

05.23.05  
З-634

Контрольный  
экземпляр

На правах рукописи

Зинов Игорь Алексеевич

*Стойкость и деформации высокопрочного бетона  
при циклических температурных воздействиях*

Специальность 05.23.05 - "Строительные материалы и изделия"

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный  
читальный зал

Челябинск - 1999

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель – д.т.н., профессор Б.Я. Трофимов.

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор А.Н. Чернов,  
к.т.н., доцент С.В. Раскопин.

Ведущая организация – АО "Наука, техника, маркетинг".

Зашита состоится 10 июня 1999 года, в 10 часов, на заседании диссертационного совета К 063.66.12 в Пермском государственном техническом университете по адресу: 614600, г. Пермь, ул.Куйбышева, 109, корп.4, ауд.207.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пермского государственного технического университета.

Автореферат разослан 30 апреля 1999 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат экономических наук  
доцент \_\_\_\_\_  А.В.Калутин

## **Общая характеристика работы**

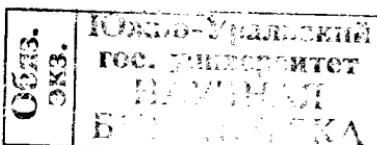
### **Актуальность проблемы**

В связи с расширением использования цементных бетонов в различных видах конструкций, изменением свойств цементов, производимых на существующих цементных заводах, в настоящее время остается актуальной проблема получения бетонов с требуемой и прогнозируемой долговечностью. Из всех вопросов, связанных с долговечностью, для России, большая часть территории которой расположена в суровых климатических условиях, особое внимание уделяется изучению и обеспечению морозостойкости бетонных и железобетонных конструкций, эксплуатируемых как на воздухе, так и в контакте с различными агрессивными жидкостями. Особенно быстро разрушается бетон при циклическом вмораживании в лед.

Стойкость бетона определяется многими факторами: условиями эксплуатации, минералогическим составом клинкера и тонкостью помола цемента, условиями формования и твердения бетона, качеством заполнителей, количеством и видом используемых добавок, структурой затвердевшего конгломерата и т.д.

В настоящее время отсутствует единое мнение о причинах ускоренного разрушения бетона при одновременном воздействии солевых растворов и знакопеременных температур, что затрудняет решение вопросов, связанных с обеспечением требуемой долговечности.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является – уточнение механизма разрушения и разработка способов получения бетонов высокой прочности и стойкости без дополнительного воздухововлечения при циклическом замораживании в минерализованных жидких средах.



### **Научная новизна работы:**

1. Выявлены причины и закономерности ускоренного разрушения бетона при циклическом замораживании в водных растворах хлорида натрия по сравнению с замораживанием и оттаиванием в воде;
2. Разработан новый подход к получению удобоукладываемых бетонных смесей с низкими водовяжущими отношениями;
3. Установлено модифицирующее влияние микрокремнезёма на структуру гидратных фаз цементного камня и свойства тяжелого и мелкозернистого бетона при низких водовяжущих отношениях ( $B/B=0.2...0.34$ );
4. Выявлено влияние высокоактивной минеральной добавки и суперпластификатора С-3 на стойкость бетона при совместном воздействии водного раствора хлорида натрия и знакопеременных температур.

**Практическое значение и реализация работы.** На основании проведенных исследований:

- предложен способ получения высокоподвижных бетонных смесей с низкими водоцементными отношениями;
- впервые экспериментально доказана возможность получения бетонов с морозостойкостью F 600 для дорожных и аэродромных покрытий без дополнительного воздуховлечения и вторичной защиты, благодаря повышенному содержанию низкоосновных гидросиликатов кальция в структуре цементного камня;
- доказана возможность получения бетонов с маркой по прочности до двух раз превышающей марку цемента за счет введения комплексной добавки: микрокремнезём+суперпластификатор;
- показана возможность установления причин коррозионной деструкции бетона дилатометрическими методами;

- полученные результаты исследований могут быть использованы при проектировании технологии изготовления железобетонных конструкций повышенной долговечности без вторичной защиты для дорожных и аэродромных покрытий, конструкций и сооружений, возводимых в районах Крайнего Севера и на шельфе северных морей;

- основные результаты работы внедрены при изготовлении деталей трубопроводов на оборудовании и по технологии фирмы "TAUBER".

