**Структурные изменения в бетоне при его твердений.**

*Аннотация*. Рассматривается физико-химическая природа и механизм возникновения внутренних напряжений в процессе кристаллизованного структурного образования в бетоне. С течением времени изменяется структура бетона за счет продуктов гидратации цемента. Влияние раннего замораживания на структуру бетона не однозначно.

*Ключевые слова.* Деструктивные явления, реологическое состояние системы, внутренние напряжения, структура бетона, структура пор .

**STRUCTURAL CHANGES IN CONCRETE AT ITS CURING.**

*Annotation.* The physicochemical nature and mechanism of the occurrence of internal stresses in the process of crystallized structural formation in concrete are considered. Over time, the structure of concrete changes due to the products of cement hydration. The effect of early freezing on concrete structure is not straightforward.

*Keywords.* Destructive phenomena, rheological state of the system, internal stresses, concrete structure, pore structure.

Многочисленные исследования показали, что деструктивные явления наиболее сильно проявляется при нагреве или при замерзании воды, когда физический процесс расширения опережает химические ,физико-химические процессы твердения. Поэтому при анализе причин деструктивных процессов необходимо более подробно остановиться на периоде подъема температуры и на периоде раннего замораживания бетона.

Как известно бетонная смесь предоставляет собой многокомпонентную гетерогенную систему, состоящую из твердой, жидкой и газообразной фаз. Каждая из этих фаз имеет разные коэффициенты линейного температурного расширения.

Другой особенностью свежеотформованного бетона является непрерывное изменение реологического состояния системы, необратимые реакции твердения цемента. Физико-химическая природа и механизм возникновения внутренних напряжений в процессе кристаллизованного структурнообразования подробно рассмотрены в работах А.Ф. Полака . По его мнению внутреннее напряжение является следствием проникания подвижных молекул адсорбционного слоя в пространство между срастающимися кристалликами и возникновения в результате этого кристаллизационного давления. П.А. Ребиндер и его сотрудники объясняют возникновение внутренних напряжений тем, что контакты срастания препятствуют свободному сдвигу и перемещению растущих кристалликов новообразований под действием кристаллизационного давления, А.Е. Шейкин и T.Ю. Якуб предполагают , что причиной появления внутренних напряжений в твердеющем цементном камне является не только высокое кристаллизационное давление, но и возникающие в поровом пространстве осмотическое давление [1,3].

Для изучения влияния раннего замораживания на структуру цементного камня и бетона, выявления распределения пор по сечению образца были проведены макроскопические и микроскопические исследования образцов [6]. Эти исследования показали, что структура образцов замороженных в раннем возрасте существенно изменилась.

Так структура образцов, замороженных при -20 °С сразу, через 3 и 6 часов после замеса бетона и испытанных через сутки после оттаивания, очень рыхлая. В них много макро и микро трещин разного направления. Ширина трещин находится в пределах 0,001-0,003 мм. Преобладают цепочки из 3-5 пор размером 0,001-0,1 мм. Большая часть микротрещин проходит по границе сцепления клинкерных минералов. B образцах, выдержанных до замораживания 9 и 12 часов при положительной температуре и испытанных через сутки после оттаивания, структура улучшилась: появилось больше изолированных пор, но общая пористость бетона больше, чем у образцов суточного нормального твердения. Исследование свежезамороженных образцов из цементного теста, выдержанных после оттаивания 28 суток в нормальных условиях, показала, что их свойства сходны со свойствами образцов, хранившихся в нормальных условиях.

Эти и другие исследования по раннему замораживанию бетона показали, что раннее замораживание цементного камня вредно сказывается главным образом на макроструктуре ,основные изменения происходят в порах размером больше 0,1 мк, и причем наибольшее ухудшение структуры наблюдается в образцах замороженных сразу. Это влияние ослабевает с увеличением времени выдерживания до замораживания, в 24 в 72 часовом возрасте нарушения структуры почти отсутствуют. В структуре геля никаких нарушений не наблюдается, так как вода в порах геля не замерзает даже при очень низких отрицательных температурах и не прекращается химическая активность цементных клинкеров.

