

**ТЕМПЕРАТУРНАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ БЕТОНОВ**

Процесс твердения бетона в значительной степени влияет на сроки производства не только бетонных работ, но и вообще на сроки возведения зданий и инженерных сооружений. Поскольку в современном строительстве сроки возведения объектов имеют первостепенное значение, то без интенсификации твердения бетона обойтись невозможно.

Для современных строек прогнозирование прочности бетона на основе данных температурного контроля является весьма распространенной инженерной задачей. Формирование температурного режима монолитного бетонного сооружения представляет собой очень сложный, постоянно изменяющийся во времени процесс. Он играет большую роль не только на стадии укладки бетонной смеси, но и в эксплуатационный период.

Одна из основных проблем, с которыми приходится сталкиваться при строительстве массивных бетонных сооружений, - обеспечение температурной трещиностойкости бетона в процессе возведения. Основным фактором, влияющим на разогрев бетона, является тепловыделение при экзотермических реакциях гидратации цемента, протекающих в процессе его твердения. Степень температурного разогрева зависит от состава бетона и ряда технологических факторов. При этом следует учитывать, что при равномерно распределенной по объему температуре, ее величина не играет существенной роли для образования трещин. Возникновение трещин в твердеющем бетоне обусловлено, в первую очередь, наличием температурных градиентов, образующихся вследствие неоднородного распределения температуры по объему.

Если считать, что бетонизируемая конструкция представляет собой параллелепипед, то в случае, если не осуществляется специальных мероприятий по температурному регулированию, между гранями и сердцевинной такого блока наблюдаются

большие температурные градиенты, что приводит к развитию значительных растягивающих напряжений у наружных граней. Это вызвано интенсивностью остывания бетонного блока и, в значительной мере, определяется климатическими условиями района строительства. Другой причиной образования температурных трещин в строительный период, является наличие температурных деформаций на стыке вновь уложенного бетона с ранее уложенным «старым» бетоном.

Непрерывное изменение температуры бетона при его твердении вызывает изменение его напряженного и деформированного состояния. Трещинообразование в бетоне является наиболее опасным последствием температурных воздействий, которое может вызвать нарушение эксплуатационных свойств и даже разрушение конструкции. Все это говорит о необходимости прогноза поведения конструкции при температурном воздействии.

На сегодняшний день существуют рекомендации по подбору состава бетонов и режиму возведения сооружений, однако в каждом конкретном случае необходим тщательный анализ возможного температурного разогрева массива бетона при его возведении.

Технологические мероприятия ориентируются на контроль величины и скорости повышения температуры в твердеющей бетонной конструкции, чтобы результирующее растягивающее напряжение не превышало, соответствующее предельное удлинение [1, 2]. Напряжения деформации в результате охлаждения конструкции можно уменьшить при соответствующем технологическом уходе за твердеющим бетоном. Также мало известно о степени влияния тепловыделения гидратации на кинетику нарастания прочности. Важным аспектом проблемы является также выбор вида и состава цемента на характер изменения температуры во времени, фактически наблюдаемый на месте производства работ.

Требования к бетону во время строительства относятся в основном к оценке удобоукладываемости бетонной смеси и нарастанию прочности бетона при наименьшем возможном повышении температуры конструкции в результате тепловыделения при гидратации цемента.

Причинами трещинообразования в бетонных сооружениях являются деформации за счет усадки и тепловыделения при гидратации [3-10].

В твердеющих бетонных конструкциях, возводимых на бетонных основаниях, температурные градиенты возникают между их центром, поверхностью, основанием и боковыми стенками. Возникающее во время разогрева блока сжатие погашается растягивающим действием вышележащих блоков, и в вертикальных сечениях получается уравновешенная пилообразная эпюра напряжений. В дальнейшем бетон остывает, и его температура приближается к температуре основания. При этом по вертикальным площадкам в бетонном массиве вблизи контакта с основанием возникают растягивающие напряжения, а в основании — сжимающие. Растягивающие напряжения могут привести к образованию вертикальных трещин, направленных вдоль оси бетонного блока, весьма неблагоприятные для статической работы сооружения (рис.1).