Результаты исследований отражены в:

- отчете по научно-исследовательской работе по теме № 7.1-11-251/93 "Разработка методов проектирования конструкций повышенной стойкости, эксплуатируемых в условиях совместного воздействия циклического замораживания в водных растворах солей" (М.: Стройиндустрия, -1993);

- двух научно-технических отчетах Челябинского государственного технического университета за 1995г. (№ гос. регистрации 02940001173 и 02950000735);

и использованы в разработке совместно с НИИЖБ ГОССТРОЯ СССР разработаны и выпущены "Рекомендации по производству эффективных сборных железобетонных изделий и конструкций на основе бетонов с добавкой конденсированного микрокременезёма" (Москва-Челябинск, 1988.- 11с.).

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены: на 43-50 научно-технических конференциях Челябинского Государственного технического университета (Челябинск 1990-1998 г.); республиканском семинаре "Пути экономии цемента при производстве железобетона" (Челябинск, 1989 г.); научно-техническом семинаре "Экономия топливно-энергетических ресурсов в промышленности сборного железобетона" (Челябинск, 1989 г.); семинаре "Совершенствование технологий вяжущих, бетонов и железобетонных конструкций" (Пермь, 1989г.); региональной научно-технической конференции "Долговечность

бетонных и железобетонных конструкций в климатических условиях Сибири и крайнего Севера" (Новосибирск, 1990 г.); межгосударственной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития научно-технического потенциала Южно-Уральского региона" (Магнитогорск, 1994 г.); международной конференции "Ресурсо- и энергосберегающие технологии строительных материалов, изделий и конструкций" (Белгород, 1995 г.); вторых академических чтениях "Современные проблемы строительного материаловедения" (Казань, 1996 г.); Уральских академических чтениях "Реконструкция городов, отдельных зданий, сооружений и конструкций на Урале" (Екатеринбург, 1997 г.).

**Публикация.** Основное содержание работы опубликовано в 12 статьях, трех научно-технических отчетах.

**Объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованных источников, включающего 135 наименований, приложений на 12 страницах; содержит 196 страниц машинописного текста, 18 таблиц и 61 рисунок.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Приведенный в диссертационной работе анализ литературных данных показал, что в зависимости от свойств бетона и параметров его влажностного состояния основные причины возникновения деструктивных явлений при циклическом замораживании и оттаивании определяются воздействием одного из следующих факторов или их групп:

- различием коэффициентов термического расширения составных частей бетона (заполнителей и цементно-песчаного раствора), а также скелета бетона и льда;

- гидростатическим давлением воды при образовании льда в замкнутых полостях водонасыщенного бетона, замерзающего в воде или на воздухе;
- гидравлическим давлением воды в бетоне при перемещении фронта льдообразования;
- кристаллизационным давлением льда при сегрегации его за время длительного стационарного стояния фронта промёрзания.

Существующие гипотезы не объясняют причины ускоренного разрушения бетона при замораживании в водных растворах солей. Уточнение этих причин позволит установить способы проектирования технологии бетонов высокой долговечности при работе их в крайне неблагоприятных условиях.

В настоящее время среди мер для увеличения долговечности бетонных и железобетонных конструкций при агрессивных воздействиях приоритет отдается уменьшению величины капиллярной пористости и созданию системы условно замкнутых пор с определенными параметрами. На практике такой подход реализуется введением в бетонную смесь комплексных пластифицирующих и воздухововлекающих добавок. Использование последних приводит к снижению прочности. Данные по минимальному водовяжущему отношению, которое обеспечивает требуемую морозостойкость противоречивы.

Исходя из выше сказанного, была поставлена цель уточнения механизма морозного разрушения бетонов, замораживаемых в минерализованных жидких средах и разработки высокопрочных бетонов с гарантированной высокой долговечностью без дополнительного воздухововлечения и вторичной защиты.

Для достижения данной цели решались следующие задачи:

1. Исследовались особенности деформирования бетонов в процессе циклического замораживания и оттаивания при различных условиях насыщения и замораживания.
2. Разрабатывались способы повышения плотности и стабильности структуры цементного камня.
3. Проводился анализ напряженного состояния бетона при циклическом замораживании и оттаивании, выявлялись основные факторы, вызывающие деформации расширения и деструкцию цементного камня.
4. Исследовалось влияние минеральной и пластифицирующей добавок на особенности формирующейся структуры гидратных фаз цементного камня и свойств бетонов с низкими водовяжущими отношениями.
5. Исследовалось влияние низких водоцементных отношений и добавок микрокремнезёма на кинетику набора прочности и морозостойкость бетонов.
6. Устанавливалась возможность получения неаэрированных бетонов высокой стойкости для устройства жестких автомобильных и аэродромных покрытий на основе цементов с ненормируемым минералогическим составом.

