

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**ИВАНОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ**

*На правах рукописи*

**УДК 666.97.058.015.04(043)**

**АКУЛОВА МАРИНА ВЛАДИМИРОВНА**

**РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ  
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОТДЕЛКИ  
ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ БЕТОНОВ**

**Специальность 05.23.05 - Строительные материалы и изделия**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

**Научный консультант -  
Заслуженный деятель науки РФ,  
Лауреат Премии Правительства  
в области науки и техники,  
член-корреспондент РААСН, д. т. н.  
ФЕДОСОВ С. В.**

**Иваново 2004**

Работа выполнена на кафедре Строительного материаловедения и специальных технологий Ивановской государственной архитектурно-строительной академии.

**Научный консультант —**

Заслуженный деятель науки РФ, Лауреат Премии Правительства в области науки и техники, член-корреспондент РААСН, д.т.н.  
**ФЕДОСОВ Сергей Викторович**

**Официальные оппоненты:**

Академик РААСН, профессор каф. «Строительные материалы и технологии» Петербургского государственного университета путей сообщения, д. т. н.

**КОМОХОВ Павел Григорьевич**

Заведующий кафедрой «Строительные материалы» Московского государственного строительного университета, профессор, д. т. н.

**КОЗЛОВ Валерий Васильевич**

Заслуженный изобретатель РФ, профессор кафедры «Стандартизация, сертификация и аудит качества» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, д. т. н.

**ЛОГАНИНА Валентина Ивановна**

**Ведущая организация —**

Санкт-Петербургский зональный научно-исследовательский и проектный институт **СПБЗНИИП (ОАО)** г. Санкт-Петербурга.

Защита состоится 17 июня 2004 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.060.01 в Ивановской государственной архитектурно-строительной академии по адресу: 153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, д. 20, главный корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановской государственной архитектурно-строительной академии.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



ЛАДАЕВ Н. М.

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** В настоящее время в области строительства произошли большие изменения. Известные в России виды отделки строительных материалов, а особенно бетона, не удовлетворяют современным требованиям, и рынок наводнен импортными видами отделочных материалов.

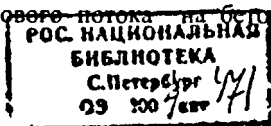
Использование нетрадиционных технологий, основанных на использовании электрохимических, плазменных, лазерных, электроимпульсных и других высокоэффективных способов обработки материалов существенно улучшает свойства строительных изделий. Высокотемпературные методы отделки бетона, силикатного кирпича и других материалов, такие как плазменная обработка бетона, глазурирование бетона, плазменное напыление металлов на бетон и другие, вызывают большой интерес у строителей, как у нас, так и за рубежом, так как являются достаточно простыми и эффективными. В данных видах отделки используются эффективные источники концентрированной тепловой энергии. Это генераторы низкотемпературной плазмы и экранные обжиговые печи.

Использование низкотемпературной плазмы как источника теплового воздействия открывает новые возможности технологического характера в отделке строительных изделий. При высоких температурах можно осуществлять процессы, которые при обычных условиях не протекают. Это позволяет получать материалы с принципиально новыми физико-химическими и физико-механическими характеристиками.

Плазменные технологии получения стекловидного расплава из различных тугоплавких соединений, к которым относится и бетон, имеют ряд преимуществ перед другими технологиями. Это экономичность, экологическая чистота, возможность создания на бетоне покрытий с большим разнообразием фактуры по поверхности изделия и высокими декоративно-художественными качествами. Кроме декоративных функций такой вид отделки решает проблему антикоррозийной защиты, увеличивает водостойкость, морозостойкость и, снижая водопоглощение материалов, сохраняет прочность материала и увеличивает долговечность.

**Актуальность** разработки научных основ высокотемпературных процессов многофункциональной отделки изделий на основе бетонов обусловлена:

- отсутствием систематизированного теоретического и технологического исследования процессов, происходящих при высокотемпературной отделке бетона;
- отсутствием моделирования процессов тепло- и массопереноса при воздействии концентрированного теплового потока на бетонную подложку;



- необходимостью создания новых малоэнергоёмких и экологически чистых технологий и оборудования для высокотемпературной отделки бетона.

Актуальность работы подтверждается включением ее в базовые программы ИГАСА с 1998 года, в две межвузовские программы «Архитектура и строительство» с 1998 года по настоящее время, в Грант Министерства образования РФ (шифр 98-21-2, 4-109) в области архитектуры и строительных наук 1999/2000 гг., Грант Министерства образования РФ 2001/2002г., Грант Министерства образования РФ 2003/2004г.

**Цель и задачи исследований.** В соответствии с научным направлением основной целью данной работы является решение научной проблемы разработки теоретических положений и исследование физико-химических и физико-механических характеристик высокотемпературных процессов многофункциональной отделки изделий на основе бетонов для обеспечения возможности создания новых малоэнергоёмких и экологически чистых технологий отделки бетона с высокими декоративными и антикоррозионными свойствами.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- обобщить теоретические и практические разработки в области высокотемпературной отделки изделий на основе бетонов и классифицировать их по различным признакам - температуре применения, видам используемых аппаратов и т. д.;
- определить оптимальные технологические схемы и оборудование для осуществления качественной высокотемпературной отделки бетонов;
- определить физические и физико-химические основы процессов, происходящих при высокотемпературной отделке изделий на основе бетонов;
- провести исследования по определению влияния различных способов высокотемпературной отделки на физико-химические и физико-механические свойства бетонов;
- изучить процессы теплопереноса при действии теплового потока во время высокотемпературной отделки бетона и разработать математическую модель, позволяющую проводить оценку влияния теплового удара на бетонный камень;
- разработать декоративные и жаростойкие покрытия для различных способов высокотемпературной отделки бетонов;
- разработать научные принципы отделки бетона стекловидными покрытиями с использованием физической и математической моделей процесса обработки бетона высокотемпературным лучистым тепловым потоком, численного эксперимента и анализа на этой основе влияния термообработки на свойства бетона;
- разработать усовершенствованные установки для оплавления глазурных и стекловидных покрытий на бетоне;

- усовершенствовать технологию отделки бетона (железобетона) стекловидными покрытиями, улучшающую качество отделки и снижающей ее негативное воздействие на бетон.

**Научная новизна** состоит в разработке теоретических положений научных основ высокотемпературных процессов многофункциональной отделки изделий на основе бетонов и их практической реализации, что конкретизируется следующим:

- обобщены теоретические и экспериментальные результаты технологий плазменной отделки бетона, газоплазменной металлизации, глазурирования и предложена классификация способов высокотемпературной отделки бетонных изделий;
- определены оптимальные параметры и предложен специальный декоративный и жаростойкий состав для плазменной отделки бетона на установке;
- разработана обобщенная модель физико-химических и физико-механических процессов, происходящих при плазменной металлизации бетона;
- разработаны научные принципы отделки бетона стекловидными покрытиями с использованием физической и математической моделей процесса обработки бетона высокотемпературным лучистым тепловым потоком;
- предложен и обоснован принцип подбора составов стекловидных покрытий для отделки бетона и железобетона, в основе которого лежит наличие одинаковых оксидов, входящих в само покрытие и цементно-песчаную составляющую бетонного камня;
- впервые установлены закономерности, отражающие взаимосвязь между адгезией стекловидных покрытий к бетонной подложке и их химическим составом;
- изучены закономерности распределения температурных полей в бетонном камне при его термической обработке при различной продолжительности термического воздействия и разных видах покрытия, на основе чего разработана компьютерная программа расчета температурных полей в образце бетона, покрытом смесью для глазурирования «Глазурь»;
- изучены закономерности изменения механических характеристик бетона под действием теплового потока экранных печей при его глазурировании по известным технологиям, предложена усовершенствованная технология отделки бетона (железобетона) стекловидными покрытиями с исключением стадии предварительного прогрева бетона;
- изучены закономерности изменения физико-химических свойств цементной и цементно-песчаной составляющих бетонного камня под действием теплового потока при плазменной обработке,

металлизации и глазуровании бетонных изделий с применением рентгеноструктурного и дериватографического методов анализа.

**Практическая значимость работы.** Разработаны научные основы высокотемпературных процессов многофункциональной отделки изделий на основе бетонов. Обобщены теоретические и экспериментальные результаты технологий плазменной отделки бетона, газоплазменной металлизации, глазурования и разработана классификация способов высокотемпературной отделки бетонных изделий; предложены оптимальные схемы и оборудование для высокотемпературной отделки бетонов; определена сущность процессов, происходящих при высокотемпературной отделке изделий на основе бетонов; проведены исследования по определению влияния различных способов высокотемпературной отделки на физико-химические и физико-механические свойства бетонов; изучены процессы теплопереноса при действии теплового потока во время высокотемпературной отделки бетона и разработана математическую модель, позволяющая проводить оценку влияния теплового удара на бетонный камень.

Рекомендованы оптимальные режимы высокотемпературных отделок бетона, предложены: специальный жаростойкий слой для плазменной отделки бетона, новые составы легкоплавких глазурей (температура оплавления 750-850°С), включающие преимущественно недорогие, недефицитные, экологически безопасные сырьевые компоненты. Предложены усовершенствованные конструкции генераторов высокой температуры для плавления глазурных и стекловидных покрытий на бетоне. Усовершенствована технология глазурования бетона. Ожидаемая экономическая эффективность (по сырью) от использования стекловидных покрытий в сравнении с покрытиями НИИ "Стройкерамика", принятыми за базовый вариант, составляет 255,0 - 295,8 тыс. руб. (в ценах 1999 г.).

Глазурование бетона рекомендовано для использования на ОАО "Домостроительная компания" (г. Иваново) при выпуске декоративных плит.

Технологический процесс плазменного декорирования испытывался при изготовлении промышленной партии балконных ограждений типа БО и цокольных панелей типа ЦП (см. приложение).

Теоретические и экспериментальные результаты исследований, полученные в работе, используются в учебном процессе при чтении лекций и выполнении дипломных работ специальности 290600 «Производство строительных материалов, изделий и конструкций» на кафедре «Строительное материаловедение и специальные технологии» Ивановской архитектурно-строительной академии.