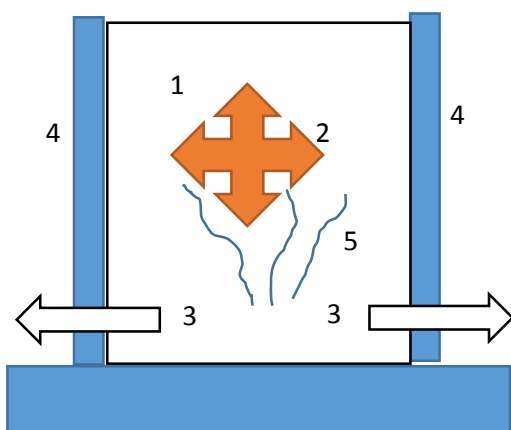


Рис.1. Растягивающие механические и температурные напряжения в твердеющем бетонном блоке

- 1 – бетонный блок; 2 – температурные напряжения; 3 – растягивающие напряжения; 4 – опалубка; 5 - трещины

Усадочные и температурные деформации бетонного блока ограничиваются фундаментной плитой, которая уже затвердела. Если ограниченные деформации превышают предельную деформацию удлинения бетона, то они приводят к трещинам.

Температура трещинообразования  $T_{тр}$  зависит от максимальной температуры  $T_{max}$ , определяемой по экспериментальной кривой изменения температуры со временем (рис.2).

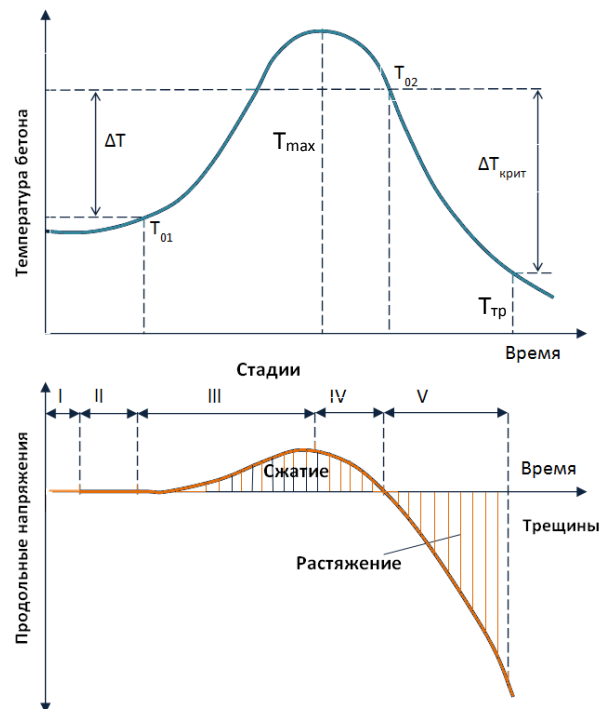


Рис. 2. Изменение температуры и напряжения со временем

Важными факторами, влияющими на подъем температуры в результате тепловыделения при гидратации цемента в бетоне, являются укладываемый объем и состав бетонной смеси, температура окружающей среды и условия теплопередачи. Используемый цемент, состав бетона и водоцементное отношение представляют особую важность для состава бетонной смеси. Добавки также могут влиять на тепловыделение. Заполнитель влияет на подъем температуры в бетоне своими теплоемкостью и теплопроводностью, но в бетонах с обычным составом это влияние имеет второстепенное значение. Опреде-

ляющими факторами для условий рассеяния тепла являются окружающая температура и характер опалубки, а также другие факторы, такие как скорость ветра и т.д.

W. Hintzen достаточно подробно исследовал влияние вида цемента, состава бетона, водоцементного отношения, температуры бетонной смеси и температуры окружающей среды [11].