### **Материалы и методы исследования**

В экспериментальной части использовались портландцементы Коркинского цементного завода (ПЦ 400-Д20 и ПЦ 500-Д-0), гранодиоритовый щебень фракции 5-20, кварцевый песок с модулем крупности 2.25, химическая добавка С-3, высокоактивная минеральная добавка (отход производства ферросилиция)-конденсированный микрокремнезём Челябинского электрометаллургического комбината.

Влияние микрокременезёма на фазовый состав продуктов и кинетику гидратации портландцемента исследовалось методами рентгенофазового и дифференциального-термического анализов.

Удельную поверхность цементного камня и характеристики пористости бетона оценивали адсорбцией паров воды при различных величинах относительной влажности воздуха.

Морозостойкость мелкозернистого бетона оценивалась циклическим замораживанием серии образцов бетона до  $-50 \pm 2^\circ\text{C}$  и оттаивания при  $+18 \pm 2^\circ\text{C}$  в воде, тяжелого при замораживании до  $-50 \pm 2^\circ\text{C}$  и оттаивания при  $+18 \pm 2^\circ\text{C}$  в водном растворе хлорида натрия 5% концентрации.

Деформации бетона в процессе циклического замораживания и оттаивания измерялись с помощью кварцевого низкотемпературного дилатометра.

Распределение температуры в теле бетона с точностью  $0.1^\circ\text{C}$  оценивалось с помощью тарированных хромель-копелевых термопар.

Количество образцов в одной серии испытаний устанавливалось таким образом, чтобы внутри серийный коэффициент вариации не превышал 5%.

Эксперименты проводились с помощью математического метода планирования, адекватность полученных на ПЭВМ математических моделей оценивалась по критерию Фишера.

### **Результаты исследований**

Изучение распределения температуры в образцах мелкозернистого бетона (40x40x160 мм) в процессе замораживания проводили в воде и водных растворах хлорида натрия 5,10 и 20 % концентрации. Экспериментально установлено, что при замораживании в воде в бетоне появляется аномальный температурный градиент, связанный с

льдообразованием, что создает дополнительное поле внутренних напряжений и связанных с ним микродеформаций.

Характерными особенностями «солевого» замораживания являются:

- снижение температуры начала льдообразования при увеличении концентрации раствора;
- наличие дополнительного тепловыделения (второй аномалии), связанного с образованием эвтектических кристаллов;
- при увеличении концентрации водного раствора NaCl количество образующихся кристаллогидратов при эвтектической температуре возрастает, что сопровождается увеличением тепловыделения, приводящим к изменению температурного равновесия и созданию вторичного градиента температуры, при большем переохлаждении образца;
- с увеличением концентрации раствора количество пресного льда, образовавшегося до температуры эвтектики, уменьшается, что изменяет условия теплоотдачи, результирующие в увеличении времени достижения бетоном температуры окружающей среды (-50°C).

Универсальным инструментом оценки напряженного состояния бетона при циклическом воздействии окружающей среды является его деформирование.

Расчетно-экспериментальным методом была получена зависимость объема поглощенной бетоном жидкой фазы от концентрации раствора хлорида натрия, имеющая обратно пропорциональный характер. Это подтверждается снижением величины деформаций набухания бетона при увеличении концентрации раствора.

Исследованиями выявлено, что при замораживании водонасыщенного бетона в воде происходит его дополнительное обжатие за счет температурных деформаций образующегося льда. При этом все процессы образования, распространения и таяния льда при первом цикле замораживания протекают в области отрицательных деформаций бетона.

Особенностями деформаций бетона при замораживании в водных растворах NaCl являются:

- дополнительные пики деформаций расширения бетона вследствие образования эвтектических кристаллов;
- с увеличением концентрации NaCl величины дополнительных пиков возрастают, а пик расширения бетона от кристаллизации воды сглаживается;
- с увеличением количества циклов замораживания и оттаивания кривая деформирования смещается в область деформаций расширения;
- нарастание деформаций расширения на стадии оттаивания максимально для образцов бетона, замораживаемого в 5% растворе NaCl;
- отсутствие помех внешнего льда процессу деформирования бетона при замораживании вплоть до температуры эвтектики.

Гистерезис кривой деформирования бетона при охлаждении-нагревании (рис.1) объясняется увеличением прочности смерзания привоконтактного слоя льда с поверхностью бетона, т.е. соленый лед в результате лучшего сцепления с бетоном способствует большему изменению размеров образца ниже температуры эвтектики.