**Методология работы.** Исследования основаны на использовании и развитии теоретических положений в области строительных наук и, в частности, отделки бетона, разработанных Ю.М.Баженовым, В.Ф.Черных, К.Д. Некрасовым, В.М. Москвиным, А.Г. Комаром, П.Г. Комоховым, В.И.Логаниной, В.Н.Соковым, В.А. Воробьевым, Л.Н. Поповым,

С.В.Федосовым, А.В.Лыковым, В.В. Козловым а также на результатах исследований в области низкотемпературной плазмы В.В. Кудинова, Л.С. Полака, Н.Н.Рыкалина, А.И. Максимова, Л.А. Арцимовича, Л.К. Дружинина и др.

В проводимых исследованиях применялись современные приборы и оборудование Ивановской государственной архитектурно-строительной академии, Санкт-Петербургских институтов ЛенЗНИИЭП и ВНИИЭСО.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы представлены на Международных, Всесоюзных и Российских симпозиумах и конференциях, в частности, на: IV, X Всесоюзных научно-технических конференциях «Бенардосовские чтения» (Иваново, 1989, 2001 гг.), Международной научно-технической конференции «Polytechnic Krakowska» (Краков-Могиляны, 1996 г.), Международной XLIII научной конференции «Krynica»-97 (Криница, 1997 г.), Международных научно-технических конференциях «Повышение эффективности теплообменных процессов и систем» (Вологда, 1998, 2000 г.), XXX, XXXI Всероссийских научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современного строительства» (Пенза, 1999, 2001 гг.), Юбилейной международной научно-технической конференции «Строительство-99» (Ростов на Дону, 1999 г.), II Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы химии и химической технологии» (Иваново, 1999 г.), I, II Международных семинарах «Нетрадиционные технологии в строительстве» (Томск, 1999, 2001 гг.), VI Академических чтениях РААСН (Иваново, 2000 г.), IX, X, XI Польско-российских семинарах «Теоретические основы строительства» (2000, 2001, 2002 гг.), Международном семинаре «Плазмохимические технологии» (Иваново, 2002 г.), Международной конференции «Аналитические методы анализа и дифференциальных уравнений» (Минск. Беларусь, 2003 г.), Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки в АПК» (Кострома, 2004 г.) и др.

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы отражены в 73 печатных работах, в том числе монографии, патенте, 2 свидетельствах на полезную модель, компьютерной программе.

**На защиту выносятся:**

- теоретические и экспериментальные результаты исследований плазменной отделки бетона, газоплазменной металлизации, глазурирования и классификация способов высокотемпературной отделки бетонных изделий;
- оптимальные параметры и специальный декоративный и жаростойкий состав для плазменной отделки бетона;
- обобщенная модель физико-химических и физико-механических процессов, происходящих при плазменной металлизации бетона;
- физико-химические основы отделки бетона стекловидными покрытиями с использованием физической и математической моделей процесса обработки бетона лучистым высокотемпературным тепловым потоком;

- принцип подбора составов стекловидных покрытий для отделки бетона и железобетона, в основе которого лежит наличие одинаковых оксидов, входящих в само покрытие и цементно-песчаную составляющую бетонного камня;
- закономерности, отражающие взаимосвязь между адгезией стекловидных покрытий к бетонной подложке и их химическим составом;
- закономерности распределения температурных полей в бетонном камне при его термической обработке при различной продолжительности термического воздействия и разных видах покрытия, компьютерную программу расчета температурных полей в образце бетона, покрытом смесью для глазурирования «Глазурь»;
- закономерности изменения механических характеристик бетона под действием теплового потока экранных печей при его глазурировании по известным технологиям, усовершенствованную технологию отделки бетона (железобетона) стекловидными покрытиями с исключением стадии предварительного прогрева бетона;
- усовершенствованную установку экранной печи для глазурирования бетона;
- специальную конструкцию аппарата для плавления стекловидных покрытий на основе плазмы ацетиленовой горелки;
- закономерности изменения физико-химических свойств цементной и цементно-песчаной составляющих бетонного камня под действием теплового потока при плазменной обработке, металлизации и глазурировании бетонных изделий с применением рентгеноструктурного и дериватографического методов анализа.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, основных выводов, списка использованной литературы, включающего 278 наименований и 13 приложений. Содержит 305 страниц машинописного текста, в том числе 109 рисунков и 62 таблицы.

### **Содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность проблемы, определяются научная новизна и практическая значимость исследований.

В первой главе проведен сравнительный анализ современного отечественного и зарубежного опыта научно-исследовательских работ в области технологии традиционной и высокотемпературной отделки бетонов как способа увеличения их декоративности и антикоррозионной защиты, рассмотрены характеристики декоративности, виды и свойства отделочных материалов разного назначения, дана характеристика влияния агрессивных сред на здания и сооружения, рассмотрены виды коррозии бетона и традиционные способы антикоррозионной защиты, намечаются основные направления работы, даны авторские классификации высокотемпературных отделок бетона.



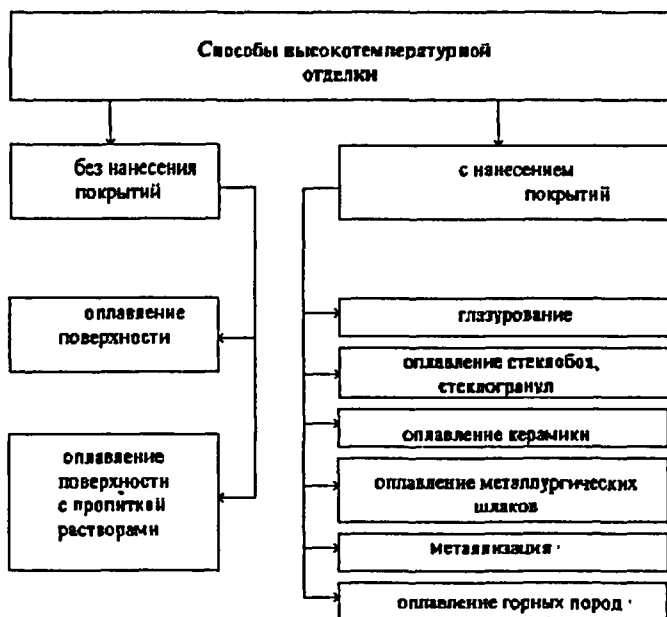
Теоретические и практические исследования опираются на фундаментальные работы в области строительных наук и, в частности отделки, структуры и тепломассопереноса в бетонных материалах Ю.М.Баженова В.Ф.Черных, К.Д. Некрасова, В.М. Москвина, А.Г. Комара, П.Г. Комохова, Ю.А. Соколовой, В.Н.Сокова, В.А. Воробьева, Л.Н. Попова, С.В. Федосова, А.В.Лыкова, а также на результаты исследований в области низкотемпературной плазмы В.В. Кудинова, Л.С. Полака, Н.Н.Рыкалина, А.И. Максимова, Л.А. Арцимовича, Л.К. Дружинина и др.

Сравнительный анализ традиционной и высокотемпературной отделки бетонов позволяет высказать суждение, что известные традиционные способы отделки наряду с положительными качествами имеют серьезные недостатки, к числу которых относятся: недолговечность; горючесть; малоэффективность от проникновения влаги; подверженность коррозии и др. Поэтому остро встает вопрос о разработке таких способов отделки бетонных изделий, которые вместе с высокими декоративными качествами надежно защищали бы материал от действия агрессивных сред. К таким способам относятся высокотемпературные способы отделки железобетонных конструкций, которые быстро развиваются в последнее время. В настоящее время высокотемпературные способы отделки бетона и железобетона включают в себя плазменное оплавление поверхности, металлизацию бетонной поверхности с помощью плазмотронов, глазурирование поверхности бетона и их разновидности. Способы высокотемпературной отделки кроме защиты от внешней среды придают изделиям декоративность. Все вышперечисленные способы высокотемпературной отделки строительных материалов разрабатывались отдельно друг от друга. Проблема заключается в том, что нет единой систематизации высокотемпературных процессов, методологии, не обобщены достоинства и недостатки этих процессов, что затрудняет дальнейшее совершенствование процессов высокотемпературной отделки.

Систематизация любых способов и технологий начинается с их классификации. Автором предлагается систематизировать способы высокотемпературной отделки бетонов по четырем основным признакам: по виду высокотемпературной обработки; технологии нанесения отделочного слоя; типу высокотемпературной установки; степени нагрева поверхности бетона в результате высокотемпературной обработки. По виду высокотемпературной обработки отделка бетона делится на три основные группы: 1) оплавление поверхности бетона плазмой; 2) плазменная металлизация бетона; 3) глазурирование бетона. Все способы высокотемпературной отделки можно разделить на две большие группы: без предварительного нанесения отделочного слоя и с нанесением отделочного слоя на поверхность изделия (рис. 1).

Классификация по технологии нанесения отделочного слоя выполнена по традиционной схеме отделки железобетонных наружных

стенных панелей в заводских условиях, а именно: 1) нанесение отделочного слоя на незатвердевшее изделие "лицом вверх" и "лицом вниз"; 2) нанесение отделочного слоя на поверхность готового изделия. После затвердевания изделия покрытие оплавляется. Во втором случае материал, предназначенный для отделки, наносится на поверхность уже затвердевшего бетонного изделия. По типу высокотемпературной установки способы высокотемпературной отделки делятся на две большие группы. В первой группе тепловой поток генерируется с помощью плазмы. Во второй группе тепловой поток идет от инфракрасных излучателей.



**Рис.1. Классификация способов высокотемпературной отделки бетона и железобетона**

Классификация по степени нагрева у поверхности бетона в результате тепловой обработки рассматривает способы высокотемпературной отделки по увеличению теплового потока. Наименьшей температура обработки у поверхности бетона будет при плазменной металлизации (температура около 800°C у поверхности изделия); затем идет глазурирование бетона (температура 800-900°C); потом оплавление стеклобоя факелом газовой горелки (температура около 2000°C); и, наконец, оплавление поверхности бетона факелом индукционного или дугового разряда (температура до 4000°C).

**Во второй главе** рассматривается применение плазменных технологий для антикоррозийной и декоративной отделки бетонов. Проведено исследование по влиянию плазмы на различные виды бетонов и их составляющих, разработаны и рекомендованы декоративные жаростойкие подстилающие слои для улучшения качества плазменной отделки.

