

4. Плугін А. Н. Основи теорії тверднення, міцності, руйнування і довговічності портландцементу, бетону і конструкцій із них. Плугін А.А, Трикоз Л.В, Кагановський О.С., Плугін О.А. // Київ, 2011. - т. 1, т. 2, т.3
5. Дистлер Г. И. Электрическая структура реальных поверхностей твердых и формирование граничных слоев с особыми свойствами, обеспечивающими передачу дальнедействующего влияния твердых тел. // Сборник докладов IV конференции по поверхностным силам. М., «Наука», 1972, с. 245–261
6. Дерягин Б. В. Синтез алмаза из газовой фазы. Б. В. Дерягин, Д. В. Федосеев. М., «Знание», 1973 - 64 с.
7. Гвоздев А. А. Состояние и задачи исследования сцепления арматуры с бетоном. // Б и Ж. Б., 1968. - № 12. –С. 1 – 4.
8. Рабинович, Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкция: монография / Ф.Н. Рабинович. - М.: издательство АСВ, 2004 – 560с.
9. Колчунов В. И. Аналитическая и конечно-элементные стержневые модели нелинейной задачи сцепления арматуры с бетоном, их сравнение и анализ // Містобудування та територіальне планування: наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2016. – Вип. 60. – С. 184- 197.
10. Костюк Т. А. Структура сталебетонних композиционных материалов. Анализ взаимодействия между элементами композита / Т. А. Костюк, С. С. Вандоловский. // Научный вестник строительства. – 2016. – № 2 (84). – С. 242 – 245.

Vandolovskyi S. S. STRUCTURE FEATURES OF STEEL - FIBER CONCRETE AND ITS IMPROVEMENT. The problem of increasing the strength of steel-fiber concrete by improving the interaction of the steel surface (solid phase) and the cement test (liquid phase) is considered. The analysis of strength indicators is carried out and it is proved that when setting the concrete, the steel substrate contributes to the increase in the thickness and strength of the layer, which contacts the steel lining.

Keywords: steel-fiber concrete, cement stone, contact zone, iron powder.

Вандоловский С.С. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА И ЕЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ. Рассмотрена проблема повышения прочности сталефибробетона за счет уточнения взаимодействия стальной поверхности (твердая фаза) и цементного теста (жидкая фаза). Проведен анализ прочностных показателей и доказано, что при схватывании бетона стальная подложка способствует повышению плотности и прочности слоя, который контактирует со стальной подкладкой.

Ключевые слова: сталефибробетон, цементный камень, зона контакта, железный порошок.

DOI: 10.29295/2311-7257-2018-91-1-257-261
УДК 691.32

Белых И.М., Сопов В.П.

*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
(ул. Сумская, 40, Харьков, 61002, Украина; e-mail: vsopov@ukr.net)*

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЕЮЩЕГО БЕТОНА ПО ВЕЛИЧИНЕ ЕГО ЭКЗОТЕРМИИ

По результатам температурного мониторинга твердеющего бетона в монолитном ростверке многоэтажного жилого здания определены значения его прочности в разные сроки твердения, проанализированы возможные причины температурного трещинообразования и пути обеспечения трещиностойкости.

Ключевые слова: цемент, бетон, температура, мониторинг, зрелость, прочность, температурные напряжения.

Введение. Твердение бетона – технологический процесс, который в значительной степени влияет на сроки производства бетонных работ и возведения зданий и инженерных сооружений в целом. При этом процесс твердения во многом определяет основные эксплуатационные свойства бетона.

Скорость твердения бетона зависит от влияния внешних (температура, давление) и внутренних (наличие химических добавок, технологические приемы и пр.) факторов.

Твердение сопровождается изменением температуры обусловленным тепловыделением в бетоне в результате экзотермических реакций гидратации цемента. Остывание бетонного массива происходит вследствие теплообмена с окружающей средой. Следует обратить внимание на то, что, если разогрев, обусловленный экзотермией цемента, является, в целом, равномерно распределенным по объему забетонированного блока, то остывание, происходит через поверхности блока. Вследствие этого у граней блока наблюдаются значительные температурные градиенты, что приводит к образованию растягивающих напряжений у наружных граней блоков, создающих условия к развитию трещин в бетоне [1-3].