Заслуживают внимания эксперименты по определению влияния раннего замораживания на снижение прочности бетона. Большую роль в снижении прочности бетона при замораживании его в раннем возрасте играет ослабление прочности сцепления между растворной частью бетона и зернами крупного заполнителя. Для экспериментов брали бетонные образцы на разных заполнителях (плотные и пористые). Наибольшее ослабление прочности сцепления при раннем замораживании бетона было получено в образцах с плотным, прочным заполнителем. Замораживание иначе влияет на бетоны с пористым заполнителем. В керамзитбетоне создаются, лучшие по сравнению с тяжелым бетоном, условия формирования структуры. После затворения легкобетонной смеси, керамзит берет 30% воды затворения структуры, являясь как бы аккумулятором влаги. Формирование структуры проходит в условиях меньшего истинного водоцементного отношения и отсюда на контакте формируется мелкопористая, прочная структура. В последующем влага мигрирует из керамзита в растворную часть, где происходит дальнейшая гидратация цементного клинкера. Результаты этих работ, а также анализ других данных позволяет предположить, что в контактной зоне создаются условия для образования более плотной структуры и полного гндратирования минералов цемента.

Со структурой пор цементного камня на прямую связана долговечность. Научные труды как наших, так и зарубежных исследователей указывают на то, что основным фактором , влияющим на морозостойкость бетона является характер его пористой структуры. Причем по мнению ряда исследователей, суммарная пористость бетона не определяет его морозостойкости. Сказывается то обстоятельство , что областью «опасных» пор являются поры 1-0,1мк. Интегральная пористость бетонных образцов уменьшается с увеличением срока предварительного выдерживания бетона до замораживания. Наибольшую пористость имели образцы, замороженные в период образования первых кристаллов из коагуляционной структуры (3-4 часа). При этом преобладают поры размером более 1мк (10 4А0), т.е. не очень "опасные" поры.

Распределение размера пор зависит от температуры замораживания. Так при температуре -2°С в лед переходит меньше воды, чем при -20 °С кроме этого при -2°С хотя слабо, но идут процессы гидратации и его диспергирование. Все это создает условия для образования повышенного количества промежуточных пор (1-0,1мк) и уменьшает процент крупных пор больше 1 мк. При замораживании образцов, при температуре -20°С увеличиваются крупные поры больше 1мк, количество "опасных" пор от 0,1 до 1 мк уменьшается следовательно, повышается морозостойкость бетона.

Чтобы обоснованно установить ту прочность, при котором бетон может быть заморожен без последствия для дальнейшего роста прочности были приведены многочисленные исследования. Нормами установлены пределы прочности бетона монолитных конструкции к моменту возможного замораживания. Прочность бетона должна быть не менее: 50% проектной прочности при проектной марке до 150:

40% - для бетонов марок 200-300;

30% - для бетонов марок 400-500. При этом надо учесть, что критическая прочность устанавливает только момент замораживания и ни коим образом не отражает прочность распалубки конструкции и его частичное или полное загружение [2].

Критическая прочность бетона при замораживании суммарно характеризует не только механические свойства, но и стадию его «зрелости» структуры и полноту гидратации минералов цемента. "Критическая" прочность бетона по представлению С.А. Миронова и Л.А. Малининой - минимальная прочность бетона при которой наложение температурного воздействия не приводит к структурным нарушениям [3].Расширение бетона с такой прочностью практически равно температурному.

Прочность бетона зависит от содержания газовой, жидкой и твердой фаз, интенсивности теплового воздействия. Составляющие бетона имеют разные температурные коэффициенты линейного расширения, так твердая фаза имеет наименьший коэффициент (5-14)\*10-6 м/(м \*°С) и увеличивается в объеме на 0,5-0,2%, жидкая фаза (вода) расширяется в значительно большей степени – на 2,7-3%, причем интенсивность расширения увеличивается с повышением температуры. Еще большее расширение имеет газ температурный коэффициент объемного расширения 1/273 1/°С, ее объем при повышении температуры с 20 до 90°С увеличивается на 22-25%, т.е. в 100-150 раз больше, чем твердая фаза и в 8-10 раз больше, чем воды.