Так на современном этапе промышленности строительных материалов возникло целое направление по изготовлению изделий на принципиально новом сырьевом материале - зольных отходах теплоэлектростанций. Однако строительные материалы на основе зол имеют ряд существенных недостатков - малая прочность, большое водопоглощение и, как результат, малая водостойкость и низкая морозостойкость. В связи с этим была изучена возможность применения плазменной обработки для улучшения свойств теплоизоляционных материалов на основе зол и их декоративности. В качестве объекта исследований был выбран безобжиговый теплоизоляционный пенобетон неавтоклавного твердения на основе золы и жидкого стекла, следующего состава по массе: 70-75% золы (фракций 0,63-0,14 мм), 20-24,4% жидкого натриевого стекла, 0,4-0,6% пенообразователя и воды. Оплавление изделий производилось на плазменной высокочастотной индукционной установке. На поверхности образцов после их плазменной активации появлялось черное стекловидное покрытие. Найдено, что на скорость образования стекловидного покрытия оказывает влияние температура плазменной струи. Установлено, что толщина образования стекловидного слоя на поверхности бетонных изделий зависит от времени высокотемпературного воздействия и возрастает с увеличением времени воздействия плазмы; в наших условиях обработки она составляет 1-2 мм. Прочность сцепления стекловидного слоя с основой определяли методом отрыва, она в значительной степени зависит от толщины слоя и пористости материала. С увеличением толщины стекловидного слоя возрастают напряжения между стеклом и основой, которые способствуют образованию и развитию трещин в поверхностном слое.

В результате плазменной обработки и образования стекловидного слоя на поверхности образцов изменялись функциональные и технологические свойства теплоизоляционного материала: его средняя плотность, водопоглощение, предел прочности на сжатие и изгиб в сухом состоянии после водной обработки, коэффициент размягчения, коэффициент теплопроводности (табл.1). В результате высокотемпературного воздействия несколько снижается средняя плотность материала, причем пределы прочности материала на сжатие и изгиб практически не изменяются.

Автором разработаны оптимальные способы отделки бетонных изделий на установке «Плазма-602». Показано, что обработку бетонных изделий на установке индукционного разряда следует проводить с применением жаростойких подстилающих слоев.

Таблица 1

Влияние плазменной обработки  
на свойства зольного теплоизоляционного материала

Параметры плазменной обработки		Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент размягчения, отн.ед	Водопоглощение, %	Предел прочности в высушенном состоянии		Коэффициент теплопроводности, Вт/м К
Скорость движения тележки, м/мин	Расстояние от сопла, мм				Сжатие, МПа	Изгиб, МПа	
Контрольный		450	0,30	28,6	2,6	0,23	0,110
0,65	30	390	0,71	20,5	4,5	0,29	0,099
0,65	40	390	0,71	21,0	4,5	0,30	0,085
0,65	50	400	0,70	22,0	4,2	0,25	0,093
0,70	40	400	0,72	21,0	4,6	0,30	0,081
0,75	40	400	0,71	21,0	4,5	0,29	0,085
0,80	40	410	0,70	22,0	5,5	0,28	0,087
0,85	30	410	0,70	20,5	4,4	0,28	0,093
0,85	40	410	0,71	21,0	4,6	0,29	0,087
0,85	50	420	0,70	20,3	4,5	0,29	0,099

Для предотвращения растрескивания образцов от теплового удара разработаны специальные подстилающие слои из материалов с низкой теплопроводностью и высокой декоративностью - белого цемента, кварцевого песка, стекла. Такие слои наносятся на поверхность бетонного изделия, защищают его от кратковременного теплового удара при температуре 2000-4000°С, увеличивают декоративность и защищают от химической коррозии. Для изготовления слоев использовались: портландцемент М400; портландцемент белый М400; песок строительный; вода; стекло оконное. Было изготовлено несколько видов слоев: портландцемент с песком; белый портландцемент; белый портландцемент со стеклянным боем; белый портландцемент с песком и стеклянным боем, а сверху вся поверхность образца покрывалась стеклянной крошкой; формование производилось аналогично предыдущему слою, только отсутствовал стеклянный бой. Плазменная обработка бетонных образцов производилась на установках ВЧИ-6315-ИГ, «Кристалл» ТПл-25К. Для всех образцов производилось испытание штукатурного слоя на коррозию в реальных условиях. В течение месяца образцы находились в кислой агрессивной среде на Ивановском химическом заводе. После этого они испытывались на прочность при сжатии и изгибе. Также проводились испытания на быструю коррозию бетонных образцов. Испытание проводилось в среде 15%-ого раствора сульфата магния.

Следующая работа заключалась в оценке целесообразности применения плазменного факела с целью стабилизации корродированного

слоя железобетонных изделий в химических цехах. Разрушенный химической коррозией слой железобетонного изделия, сколотый с панелей, колонн и ригелей цеха № 4 Ивановского химического завода, подвергали обработке в струе плазмы на высокочастотной плазменной установке. В результате исследований установлено, что в химических цехах при обработке бетона, подвергнутого коррозии, происходят зачистка и закалка поверхности конструкции, уменьшение трещин и новообразований. Это приводит к продлению срока службы конструкции. Как показали рентгеноструктурные исследования, плазменная обработка корродированной поверхности восстанавливает химический состав бетона, разрушая продукты коррозии. Происходит как бы закалка поверхности, временно прекращаются процессы коррозии. При этом прочностные характеристики бетона практически не ухудшаются.

Проведено определение оптимальных способов плазменной обработки бетона с целью защиты его от коррозии. По первому способу плазменной отделке подвергался корродированный бетон промышленных цехов без предварительной обработки. Этот способ не дает прочного стекловидного покрытия и довольно сложен по техническому исполнению. По второму способу поверхность бетонных конструкций подвергалась предварительной пескоструйной обработке. Обработка проводилась на образцах, взятых как в химических цехах, так и непосредственно на линии отделки при изготовлении наружных стеновых панелей. По данному способу получено более прочное стекловидное покрытие, но оно имеет ненадежное сцепление с основанием. Прочность бетона при этом не изменяется или даже несколько снижается в поверхностных слоях. По третьему способу плазменная отделка железобетонных конструкций проводилась на образцах, изготовленных из портландцемента и песка и покрытых штукатурным специальным слоем из белого портландцемента с песком с добавлением в наружный слой боя стекла. Образцы подвергали обработке в струе плазмы на высокочастотной плазменной установке «Кристалл» ТПл-25К. В результате этого способа повышаются декоративные характеристики бетона, снижается водопоглощение образцов (рис.2).

Отделка положительно сказывается на атмосферостойкости, морозостойкости и коррозионной стойкости бетона. Показано, что прочность бетона со специальными защитными слоями после плазменной обработки практически не меняется. Так, даже после испытаний на ускоренную коррозию в среде 15%-ого раствора магниевой соли ( $MgSO_4$ ) прочность образца изменялась незначительно (табл.2).

В работе проведен расчет экономической эффективности повышения долговечности железобетонных панелей после обработки низкотемпературной плазмой. Рассчитывалась экономическая эффективность антикоррозионной защиты железобетонных плит из легкого бетона средней плотностью  $1900 \text{ кг/м}^3$ . Определена степень агрессивности производственной среды на железобетонные конструкции:

в первом варианте - химически стойких защитных лакокрасочных покрытий толщиной 175 мкм для внутренних помещений при среднеагрессивной среде, во втором варианте - защитного покрытия из одного слоя оплавленной поверхности толщиной до 2 мм.

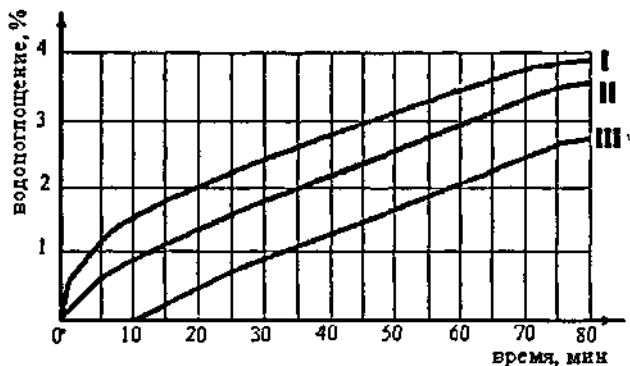


Рис. 2. Зависимость скорости водопоглощения оплавленного бетона от состава подстилающего слоя:

I - белый портландцемент: песок, неоплавленный; II - белый портландцемент: песок; III - белый портландцемент : песок: стекло.

Таблица 2

Влияние плазменной обработки штукатурного слоя бетона на предел прочности при сжатии в условиях ускоренной коррозии, МПа

Вид образца	БПЦ+П Неоплавленный	БПЦ+П Оплавленный	БПЦ+П+С Неоплавленный	БПЦ+П+С Оплавленный
До коррозии	13,0	13,0	16,0	17,6
После коррозии	9,1	9,5	12,1	15,7

Примечание: БПЦ - белый портландцемент; П - песок; С - стекло; неопл./оплавл. - неоплавленный/оплавленный образец.

Анализ проведенных расчетов показывает, что стоимости текущего и капитального ремонтов по первому и по второму варианту практически одинаковы. Периодичность же капитальных ремонтов у конструкций с плазменным оплавлением реже, чем у окрашенных масляной краской. Поэтому плазменная отделка зданий при длительном сроке эксплуатации выгоднее отделки красочными составами.

**В третьей главе** представлены результаты научных исследований, разработаны основы процессов отделки бетона с помощью газоплазменного напыления. Найдено, что наиболее целесообразно применять для плазменного напыления металлов на бетон электродуговые плазмтроны. Рассмотрены принципы генерации плазмы в электродуговых плазмтронах; методы электродуговой металлизации и особенности плазменного нагрева напыляемого вещества при газоплазменной металлизации бетона; процессы, происходящие при образовании

плазменной струи; процессы, происходящие при попадании металлической проволоки или порошка в зону плазмы; теплофизика напыления; физико-химические процессы, происходящие при попадании напыляемых частиц в зону плазмы.

Исследованы условия образования покрытия на бетоне и аспекты взаимодействия наносимого материала с подложкой при напылении; условия взаимного влияния напыляемых частиц на формирование покрытий; взаимодействие наносимого материала с подложкой при напылении; термические и гидродинамические условия соударения напыляемых частиц с подложкой; влияние перегрева напыляемых частиц на тепловые процессы между частицей и подложкой при напылении; влияние энергии активации связи на прочность сцепления напыляемых частиц с подложкой.

Разобраны принципы работы плазмотронов, используемых для плазменной металлизации строительных материалов и бетонов, описаны конструкции и параметры работы плазменных установок, использованных в данном исследовании. Исследования показали, что кроме придания частицам напыляемого материала тепловой и кинетической энергии в зоне плазмы происходят и достаточно сложные физико-химические процессы. Вследствие развитой поверхности напыляемых частиц они интенсивно взаимодействуют с плазмой и окружающей средой.