Анализ проблемы. Тепловыделение твердеющего бетона – важная характеристика, во многом определяющая возможности корректного ведения технологических процессов возведения зданий и сооружений. Тепловыделение при твердении бетона может играть позитивную или негативную роль в зависимости от известных химико-технологических, объемно-конструктивных, климатических и др. факторов [4-5].

Особенно необходимы оценка и учет экзотермии для массивных конструкций при решении непростой задачи обеспечения термической трещиностойкости за счет минимизации температурных градиентов, а также для принятия решений по съему опалубки монолитных конструкций. Величину возникающих напряжений можно свести к определенным минимальным пределам с

помощью технологии проектирования составов бетона и ухода за его твердением. Это особенно относится к напряжениям, связанным с рассеянием теплоты гидратации.

В технологии массивного монолитного бетона используются различные приемы и режимы бетонирования путем расчленения массивов на захватки, укрытия, охлаждения, прогрева и др. В последние годы технологи успешно используют химические и минеральные добавки, позволяющие в широких интервалах регулировать темп тепловыделения бетона на начальных стадиях твердения [6-7].

Лабораторные и натурные исследования позволили установить некоторое предельно допустимое значение градиента температуры в твердеющем бетоне 19°C , превышение которого неотвратимо влечет за собой образование трещин и нарушение сплошности поверхности бетонного массива [8-9]. При этом немаловажную роль играет состав бетона, поскольку в некоторых случаях даже при более высоких температурных градиентах, трещины не образовывались. С другой стороны, есть некоторые сведения, указывающие на возникновение значительного количества термических трещин, даже когда градиент температуры меньше, чем 19°C . На основании свойств бетона и бетонных конструкций, ACI 207.2R предусматривает расчет максимальной разности допустимой температуры [10]. Обычно указывается максимально допустимый градиент температур 19°C и сравнивается с экспериментальными значениями. На рис. 1 показана зависимость прочности бетона от величины градиента температур для двух видов твердеющих бетонов [11]. Видно, что применение цементов с низким тепловыделением способствует большему росту прочности бетона даже при превышении предельных значений градиента температур при прочих равных условиях.

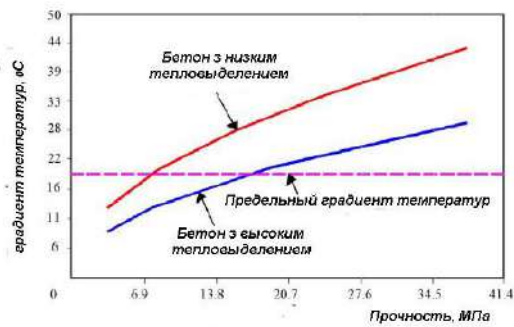


Рис. 1. Зависимость между прочностью бетона и допустимым градиентом температуры

Результаты исследований. Расчетные исследования теплового режима бетона на стадии твердения проводились на ростерке фундамента жилого дома, строящегося в г. Харьков.

Чтобы подобрать подходящий цемент, минеральные и химические добавки и установить соотношение компонентов были проведены предварительные лабораторные исследования для нескольких составов. Однако реальные условия строительной площадки могут постоянно меняться в зависимости от погоды, времени года. Поэтому в данном случае эксперимент проводился в летнее время и бетонный массив подвергался влиянию наружного воздуха. После завершения бетонирования, поверхность бетона была накрыта пленкой, чтобы предотвратить испарение влаги из поверхностных слоев бетона. Для регистрации температуры твердеющего бетона использовались термопары, которые были размещены на глубине 15, 75 и 135 см от поверхности бетона в соответствии со схемой рис. 2. Трехканальный регистратор данных термометров был подключен к термопарам для измерения температуры бетона

Измеряли градиент температуры в бетонном блоке толщиной 1.5 м, объем захватки 150 м³. Скорость набора прочности бетона фиксировалась на стандартных образцах-кубиках 10×10×10 см.

Зависимость соотношения температуры от времени для бетона на различных глубинах и температуры окружающей среды показаны на рис. 3-5.