При твердении бетона в опалубке с низким термосопротивлением тепловой изоляции, наличие температурного градиента приводит к более сильному разогреву внутренних слоев бетона по сравнению с наружными слоями, интенсивно остывающими при более низких температурах. Это способствует ускорению процесса образования вторичной кристаллизационной структуры из гидросиликатов кальция во внутренних слоях. Значительный температурный градиент между внутренними и внешними слоями твердеющего бетона, таким образом, при последующем выравнивании температур во всем массиве конструкции приведет к большему сокращению внутренних слоев. Вследствие того, что наружные слои будут препятствовать деформации внутренних, то они окажутся сжатыми и более трещиностойкими. Это и объясняет образование трещин в центральной части бетонного массива (рис.1) [12].

Эксперименты [11] подтверждают, что риск появления трещин в бетонном массиве в результате тепловыделения при гидратации цемента возрастает приблизительно пропорционально достигаемой максимальной температуре. На зависимость между максимальной температурой и температурой трещинообразования (рис.2) влияют коэффициент теплового расширения и предельное удлинение. Применяемые в строительстве заполнители для различных составов бетонной смеси, могут оказывать лишь незначительное влияние на коэффициент теплового расширения и предельное удлинение. Поэтому основные меры в технологии бетона по ограничению возможного температурного трещинообразования должны быть нацелены на уменьшение максимальной температуры, насколько это возможно

практически. Это предполагает знание зависимости между тепловыделением при гидратации и нарастанием прочности.

Для измерения скорости тепловыделения твердеющего бетона используют полуадиабатические калориметрические системы [13, 14]. Типичный характер изменения температуры твердеющего бетона во времени при различных температурах окружающей среды представлен на рис.3.

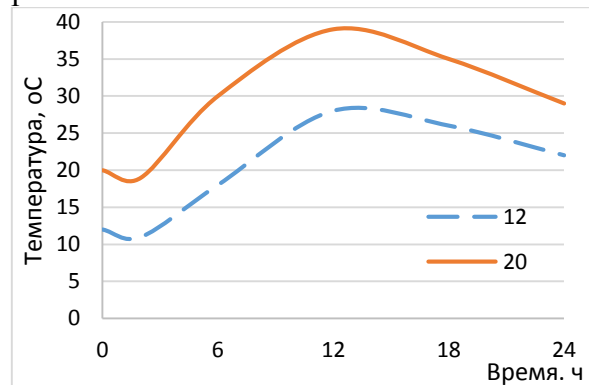


Рис. 3. Изменение температуры твердеющего бетона со временем при разных температурах окружающей среды<sup>^</sup>  
--- 12°C; — 20°C

Используя аналогичные кривые для разных температур окружающей среды и составов бетонов, можно определенное значение температуры бетона нормализовать к фактическому возрасту [11].

Сравнительный анализ кривых тепловыделения бетонов различных составов одного возраста позволяет получить характеристическую кривую тепловыделения для данного состава.

Процесс формирования физических свойств бетона, включая прочностные характеристики, определяется кинетикой гидратации цемента, которая определяет степень гидратации  $\alpha$  цемента в любой момент времени твердения. Поскольку клинкерные минералы цемента имеют различную скорость гидратационного взаимодействия, точное определение степени гидратации цемента достаточно сложно.

Обычно под степенью гидратации понимают массовую долю прореагировавшего цемента без учета характера гидратационного взаимодействия отдельных фаз. Имеются разные способы определения  $\alpha$ :

- по оценке суммарного количества

прореагировавших минералов цемента (рентгенофазовый анализ) [15];

- по оценке количества химически связанной воды (термопорометрия) [16];

- по количеству  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [17] и др.

А.В. Ушеровым-Маршаком разработан метод оценки степени гидратации методом термокинетического анализа на основе изотермической микрокалориметрии [17].

В общем случае степень гидратации характеризует глубину протекания процесса гидратации цемента и зависит от времени и температуры твердения

$$\alpha = f(\tau, T), \quad (1)$$

где  $\tau$  – время;  $T$  – температура твердения.