Эти воздействия зависят от времени приложения усилий, минералогического состава цемента и прежде всего содержания в клинкере трех кальциевого алюмината С3А. У портландцементов с различным содержанием СзА и разные сроки схватывания. Так при СзА в клинкере 7-8 % время схватывания уменьшается с 192 до 130 мин. при температуре 18°С, до 6-7 мин при быстром разогреве до 40°С, а дальнейшее повышение температуры не влияет. У портландцемента с содержанием СзА в клинкере 3% время начала и конца схватывания мало зависит от температуры.

Разработаны методики расчета продолжительности остывания конструкции с обеспечением заданной прочности бетона, которые основываются на закономерностях остывания конструкции в зависимости от ее размеров, применяемых цементов, температуры и скорости ветра наружного воздуха. Расчет охлаждения бетонных и железобетонных конструкций является решением одной из частных нелинейных задач теплопроводности. Решение задач осложняется трудностями, связанными с нестационарными условиями остывания монолитного бетона. Существуют различные методы решения данной задачи. Общей особенностью всех методов расчета охлаждения бетона является то, что экзотермия цемента, его реакционная способность учитывается по стандартным показателям, без учета температуры внешней среды, что приводит к существенной погрешности. Исследования, проведенные С.Г.Головневым [4] подтвердили, что замораживание связано с увеличением физического объема цементной пасты. Вода, замерзая в порах цементного теста разрыхляет ее, что в конечном счета уменьшает прочность цементного камня и сказывается на качестве сцепления цементного камня с арматурой.

Опыты при раннем замораживании и повторном вибрировании доказали, что замораживание не влияет на прочность при последующем выдерживании образцов в нормальных условиях. Так же в этих опытах исследовалось сцепление арматуры с бетоном, которое тоже не нарушается при раннем замораживании бетона. Это явление объясняется повышенной закристаллизованностью гидросиликатной массы. Понижение температуры в раннем возрасте бетона способствует более полному гидролизу клинкера, за счет большей растворимости гидрооксида кальция и увеличения продуктов гидратации. Эти явления протекает одновременно с образованием мелкопористой структуры цементного камня из-за кристаллизации воды в лед и уменьшением жидкой фазы геля. При последующем повышении температуры происходит пресыщение жидкой фазы по отношению к Са(ОН)2 и интенсивное образование большого числа центров кристаллизации. Это понижает основность гидросиликатов и изменяет удельную поверхность микропор цемента [4].

Комплексным показателем сопротивляемости бетона различного, внешнего воздействия являются его деформативные свойства. Деформации бетона условно можно разделить на два вида: внешние, силовые и собственные (температурно-усадочные). Полные деформации бетона складываются из упругих и пластических деформаций. Упругие деформации бетона возникают от внешних нагрузок, пластические или остаточные деформации, возникают при длительном воздействии нагрузок, усадки бетона, температуры.

Среди этих деформации наибольший интерес представляют ползучесть и изменение состояния бетона под влиянием температуры. Величина остаточной деформации характеризует степень протекания деструктивных процессов. Чем больше остаточное расширение бетона и его составляющих, тем сильнее нарушение его структуры, хотя, как показали исследования прямой пропорциональности между деформациями и прочностью бетона, подвергшегося раннему замораживанию не существует. В исследованиях влияния раннего замораживания на деформативность бетона нет единого мнения.

Наиболее близкой моделью деформативных свойств бетона, подвергнутого раннему замораживанию является модель, предложенное Ребиндер П. А [2]. Рассматривается модель в виде пластины в которой влагосодержанис пластины «U» изменяется до среднего влагосодержания «Uср» за некоторый промежуток времени t. Вводя понятия бесконечно тонких полосок, автор получает выражение усадки пластины

l–lср=l0 \*βi \*(Uср - U) (1)

где 1 - теоретическая длина полоски, при влагосодержании полоски «U»;

1ср - размер пластины;

10 - теоретическая длина полоски при влагосодержании "Uср";

βi - коэффициент линейной усадки.

Вызываемое расширением составляющих бетона напряжение реального материала близко к рассматриваемой модели равно:

Рп = [(βi \* Е ) /(7 - βi) \* (7 + Un \* βi)] \* (U-Uн) (2)

где Рп- нормальное напряжение, МПа;

Е - модуль линейной деформации, МПа;

Uн - начальная влагосодержание;

μ - коэффициент Пуассона.

