

**НИКИТИН Леонид Валериевич**



**ПОЛИМЕРСИЛИКАТНЫЙ БЕТОН  
КАРКАСНОЙ СТРУКТУРЫ  
РОЛИКОВОГО ФОРМОВАНИЯ**

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ПЕНЗА 2004

Работа выполнена в Мордовском государственном университете имени Н. П. Огарева.

Научный руководитель: член-корреспондент РААСН  
доктор технических наук  
профессор **Ерофеев В. Т.**

Официальные оппоненты: засл. деятель науки РФ  
доктор технических наук  
профессор **Калашников В. И.**,  
кандидат технических наук  
доцент **Дудынов С.В.**

Ведущая организация: ОАО «ЖБК-1», г. Саранск

Защита состоится «23» декабря 2004 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.184.01 в Пензенском государственном университете архитектуры и строительство по адресу: г. Пенза, ул. Титова, 28. ПГУАС, 1-й корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского ГУАС.

Автореферат разослан «22» декабря 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.184.01



В. А. Худяков

2006-4  
554

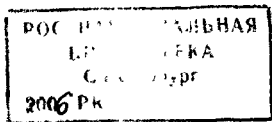
2096791

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** При проектировании производственных и сельскохозяйственных зданий и сооружений всегда существует проблема выбора материалов для изготовления строительных изделий и конструкций. В связи с тем что в современном промышленном производстве неотъемлемыми факторами являются агрессивные среды, задача выпуска долговечных и эффективных материалов, способных обеспечивать длительную и надежную работу конструкций и сооружений в агрессивных средах, является чрезвычайно актуальной. Одним из радикальных способов повышения долговечности материалов и изделий является применение композитов на полимерном вяжущем. В то же время известно, что растворы и бетоны на основе жидкого стекла обладают высокой стойкостью к действию кислот, что позволяет использовать силикатные и полимерсиликатные композиты в условиях агрессивного воздействия большинства концентрированных минеральных и органических кислот, стоимость же их в 2 – 3 раза меньше, чем полимербетонов. Более широкое применение данных композитов в условиях воздействия агрессивных сред сдерживается тем, что они имеют недостаточно высокую прочность, слабо устойчивы к воздействию воды и разбавленных кислот. Также существуют проблемы получения низкопористых плотных изделий при укладке и уплотнении высоконаполненных силикатных и полимерсиликатных композитов.

В последнее время одним из эффективных направлений дальнейшего совершенствования строительных композитов является получение и внедрение материалов каркасной структуры. Технология их производства включает предварительное создание каркаса путем склеивания зерен заполнителя друг с другом с последующим заполнением пустот матричными составами. Такая технология позволяет максимально наполнить бетоны крупным заполнителем. В настоящее время получены эффективные каркасные бетоны на полимерных, цементных, полимерцементных и серных связующих. Эффект при получении каркасных бетонов повышенной плотности может быть достигнут за счет использования для заполнения пустот каркаса высоконаполненных матричных композиций с применением вяжущего на основе жидкого стекла. Сложность получения высокоплотных кислотоупорных силикатных растворов и бетонов обуславливается значительной их вязкостью, даже при содержании в жидком стекле значительного количества воды, что усложняет заполнение пустот каркасов матричными составами без силового воздействия. На наш взгляд, перспективным представляется способ заполнения пустот каркаса матрицей методом безвибрационного роликового уплотнения, при котором может быть достигнуто повышение плотности и улучшение физико-механических и эксплуатационных характеристик получаемых материалов и изделий.

**Цель и задачи работы.** Целью настоящей работы является экспериментально-теоретическое обоснование приемов и методов получения каркасных композитов с применением безвибрационного роликового формования на жидкостекольных связующих.



Задачи исследований состоят в следующем.

- Разработать технологию изготовления изделий на основе каркасных композитов методом безвибрационного роликового формования
- Разработать модель формования каркаса и заполнения его пустот матричными составами при помощи безвибрационного роликового уплотнения.
- Оптимизировать составы каркасов по гранулометрическому составу для композитов роликового формования на жидкостекольном вяжущем.
- Оптимизировать составы матричных композитов по показателям прочности, жесткости и долговечности.
- Получить количественные зависимости изменения физико-механических свойств матричных композитов на основе жидкого стекла при воздействии агрессивных сред.
- Подобрать эффективные добавки для композитов на силикатном вяжущем, позволяющие улучшить их физико-технические показатели.

**Научная новизна.** Разработана математическая модель технологии получения композитов каркасной структуры на жидкостекольных связующих методом безвибрационного роликового уплотнения. Выявлены количественные зависимости изменения физико-технических свойств композитов на основе жидкого стекла при выдерживании их в агрессивных средах от основных рецептурных и структурообразующих факторов.

**Практическое значение работы** заключается в разработке составов силикатных бетонов с улучшенными физико-техническими свойствами и технологии производства каркасных строительных изделий с применением безвибрационного роликового уплотнения, пригодных для изготовления покрытий полов и стеновых панелей для производственных и сельскохозяйственных зданий и сооружений.

**Апробация работы.** Результаты исследований докладывались на следующих внутривузовских, всероссийских и международных конференциях: Всероссийской конференции «Экологические проблемы биодegradации промышленных, строительных материалов и отходов производств» (Пенза, 1998 г.); Международной научно-практической конференции «Современное строительство» (Пенза, 1998 г.); VI академических чтениях РААСН «Современные проблемы строительного материаловедения» (Иваново, 2000 г.); VII академических чтениях РААСН «Современные проблемы строительного материаловедения» (Белгород, 2001 г.); Всероссийской научно-технической конференции, посвященной памяти академика В. И. Соломатова, «Современное строительство» (Саранск, 2003 г.); Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 40-летию строительного факультета Мордовского университета, «Актуальные вопросы строительства» (Саранск, 2002 г.); Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения академика В. Г. Шухова, «Современные технологии строительных материалов и конструкций» (Саранск, 2003 г.); Международной научно-практической конференции «Современное строительство» (Пенза, 2003 г.).