Поскольку температура и теплота взаимосвязаны, выражение (1) может быть представлено в виде  $\alpha = f(\tau, Q_\tau)$ ,

(2)

где  $Q_\tau$  – теплота гидратации цемента за время  $\tau$ .

Для нахождения искомой величины используют соотношение [17]:

$$\alpha = \frac{Q_\tau}{Q_\infty}, \quad (3)$$

где  $Q_\infty$  – удельное тепловыделение при полной гидратации цемента.

Вопрос оптимизации между теплотой гидратации цемента в бетоне и прочностью бетона изучался многими исследователями [13]. По результатам исследований между прочностью на сжатие бетонов и теплотой гидратации цементов существует приближенная экспоненциальная зависимость (рис. 4).

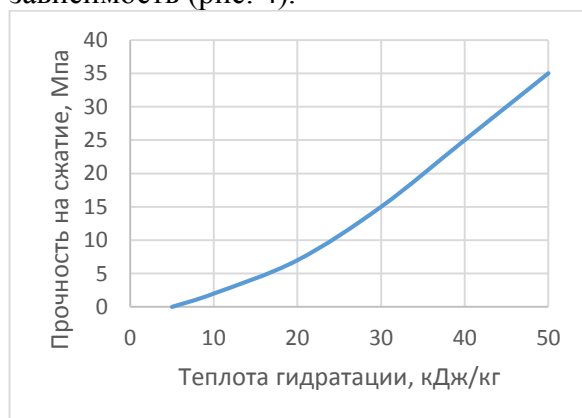


Рис. 4. Зависимость между прочностью на сжатие бетонов и теплотой гидратации цементов

Как было показано в [13] тепловыделение, требуемое для достижения определенной прочности на сжатие для заданных состава бетона и гранулометрического распределения зерен заполнителя практически не зависит от используемого цемента в диапазоне водоцементных отношений между 0,5 и 0,6. При этих условиях разница между разными цементами незначительна.

Поэтому оптимизация между прочностью и теплотой гидратации зависит от времени года, объема укладываемого бетона, времени выдерживания в опалубке и заключается в разработке таких составов бетонов, которые достигают требуемого значения прочности, но не превышают определенную величину тепловыделения. Данную задачу оптимизации можно решить проведением соответствующих лабораторных испытаний различных составов бетонов совместно с модельными расчетами.

Модельные расчеты основываются на оценке характеристической температуры твердеющего бетона в зависимости от температуры бетонной смеси, толщины самой конструкции, типа опалубки и температуры окружающей среды. Эти факторы и будут определять характер теплопередачи в твердеющем бетоне, а, следовательно, и изменение его температуры.

Ожидаемое нарастание прочности на сжатие можно рассчитать в соответствии с фактическим процессом гидратации по изменению температурной кривой твердеющего бетона.

Решающее влияние на начальное нарастание прочности оказывает температура свежееуложенного бетона, а также водоцементное отношение и характеристики твердения цемента или комбинации используемых материалов.

### Выводы

Повышение температуры в результате тепловыделения при гидратации цемента, совместно с усадочными деформациями, является одной из возможных независимых от нагрузки причин появления трещин в твердеющем бетоне. Трещинообразование может быть связано не только с

вызывающими его внутренними напряженными состояниями, но также осевыми напряжениями при ограничении деформации бетона элементами опалубки и ранее уложенным бетоном. Повышение температуры в последней залитой захватке приводит к напряжениям в условиях ограниченной деформации вскоре после прохождения максимальной температуры  $T_{\max}$ . Причиной этого является в основном увеличение модуля упругости и большая релаксация напряжений во время нагрева бетона. Появление трещин наблюдается при дальнейшем остывании, когда превышает предельная деформация удлинения. Во избежание этого необходимо предварительное калориметрическое исследование образцов бетонов при разных температурах с целью разработки составов бетона и практических мер по уходу за твердеющим бетоном для снижения риска образования трещин.