Найдено, что газоплазменное напыление коррозионностойких металлов, цинка и алюминия, защищает бетон от действия кислот, щелочей, уменьшает в 1,5 раза водопоглощение и сульфатную коррозию цементного камня. Физико-механические свойства бетонных образцов после нанесения металла не ухудшаются, в некоторых случаях прослеживается тенденция увеличения предела прочности на сжатие бетона после металлоплазменной обработки. В работе проводилось исследование изменения прочностных характеристик образцов цемента и мелкозернистого бетона с металлическими покрытиями на сжатие и изгиб до и после выдерживания их в 15%-ом растворе магнезиевой соли  $MgSO_4$  в течение месяца, что дает приблизительную характеристику морозостойкости (табл. 3).

Исследования показали, что покрытия из цинка и алюминия имеют высокую адгезию к бетону. При попытке оторвать пленку металла от основы разрывы происходили ниже уровня подслоя, при показании манометра  $7,5 \text{ кг/см}^2$ .

В табл. 4 показана зависимость изменений на поверхности напыленного и контрольного образца бетона от вида и концентрации химических реагентов. Как видно из таблицы, покрытия из алюминия и цинка, хотя и имеют на поверхности окисную пленку, по-разному реагируют при взаимодействии с кислотой и щелочью. Алюминиевое покрытие лучше сопротивляется кислоте, а цинковое - щелочи. В цехах с невысокой химической активностью целесообразно применять алюминий и цинк в зависимости от pH среды. Окись алюминия рекомендуется применять в более агрессивной среде.

Таблица 3

Влияние плазменно-дугового напыления на прочностные характеристики бетона до и после обработки в магниевои соли ( $MgSO_4$ )

Вид Образцов	Вид Покрытия	Сжатие, МПа		Изгиб, МПа	
		До	После	До	После
Цементное	Без покрытия	42,54	41,85	4,04	3,79
	Zn	41,15	41,00	4,07	4,05
	Al	41,14	40,23	4,01	4,00
Цемент+песок	Без покрытия	23,53	23,15	2,00	2,00
	Zn	19,31	20,16	2,23	2,25
	Al	20,71	20,68	2,40	2,33

Таблица 4

Зависимость изменений на поверхности бетона с нанесенным металлическим покрытием от вида и концентрации химических реагентов

Вид отделки материала	Взаимодействие поверхности с NaOH	Взаимодействие поверхности с HCl
1. Контрольный образец бетона	Устойчив к разбавленным растворам (до 15%)	Неустойчив начиная с 15%
2. После пескоструйной обработки	— // —	— // —
3. Покрытие Zn	— // —	Реагирует с 5% с образованием темной пленки
4. Покрытие Al	Образование окисной пленки в слабых растворах	Устойчив к разбавленным растворам до 35%
5. Покрытие $Al_2O_3$	Устойчив в сильных растворах	Устойчив к сильным растворам

Коррозионная стойкость бетона, адгезионная стойкость покрытия, морозостойкость бетонных конструкций и т.п. напрямую зависят от водопоглощения, т.е. от способности покрытия защищать конструкцию от проникновения влаги. Исследования показали, что металлические покрытия в результате глубокого проникновения металла в поры бетона и образования на поверхности образца равномерного металлического слоя снижают скорость проникновения влаги в материал. Причем лучшую защиту от влаги во всех случаях дает цинковое покрытие (рис. 3).

Проведен расчет экономической эффективности повышения долговечности железобетонных панелей после плазменного напыления покрытий из металлов. Найдено, что отделка бетонных- конструкций газоплазменным напылением практически не дороже традиционной отделки красочными составами. Расчет экономической эффективности повышения долговечности строительных конструкций из бетона методом газоплазменного напыления проводился в сравнении с лакокрасочными покрытиями на железобетонных ребристых плитах покрытий.



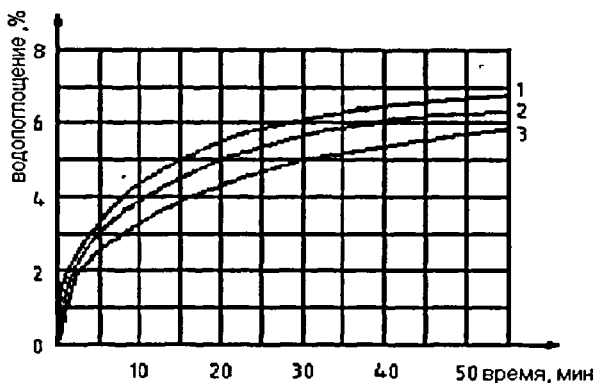


Рис. 3. Кинетика водопоглощения цементного камня в зависимости от вида напыленного металла:

- 1 - контрольный образец; 2 - образец с нанесенным алюминием;  
3 - образец с нанесенным цинком

В четвертой главе сделан анализ состояния отделки бетона глазурованием на настоящее время. Найдено, что известная технология глазурования дорогостоящая, снижает прочностные свойства бетона на 45%, используются глазури, разработанные для глазурования керамики.

В данной работе предложено подбирать составы глазурей для глазурования бетона с учетом химического сродства компонентов глазурей и компонентов бетона. Разработан ряд легкоплавких составов глазурей для бетонов, включающие дешевые, недефицитные, экологически безопасные сырьевые компоненты, отходы производства. Получено легкоплавкое стекловидное покрытие на бетоне из стеклобоя. Состав глазури защищен патентом РФ.

Разработана оригинальная технология глазурования бетона, исключающая стадию предварительного подогрева бетона. В рамках технологии разработаны установки для щадящего обжига: экранная печь и газовая горелка. На конструкции устройств получены свидетельства РФ на полезную модель. Так как глазурование проводилось на бетоне то такие свойства как размеры и правильность формы, водопоглощение, прочность, морозостойкость, указанные в стандарте, определялись по специальным методикам, разработанным для бетона. Результаты испытаний приведены в таблицах 5 и 6.

• Химическая стойкость полученных глазурей по отношению к действию щелочной среды удовлетворительная. Термическая стойкость покрытий отвечает требованиям стандарта. Морозостойкость глазурей составляет 35-50 циклов. Этот показатель указывает на возможность применения глазурованных бетонных изделий как внутри, так и снаружи зданий. Адгезия глазурных покрытий к бетону объясняется значительным содержанием в их составах  $\text{SiO}_2$  небольшим значением ТКЛР, а также

идентичностью окислов, входящих в состав глазурей, и цементно-песчаной составляющей бетонного камня. В таблицах 5-7 под номерами приведены разработанные составы глазурей, включающие: компоненты  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и др.

Таблица 5

Физико-химические свойства глазурных покрытий

№ состава глазурей	ТКЛР, $10^{-7}\text{C}^{-1}$	Модуль упругости, МПа	Плотность, $\text{кг/м}^3$	Морозостойкость, циклы	
				ускоренная методика	ГОСТ 10060-95
1	87,79	73,42	2580	7	35
2	53,61	101,19	2590	7	35
3	76,22	73,55	2850	10	50

Таблица 6

Механические свойства глазурных покрытий

№ состава глазурей	Прочность сцепления с бетоном, МПа	Твердость по шкале Мооса
1	0,9	6,5
2	0,7	6,5
3	1,1	6,5

В работе исследовались свойства стекловидных покрытий на основе стеклобоя как заменителя глазури, полученных по различным вариантам нанесения (табл.7, 8). Химическая стойкость покрытия на основе стеклобоя удовлетворительная, термическая стойкость невысока. Морозостойкость покрытия из оплавленного стеклобоя ниже, чем у глазурей, что объясняется различными химическими составами покрытий.

Таблица 7

Физико-химические свойства покрытия на основе стеклобоя

№ состава глазурей	ТКЛР, $10^{-7}\text{C}^{-1}$	Модуль упругости, МПа	Плотность, $\text{кг/м}^3$	Морозостойкость, циклы	
				ускоренная методика	ГОСТ 10060-95
1	81,52	69,88	2520	3	15
2	81,52	69,88	2520	3	15

Кроме прочностных характеристик наиболее важна характеристика изменения кинетики водопоглощения бетона при действии высокой температуры обжига глазури. Для определения влияния стекловидной пленки на водопоглощение бетона с течением времени были использованы образцы бетона класса В 30. Результаты исследований представлены на рис. 4. В работе исследовались изменения физико-механических свойств бетона при его глазуровании. Результаты исследований приведены в табл. 9.

Таблица 8

## Механические свойства покрытия на основе стеклосбоя

№ состава глазури	Прочность сцепления с бетоном, МПа	Твердость по шкале Мооса
1	0,6	6,5
2	0,7	6,5

Таблица 9

## Изменение предела прочности на сжатие бетонного камня при глазуровании в зависимости от технологии

Предел прочности на сжатие до термообработки, МПа	Предел прочности на сжатие после термообработки, МПа	Потеря прочности, %	Примечание
40,0	21,95	45,12	По технологии «Стройкерамика»
40,0	34,12	14,70	Разработанная технология

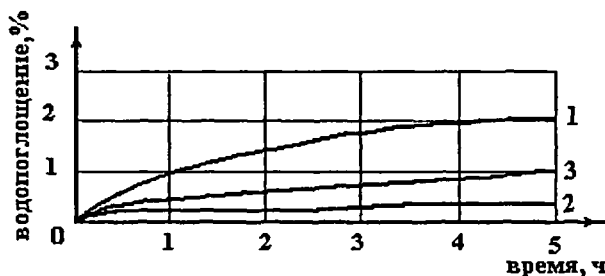


Рис. 4. Кинетика водопоглощения бетона в зависимости от времени нахождения в воде и вида отделки: 1 - без стекловидного покрытия;

2-с глазурным покрытием; 3-с покрытием из оплавленного стеклосбоя

В работе проводился расчет ожидаемой экономической эффективности применения новых стекловидных покрытий для отделки бетона. В разработанной технологии отсутствует стадия предварительного прогрева бетонных изделий, что значительно удешевляет себестоимость отделки. Снижение температуры плавления глазури на 50-100°С не только улучшает свойства бетона, но и снижает затраты на нагрев и поддержание температуры в обжиговых аппаратах, что также снижает себестоимость глазурования. Экономическая эффективность от использования предложенных составов глазури для глазурования бетонных изделий

рассчитывалась по сравнению с базовой, которая составляет около 300 тыс. руб. (в ценах 1999 г.).