**Публикации.** По материалам выполненных исследований опубликовано 10 работ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов, списка использованной литературы из 180 наименований, изложена на 149 листах машинописного текста, содержит 40 рисунков, 9 таблиц.

Диссертационная работа выполнена на кафедре строительного производства Мордовского государственного университета имени Н. П. Огарева.

Автор благодарит к.т.н. доцента А. М. Асташова за консультации по отдельным разделам диссертации и сотрудников кафедры строительного производства Мордовского государственного университета за техническую помощь при завершении работы.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна работы и ее практическая значимость, отмечено промышленное внедрение результатов разработок.

В **первой главе** приводится аналитический обзор отечественной и зарубежной литературы о структурообразовании, составах, свойствах и применении композиционных строительных материалов на основе жидкого стекла. Они используются в строительстве в качестве кислотоупорных строительных материалов (замаски, растворы, бетоны), а также в качестве жаростойких бетонов, лакокрасочных и антикоррозионных материалов, при химическом закреплении грунтов и изготовлении бетонополимеров. Широкое применение в строительстве композиты на основе жидкого стекла нашли благодаря работам Ю. М. Баженова, П. П. Будникова, П. Н. Григорьева, В. В. Данилова, В. П. Дятловой, В. И. Калашникова, И. П. Клима, В. И. Корнеева, Е. А. Климановой, В. Н. Кузина, И. И. Лагутина, М. А. Матвеева, И. Е. Путляева, И. И. Сильвестровича, В. И. Соломатова, Н. П. Степичева, М. И. Субботина, А. П. Тарасовой, В. М. Хрулева, J. Csutor, D. Liguori и других отечественных и зарубежных исследователей.

Показано, что при создании долговечных композитов на основе жидкого стекла прежде всего необходимо добиваться улучшения структуры и физико-механических показателей материалов: прочности, плотности, водо- и кислотостойкости. С целью повышения данных характеристик следует обратить внимание на точную дозировку и порядок смешивания компонентов. В качестве связующего при приготовлении композитов рекомендуется натриевое жидкое стекло с силикатным модулем  $M\ 2,8 - 3,0$  при плотности раствора от 1,3 до 1,45 г/см<sup>3</sup>, а в качестве инициатора твердения чаще всего используется кремнефтористый натрий в виде технического порошкообразного продукта 1-го или 2-го сорта. Показано, что оптимальное содержание кремнефтористого натрия для получения водостойких и кислотостойких материалов составляет 15 – 20 % от массы жидкого стекла.

При создании композиционных материалов на основе жидкого стекла с заданными свойствами большое значение имеют наполнители. Основное требование к наполнителям и заполнителям – физико-химическая совместимость с вяжущим, получение цементирующих веществ и исключение появления нежелательных продуктов реакций в зоне контакта.

Физико-механические свойства композитов на основе жидкого стекла можно улучшить при введении различных модифицирующих добавок: фурилового спирта (полимерсиликатное связующее), низкомолекулярного полиэтилена, метилметакрилата, мочевино-формальдегидной смолы, необожженной и обожженной гидратированной слюды, окиси цинка, поташа.

Приготовление смесей – важнейший этап, от которого во многом зависят свойства композиционного строительного материала. Полиструктурная теория предполагает раздельную технологию приготовления смесей, в соответствии с которой отдельно в скоростных смесителях готовятся связующие с полимерной добавкой, наполнители с отвердителем с последующим их совмещением. Такая технология позволяет эффективно управлять структурой и свойствами КСМ.

Описана технология изготовления каркасных бетонов, которая позволяет снизить трудоемкость и улучшить свойства покрытий полов и стеновых панелей. Для уплотнения бетонов применяют вибрирование и вибропрессование.

Отмечено, что перспективным направлением изготовления изделий на основе жидкостекольного вяжущего является роликовое формование, обеспечивающее качественное уплотнение жестких и сверхжестких бетонных смесей, благодаря чему ускоряется рост прочности бетона при пониженном расходе вяжущего, что ведет к улучшению характеристик получаемого материала. На наш взгляд, применение этого метода целесообразно при формировании изделий из бетонов каркасной структуры. При этом достигается хорошее омоноличивание зерен заполнителя и уменьшение пленки контакта между заполнителями. При изготовлении каркаса и качественного заполнения его пустот матричными композициями роликовое формование адекватно по силовому воздействию способу изготовления изделий с вибропригрузом, однако в последнем случае силовое воздействие распространяется на значительную площадь изделия, что снижает удельное давление на бетон. При роликовом уплотнении каток, передвигаясь по направляющим, снимает излишнее давление на зерна и обеспечивает оптимальное распределение смеси по межзерновому объему. При заполнении пустот каркаса матричными составами роликовое уплотнение имеет ряд преимуществ: возможность использования жестких высоковязких смесей; заполнение каркаса может осуществляться до набора им конструктивной прочности; значительно уменьшается трудоемкость, снижаются энергозатраты. Все это позволяет считать, что данная технология является перспективной для исследований.

Во **второй главе** приведены цель и задачи диссертационной работы, характеристики применяемых материалов, описаны методы экспериментальных исследований.