Следовательно экспериментально установлено, что наиболее опасными будут деформации бетона, замораживаемого в растворах соли, т.к. они протекают в области растягивающих напряжений и их развитию не препятствует внешняя оболочка льда, создающая в бетоне сжимающие напряжения, которые сдерживают развитие деструктивных процессов при замораживании в воде.

Очевидно, что выявленный характер деформирования бетона и связанный с ним процесс деструкции позволяет исключить воздухововление как меру повышения долговечности при особых условиях замораживания.

Относительные  
деформации,  
 $\times 10^{-4}$  мм/мм

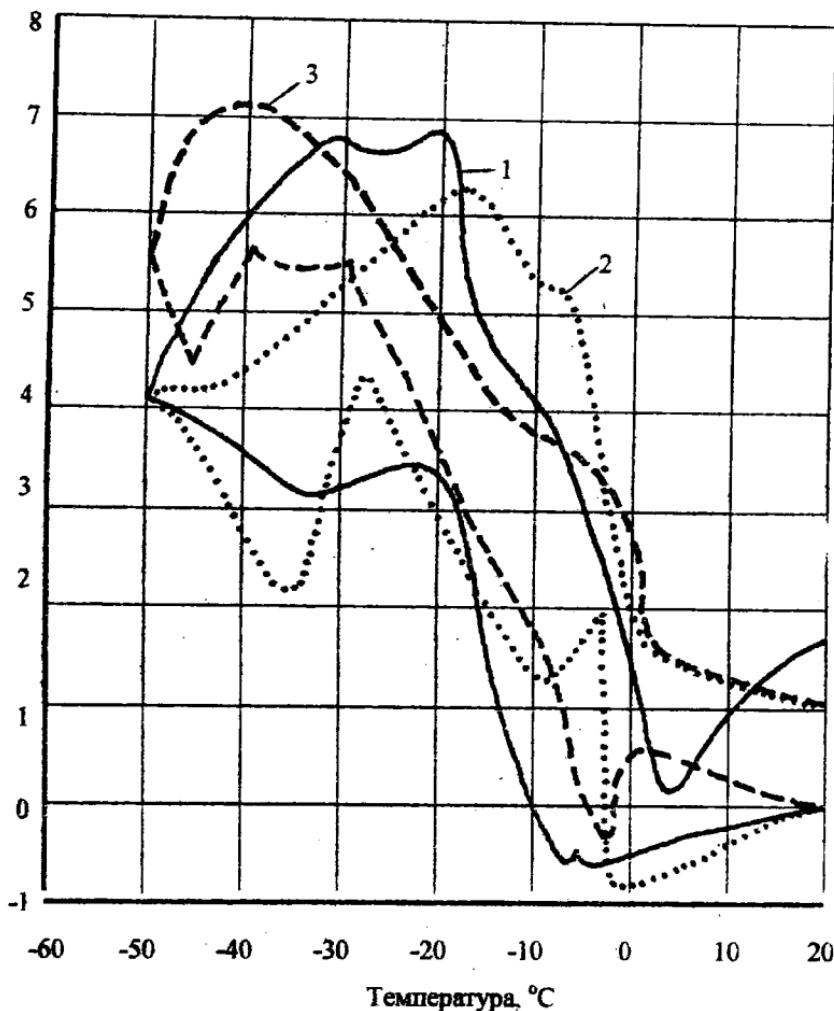


Рис.1. Дифференциальные дилатометрические кривые бетона, при замораживании в растворах с концентрацией хлорида натрия: 1-5%; 2-10%; 3-вода.

Наиболее агрессивное воздействие при замораживании бетона в растворах NaCl 3...5 % концентрации можно объяснить сочетанием следующих факторов:

- отсутствием сдерживающей оболочки внешнего льда до температуры эвтектики;
- лучшее сцепление контактного слоя соленого льда с бетоном при температурах ниже эвтектической;
- большее количество льда в порах бетона с уменьшением концентрации NaCl;
- создание вторичного поля напряжений при образовании эвтектических кристаллов;
- циклический характер льдообразования при однократном замораживании вследствие изменяющейся концентрации NaCl в порах бетона.

Влияние микрокремнезёма на структурные и механические характеристики мелкозернистого бетона при низких водовяжущих отношениях, а также на их изменение при циклическом морозном воздействии в водной среде оценивалось с применением математического планирования эксперимента. При реализации трехфакторного трехуровневого плана второго порядка в качестве переменных факторов были выбраны:  $x_1$ -доля микрокремнезёма в вяжущем (0... 0.2),  $x_2$ -водовяжущее отношение (0.25...0.3) и дозировка суперпластификатора (0.2...2.0% от массы вяжущего) при постоянном соотношении вяжущее: песок -1:1.