**В пятой главе** проведен анализ процессов теплопереноса и их влияния на структуру и свойства бетона при его высокотемпературной отделке. Проведен анализ теплофизики плазменного напыления металлов на строительные изделия из бетона. Рассмотрена схема ввода тепла напыляемыми частицами и плазменной струей в изделие и распределение удельного теплового потока по пятну нагрева. Рассмотрен баланс мощности плазменных металлизаторов. Показано, что доли участия в нагреве изделия плазмой и напыляемым материалом близки и составляют несколько процентов (до 10%) от мощности дуги. Основной статьей баланса является нагрев плазмообразующего газа, в результате которого газ получает тепловую и кинетическую энергию.

В работе изучен тепломассоперенос при высокотемпературной отделке бетона стекловидными покрытиями с помощью глазурирования и плазменного оплавления. Получена математическая модель прогрева полуограниченного тела в муфельной печи. Результаты расчетов полей температур для случаев предварительного прогрева бетона перед глазурированием и бетона с нанесенным стекловидным покрытием показали, что увеличение времени прогрева ведет к увеличению температуры внутри бетонного камня. Нежелательное действие прогрева на бетон снижается при уменьшении времени нагрева. Присутствие на поверхности стекловидной пленки из глазури или из стеклобоя значительно снижает прогрев изделия по толщине бетона.

Выполнено математическое моделирование теплообмена в процессе нанесения стекловидного покрытия на бетон в системе стекло - бетон. В этом случае температурой на границе раздела пластин можно управлять двумя путями: тепловым потоком к свободной поверхности пластины стекла и теплоотводом со свободной поверхности бетона; для выбора управляющего воздействия необходимо определить чувствительность этих двух каналов управления, для чего необходимо знать теплофизические параметры рассматриваемой системы.

Проведен анализ экспериментальных методов определения теплопереноса в глубь образца, разработана методика и исследовано влияние высокотемпературной обработки на распределение температуры в бетонном камне тяжелого, мелкозернистого бетона, керамзитобетона и изменение его линейных размеров при образовании стекловидного слоя на поверхности бетона с помощью плазменной газовой горелки и экранной печи. Так, показано (рис-5,6), что наибольший тепловой нагрев при обработке газовой горелкой и экранной печью происходит в поверхностных слоях бетона, на глубине 3-4 см температура прогрева меньше температуры кипения воды. Слой глазури и стекла снижает температуру прогрева бетона на -25%. Остывание бетона после

температурной обработки происходит не последовательно, а с выраженным эффектом «температурной волны».

При нагревании наблюдается некоторое расширение бетона. Найдена зависимость температурного расширения от класса бетона. Наибольшее расширение - 1- 0,5% происходит на глубине 4-5 мм.

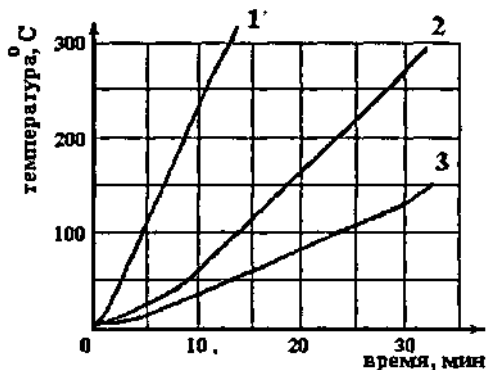


Рис. 5. Распределение температур в тяжелом бетоне по времени при нагреве горелкой:

1 - на глубине 2 см; 2 - на глубине 4,6 см; 3 - на глубине 7,2 см

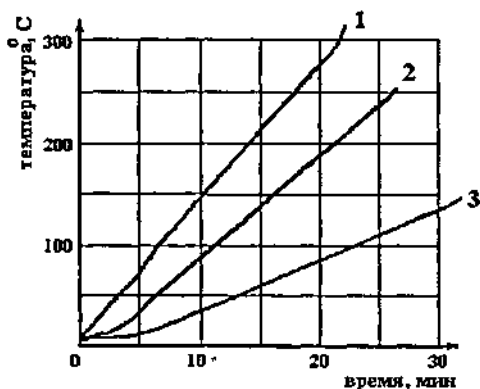


Рис. 6. Распределение температур в тяжелом бетоне с нанесенным стеклом по времени при нагреве горелкой:

1 - на глубине 1,8 см; 2 - на глубине 2,8 см; 3 - на глубине 5,2 см

Для комплексного анализа тепловых процессов, происходящих при высокотемпературной отделке бетона стекловидными покрытиями, разработана компьютерная программа «Глазурь». Настоящая программа моделирует ситуацию одностороннего прогрева образца в печи

посредством теплового излучения. Возможен другой вариант нагрева газовой горелкой, индукционный разряд.

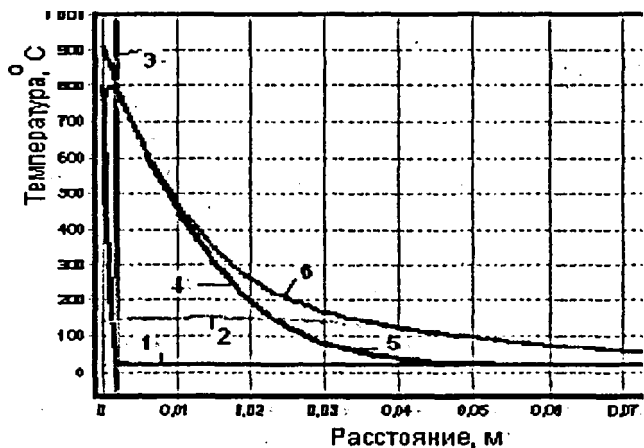


Рис. 7. График распределения температур при высокотемпературной обработке бетона с нанесенной глазурью экранной печью:  
 1 -нагрев до температуры плавления; 2 - остывание после кристаллизации;  
 3 - граница между стеклом и бетоном; 4 - завершение фазы плавления;  
 5 — завершение кристаллизации; 6 - максимальный прогрев бетона

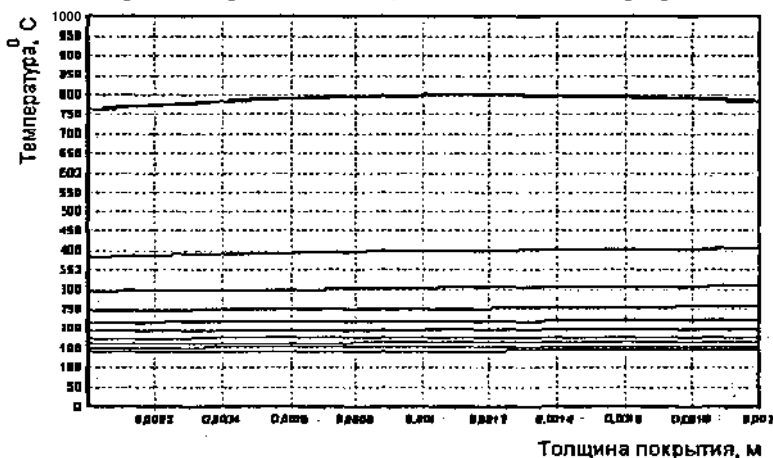


Рис. 8. График движения фронта плавления глазури при обработке бетона экранной печью

Программа "Глазурь" позволяет рассчитать температурные поля в образце и показать их в виде графика. С помощью программы «Глазурь» проведен анализ распространения фронта температур во времени и по толщине бетона при плавлении, кристаллизации покрытия, остывании

бетона после кристаллизации и т.п. во время его обработки экранной печью, газовой горелкой, индукционным разрядом. Пример для экранной печи приведен на рисунках 7-10.

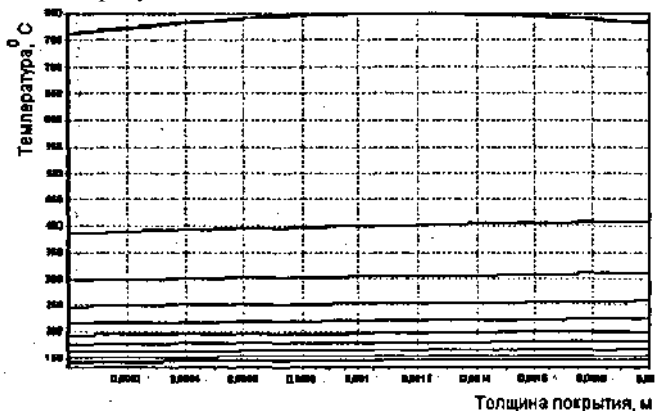


Рис. 9. График движения фронта кристаллизации глазури при обработке бетона экранной печью

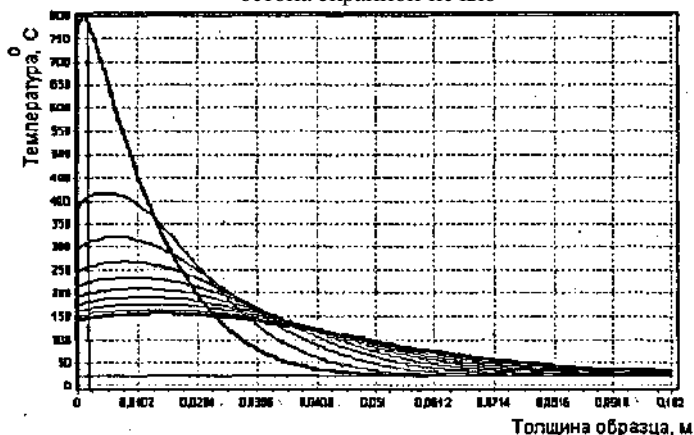


Рис. 10. График остывания образца после кристаллизации глазури при обработке бетона экранной печью

При анализе полученных графиков видно, что все стадии процесса - плавление, кристаллизация глазури, остывание образца - происходят нелинейно по толщине покрытия и образца. Остывание образца идет с некоторым увеличением температуры в глубине образца так называемой «тепловой волной». Показано, что распространение температуры по глубине образца зависит от времени тепловой обработки, толщины покрытия, тугоплавкости оплавливаемого покрытия. Высокотемпературная отделка во всех случаях прогревает до температуры дегидратации воды

только поверхностные слои бетона и на глубине 2-4 см становится меньше температуры удаления физически связанной воды.

**В шестой главе** рассмотрены физико-химические особенности поведения тяжелого бетона при высокотемпературном нагреве. Показано, что в результате действия высоких температур из-за сложной структуры бетонного камня могут возникать как внутренние напряжения, так и химические разрушения в бетоне. Автором проведено исследование влияния высокотемпературной отделки на структуру и свойства бетонов методами дифференциально-термического и рентгеноструктурного анализа.