В качестве основного вяжущего использовалось натриевое жидкое стекло с силикатным модулем  $M\ 2,8 - 3,0$  при плотности раствора от  $1,3$  до  $1,45\ \text{г/см}^3$

следующего химического состава:  $\text{SiO}_2$  – 26,1 – 31,1,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 9,5 – 11,4,  $\text{H}_2\text{O}$  – 64,1 – 57,0, ППП – 0,3 – 0,5. Отверждение составов производили с помощью кремнефтористого натрия (КФН). Для объединения зерен крупного заполнителя в каркас применяли следующие связующие: натриевое жидкое стекло, эпоксидную смолу марки ЭД-20, битум марки БН 60/90 и портландцемент М400.

Наполнителями служили: перлитовая мука, диатомит, пиритные огарки, порошки известняка, керамзита, бой стекла, а также кварцевый песок различных фракций. Были использованы следующие модифицирующие добавки: полиэтиленполиамин, дибутилфталат, отработанное машинное масло, фуриловый спирт.

При определении физико-технических свойств композитов на основе жидкого стекла применялись современные физико-механические, физико-химические, химические и математические методы исследований, регламентированные действующими ГОСТами.

В качестве агрессивных сред при исследовании химического сопротивления силикатных композитов рассматривались: вода, водный раствор серной кислоты (63 %), водный раствор ортофосфорной кислоты (85 %), водный раствор азотной кислоты (50 %), водный раствор азотистой кислоты (1 – 1,5 %), водные растворы технического едкого натра (2-х, 10-и и 44-х процентной концентрации), пивные дрожжи (рН 4,6 – 4,4 и рН 2), водный раствор алкафона – 1 : 5.

При подборе составов многокомпонентных систем пользовались методами математического планирования эксперимента (ММПЭ). ММПЭ позволяет определить оптимальные значения свойств при значительном сокращении количества опытов. Планы экспериментов составались в соответствии с ранее проведенными разработками, варьируемые факторы выбирались с учетом критерия оптимизации. Для установления пределов варьирования были использованы предварительные эксперименты, что позволило проводить опыты в максимальной близости к области оптимума. При проведении исследований ММПЭ рассматривался трехкомпонентный состав, оптимизация осуществлялась с помощью метода симплекс-решетчатого планирования «состав – свойство», расчеты производились по разработанной программе в оболочке Excel.

В третьей главе рассмотрены основы теории получения каркасных композитов на жидкостекольных связующих методом роликового формования. Приведены формулы для расчета оптимального соотношения размеров наполнителя матрицы и заполнителя каркаса. Рассмотрены различные способы пропитки каркасов матричными составами, а также теоретические предпосылки уплотнения жестких бетонных смесей по технологии безвибрационного роликового уплотнения. Показаны процессы, происходящие в системе под действием уплотняющего катка. Приведены факторы, оказывающие влияние на уплотнение, и определены граничные условия. Рассмотрено напряженно-деформированное состояние материала при уплотняющем воздействии на него цилиндрического тела. Описана реологическая модель, которая представляет среду в виде комбинации упрощенных механических моделей. Каркас и каркасный бетон имеют сложную многокомпонентную структуру. Каркас состоит из твердых частиц различной крупности (заполнителя) и вязко-

различной крупности (заполнителя) и вязко-пластичного тела (связующего) распределенного по их поверхности. Каркасный бетон, в свою очередь, представляет собой каркас, пустоты которого заполнены матрицей.

Приведена упрощенная модель уплотнения каркаса по безвибрационной роликовой технологии (рис. 1). Получены математические зависимости, описывающие закономерности формирования структуры каркасного бетона при воздействии ролика на формируемую вязко-пластичную смесь компонентов каркаса и последующего заполнения пор каркаса матрицей. Расчетная схема взаимодействия уплотняющего ролика с бетонной смесью показана на рис. 2.

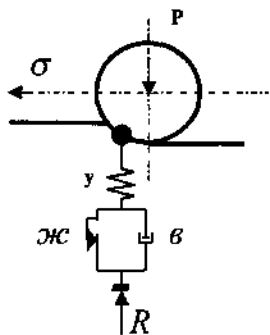


Рис. 1

Реологическая модель системы  
«уплотняющий каток – каркас или  
каркасный бетон»

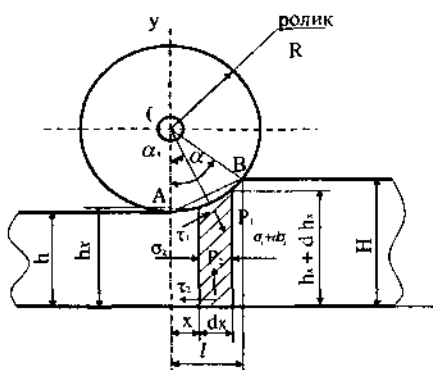


Рис. 2

Расчетная схема взаимодействия ролика с  
бетонной смесью

Для анализа механизма уплотнения массива материала в зоне деформирования, ширина которой равна горизонтальной проекции дуги контакта уплотняемого материала с рабочей поверхностью катка, выделен бесконечно малый объем на участке единичной длины  $dx$  и рассмотрено условие равновесия сил, действующих на него при уплотнении. Совместное решение уравнений равновесия относительно осей  $X$  и  $Y$  и уравнения пластичности для граничных условий  $x=l$ ,  $h_x=h_0$ ,  $P_x=P_{x1}=\sigma_0+\sigma_x$  после ряда преобразований и упрощений позволило получить уравнение вида

$$\sigma_x = \frac{1}{A} \left[ (P_{x1} \cdot A - \sigma_0) \cdot \left( \frac{h_0}{h_k} \right)^A - \sigma_0 (A-1) \right],$$

где  $\sigma_0$  - начальная прочность структуры бетонной смеси;  $A$  - постоянная величина, определяемая по формуле

$$A = [\mu_1 + \mu_2 / \operatorname{tg}(\alpha/2) - \mu_1 \cdot \mu_2]$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  - коэффициенты сцепления уплотняемого материала с поверхностью ролика и основания.