В результате физико-химических исследований, статистической обработки экспериментальных данных и анализа полученных математических моделей было установлено, что без добавки микрокремнезёма цементный гель преимущественно состоит из гидросиликатов кальция типа C-S-H (II), обладающих большей степенью

закристаллизованности и содержащих большее количество химически связанный воды. Введение микрокремнезёма приводит к росту количества гидросиликатных новообразований низкоосновного типа с высокой степенью дисперсности и конденсации кремнекислородных анионов, что предопределяет их повышенные связующие свойства и стабильность. Увеличение количества низкоосновных гидросиликатов подтверждается данными по содержанию  $\text{CaO}_{\text{cs}}$  в цементном камне, количеству химически связанный воды, энергии кристаллизации  $\beta$ -волластонита в процессе нагрева цементного камня при ДТА, увеличению удельной поверхности цементного камня и росту количества гелевых пор.

Создание таких структур с повышенным содержанием стабильной гелеобразной фазы приводит к увеличению способности бетона релаксировать возникающие напряжения, снизить их концентрацию и увеличить работу разрушения бетона. Последний становится менее хрупким, растет трещиностойкость (отношение прочности при сжатии к прочности на растяжение при изгибе уменьшается с увеличением дозировки микрокремнезёма).

Исследование прочности бетона в процессе циклического замораживания показало, что после определенного числа циклов прочность бетона начинает изменяться скачкообразно. Наибольшая амплитуда «скакков» начиная с 20 цикла наблюдается для бетонов при водовяжущем отношении 0.25 без микрокремнезёма и при  $\text{B}/\text{B}=0.3$  с дозировкой микрокремнезёма 20%. При водовяжущих отношениях в интервале 0.2...0.25 и добавке микрокремнезёма 10% резкого изменения прочности не наблюдалось. Изменение прочности на растяжение при изгибе носило слаженный характер. Наиболее стабильным коэффициентом морозостойкости ( $k=R_{\text{мор}}/R_{28} \geq 0.95$ ) обладают бетоны при увеличении дозировки микрокремнезёма и снижении водовяжущего отношения. Скачкообразный характер изменения прочности говорит о протекании в

системе конструктивных и деструктивных процессов, приводящих к изменению поровой структуры. Подтверждением этого является характер изменения гелевой пористости.

Выявлено, что содержание свободного гидроксида кальция в процессе замораживания обратно пропорционально концентрации микрокремнезёма.

Установлено, что в процессе циклического замораживания при низких отрицательных температурах происходят структурные превращения, связанные с перекристаллизацией и изменением фазового состава новообразований (формирование менее стесненных гидросиликатов кальция).

Введение микрокремнезёма создает условия для связывания выделяющегося при гидратации цементных минералов гидроксида кальция с образованием низкоосновных гидросиликатов и увеличением удельной поверхности. При водовяжущем отношении 0.3 без добавки микрокремнезёма удельная поверхность уменьшается, т.е. происходят процессы укрупнения новообразований цементного камня как форма «старения» цементного геля.

Большему водовяжущему отношению соответствовали большие значения энергии кристаллизации  $\beta$ -волластонита, что подтверждает благоприятное влияние менее стесненных условий на протекание процессов гидратации. Однако при фиксированной дозировке микрокремнезёма рост водовяжущего отношения оказывает меньшее влияние на количество низкоосновных гидросиликатов, чем активная минеральная добавка.

Выявлено, что только при совместном воздействии: снижении водовяжущего отношения и введении активной минеральной добавки удается получать бетоны сверхвысокой морозостойкости при замораживании и оттаивании в воде (до 2000 циклов замораживания-оттаивания).

Для оценки возможности получения высокопрочных и высокоморозостойких тяжелых бетонов были реализованы два плана второго

порядка проведения экспериментов: 1) трехфакторный пятиуровневый и 2-двуухфакторный трехуровневый с варьируемыми факторами: 1- В/Ц (0.26...0.3), МК (0...10% от массы цемента), С-3 (1...3% от массы вяжущего) при  $\Pi/(P+Щ)=0.3$ ; 2)  $\Pi/(P+Щ)$  (0.3...0.5), МК (10...30% от массы вяжущего) при  $B/B=0.34$  ( $B/C=0.38...0.49$ ).

Анализ экспериментальных данных позволил установить возможность увеличения до 3% от массы вяжущего оптимального количества суперпластификатора, необходимого для получения бетонных смесей равных подвижностей при различных дозировках компонентов. Установлена зависимость максимально возможного количества добавки С-3 от суммарной поверхности вяжущего (цемент + микрокремнезём).