Из формулы растягивающих напряжений на поверхности пластины.

Рп = [(βi \* Е\*R ) /3\*(7 - μ) \* (7 + Uн \* βi)] \* (ΔUн) (3)

выводится следствие, что при значении ΔU=Uн-Un происходит деструкция материала, если его прочность на растяжение, т.е. полностью незакристаллизованная структура будет имеет прочность, меньше величины Рп.

В формуле (3) R=1/2 толщины пластины, а Uн и Un - соответственно, влагосодержание центра и поверхности пластины.

Так как не затвердевший бетон испытывает сложнонапряженное деформированное состояние, важен еще учет развития касательных напряжений. Предельное касательное напряжение, приводящее к нарушению структуры;

Рm = [(βi \* Еc\*z ) / (7 + Uн \* βi)] \* (ΔUн) (4)

где Ес - модуль деформации сдвига:

Z - растяжение вдоль поверхности;

ΔUn - градиент влагосодержания у поверхности и на глубине X слоя материала.

Следует отметить, что модуль сдвига Ес, в формуле (1) является усредненной характеристикой материала, соответствующий сечению наклонному под углом 45°С к плоскости пластины. В таком виде использовать характеристики деформативности в практических расчетах сложно. Хаотичность «слабых мест» - зародышей концентрации напряжений предопределяет разнонаправленность касательных напряжений. Еще большую хаотичность создает разнообразное направление структурообразования цементного геля и сростание кристаллов новообразований. Отсутствие характеристики, позволяющей судить о предельной деформативности материала несколько снижает ценность выше приведенных зависимостей.

С.В. Александровский указывает на неоднозначность усадки и набухания бетона от изменения влажности [3]. Эта неоднозначность объясняется тем, что в процессе твердения бетона, свободная вода мигрирует из крупных пор цементного камня в более мелкие, но это еще не вызывает усадки бетона, далее и после потери всей или большей части свободной воды начинают происходить объемные изменения цементного геля. С другой стороны эти объемные изменения геля происходят из-за разного коэффициента линейного температурного расширения, составляющих бетонную смесь. Температурные объемные изменения тоже будут разными на поверхности и в центре, бетонируемой конструкции.

Упруго-температурные напряжения при усадке рассчитываются по следующей формуле:

σ = εфу \* Е0 (5)

где εфу - линейные относительные деформации при заданной относительной влажности воздуха.

По этой методике конкретизируется вид бетона и его влажностные деформации.

В работе [4] отмечается противоречие данных по закономерности изменения величины усадки по методикам И.И.Улицкого, С.В. Александровского и Цюрихской лаборатории. Показывается, что деформация усадки бетона изменяется, не смотря на колебания остальных технологических параметров в широких пределах, как правило, не более чем на ±10%. Авторами предлагается упростить методы прогноза величин деформаций усадки последующей зависимости:

εу н =Ку \* В3\2  (6)

где εу н - нормативное значение деформации, представляющее собой усадку бетона произвольного свойства;  
КУ = 0,215 х 10-6 - эмпирический коэффициент;

В - расход воды на 1м3 воды, л;

За исходное условия принято: приведенный радиус сечения изделия г=2,5 см, причем:

r = F\P (7)

где F - площадь поперечного сечения, см2;  
Р - периметр, см.

**Список использованной литературы**

1. Полак А. Ф., Бабков В. В., Андреева Е, П. Твердение минеральных вяжущих веществ. - Уфа: Башк. кн. изд-во, 1990. - 216 с.
2. Ребиндер П. А. Избранные труды. Поверхностные явления в дис­персных системах. - М.: Наука, 1979. - 382 с.
3. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкции на температурные и влажностные воздействия.-М.: .: Стройиздат, 1966. - 443 с
4. Бржанов Р.Т. Причины деструктивных процессов при зимнем бетонировании. Материалы Международной научно-технической конферениции «Современные проблемы геотехники, механики и строительства транспортных сооружении» ,28-29мая 2010г.стр235-238.

© Бржанов Р.Т.