Эти процедуры ориентированы на уменьшение независимых от нагрузки изменений в бетоне путем выбора наименьшего возможного содержания цемента и наименьшего возможного тепловыделения в бетоне. В частности, количество цемента и состав бетона должны подбираться соответственно сезонным флуктуациям температуры окружающей среды и свежееуложенного бетона таким образом, чтобы, с одной стороны, достигалась адекватная ранняя прочность и, с другой стороны, чтобы тепловыделение (повышение температуры) в захватке ограничивалось необходимым значением. Существуют простые методы испытаний для оценки тепловыделения при гидратации цемента в бетоне и получаемого нарастания прочности, которые подходят для решения этой задачи оптимизации. Кроме прямого сравнения разных бетонов, физические законы, действующие в них, также могут использоваться для расчета температуры и нарастания прочности в них с целью изучения влияния разных природных и технических факторов.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für Kunstbauten (ZTV-K 88), Ausgabe 1989, Verkehrsblatt-Verlag.

2. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln. Teil 1: Geschlossene Bauweise (Spritzbetonbauweise) (ZTV Tunnel Teil 1/95), Ausgabe 1995, Verkehrsblatt-Verlag.
3. 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
4. Wischers, G.; Dahms, J.: Untersuchungen zur Beherrschung von Temperaturrissen in Brückenwiderlagern durch Raum- und Scheinfugen. Beton 18 (1968) H. 11, S. 439-442 und H. 12, S. 483-490.
5. Springenschmid, R.; Nischer, P.: Untersuchungen über die Ursache von Querrissen im jungen Beton. Beton- und Stahlbetonbau 68 (1973) H. 9, S. 221-226.
6. Springenschmid, R.: Die Ermittlung der Spannungen infolge von Schwinden und Hydratationswärme im Beton. Beton- und Stahlbetonbau 79 (1984) H. 10, S. 263-269.
7. Breitenbücher, R.: Zwangsspannungen und Rißbildung infolge Hydratationswärme. Dissertation TU München, 1989.
8. Thielen, G.; Grube, H.: Maßnahmen zur Vermeidung von Rissen im Beton. Beton- und Stahlbetonbau 85 (1990) H. 6, S. 161-167.
9. Thielen, G.; Hintzen, W.: Betontechnische Maßnahmen zur Vermeidung von Rissen in Tunnelinnenschalen. Beton 44 (1994) H. 9, S. 522-526 und H. 10, S. 600-607.
10. Grube, H.: Ursachen des Schwindens von Beton und Auswirkungen auf Betonbauteile. Habilitation, TH Darmstadt, 1990; ebenso Schriftenreihe der Zementindustrie H. 52/1991.
11. 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).
12. Антонов Е.А. Технологическая особенность качества - реальная система организации строительства сооружений с гарантированной эксплуатационной надежностью // Сб. тр. ЦНИИС. М.: ЦНИИС, 2003. Вып. 217. С. 222-226.
13. Grube, H.; Hintzen, W.: Prüfverfahren zur Voraussage der Temperaturerhöhung im Beton infolge Hydratationswärme des Zements. Beton 43 (1993) H. 5, S. 230-234 und H. 6, S. 292-295.
14. Калориметрия. Теория и практика. Пер. с англ./ В. Хеммингер, Г. Хене. - М.: Химия, 1990. - 176с.
15. Тейлор Х. Химия цемента. Пер. с англ. М.: Мир, 1996, 560 с.
16. Сопов В.П. К оценке количества поровой жидкости различных форм связи. / Науковий вісник будівництва. Харьков: ПФ «Михайлов», № 59. - 2010. - с. 172-179.
17. Рамачандран Р.Б. Наука о бетоне: физико-химическое бетоноведение. - М.: Стройиздат, 1986. - 278с.
18. Ушеров-Маршак А.В. Калориметрия цемента и бетона: Избранные труды. Харьков, Факт, 2002. - 183 с.