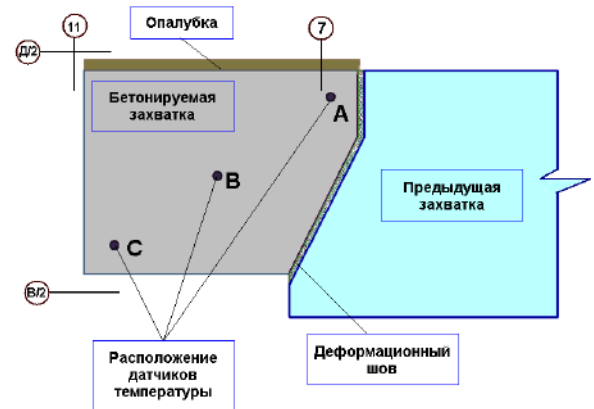


Рис. 2. Схема расположения датчиков температуры

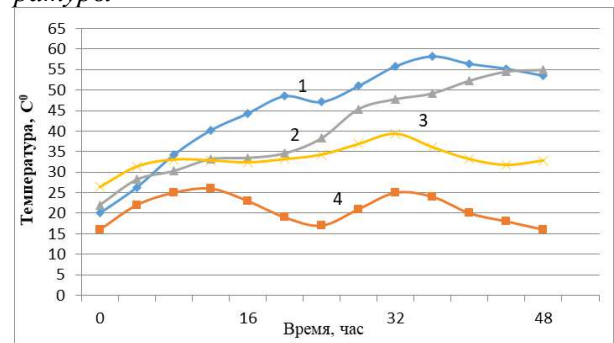


Рис. 3. Изменение температуры бетона на отметке 0,15м

1 - температура в точке В; 2 - в т. А; 3 - в т. С; 4 - температура воздуха

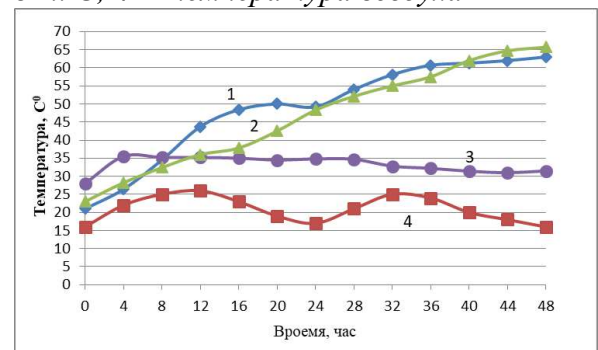


Рис. 4. Изменение температуры бетона на отметке 0,75м. Обозначения соответствуют рис. 3.

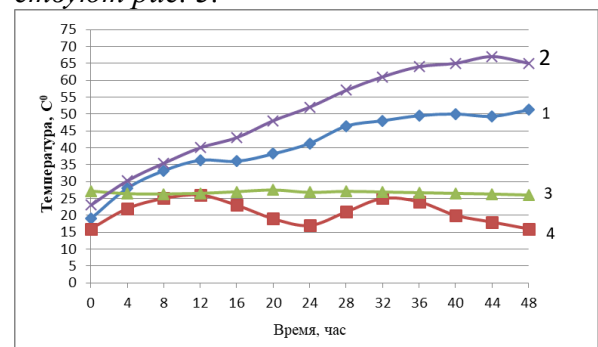


Рис. 5. Изменение температуры бетона и окружающей среды на отметке 1,35м. Обозначения соответствуют рис. 3.

Термические растягивающие напряжения были рассчитаны на глубинах 15, 50 и 150 см от верхней поверхности фундамента с помощью уравнения 1 [11]:

$$\sigma_t = K_r \frac{E}{1+\varphi} \alpha \Delta t \quad (1)$$

где σ_t - термическое напряжение при растяжении, МПа; K_r - степень ограничения; E - модуль упругости бетона, МПа (рассчитывается с использованием ACI 318r-05 [12]); α - коэффициент теплового расширения бетона, $^{\circ}\text{C}^{-1}$ (для бетона принимается равным 10×10^{-6}); Δt - изменение температуры между ядром и верхней поверхностью, $^{\circ}\text{C}$; φ - коэффициент ползучести. Степень ограничения (K_r) рассчитывали в соответствии с ACI 207.2R-95 [13]. Значение K_r принимают равным 0,91 в центре активной зоны и 0,83 на поверхности бетона. Коэффициент ползучести (φ) рассчитывали в соответствии с ACI 209 [14]. Среднее значение коэффициента ползучести составило 3,6.

Оценка прочности бетона в разные сроки твердения в контрольных точках (рис. 2) осуществлялась по расчетным значениям зрелости бетона [15]. Результаты приведены на рис. 6-8.