В четвертой главе приведены результаты исследований, направленные на оптимизацию матричных композитов по показателю прочности, жесткости и долговечности. Рассмотрено влияние количественного соотношения кремнефтористого натрия, наполнителя и заполнителя на прочностные свойства композиционного материала. При определении требуемого количества отвердителя были рассмотрены два варианта. В первом в жидкое стекло наполнитель не вводился, его роль выполнял сам кремнефтористый натрий; во втором наполнителем служил кварцевый песок фракции 0,16 – 0,315 мм. Образцы изготавливались в виде кубиков с размерами граней 20×20×20 мм, их отверждение происходило в нормальных температурно-влажностных условиях в течение 28 суток, после чего они подвергались испытанию. Результаты испытаний показали, что оптимальное количество кремнефтористого натрия в обоих случаях составило 18 м. ч. на 100 м. ч. жидкого стекла.

При определении свойств наполненных композитов в качестве наполнителей использовались порошки различных горных пород, а также местных материалов и отходов промышленности: кварцевый песок, диатомит, пиритные огарки, известняк, керамзитовая пыль, бой стекла, перлит. Так как свойства композита во многом зависят от количества вводимого наполнителя, были проведены исследования по оптимизации его содержания в связующем. Образцы для испытания на сжатие изготавливались в виде кубиков с размерами граней 20×20×20 мм и балочек с размерами 20×20×70 мм. Испытания показали, что наибольшей прочностью обладают составы, наполненные диатомитом (прочность на сжатие составляет 20,1 МПа, а на растяжение при изгибе – 2,56 МПа), который содержит активный кремнезем, способный образовывать полимерсиликаты с жидким стеклом. Высокую прочность также продемонстрировали составы на перлитовой муке (прочность на сжатие составляет 22 МПа, а на растяжение при изгибе – 2,62 МПа) вследствие достаточно высокого её сродства с силикатом натрия. Эффекты взаимодействия наполнителей с вяжущим установлены методом рентгеноструктурного анализа.

С целью оптимизации составов высоконаполненных матриц было исследовано влияние добавок различных микронаполнителей: диатомита, пиритных огарков, керамзита, известняка, перлита и кварцевого порошка. Базовые составы включали натриевое жидкое стекло – 100 м. ч., кремнефтористый натрий – 18 м.ч., а также мелкий заполнитель – кварцевый песок. Исследования проведены с использованием метода математического планирования эксперимента. Были разработаны планы, выбраны компоненты, образующие материал, и назначены уровни их варьирования. При проведении оптимизации рассматривался трехкомпонентный состав с применением метода симплекс-решетчатого планирования эксперимента (10 опытов). В качестве оптимизируемого параметра рассматривался предел прочности на сжатие. Испытания проводились на образцах – кубах с размером ребер 20×20×20 мм.

Факторами варьирования являлись:  $X_1$  – количество кварцевого песка фракции 0,16 – 0,315 мм;  $X_2$  – количество наполнителя фракции 0,08 – 0,016 мм и

$X_3$  – количество наполнителя крупностью менее 0,08 мм

Были изготовлены и испытаны образцы из составов со следующими комбинациями

- кварцевый песок, кварцевый порошок, молотый известняк (комбинация № 1);
- кварцевый песок, пиритные огарки, диатомит (комбинация № 2);
- кварцевый песок, пиритные огарки, молотый известняк (комбинация № 3),
- кварцевый песок, пиритные огарки, керамзитовая пыль (комбинация № 4)

После статистической обработки результатов эксперимента получены уравнения регрессии, характеризующие зависимость оптимизируемого параметра от варьируемых факторов, а также построены графические зависимости (рис 3)

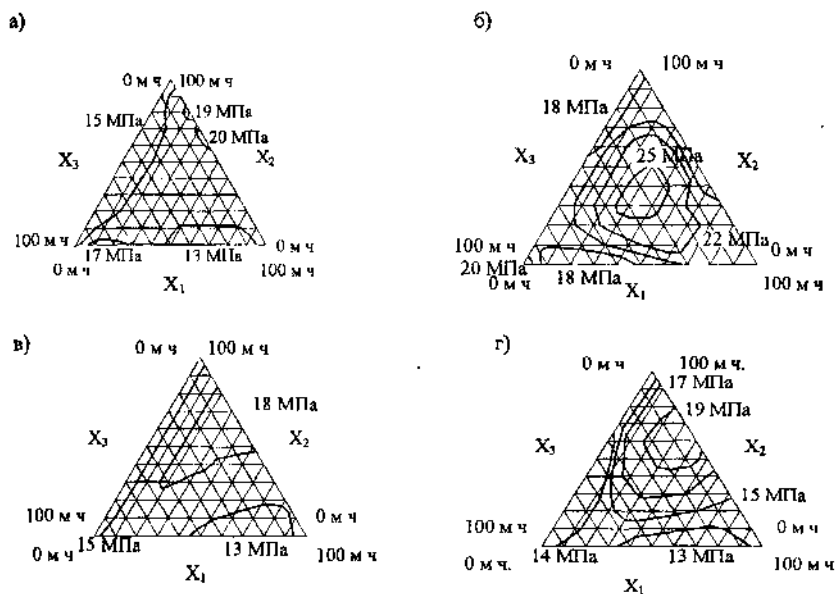


Рис 3 Зависимость изменения прочности композитов на основе жидкого стекла с различной комбинацией наполнителей

а – комбинация № 1, б – комбинация № 2, в – комбинация № 3, г – комбинация № 4

Использование в матричных составах наполнителей различной природы и крупности положительно влияет на увеличение прочностных характеристик материала. Матричные составы различных комбинаций показали повышение прочности по сравнению с матрицами со 100% содержанием мелкого заполни-

теля – кварцевого песка: в первом случае – на 15 %, во втором – на 65, в третьем – на 15 и в четвертом – на 10 %. Лучшими прочностными свойствами характеризуется матричный состав (комбинация № 2), в котором соотношение мелкого заполнителя – кварцевого песка, пиритных огарков и диатомита составляет 0,8 : 1 : 0,4 по массовым частям.