Дифференциально-термический анализ (ДТА) бетона после плазменной металлизации, оплавления, глазурирования проводился на дериватографе «Derivatograph Q-1500 D». Фиксировались температурная кривая, кривая потери веса, дифференцированные кривые потери массы и потери энергии. С помощью ДТА определялось изменение кристаллической структуры цементного камня - содержание кристаллической воды, перекристаллизация окиси кремния, выгорание органических остатков, разложение углекислого кальция, сульфатов.

Дифференциально-термический анализ бетона после плазменной металлизации определялся на образцах, изготовленных из гидратированного портландцемента М400, подвергнутых напылению металлов цинка, алюминия плазмодуговым способом. Пробы для ДТА отбирались с наружной поверхности, контактной зоны и внутреннего слоя образца.

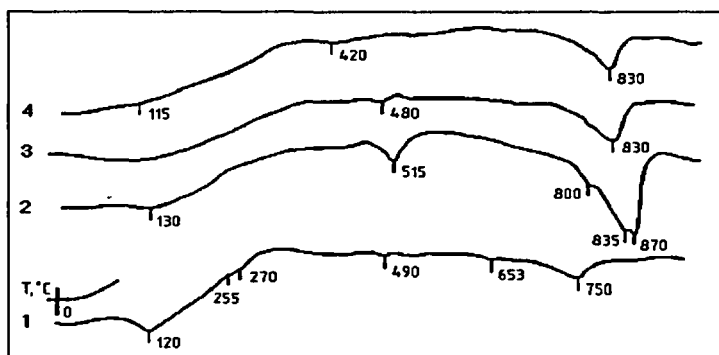


Рис. 11. Дериватограммы (ДТА) гидратированного портландцемента: 1 - контрольного образца; 2 - внутреннего; 3 - подосновного; 4 - верхнего слоев цемента с нанесенным алюминием

Анализ дериватограмм показал (рис. 11), что в поверхностном слое образца (около 1 мм) с напыленным покрытием окиси алюминия содержится 5,24% воды, в подосновном слое содержится 5,45% воды, во внутреннем слое - 14,4%, а в контрольном - 10,71%. Если сравнить содержание воды и  $\text{CaCO}_3$  в контрольных образцах и в образцах с нанесенным алюминием, то видно, что ее содержится больше в поверхностном слое контрольного



образца, чем в металлизированном. Это объясняется как некоторой дегидратацией цементного камня в результате действия высокой температуры металла, так и тем, что в пробе металлизированных цементов было очень большое содержание металлов, которое и повлияло на количественную характеристику дериватографа.

Проведен дифференциально-термический анализ бетона после плазменного оплавления бетона и его коррозии в 15%-ом растворе  $MgSO_4$ . У оплавленного покрытия коррозия начинается в поверхностном слое, но не идет в глубь образца из-за защитных свойств оплавленного покрытия. Если рассматривать общие потери веса с точки зрения влияния оплавления на структуру покрытия, то можно отметить практически одинаковые изменения общего веса и влаги при прокаливании у всех образцов. Небольшое отличие потери веса среднего слоя показывает на отсутствие в нем коррозионных процессов.

Проведен дифференциально-термический анализ бетона после глазурования. Анализ изменения массы глазурованного бетона показал, что при глазуровании бетона в результате нагрева происходит испарение капиллярной влаги с поверхности бетона. На дериватограммах наиболее четко видны изменения в кристаллической фазе кварца -  $500-600^{\circ}C$  - и разложение  $Ca(OH)_2$  -  $400-450^{\circ}C$ . Однако эти изменения в контрольном и глазурованном бетоне незначительны. Увеличение содержания  $Ca(OH)_2$  в слоях от 1 до 5 см от поверхности глазурованного бетона показывает на эффект «самозапаривания» после высокотемпературной обработки.

Рентгеновский анализ производился на дифрактометрах, таких как ДРОН-3М и аппарате фирмы «Philips». Рентгеноструктурному анализу бетона после плазменной металлизации подвергались образцы бетона с напыленными металлами как до, так и после их обработки в 15%-ом растворе  $MgSO_4$ . Исследовались поверхностный, подосновный и внутренний слой бетона (рис. 12).

Рентгеноструктурный анализ показал, что металл в покрытии находится в аморфном состоянии, поэтому пики проявляются слабо. Чтобы посмотреть возможность защиты бетона слоем напыленного металла от действия агрессивных сред, образцы подвергали ускоренной коррозии в растворе  $MgSC_4$  в течение месяца. На основе рентгеноструктурного анализа можно сделать вывод, что плазменное напыление металлов не разрушает структуру цементного камня и может служить для защиты бетона от коррозии.

Рентгенограммы поргланциента с песком, покрытых алюминием с помощью плазменного напыления как и в случае с напыляемым цинком в верхнем слое показывают некоторое снижение интенсивности пиков кристаллогидратов, оксида кремния,  $CaCO_3$  в верхнем слое. Это может происходить из-за присутствия в пробе оксида алюминия и в результате небольших изменений в структуре мелкозернистого бетона. В более глубоких слоях мелкозернистого бетона различий в структуре практически не обнаружено.

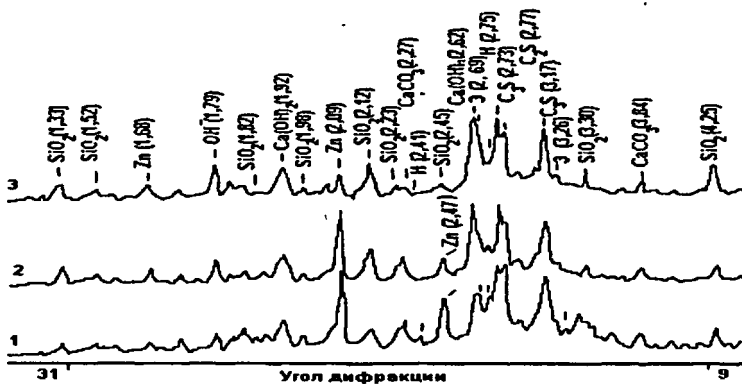


Рис. 12. Рентгенограммы гидратированного портландцемента с цинковым покрытием:

- 1 - подосновный слой после обработки в 15%-ом растворе  $MgSO_4$ ;  
 2 - подосновный слой; 3 - внутренний слой

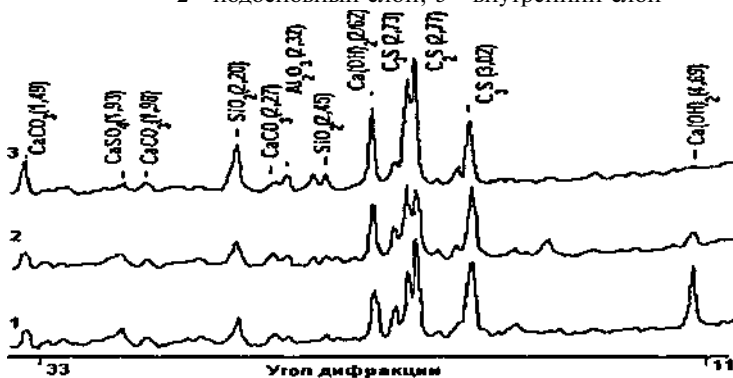


Рис. 14. Рентгенограммы гидратированного белого цемента, оплавленного плазмой индукционного разряда:

- 1 - нижний слой, 2 - средний слой, 3 - верхний слой

Рентгеноструктурный анализ бетона после оплавления индукционным разрядом показан на рис. 13. Рентгеноструктурные исследования показали, что в результате плазменной активации происходит изменение структуры белого портландцемента: выделение связанной воды и уменьшение интенсивности пиков алита, что показывает на образование аморфных структур, содержащих определенное количество исходных клинкерных минералов. Если сравнивать интенсивность и глубину изменения структуры у жаростойких слоев из белого цемента, белого цемента с песком и белого цемента со стеклом, то их рентгенограммы показывают, что более стойким к термическим обработкам является слой белого цемента со стеклом, а также белого цемента с песком.

Изучено влияние обработки индукционного разряда на свойства и структуру тяжелого бетона. В верхнем слое оплавленного бетона идет снижение интенсивности пиков оксида кремния, что показывает перекристаллизацию его из  $\beta$ - в  $\alpha$ -модификацию. Снижена интенсивность пиков карбоната кальция, что указывает на его разложение. Уменьшена интенсивность пиков кристаллогидратов, особенно алита, что показывает на испарение кристаллической воды. Однако в подстилающем слое изменение интенсивности данных пиков значительно меньше, а в более глубоком слое интенсивность пика  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (1,92) даже больше, чем в контрольном, что указывает на протекание при плазменной обработке эффекта вторичного samozапаривания и образовании новых гидратных соединений.

Рентгеноструктурные исследования бетона, взятого из цеха №3 с химического завода г. Иваново, показали, что в поверхностном слое корродированного бетона присутствует большое количество кальцита  $\text{CaCO}_3$ . После плазменной активации в поверхностном слое присутствуют только следы кальцита, а на внутренних слоях содержание кальцита остается в пределах нормы. Также уменьшается после плазменной обработки и интенсивность пика  $\text{CaSO}_4$ , которая характеризует протекание газовой сульфатной коррозии в бетоне. Это показывает, что плазменная обработка корродированной поверхности восстанавливает химический состав бетона, разрушая продукты коррозии, происходит как бы закалка поверхности, и временно прекращаются процессы коррозии.

Анализ рентгенограмм подглазурного слоя в сравнении с контрольным показал, что на рентгенограммах образцов бетонного камня, подвергнутого прогреву, интенсивность пиков кварца несколько отличается в сравнении с рентгенограммой образцов бетона, не подвергнутого прогреву. Это связано с полиморфными превращениями. За исключением этих пиков рентгенограммы образцов бетона неподвергнувшихся и подвергнувшихся прогреву, практически не отличаются.

### **Основные выводы.**

1. Разработано общее научное направление высокотемпературной обработки бетонов, которое базируется на законах взаимодействия плазмы, ИК-излучения с поверхностью бетона. Рассмотрены способы традиционной и высокотемпературной отделки бетонов. Проанализированы характеристики декоративности, виды и свойства отделочных материалов разного назначения, влияния агрессивных сред на здания и сооружения. Рассмотрены виды коррозии бетона и традиционные способы антикоррозионной защиты. Классифицированы способы высокотемпературной отделки бетона: по виду высокотемпературной обработки; технологии нанесения отделочного слоя; типу высокотемпературной установки; степени нагрева у поверхности бетона в результате высокотемпературной обработки.