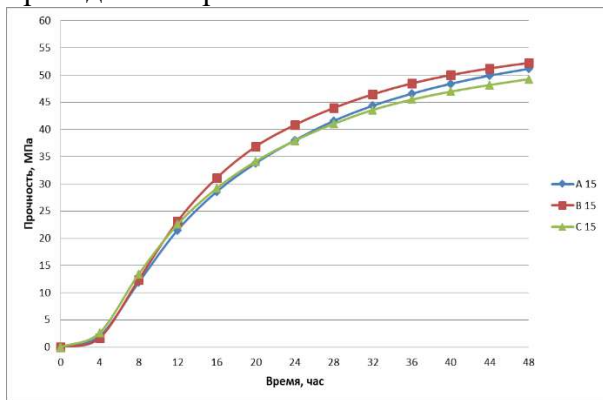


Рис. 6. Прочность бетона на отметке 15 см от поверхности

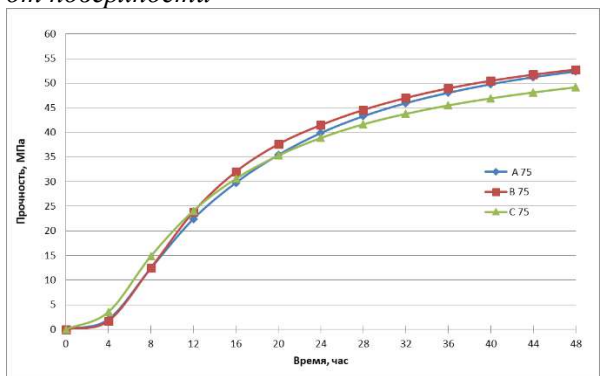


Рис. 7. Прочность бетона на отметке 75 см от поверхности

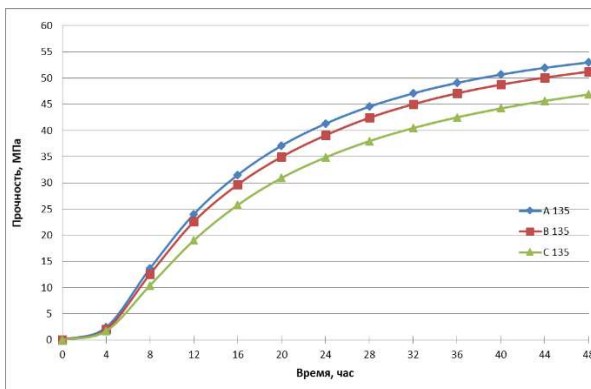


Рис. 8. Прочность бетона на отметке 135 см от поверхности

Как видно, из рис. 6-8, значения прочности бетона в контрольных точках на разных высотах во все сроки твердения отличались незначительно. Таким образом, полученные результаты дают уверенность в том, что температурные изменения в бетоне не вызовут возникновение трещин.

Для оценки максимальной температуры ядра бетона использовалось уравнение Vogue, исходя из процентного содержания основных минералов цемента ($\text{C}_3\text{S} = 61,81\%$; $\text{C}_2\text{S} = 12,42\%$; $\text{C}_3\text{A} = 12,08\%$ и $\text{C}_4\text{AF} = 7,39\%$). Теплота гидратации цемента (Q) рассчитывали по формуле 2 [16]:

$$Q = [136 \times (\% \text{C}_3\text{S}) + 62 \times (\% \text{C}_2\text{S}) + 200 \times (\% \text{C}_3\text{A}) + 30 \times (\% \text{C}_4\text{AF})] \times 4.19 \text{ kJ/kg} \quad (2)$$

Для того чтобы рассчитать зависимость роста температуры от времени в твердеющем бетоне использовали уравнение [17]:

$$T(t) = \frac{m \cdot Q \cdot (1 - e^{-\alpha t})}{c_p \cdot \rho},$$

$$m = m_{\text{ц}} + m_{\text{м.д.}},$$

$$\alpha = 0,43 + 0,0018m_{\text{ц}}$$

где $T(t)$ - максимальная температура ядра бетонной конструкции в момент времени t ($^{\circ}\text{C}$); m - расход цемента ($\text{кг}/\text{м}^3$); Q - теплота гидратации цемента ($\text{кДж}/\text{кг}$); α - степень гидратации; c_p - удельная теплоемкость бетона ($\text{кДж}/\text{кг} \times ^{\circ}\text{C}$); ρ - плотность бетона ($\text{кг}/\text{м}^3$); t - время твердения (сут).

