условиях $\tau_{нв}$ для достижения заданной отпускной прочности бетона по формуле

$$\tau_{нв} = 10^{a_{нв}}, \quad (26)$$

где
$$a_{нв} = \frac{1}{n_{нв}} \lg \frac{P_{омн} \cdot f_{c.cube.28}}{100 \cdot f_{c.cube.2.HB}}; \quad (27)$$

$n_{нв}$ — параметр, рассчитываемый по формуле (16);

$P_{омн}$ — процент отпускной прочности бетона от требуемой в 28-суточном возрасте.

Рассчитывается продолжительность выдерживания изделий на складе готовой продукции до достижения отпускной прочности бетона по формуле

$$\tau_{сгп} = \frac{\tau_{нв} - \tau_{mo} \cdot K_{f.t.mo} - \tau_{фц} \cdot K_{f.t.фц}}{K_{f.t.сгп}}. \quad (28)$$

Методика расчета энергосберегающих режимов тепловой обработки проверена в условиях опытного изготовления многпустотных плит перекрытия на Барановичском комбинате ЖБК и принята в Пособии П1-01 [4].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Разработать конструкцию, оборудование и технологию изготовления многпустотных плит перекрытий повышенной строительной высоты для ресурсосберегающих конструкций систем зданий с пролетами 9 и более метров: Отчет о НИР (заключит.) / УП «Институт БелНИИС»; Рук. темы: Н.П.Блещик, В.Н.Белевич – Мн., 2003. – 241 с.
2. Сорокер В.И., Довжик В.Г. Жесткие бетонные смеси в производстве сборного железобетона. – М.: Стройиздат, 1964. – 307 с.
3. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. – М.: Стройиздат, 1998. – 768 с.
4. П1-01 Тепловлажностная обработка сборных железобетонных изделий и конструкций к СНБ 5.03.02-03 Производство сборных железобетонных изделий и конструкций. Мн., 2004. – 66 с.
5. Маркаров Н.А. Повышение качества предварительно напряженных железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1984. – 212 с.