Химическая стойкость силикатных растворов обуславливается свойствами продуктов реакции, выделяющихся при их твердении, а также свойствами непрореагировавшего щелочного силиката, дозировкой инициаторов твердения (кремнефторида натрия или какой-либо другой добавки), природой и количеством наполнителей. Исследована стойкость в воде и 10% растворе едкого натра. Установлено, что водостойкость силикатных композитов зависит главным образом от содержания в их составе свободного, не прореагировавшего с кремнефтористым натрием жидкого стекла. Из результатов испытаний также следует, что при воздействии водного раствора едкого натра у всех составов наблюдается уменьшение массосодержания за счет процессов вымывания и в течение первых суток некоторые составы теряют от 25 до 60 % массы. Выявлено положительное влияние увеличения содержания кремнефтористого натрия для составов с разными наполнителями. Более стойкими при воздействии растворов едкого натра являются составы, наполненные диатомитом, введение которого позволяет повысить связываемость геля кремнеземистой кислоты в полисиликаты.

Одним из способов повышения химического сопротивления жидкостекольных композитов является введение в их состав полимерных добавок. Исследована химическая стойкость композитов в средах, характерных для производственных зданий. Результаты сравнительных испытаний химической стойкости композиций с полимерной добавкой и без нее свидетельствуют о различных процессах, происходящих в композитах на основе жидкого стекла при выдерживании их в агрессивных средах. Деградация композитов происходит по различным механизмам. В одних средах массосодержание материалов увеличивается, а в других – уменьшается. Испытания во всех средах показали положительное влияние полимерной добавки фурилового спирта на химическую стойкость композитов. Из рассмотренных сред наиболее сильное агрессивное воздействие на силикатные и полимерсиликатные материалы оказали 63% раствор серной кислоты, 85% раствор ортофосфорной кислоты, 2% раствор технического едкого натра и 44% раствор едкого натра.

Установлено влияние добавки машинного масла, используемого для смазки форм, на прочность силикатного раствора. Для сравнения тот же состав модифицировался дибутилфталатом при тех же дозировках. Ввиду его широкого использования в качестве пластификатора. Отработанное машинное масло оказало большее положительное воздействие, нежели дибутилфталат, – прочность составов повысилась более чем на 12 %. Механизм действия отработанного машинного масла, названный «защитным действием», можно объяснить аналогично действию полимерной добавки. Оптимальная дозировка составляет 2,1 – 2,4 %. При добавлении отработанного машинного масла в объеме до 2 % от массы жидкого стекла его не хватает на полное обволакивание частиц геля, вслед-

ствие чего процесс агрегации продолжается не столь активно. Если добавка превышает 2,5 %, происходит снижение прочности в связи с утолщением прослоек, экранирующих срастание гелевых связей.

В пятой главе приведены результаты исследований по оптимизации гранулометрического состава заполнителей, исследовались прочность, жесткость и долговечность каркасных бетонов на основе различных связующих, проводились исследования плотности и динамической прочности.

Физико-технические свойства материалов каркасной структуры зависят от степени отверждения клеевой композиции, природы заполнителей и связующих, соотношения упруго – прочностных свойств связующего и заполнителя, а также от величины сцепления между ними. Одним из факторов, влияющих на свойства каркасных бетонов, является гранулометрический состав заполнителей. Анализ существующих работ свидетельствует, что наибольшая прочность каркасов на основе цементных и полимерных связующих достигается при оптимальном сочетании в нем гранул разных фракций. Оптимизация каркаса на основе жидкостеклянного вяжущего по гранулометрическому составу заполнителя ранее не производилась. При установлении оптимального гранулометрического состава заполнителей для каркасов на жидком стекле были использованы математические методы планирования эксперимента, рассматривался трехкомпонентный состав с применением метода симплекс-решетчатого планирования эксперимента (10 опытов). Факторами варьирования являлось массовое содержание различных фракций заполнителя:  $X_1$  – фракция 5 – 10 мм;  $X_2$  – фракция 2,5 – 5 мм;  $X_3$  – фракция 1,25 – 2,5 мм. Образцы изготавливались в виде кубов размерами 40×40×40 мм, которые выдерживались в нормальных температурно-влажностных условиях в течение 28 суток, после чего испытывались на сжатие. После статистической обработки результатов эксперимента получено уравнение регрессии, характеризующее зависимость оптимизируемого параметра от варьируемых факторов:

$$R_{сж} = 0,56X_1 + 1,04X_2 + 0,8X_3 - 0,09X_1X_2 + 1,845X_1X_3 + 1,1025X_2X_3 + \\ + 3,78X_1X_2(X_1 - X_2) + 0,405X_1X_3(X_1 - X_3) + \\ + 1,6875X_2X_3(X_2 - X_3) + 2,0925X_1X_2X_3.$$

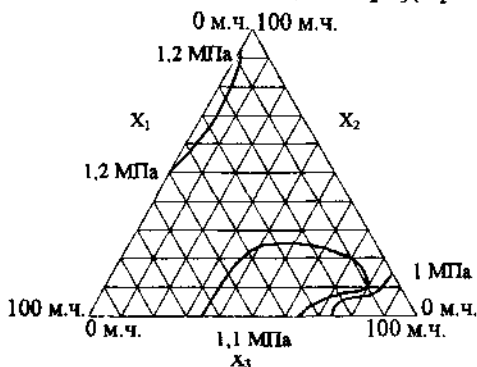


Рис. 4 Влияние фракционного состава крупного заполнителя на прочность каркасов

Интерпретация полученной зависимости приведена на рис. 4.