Расчетное значение температуры ядра бетонной конструкции составило $63,5^{\circ}\text{C}$, что находится в хорошем соответствии с результатами, полученными экспериментальным путем ($65,7^{\circ}\text{C}$).

Выводы. Показано, что при прогнозе температурного трещинообразования в твердеющем бетоне немаловажную роль играет состав бетона. При этом нормативно принятый максимальный градиент температур (19°C) может быть превышен без риска образования трещин.

Установлено хорошая сходимість експериментальних і розрахункових результатів оцінки температури твердеючого бетону.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Wischers, G.: Betontechnische und konstruktive Maßnahmen gegen Temperaturrisse in massigen Bauteilen. Beton 14 (1964) H. 1, S. 22-26 und H. 2, S. 65-73.
2. Hintzen, W.: Zum Verhalten des jungen Betons unter zentrischem Zwang beim Abfließen der Hydratationswärme. Dissertation RWTH Aachen (1998); ebenso Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 59 (1998).
3. Бєльх І.М., Сопов В.П. Температурна трещиностійкість бетонів. / Науковий вісник будівництва. Харків: ПФ «Михайлов». - 2014, №4(78). - С.144-150.
4. Ушеров-Маршак А.В. Калориметрия цемента и бетона. - Х.: Факт, 2002.-184 с.
5. Запорожец И.Д., Окоороков С.Д., Парийский А.А. Тепловыделение бетона. Л.-М.: Стройиздат, 1966. – 314 с.
6. Заседателев И.Б., Петров-Денисов В.Г. Тепло- и массоперенос в бетоне. М.: Стройиздат, 1973. – 162 с.
7. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М.: 1998. – 768 с.
8. Химические и минеральные добавки в бетон / Под ред. А. Ушерова-Маршака. – Х.: Колорит, 2005. - 280с.
9. Gajda J., Vangeem M., Controlling temperatures in mass concrete, Concrete International, 2002. - pp. 59-62.
10. ACI 207.2R-07 Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete, 2007, American Concrete Institute. – 32 p.
11. Kumar Mehta P., Monteiro P. J. M., Concrete, Microstructure, Properties and Materials, Mc Graw Hill, Third Edition, 2001
12. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318R-05), 2005, American Concrete Institute. – 432 p.
13. ACI 207.2R-95. Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete, 2002, American Concrete Institute. – 26 p.
14. ACI 209R-92. Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures. 1982, American Concrete Institute. – 47 p.
15. Сопов В.П., Бєльх І.М. Оцінка зрелості бетону. / Науковий вісник будівництва. Харків: ПФ «Михайлов», № 65. – 2011. – с. 446-453.
16. Neville A.M., Properties of Concrete, Longman Group Limited, Fourth Edition, 1995
17. Yunchuan Z., Liang B., Shengyuan Y., Guting C. Simulation Analysis of Mass Concrete Temperature Field, 2012 International Conference on Structural Computation and Geotechnical Mechanics, Procedia Earth and Planetary Science 5, 2012. - pp.5 – 12.

Бєльх І.М., Сопов В.П. ОЦІНКА ДИНАМІКИ МІЦНОСТІ БЕТОНУ, ЩО ТВЕРДІЄ ПО ВЕЛИЧИНІ ЙОГО ЕКЗОТЕРМІЇ.

За результатами температурного моніторингу бетону, що твердіє в монолітному ростверку багатопверхового житлового будинку визначено значення його міцності в різні терміни твердіння, проаналізовано можливі причини температурного трещинообразования і шляхи забезпечення трещиностійкості.

Ключові слова: цемент, бетон, температура, моніторинг, зрілість, міцність, температурні напруги.

Belykh I.M., Sopov V.P. EVALUATION OF DYNAMICS OF STRENGTH OF SOLID STONE CONCRETE BY THE EXTREMITY OF ITS EXOTHERME.

Based on the results of temperature monitoring of hardening concrete in a monolithic grillage of a multi-storey residential building, its strength values were determined at different times of hardening, possible causes of temperature cracking and ways to ensure crack resistance were analyzed.

Key words: cement, concrete, temperature, monitoring, maturity, strength, temperature stresses.