Повышенные дозировки микрокремнезёма в серии 2 полностью компенсируют потерю прочности на сжатие при увеличении водоцементного отношения, а при постоянных дозировках суперпластификатора и микрокремнезёма увеличение водовяжущего отношения (состав 12 табл.1) с 0.25 до 0.34 (сосав 1 табл. 2) приводит к росту прочности бетона на 7% при снижении расхода цемента с 550 до 450 кг/м<sup>3</sup>. Данное явление прежде всего следует связывать с более полной гидратацией вяжущего, количеством и качеством новообразований, снижением уровня внутренних напряжений. Вместе с тем уменьшение степени гидратации при уменьшении водоцементного отношения приводит к созданию структуры, способной в дальнейшем противодействовать агрессивным воздействиям за счет неиспользованных возможностей вяжущего.

Исследование поровой структуры бетона методом водопоглощения (ГОСТ 12730.4) позволило установить, что добавка микрокремнезёма сокращает объем открытых капиллярных пор в бетоне, последний уменьшается и при снижении водовяжущего отношения.

Проведенные исследования морозостойкости бетона показали, что при водоцементных отношениях ниже 0.3 стойкость бетона не зависит от

Таблица 1

№	В/Ц	МК, % от цемента	С-3, % от вяжу- щего	OK, см	V <sub>v</sub> , %	Сред- ний размер пор λ	Одно- род- ность размера пор α	Водопо- глощение, % по	Прочность при сжатии, Мпа, после № циклов			
									массе	объему	0	35
1	0.268	2.115	1.423	2	2.9	0.78	0.41	3.4	8.2	58.3	60.6	58.9
2	0.268	2.115	2.557	2	1.7	0.89	0.32	4.0	9.5	51.4	59.9	53.0
3	0.268	7.885	1.423	2	2.5	1.02	0.25	3.6	6.2	65.8	82.0	87.1
4	0.268	7.885	2.557	4	1.3	1.00	0.31	2.7	6.5	78.6	83.6	68.0
5	0.292	2.115	1.423	14	2.9	1.06	0.38	4.6	10.8	42.9	62.3	61.0
6	0.292	2.115	2.557	18	1.5	1.13	0.33	4.0	9.5	55.2	55.5	56.8
7	0.292	7.885	1.423	11	1.6	1.07	0.25	3.4	8.1	65.9	76.7	70.1
8	0.292	7.885	2.557	21	2.3	0.92	0.20	3.7	8.5	53.8	71.6	70.0
9	0.280	5.0	1.0	3	2.3	0.88	0.31	3.1	7.5	68.8	64.9	64.2
10	0.280	5.0	3.0	22	1.2	1.05	0.32	3.6	7.1	62.8	62.3	66.4
11	0.280	-	2.0	3	3.7	1.10	0.36	3.9	9.4	52.5	57.3	49.8
12	0.280	10.0	2.0	20	1.8	1.09	0.35	3.3	7.8	60.6	72.4	80.3
13	0.26	5.0	2.0	10	1.4	1.05	0.34	3.5	8.4	73.9	71.8	72.2
14	0.3	5.0	2.0	24	2.7	1.13	0.39	4.0	9.6	54.7	51.1	52.6
15	0.28	5.0	2.0	17	2.0	1.10	0.36	3.2	7.7	70.4	65.5	58.2
16	0.28	5.0	2.0	17	2.3	1.15	0.35	3.8	6.9	70.0	69.0	69.0

Примечание. Расход цемента - 550 кг/м<sup>3</sup>.

Таблица 2

№	П/П+ Щ)	МК, % от вяжу- щего	Ц, кг/м <sup>3</sup>	OK, см	V <sub>v</sub> , %	Сред- ний размер пор λ	Одно- род- ность размера пор α	Водопо- глощение, % по	Прочность при сжатии, Мпа, после № циклов			
									массе	объему	0	35
1	0.3	10	450	22	1.7	0.87	0.35	4.6	10.7	64.8	49.4	-
2	0.3	20	400	20	1.4	0.95	0.29	5.2	12.0	66.8	46.3	-
3	0.3	30	350	20	1.6	1.33	0.39	4.4	10.2	70.2	44.4	-
4	0.4	10	450	23	2.5	0.69	0.30	5.0	11.4	59.1	41.1	-
5	0.4	20	400	20	1.0	0.79	0.36	4.9	11.4	68.3	34.4	-
6	0.4	30	350	21	2.3	1.18	0.43	4.7	10.8	69.6	47.8	-
7	0.5	10	450	22	3.2	0.71	0.40	4.1	9.6	58.3	39.2	-
8	0.5	20	400	23	2.5	0.78	0.39	5.4	12.1	53.0	33.9	-
9	0.5	30	350	11	0.6	0.85	0.41	4.7	10.9	64.3	33.4	-

воздухосодержания бетонной смеси, а для бетонов с высшими коэффициентами морозостойкости воздухововлечение не превышало 1.7%. При этом наилучшей стабильностью по прочности до 80 ЦЗО (F 500) обладает бетон с 15% микрокремнезёма (воздухосодержание 0.8%).