Анализируя уравнение и график, можно сделать вывод, что использование в системе нескольких фракций заполнителя положительно влияет на прочностные характеристики материала. Состав, где соотношение фракций заполнителя принимается 0,1 : 1 : 0,4 ( $X_1 : X_2 : X_3$ ) показал

увеличение прочности на 15 % по сравнению с составом, где содержание фракции  $X_2$  составило 100 %.

Каркасные композиты, в отличие от композитов, изготавливаемых путем обычного смешивания компонентов, можно получать на основе комплексных связующих, когда для каркаса и матрицы применяются различные, порой даже несовместимые при непосредственном перемешивании связующие. При этом за счет такого объединения в композите можно достигнуть существенного эффекта. Исследования проведены с учетом оптимизационных исследований составов каркаса на различных связующих и матрицах на жидкостекольных связующих. В каркасе для каждой пары связующее – наполнитель соблюдалось их оптимальное соотношение. Дисперсно-наполненные матрицы для каркасных композитов подбирали с учетом требований оптимального соотношения размеров наполнителя с размерами наполнителей каркаса, а также необходимой вязкости смеси. Для каркасных композитов важным является, с одной стороны, снижение вязкости наполненных матриц, с другой стороны, необходимо повысить степень наполнения пропиточных композиций и тем самым снизить расход дорогостоящих связующих. Для снижения вязкости пропиточных матриц могут быть применены известные способы модифицирования поверхности наполнителя, различные пластифицирующие добавки, разные технологии, в данном случае использовалась технология роликового безвибрационного формования.

Для проведения сравнительных исследований при изготовлении бетонов каркасной структуры применялись два способа формования: в первом образцы были уплотнены вибрированием, а во втором использовался способ безвибрационного роликового уплотнения. В качестве клея каркаса при выполнении экспериментальных исследований использованы: портландцемент М400; эпоксидная смола марки ЭД-20; битум марки БН 60/90 и жидкое натриевое стекло. Заполнителем служил гранитный щебень фракций 5 – 10 мм. Каркас пропитывался силикатной матрицей с различными наполнителями: перлит, диатомит, пиритные огарки, кварцевый песок. Испытания показали, что прочность на сжатие и на растяжение при изгибе у составов, уплотненных роликовым способом, выше, в среднем на 10 – 15 %, чем при виброуплотнении. Это объясняется тем, что при данном способе матрица более качественно заполняет пустоты каркаса, что приводит к образованию более плотной структуры. К тому же использование роликового уплотнения при заполнении пор каркаса матричными составами способствует их дополнительному уплотнению.

Основным параметром, характеризующим деформативность материалов при воздействии нагрузок, является модуль упругости. Модуль упругости каркасных композитов зависит от прочности и деформативности матрицы клея каркаса, наполнителя, а также их взаимодействия друг с другом. Жесткие клеи позволяют получать композиты с повышенным значением модуля упругости, а вязкоупругие – с пониженным. Нами было выявлено влияние связующего каркаса на прочность и деформативность получаемого исходного материала при одном и том же матричном материале. Каркас был выполнен на различных связующих: цементе М400, жидком натриевом стекле, эпоксидной смоле марки

ЭД-20, битуме марки БН 60/90. Для заполнения пустот каркаса была взята жидкостекольная матрица на перлитовом наполнителе. Наибольшая жесткость характерна для композитов, в которых каркас склеивался эпоксидным клеем марки ЭД-20. Модуль упругости у данных видов материалов на 40 % выше по сравнению с каркасными бетонами, составленными на жидкостекольном вяжущем.

Таким образом, регулирование вида вяжущего для каркаса в каркасных бетонах с применением жидкостекольных связующих позволяет получать композиты с различными свойствами, в том числе с регулируемым химическим сопротивлением.

Деградация материалов и конструкций в агрессивных средах происходит в результате химического взаимодействия их компонентов с компонентами материала. Как уже было сказано ранее, растворы на основе жидкого стекла имеют хорошее химическое сопротивление в концентрированных кислотах, при их воздействии они даже набирают дополнительную механическую прочность. В то же время они слабо устойчивы к разбавленным кислотам и практически нестойки к NaOH. Нами были изготовлены образцы 40×40×40 мм, которые после набора прочности погружались на 50 сут в 10 % раствор NaOH. Испытанию подвергались 2 состава, отличавшиеся связующими, использовавшимися для каркаса. В первом случае им было жидкое стекло, а во втором – эпоксидная смола марки ЭД-20. Испытания показали, что стойкость второго состава на 12 % выше по сравнению с первым.

Применение комплексных связующих позволило повысить водостойкость композитов. Рассматривались два состава: в первом связующим для каркаса служило жидкое стекло, а во втором – битум марки БН 60/90. Поровое пространство обоих каркасов было заполнено жидкостекольной матрицей. Испытания показали, что после 55 суток выдерживания в воде у композитов на битумном каркасе прекратилось уменьшение массосодержания, тогда как в другом случае процесс вымывания продолжался.