2. Проведен анализ процессов теплопереноса и их влияния на структуру и свойства бетона при его высокотемпературной отделке. При таком

термическом воздействии в бетоне в основном возникают напряжения нулевого рода, а при очень высоких температурах и напряжения второго рода. Действие высокотемпературной отделки определено как термоудар. Проведен анализ теплофизики плазменного напыления металлов на строительные изделия из бетона. Рассмотрена схема ввода тепла напыляемыми частицами и плазменной струей в изделие и распределение удельного теплового потока по пятну нагрева. Рассмотрен баланс мощности плазменных металлаторов. Дана модель теплового процесса, которая описывает реальный процесс плазменного напыления. Расчеты показывают, что глубина зоны термического влияния под частицей в конце стадии затвердевания не превышает нескольких десятков микрон.

3. Изучен тепломассоперенос при высокотемпературной отделке бетона стекловидными покрытиями с помощью глазурирования и плазменного оплавления. Получена математическая модель прогрева полуграниченного тела в муфельной печи. Показано, что нежелательное действие прогрева на бетон снижается при уменьшении времени нагрева. Присутствие на поверхности стекловидной пленки из глазури или из стеклобоя значительно снижает прогрев изделия по толщине бетона.

4. Разработана математическая модель теплообмена в процессе нанесения стекловидного покрытия на бетон в системе стекло - бетон. Анализ модели показал, что поставленная задача разрешима только в частном случае, когда температура плавления стекла ниже температуры, при которой начинается разрушение бетона.

5. Разработана экспериментальная методика и исследовано влияние высокотемпературной обработки на распределение температуры в бетонном камне тяжелого, мелкозернистого бетона, керамзитобетона и изменение его линейных размеров. Экспериментально доказано, что наибольший тепловой нагрев при обработке газовой горелкой и экранной печью происходит в поверхностных слоях бетона, на глубине 3-4 см температура прогрева меньше температуры кипения воды. Слой глазури и стекла снижает температуру прогрева бетона на ~25%. Остывание бетона после температурной обработки происходит не последовательно, а с выраженным эффектом «температурной волны». При нагревании наблюдается некоторое расширение бетона, найдена зависимость температурного расширения от марки бетона.

6. Разработана компьютерная программа «Глазурь». Программа позволяет рассчитать температурные поля в образце и показать их в виде графика. С помощью программы «Глазурь» проведен анализ распространения фронта температур во времени и по толщине бетона при плавлении, кристаллизации покрытия, остывании бетона после кристаллизации. Показано, что распространение температуры по глубине образца зависит от времени тепловой обработки, толщины покрытия, тупоупругости оплаиваемого покрытия.

7. Проведен дериватографический анализ изменения структуры и свойств бетона в результате различной высокотемпературной обработки:

металлизации, оплавления плазмой индукционного разряда, глазурирования. Исследования показали, что при высокотемпературной обработке изменяются поверхностные слои бетонного камня на глубине не более 2-3 см., причем наибольшие изменения происходят с физически связанной водой, органическими примесями, кристаллической структурой кварца. Степень и глубина структурных изменений зависят от температуры и времени высокотемпературной обработки, но в любом случае изменения происходят.

8. Проведен рентгеноструктурный анализ бетона и жаростойких слоев, подвергнутых различными видами высокотемпературной отделки. Анализ показал, что при металлизации, глазурировании и плазменном оплавлении происходит некоторое снижение интенсивности пиков оксида кварца, карбоната кальция, кристаллогидратов в поверхностных слоях бетона. В более глубоких слоях при быстром подъеме температур от 100° до 600°С происходят процессы, сопровождающиеся перекристаллизацией и «самозапариванием» клинкерных минералов, при которых возможны реакции в твердом состоянии с образованием новых соединений, что вызывает упрочнение цементного камня и увеличивает прочность бетона. В жаростойких слоях на основе белого цемента изменения структуры происходят в меньшей степени, чем в тяжелом бетоне. Наиболее жаростойким является состав на основе белого цемента и стекла. При плазменной обработке корродированного бетона, взятого из цехов химического завода, восстанавливается химический состав бетона, разрушая продукты коррозии, происходит закалка поверхности, временно прекращая коррозионные процессы. Анализ бетона с металлическим покрытием, подвергнутого испытанию на быструю коррозию в 15%-ом растворе  $MgSO_4$ , показал высокую степень защиты бетона данным видом отделки.

9. Показано, что в результате обработки образцов из тяжелого бетона и цементно-песчанного раствора плазмой индукционного и дугового разряда происходит появление трещин и некоторое снижение их прочности. При обработке плазмой бетона в химических цехах, подвергнутого коррозии, происходит зачистка и закалка поверхности конструкции, уменьшение размера трещин и новообразований, что приводит к продлению срока службы конструкции. Для предотвращения растрескивания образцов от теплового удара разработаны специальные подстилающие слои из материалов с низкой теплопроводностью и высокой декоративностью – белого цемента, кварцевого песка, стекла. Показано, что плазменная обработка практически не влияет на их прочность на изгиб, а у образцов, подвергнутых коррозии, наблюдается снижение прочности на сжатие у штукатурных слоев, обработанных в плазме, по сравнению с необработанными слоями – у слоя песок : белый цемент на 4%, а у слоя песок : стекло : белый цемент на 19%. Это позволяет рекомендовать оплавленные штукатурные слои для защиты конструкций от атмосферных воздействий.

10. Изучена возможность применения плазменной обработки для улучшения технологических свойств теплоизоляционных материалов на основе зол. Определены оптимальные параметры оплавления изделий на плазменной высокочастотной индукционной установке. Исследовано влияние фракционного состава золы, времени высокотемпературного воздействия плазмы на образование стекловидного покрытия и изменение функциональных и технологических свойств зольного материала.

11. Проведен сравнительный расчет полных затрат на плазменную отделку в сравнении с отделкой красочными составами. • При расчетах учитывались капитальные затраты, затраты на ремонт в течение проектируемого срока эксплуатации здания. Учтен коэффициент инфляции на первый квартал 2002 года. Показано, что плазменная отделка зданий требует более редких капитальных ремонтов и при длительном сроке эксплуатации не дороже отделки красочными составами.

12. Разработаны основы процессов отделки бетона с помощью газоплазменного напыления. Рассмотрены принципы генерации плазмы в электродуговых плазмотронах; методы электродуговой металлизации и особенности плазменного нагрева напыляемого вещества при газоплазменной металлизации бетона; процессы, происходящие при образовании плазменной струи; процессы, происходящие при попадании металлической проволоки или порошка в зону плазмы; теплофизика напыления; физико-химические процессы, происходящие при попадании напыляемых частиц в зону плазмы.

13. Исследованы условия образования покрытия на бетоне и аспекты взаимодействия наносимого материала с подложкой при напылении; условия взаимного влияния напыляемых частиц на формирование покрытий; взаимодействие наносимого материала с подложкой при напылении; термические и гидродинамические условия соударения напыляемых частиц с подложкой; влияние перегрева напыляемых частиц на тепловые процессы между частицей и подложкой при напылении; влияние энергии активации связи на прочность сцепления напыляемых частиц с подложкой. Разобраны принципы работы плазмотронов, используемых для плазменной металлизации строительных материалов и бетонов.

14. Найдены оптимальные способы отделки и защиты железобетонных конструкций и изделий от коррозии методом газоплазменного напыления. Проведен анализ физико-механических и химических свойств покрытий, нанесенных на бетонную подложку с помощью плазмы. Найдено, что газоплазменное напыление коррозионностойких металлов, цинка и алюминия, защищает бетон от действия кислот, щелочей, уменьшает в 1,5 раза водопоглощение и сульфатную коррозию цементного камня. Физико-механические свойства бетонных образцов после нанесения металла не ухудшаются. Показано, что отделка бетонных конструкций газоплазменным напылением практически не дороже традиционной отделки красочными составами.

15. Исследованы условия образования глазурных покрытий на поверхности бетона. Предложено подбирать составы глазурей для глазурования бетона с учетом химического сродства компонентов глазурей и компонентов бетона. Разработан ряд легкоплавких составов глазурей для бетонов, включающие дешевые, недефицитные экологически безопасные сырьевые компоненты, отходы производства. Получено легкоплавкое стекловидное покрытие на бетоне из стеклобоя. Состав глазури защищен патентом РФ. Разработана оригинальная технология глазурования бетона, исключающая стадию предварительного подогрева бетона. В рамках технологии разработаны установки для шадящего обжига: экранная печь и газовая горелка. На конструкции устройств получены свидетельства РФ на полезную модель. Рассчитана экономическая эффективность от использования предложенных составов глазурей для глазурования бетонных изделий по сравнению с базовой.

### **Список основных опубликованных работ по диссертации**

1. Федосов С.В., Акулова М.В. Плазменная металлизация бетонов. М.: АСВ, 2003.122 с.

2. Акулова М.В. Основы технологии отделочных и гидроизоляционных материалов: Учебное пособие/ Иван. хим.-технол. ин-т; Иван. инж.-строит. ин-т. Иваново, 1991. - 75 с.

3. Свидетельство на полезную модель 10401 РФ, С 21 D 9/00. Электропечь для глазурования бетона/ Щепочкина Ю.А., Акулова М.В.

4. Свидетельство на полезную модель. 11867 РФ, F 23 D 23/00, С 04 В 37/04. Установка для оплавления стекловидных покрытий/ Щепочкина Ю.А., Акулова М.В., Федосов С.В.

5. Патент РФ № 2152910, С 03 С 8/04. Стекловидное покрытие/ Ю.А.Щепочкина, М.В.Акулова, С.В.Федосов.

6. Федосов С.В., Акулова М.В., Игнатьев С.А., Щепочкина Ю.А. Программа расчета температурных полей в образце бетона, покрытом смесью для глазурования (Глазурь): Программа. № ГР 50200200168,2002. № ОФАП-1910. М., ВНИИЦ, -2002.

7. Акулова М.В., Макаров В.Н., Боброва А.А., Зайцева Т.М. Изготовление водостойкого покрытия теплоизоляционного зольного материала путем плазменной обработки// Изв. вузов. Химия и химическая технология. 1987. Т. XXX. 11. С. 97-99.