Снижение водовяжущего отношения приводит к росту плотности бетона, что создает «стесненные» условия для формирования структуры при дальнейшей гидратации, вызывая появление и рост внутренних напряжений, как за счет кристаллизационного давления, так и перекристаллизации первоначально возникших гидратных фаз. Снижения уровня внутренних напряжений можно добиться увеличением пористости системы, что отрицательно скажется на прочности и долговечности (серия2). Предлагается другой способ снижения внутренних напряжений за счет образования большего количества стабильных низкоосновных гидросиликатов кальция, представляющих гелевую составляющую, способных уменьшать концентрацию напряжений и снижать их уровень за счет собственных пластических деформаций. Данная задача решена введением активной минеральной добавки – микрокремнезёма, которая помимо этого обеспечивает высокую стабильность новообразований при агрессивных воздействиях.

Результаты выполненных исследований были внедрены при строительстве трубопроводов, изготавляемых на оборудовании и по технологии фирмы "TAUBER", к которым предъявляются повышенные требования по стойкости. Экономический эффект за счет повышения межремонтных сроков службы конструкций составил 840 315.4 руб. на 100-метров трубопровода.

## **Общие выводы**

1. Установлено, что причиной ускоренного разрушения при замораживании бетона в водных растворах солей по сравнению с замораживанием в воде является создание поля вторичных внутренних напряжений за счет градиента температур, возникающего вследствие процессов образования пресного льда и эвтектических кристаллов, а также замедленного отвода тепла.

2. Выявлено, что при замораживании в воде бетон испытывает внутренние сжимающие напряжения от «внешней» оболочки льда, которые сдерживают развитие деструктивных процессов от агрессивного воздействия. При замораживании в водных растворах солей бетон может свободно деформироваться вплоть до эвтектической температуры.

Отсутствие сдерживающей оболочки, а также повышенное сцепление соленого льда с бетоном приводят к большим деформациям за счет процессов образования, распространения и таяния льда и, как следствие, к ускорению накопления остаточных деформаций и развитию деструктивных процессов. Особенно это характерно при замораживании бетона в растворах солей средних концентраций (3...5 %).

3. Установлено, что введение микрокремнезёма в мелкозернистые бетоны с водовяжущими отношениями 0.25...0.3 приводит к значительному росту прочности на растяжение при изгибе (до 55%) и меньшему росту прочности при сжатии (до 21%). Это вызвано повышением однородности гидратных фаз, уменьшением макропористости при одновременном увеличении объема гелевых пор, снижением содержания портландита. Значительный рост прочности на растяжение при изгибе вызван увеличением гонковолокнистой гелевидной фазы, представленной низкоосновными гидросиликатами кальция.

4. Доказано, что выделяющийся в процессе дальнейшей гидратации при циклическом замораживании гидроксид кальция постоянно связывается микрокремнезёмом, в результате чего происходит пополнение количества высокодисперсных гидросиликатов кальция, выражющееся в сохранении на прежнем уровне или увеличении удельной поверхности цементного камня, энергии кристаллизации  $\beta$ -волластонита при ДТА. Происходит заливание дефектов структуры, образовавшихся при агрессивных воздействиях.

5. Разработана методика назначения количества суперпластификатора С-3, необходимого для обеспечения максимального водоредуцирующего эффекта при сохранении требуемой подвижности бетонной смеси. Расчет дозировки основан на оценке суммарной площади поверхности вяжущего, исходя из положения, что на  $200000 \text{ м}^2$  поверхности требуется 1% добавки.

6. Установлен механизм регулирования реологических характеристик бетонной смеси при низких водовяжущих отношениях в присутствии комплексной добавки микрокремнезём + суперпластификатор. Бетонные смеси с С-3 до 2...35 характеризуются высокой подвижностью, но замедленным схватыванием и твердением. Совместное введение суперпластификатора и микрокремнезёма (8...10% от массы цемента) дополнительно пластифицирует бетонную смесь без замедления схватывания и твердения.