Одним из способов оценки плотности бетона является использование ультразвукового метода. Знание скорости прохождения ультразвука позволяет определить передачу шума через ограждающую конструкцию. Для испытаний рассматривались составы каркасов на портландцементе М400, жидком натриевом стекле, эпоксидной смоле марки ЭД-20; битуме марки БН 60/90. Поры были заполнены жидкостекольной матрицей, наполненной диатомитом. Наибольшая плотность бетона была получена с применением каркасов на эпоксидной смоле марки ЭД-20.

Строительные материалы и изделия многих зданий и сооружений во время эксплуатации подвергаются воздействию динамических нагрузок, приводящих, например, к преждевременному разрушению станин металлообрабатывающих станков, дорожных и аэродромных покрытий, полов в промышленных зданиях с напряженным режимом работы и т. д. При проведении исследований силикатных бетонов каркасной структуры в качестве критерия ударной прочности была принята удельная ударная вязкость. Данный показатель определялся испытанием образцов – призм размером 40×40×160 мм на маятниковом копре. Испытания

показали, что ударная вязкость каркасного силикатного бетона оказалась на 35 % выше, чем силикатного бетона обычной структуры. Это, вероятно, объясняется следующими причинами: каркас в силикатном бетоне создает цепочечное расположение связанных заполнителей, перераспределяющих между собой приложенную нагрузку; уменьшаются структурные напряжения на границе раздела, заполнитель — связующее, приводящие к образованию микротрещин. Наибольшая прочность достигнута при использовании для вяжущего каркаса эпоксидной смолы и матричного состава на силикатной связке, наполненной диатомом.

В шестой главе приведена технология изготовления покрытий полов и трехслойных строительных изделий на основе полимерсиликатных бетонов каркасной структуры роликового формования. Технологически процесс устройства каркасных покрытий включает следующие операции: грунтовку основания, укладку, формирование и отверждение каркаса, заполнение его пустот матрицей методом безвибрационного роликового формования с одновременным устройством лицевого слоя и с последующим отверждением. В животноводческих зданиях каркас может укладываться непосредственно на песчаную или щебеночную подготовку.

Изготовление трехслойных стеновых панелей на основе каркасного бетона осуществляется в горизонтальных металлических формах с шарнирно открывающимися бортами. Цикл их формования включает в себя два этапа. На первом этапе после установки арматурных каркасов, закладных изделий и монтажных петель в форму укладывается цементно-бетонная смесь, которая вибрируется в течение 1 мин до образования крайнего плотного и среднего крупнопористого слоя. Для этого в растворяющей составляющей используют заполнитель крупностью менее 0,63 мм. В этом случае создаются лучшие условия для расслаиваемости смеси и образования прочных клеевых прослоек, связывающих гранулы крупного заполнителя в крупнопористый слой, а также не происходит закупоривания пористой структуры при образовании среднего слоя. Потом на поверхность крупнопористого слоя укладывают строительный раствор на жидкостекольном вяжущем и с помощью роликового формования заполняют поровое пространство в его верхней части. Данные изделия обладают улучшенными технологическими свойствами и химической стойкостью. При формовании стеновых изделий следует обратить внимание на составы для обработки форм, так как жидкое стекло обладает сильной адгезией к большинству материалов. Испытания показали, что за счет применения машинного масла для обработки форм прочность материала возрастает на 8 %, что позволяет повысить прочность поверхностного слоя получаемых изделий.

Экспериментально установлены оптимальные сроки набора прочности каркаса перед заполнением его пустот матричным составом. В качестве заполнителя использовался гранитный щебень крупностью 5 — 10 мм. При склеивании зерен в каркас, в качестве связующего использовалась эпоксидная смола ЭД-20. Уложенный в форму каркас пропитывался силикатной матрицей, наполненной пиритными огарками. Время пропитки каркасов было принято следующее: 0, 2,

3, 5, 7, 12, 24 и 672 ч. Результаты сравнительных испытаний свидетельствуют, что лучшие показатели достигнуты у материалов, в которых каркас и матрица отверждались совместно. Наиболее высокая прочность достигается при пропитке каркаса матрицей после его 3-часового твердения в нормальных температурно-влажностных условиях.

Для улучшения качества, а также сокращения сроков набора прочности изделий на основе жидкого стекла целесообразно подвергать их тепловой обработке с плавным подъемом температуры и медленным охлаждением, чтобы в различных слоях материала не образовывались значительные внутренние напряжения (это особенно опасно для крупногабаритных изделий). Исследования показали, что более высокими физико-механическими свойствами обладают составы, выдержанные в течение суток в нормальных температурно-влажностных условиях и затем подвергнутые термообработке при температуре 60 – 70 °С в течение 12 ч.

Осуществлено внедрение полимерсиликатных бетонов каркасной структуры роликового формования при укладке полов на ОАО «Стройпрогресс» и выпуска партии трехслойных стеновых панелей на ОАО «ЖБК-1». Каркасные полы уложены с применением каркаса на эпоксидном связующем и жидкостеклянной пропиточной матрицы. Выпущена опытная партия трехслойных изделий на комплексных связующих, в которых один плотный слой выполнен на основе жидкостеклянных связующих.