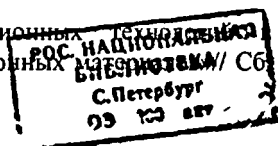
8. Акулова М.В., Федосов С.В. Защита и декорирование строительных конструкций высокотемпературной плазмой// Сб. науч. ст. по матер. Всерос. науч.-техн. конф. Иваново: ИИСИ, 1996. С 25-28.

9. Akulova M. V., Fedosov S. V. The Protection and Decorating of structural Constructions by High - Temperature Plasma// Междун. науч. техн. конф.: Модернизация строительства и обучение. Пекин, 1996. С.145.

10. Akulova M. V., Fedosov S. V. Atmospheric and corrosion resistance increase of concrete by plasma spaying of zink //XLIII Konferencja naukowo-badawcze budownictwa. Poznan - Krynica. 1997. T. VI. S. 5-7.
11. Акулова М.В., Щепочкина Ю.А. Подбор составов глазури для отделки бетонов// Матер. Всерос. науч.-техн. конф. Томск, 1998. С. 61.
12. Акулова М.В., Федосов С.В., Савельев А.С., Ерохин Д.В. Плазменная обработка строительных материалов// Матер. XXX Всерос. науч.-техн. конф. Пенза, 1999. С. 141.
13. Федосов С.В., Акулова М.В. Проблемы моделирования тепловых и плазмохимических процессов при высокотемпературной отделке бетона// Сб. тр. XI Междунар. науч.-техн. конф. Школа молодых ученых. 1998. Т.3. С.18.
14. Акулова М.В., Щепочкина Ю.А. Водостойкое силикатное покрытие// Строительные материалы. 1998. № 11. С. 39.
15. Акулова М.В., Федосов С.В., Щепочкина Ю.А. Теплоизоляционный слой для глазуруемого бетона// Юбилейная междунар. науч.-техн. конф. «Строительство-99». Ростов-на-Дону, 1999. С. 53.
16. Акулова М.В., Щепочкина Ю.А. Новые легкоплавкие глазури для бетона// Стекло и керамика. 1998. № 4. С. 33.
17. Акулова М.В., Щепочкина Ю.А. Отделка бетона стеклом с обработкой плазмой// Матер, междунар. семинара. Томск, 1999. С. 81.
18. Федосов С.В., Акулова М.В., Анисимова Н.К., Щепочкина Ю.А. Моделирование тепловых процессов в бетоне при термообработке// Матер, шестых академических чтений РААСН.ИГАСА. Иваново, 2000. С.540.
19. Федосов С.В., Акулова М.В. Защита бетона от коррозии способом газоплазменного напыления металлов// IX Польско-рос. семинар «Теоретические основы строительства». М., 2000. С. 185.
20. Федосов С.В., Акулова М.В., Алоян С.М., Щепочкина Ю.А. Оценка времени прогрева изделий при высокотемпературной обработке// Доклады IX Польско-рос. семинара «Теоретические основы строительства». М., 2000. С.185.
21. Акулова М.В., Щепочкина Ю.А., Федосов С.В. Универсальный состав легкоплавкой глазури для отделки тяжёлого бетона// Изв. вузов. Строительство. 2000. № 7-8. С. 58-59.
22. Акулова М.В., Федосов С.В. Влияние плазменной отделки на коррозионные и физико-механические свойства бетона и железобетона// Матер. Междунар. науч. конф. «Информационная среда вуза». Иваново: ИГАСА, 2000. Вып. 7. С. 76.
23. Федосов С.В., Акулова М.В., Анисимова Н.К. Структура покрытия при плазменной металллизации бетона// Всерос. XXXI науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы современного строительства». Ч.1. Пенза, 2001. С. 48.
24. Федосов С.В., Акулова М.В., Щепочкина Ю.А. Использование отходов для стекловидного покрытия кирпича// Стекло и керамика. 2000. № 11. С. 21.
25. Акулова М.В. Федосов С.В., Щепочкина Ю.А. Классификация способов высокотемпературной отделки бетона и железобетона// Докл.



- X Российско-польск. семинара. Москва.-Иваново- Варшава. 2001. С. 361.
26. Федосов С.В., Акулова М.В., Щепочкина Ю.А. Сравнительный анализ влияния плазмы дугового разряда и газового факела на свойства бетона, декорированного стеклом// Матер. II Междунар. науч.-техн. семинара. Томск, 2001. С.96-97.
27. Головушкин Б.А., Федосов С.В., Акулова М.В. Математическое моделирование теплообмена в процессе глазурирования бетона// Сб. тр. V Междун. науч. конф. Иваново, 2001. С. 173-176.
28. Федосов С.В., Акулова М.В., Щепочкина Ю.А. Анисимова Н.К. Расчет на ЭВМ температурных полей в бетоне при глазурировании// Сб. статей VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Информационная среда Вуза». ИГАСА, 2001. Вып.8. С 153.
29. Федосов С.В., Акулова М.В., Щепочкина Ю.А., Алюян СМ. О технологии глазурирования тяжелого бетона// Изв. вузона Строительство. 2001. № 8.С67-71.
30. Федосов С.В., Акулова М.В. Особенности плазменного нагрева и напыления, часть 1// Строительные материалы, оборудование, технологии XXXI. 2002. № 4. С 40-41.
31. Федосов С.В., Акулова М.В. Особенности плазменного нагрева и напыления, часть 2// Строительные материалы, оборудование, технологии XXXI. 2002. № 5. С 34-35.
32. Федосов С.В., Акулова М.В., Щепочкина Ю.А. Математическое моделирование процессов теплопереноса при глазурировании *бетона*/I Сб. тр. XV Междунар. конф. «Математические методы в технике и технологиях». Тамбов, 2002. Т. 3. С. 118-119.
33. Акулова М.В., Федосов С.В., Щепочкина Ю.А. Стекловидные покрытия для бетона// Строительные материалы. 2000. № 8. С 28.
34. Федосов С.В., Акулова М.В., Анисимова Н.К. Оценка плазменных способов защиты железобетонных конструкций от коррозии// XI Польско-рос. семинар: Доклады. М.: АСВ, 2002. С 315-318.
35. Федосов С.В., Акулова М.В., Анисимова Н.К. Тепломассообмен при плазменной отделке бетонных изделий// Сб. матер. 3-го Междунар. симпозиума по теорет. и приклад, плазмохимии. Иваново, 2002. Т. 1. С. 207-208.
36. Федосов С.В., Акулова М.В., Щепочкина Ю.А. Получение стекловидных покрытий на бетоне при обработке его поверхности плазмой// Сб. матер. 3-го Междунар. симпозиума по теорет. и приклад, плазмохимии. Иваново, 2002. Т. 1.С.241-242.
37. Акулова М.В. Дериватографический анализ бетона после его плазменной металлизации// Сб. матер. 3-го Междунар. симпозиума по теорет. и приклад, плазмохимии. Иваново, 2002. Т. 1. С. 307-308.
38. Акулова М.В. Высокотемпературные способы обработки бетонов как средства их декоративной отделки// Сб. тр. РАЕН, РААСН, ИГАСА. Иваново, 2002. С 155-159.
39. Акулова М.В. Использование информационных технологий в дисциплине «Технология отделочных и изоляционных работ»// Сб. тр. РАЕН, РААСН, ИГАСА. Иваново, 2002. С 155-159.



ст. IX Междунар. науч.-техн. конф. «Информационная среда вуза». 2002. Вып. 9. С. 30-31.

40. Щепочкина Ю.А., Акулова М.В. Применение цемента и материалов на его основе при создании художественных изделий с использованием высокотемпературной отделки//Цемент и его применение. 2002. №5. С. 39-40.

41. Акулова М.В. Экспериментальные результаты распределения динамики полей температур при высокотемпературной отделке бетона плазмой ацетиленовой горелки// Матер. Всерос. науч.-техн. конф. «I Соломатовские чтения». Саранск, 2002. С. 21-25.

42. Федосов С.В., Акулова М.В., Анисимова Н.К. Исследование влияния плазменной отделки на тепловые и коррозионные свойства бетона// Матер. Всерос. науч.-техн. конф. «Проблемы строительного материаловедения. I Соломатовские чтения». Саранск, 2002. С. 340-344.

43. Федосов С.В., Акулова М.В., Щепочкина Ю.А., Анисимова Н.К., Елин В.К. Утилизация отходов промышленности с помощью плазмы// Фундаментальные проблемы комплексного использования природного и техногенного сырья Баренцева региона в технологии строительных материалов: Матер. Междунар. науч. конф. Апатиты: РАН, 2003. С. 93-95.

44. Федосов С.В., Акулова М.В., Анисимова Н.К. Применение плазменной обработки бетона для отделки культовых сооружений// Матер. Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы храмового строительства в современной России». Иваново, 2003. С. 12-15.

45. Федосов С.В., Акулова М.В., Анисимова Н.К. Теплоперенос при высокотемпературной отделке бетона// Актуальные проблемы науки в АПК: Матер. 55-й Междунар. науч.-практ. конф. Кострома: КГСХА, 2004. Т. 1 С. 40-41.

46. Федосов С.В., Акулова М.В., Щепочкина Ю.А. Дериватографический анализ физико-химических превращений в бетоне при его глазуровании// Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2003. Т. 46. Вып. 8. С. 21-24.

47. Акулова М.В., Федосов С.В., Щепочкина Ю.А. Влияние плазменной отделки на свойства и структуру строительных материалов: Отчет по НИР, № Гос. рег. 01.99.00.10822. Иваново, 1999. 12 с.

48. Федосов С.В., Акулова М.В., Щепочкина Ю.А. Разработка составов легкоплавкой глазури, пригодной для отделки бетона: Отчет по Гранту. РК 01.99.00 1324, ИК 02.2.00 105681.2000. 2001. -13с.

49. Федосов С.В., Акулова М.В. Разработка новых ресурсосберегающих технологий материалов и безопасных методов эксплуатации зданий и сооружений. Отчет по НИР. № РК 01.20.00 039.45. 2000. 16 с.

50. Акулова М.В., Федосов С.В. Разработка новых антикоррозийных экологически чистых высокотемпературных методов отделки: Отчет по НИР, № Гос. рег. 01.20.0000774. Иваново, 2000 15с.

Подписано в печать 15.04.2004 г. Формат издания 60x84<sup>1/16</sup>  
Печ. л. 2,0. Усл. печ. л. 1,86. Тираж 60 экз. Заказ 680

Типография ГОУСПО Ивановского энергоколледжа  
153025, г.Иваново, ул. Ермака, 41, тел.:37-52-44, 32-50-89

№ 11753