7. Определено, что морозостойкость бетона при водовяжущих отношениях ниже 0.3 не зависит от количества вовлеченного воздуха и возрастает с уменьшением водовяжущего отношения. Для получения максимальной стойкости при низких водовяжущих отношениях обязательным условием является введение в состав бетонной смеси микрокремнезёма в количестве 10...15%.

8. Для бетонов с водовяжущими отношениями выше 0.34 введение микрокремнезёма приводит к значительному росту прочности при сжатии не вызывая существенного увеличения солеморозостойкости.

9. Разработаны составы бетонов, характеризующиеся резко сниженной капиллярной пористостью и высокой морозостойкостью (F 600 и более) для дорожных и аэродромных покрытий без дополнительного воздухововлечения и вторичной защиты. Применение таких бетонов для возведения трубопроводов позволяет получить экономический эффект 840315.4 руб. на 100 м за счет увеличения межремонтных сроков службы конструкций.

**Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

1. Зинов И.А., Горбунов С.П. Высокопрочные и быстротвердеющие бетоны// Экономия топливно-энергетических ресурсов в промышленности сборного железобетона: Тез. докл. науч.-техн. конф.- Челябинск: ЧПИ, 1989.- С.20-25.
2. Свойства тяжелого бетона с активной минеральной добавкой /Б.Я. Трофимов, И.А. Зинов, Л.Я. Крамар и др./// Совершенствование технологии вяжущих, бетонов и железобетонных конструкций.- Пермь: ППИ, 1989.- С.20-25.
3. Зинов И.А., Горбунов С.П., Крамар Л.Я. Комплексный ускоритель твердения // Ресурсосберегающие технологии в производстве сборного железобетона : Тез. докл. науч.-практ. семин.- Челябинск: ЧПИ, 1990. - С.66-68.
4. Зинов И.А., Горбунов С.П. Использование микрокремнезёма для получения специальных бетонов // Долговечность бетонных и железобетонных конструкций в климатических условиях Сибири и Крайнего Севера: Тез. докл. Республиканской конф.- Новосибирск: НИИЖТ, 1990.- С.18-20.
5. Зинов И.А., Горбунов С.П. Высокопрочный бетон с добавкой микрокремнезёма // Известия вузов. Строительство и архитектура.- 1990, №9.- С.55-58.

6. Горбунов С.П., Зинов И.А. Морозостойкость бетонов с низкими водоцементными отношениями // Известия вузов. Строительство и архитектура.- 1992, №1.- С.53-57.
7. Зинов И.А., Горбунов С.П. Морозостойкость бетонов с добавкой микрокремнезема // Ресурсосберегающие технологии строительных материалов, изделий и конструкций: Тез. докл. республиканской конф.- Белгород: БГТАСМ, 1993.- С.218.
8. Горбунов С.П., Зинов И.А. Деформативность бетонов при циклическом замораживании // Состояние и перспективы развития научно-технического потенциала Южно-уральского региона: Тез. докл. региональной конф.- Магнитогорск: МГМИ, 1994.-С.45.
9. Трофимов Б.Я., Крамар Л.Я., Зинов И.А. О взаимосвязи гидратных фаз цемента с морозостойкостью бетона // Состояние и перспективы развития научно-технического потенциала Южно-уральского региона: Тез. докл. региональной конф.- Магнитогорск: МГМИ, 1994.-С.46.
10. Зинов И.А. Влияние условий замораживания на деформации бетона // Исследования по строительным материалам, конструкциям и механике: Сб. науч. тр.-Челябинск: ЧГТУ, 1995.-С.49-59.
11. Горбунов С.П., Зинов И.А. Особенности свойств бетона с добавкой микрокремнезема при низких водоцементных отношениях // Современные проблемы материаловедения: Вторые академические чтения.- Казань: КГУ, 1996.-С.23-25.
12. Трофимов Б.Я., Горбунов С.П., Зинов И.А. Бетон для взлетно-посадочной полосы в аэропорту г. Челябинска // Реконструкция городов, отдельных зданий, сооружений и конструкций на Урале: Вторые академические чтения.- Екатеринбург: РААСН, 1997.-С.44-46.

**Зинов Игорь Алексеевич**

**Стойкость и деформации высокопрочного бетона  
при вибрационных температурных воздействиях**

**Специальность 05.23.05 - "Строительные материалы и изделия"  
Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Издательство Южно-Уральского государственного  
университета**

---

**ЛР № 020364 от 10.04.97. Подписано в печать 09.04.99. Формат  
60x84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1.16. Уч.-вид. л. 1.  
Тираж 90 экз. Заказ 94.153.**

---

**УОП Издательства 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.**