Экономический эффект от внедрения каркасных полов роликового формования взамен полов на основе кислотоупорной плитки и трехслойных стеновых панелей на основе каркасного бетона по сравнению с изделиями со средним слоем из пенополистирола составил соответственно 19,1 руб на 1 м<sup>2</sup> пола и 1022,99 руб на 1 м<sup>3</sup> бетона.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Установлены основные закономерности структурообразования и технологии изготовления композитов каркасной структуры на основе жидкого стекла с использованием роликового формования.
2. Разработана модель уплотнения каркаса и заполнения его пустот матрицей безвибрационным роликовым способом. Приведены аналитические выражения, пригодные для получения оптимальной структуры композитов.
3. Выявлено оптимальное содержание кремнефтористого натрия в жидкостеклянных клеевых композициях для каркасов и матричных составов. Оно составило – 19 м. ч. в клеях и 18 м. ч. в матрицах на 100 м. ч. жидкого стекла. Установлено, что высокими физико-механическими свойствами обладают жидкостеклянные матричные композиты, наполненные диатомитом.
4. Показано улучшение физико-механических свойств составов, наполненных комбинацией из трех компонентов (кварцевый песок : пиритные



- огарки : диатомит) взятых в соотношении 0,8 : 1 : 0,4. При этом прирост прочности составил 65 % от прочности композита, в котором в качестве наполнителя используется только кварцевый песок. Предложена модифицирующая добавка для улучшения свойств силикатных композитов. При введении отработанного машинного масла прочность композитов повышается на 12 %, с улучшением технологических свойств.
5. Показаны количественные зависимости изменения прочности жидкостекольных композитов при выдерживании в различных агрессивных средах. Установлено, что стойкость композитов увеличивается при повышении содержания кремнефтористого натрия до уровня 18 м. ч. на 100 м. ч. вяжущего, при применении в качестве наполнителя диатомита и введении полимерной добавки.
  6. Методом математического планирования эксперимента оптимизирован гранулометрический состав заполнителей каркасного бетона. Показано, что наибольшая прочность композитов достигается при содержании в объеме заполнителей фракций 5 – 10, 2,5 – 5, 1,25 – 2,5 мм в соотношении 0,1 : 1 : 0,4.
  7. Приведена технология изготовления покрытий полов и трехслойных ограждающих конструкций роликового уплотнения. Выявлена закономерность повышения прочности при термообработке изделий. Лучшими физико-механическими свойствами обладают композиты, выдержанные в течение суток в нормальных температурно-влажностных условиях с последующей термообработкой при температуре 60 – 70 °С в течение 12 ч.
  8. Выявлены закономерности изменения прочностных и деформативных свойств, долговечности каркасного бетона. Показано улучшение свойств каркасных композитов, составленных на комплексных связующих.
  9. Осуществлено внедрение каркасных композитов роликового уплотнения. Каркасные полы на жидкостекольных связующих уложены на ОАО «Стройпрогресс» и выпущена партия из 40 трехслойных панелей на комплексных связующих на ОАО «ЖБК-1» в городе Саранске. Экономический эффект от внедрения составил соответственно 19,1 руб на 1 м<sup>2</sup> пола и 1022,99 руб на 1 м<sup>3</sup> бетона.

**Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:**

1. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Завалишин Е.В., Асташов А.М., Никитин Л.В. Биологическое сопротивление композитов на основе жидкого стекла // Всероссийская конференция «Экологические проблемы биодegradации промышленных, строительных материалов и отходов производств». – Пенза, 1998. – С. 169 – 171.
2. Никитин Л.В., Асташов А.М. Каркасные композиты на жидкостекольном связующем // Современное строительство: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза, 1998. – С. 144 – 145.

3. Завалишин Е.В., Никитин Л.В. Структурообразование, технология и свойства полимерсиликатных композитов // Современные проблемы строительного материаловедения: материалы VI acad. чтений РААСН. – Иваново, 2000. – С. 195–200.

4. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Асташов А.М., Никитин Л.В. Технология каркасных бетонов роликового формования // Современные проблемы строительного материаловедения: материалы VII acad. чтений РААСН / Гос. техн. акад. строит. материалов. – Белгород, 2001. – С. 533 – 535.

5. Асташов А.М., Ерофеев В.Т., Никитин Л.В. К вопросу о роликовом уплотнении каркасного бетона на жидкостекольном связующем // Проблемы строительного материаловедения: материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. памяти акад. В. И. Соломатова. – Саранск, 2002. – С. 77 – 78.

6. Никитин Л.В., Асташов А.М. Исследование свойств каркасов на силикатном вяжущем // Актуальные вопросы строительства: материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 40-летию строит. фак. Мордов. гос. ун-та. – Саранск, 2002. Вып. 1. – С. 292 – 293.

7. Никитин Л.В., Асташов А.М., Ерофеев В.Т. Исследование влияния вида наполнителя на свойства матричного состава жидкостекольных каркасных композитов // Современные технологии строительных материалов и конструкций: материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 150-летию со дня рождения акад. В. Г. Шухова. – Саранск, 2003. – С. 109 – 111.

8. Никитин Л.В., Асташов А.М., Ерофеев В.Т. Оптимизация гранулометрического состава каркасных композитов на основе жидкостекольного связующего // Современные технологии строительных материалов и конструкций: материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 150-летию со дня рождения акад. В. Г. Шухова. – Саранск, 2003. – С. 112 – 113.

9. Никитин Л.В., Асташов А.М., Ерофеев В.Т. Оптимизация матричных составов на основе жидкого стекла для каркасных бетонов // Современное строительство: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза, 2003. – С. 78 – 80.

10. Ерофеев В.Т., Завалишин Е.В., Никитин Л.В., Асташов А.М., Смирнов В.Ф. Каркасные композиты и изделия на основе жидкого стекла, изготавливаемые с применением роликового формования // Вестн. Волж. регион. отд-ния РААСН. Выпуск 7. – Н. Новгород, – 2004. – С. 164 – 178.

Подписано в печать 21.11.04. Объем 1,0 п. л. Тираж 100 экз.  
Заказ № 2234.

Типография Издательства Мордовского университета  
430000, г. Саранск, ул. Советская, 24

РНБ Русский фонд

2006-4

554

19 ИЮН 2004