

На правах рукописи



КАЛУГИН ИЛЬЯ ГЕОРГИЕВИЧ

**ПЕНОБЕТОНЫ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫЕ
БАЗАЛЬТОВЫМ ВОЛОКНОМ**

Специальность 05.23.05 – «Строительные материалы и изделия»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск 2011

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент

Василовская Нина Григорьевна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

Шильцина Антонида Даниловна

кандидат технических наук

Зиновьева Татьяна Николаевна

Ведущая организация:

ГОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» (ТГАСУ)

Защита состоится «21» октября 2011 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.08 при ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу 660041, г. Красноярск, пр. Свободный 82, ауд. 120.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Автореферат разослан «19» сентября 2011 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Пересыпкин Е. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы:

Среди основных направлений экономического и социального развития особое место уделяется вопросам ускорения научно-технического прогресса, в том числе в промышленности строительных материалов, путем разработки и внедрения энергоэффективных и местных строительных материалов, в первую очередь стеновых.

К числу эффективных стеновых материалов принадлежат пенобетоны. Перспективное направление производства пенобетонов по неавтоклавной технологии имеет ряд недостатков и нуждается в улучшении качества готовой продукции.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что дисперсное армирование пенобетонов различными волокнами является наиболее перспективным и все более широко применяется во многих областях строительства.

Структура бетона с использованием базальтовых волокон приближается к структуре бетона, армированного стальными сетками, однако базальтовые волокна имеют повышенную прочность, так как обладают более высокой степенью дисперсности в армируемом камне. Волокна, произведенные из химически инертных горных пород, не вступают в реакцию с солями. Известно, что неавтоклавные пенобетоны, как и обычные, плохо работают на растяжение при изгибе. Пенобетоны также характеризуются образованием усадочных трещин при твердении.

Повысить прочностные характеристики, а также другие свойства пенобетонов можно за счет введения оптимального количества волокна и его равномерного распределения в смеси.

Дисперсное армирование базальтовым волокном позволяет повысить качество изготовления и применения неавтоклавного пенобетона.

Таким образом, для удовлетворения спроса на эффективные стеновые материалы разработка технологии неавтоклавного пенобетона с применением в качестве дисперсной арматуры базальтовых волокон является одной из важнейших задач.

Отсутствие практики промышленного производства неавтоклавных пенобетонов с базальтовыми волокнами, острый дефицит в таких бетонах определяет актуальность, научную и практическую значимость выдвинутой проблемы.

Работа выполнялась в рамках «Программы развития ФГОУ ВПО СФУ на 2007–2010 годы» по проекту «Пенобетоны дисперсно-армированные базальтовым волокном» и в рамках Всероссийского конкурса «Студенты, аспиранты и молодые ученые – малому наукоемкому бизнесу – Ползуновские гранты».

Степень разработанности проблемы.

Среди исследователей-теоретиков, работающих над созданием дисперсно-армированных бетонов и конструкций на их основе, можно

выделить отечественных ученых Ю. М. Баженова, О. Я. Берга, Г. И. Бердичевского, И. В. Волкова, А. А. Гвоздева, Ю. В. Зайцева, П. Г. Комохова, Л. Г. Курбатова, И. А. Лобанова, К. В. Михайлова, Ф. Н. Рабиновича, В. В. Тимашева, Е. М. Чернышова и зарубежных ученых – Э. Ву, А. Келли, Дж. Купера, С.Т. Милейко, Г.С. Холистера.

Большую работу в области дисперсно-армированных бетонов ведут ученые Ростовского государственного строительного университета под руководством Л. В. Моргун, а также Научно Исследовательский Институт Железобетона.

Проведенный анализ научных публикаций по вопросам производства пенобетонов неавтоклавного твердения показал, что неавтоклавные пенобетоны различных плотностей имеют недостатки в физико-механических характеристиках.

Базальтовое волокно является побочным продуктом получения базальтового ровинга. Возможность использования базальтового волокна в качестве дисперсной арматуры приводит к улучшению физико-механических и эксплуатационных характеристик пенобетонов неавтоклавного твердения и определяет актуальность выбранной темы.

Цель работы:

разработка составов и исследование физико-механических свойств неавтоклавных пенобетонов, дисперсно-армированных базальтовым волокном, на примере базальтов Торгашинского месторождения.

Задачи исследований:

- разработка составов и обеспечение качества структуры неавтоклавного пенобетона, дисперсно-армированного базальтовым волокном;
- исследование процессов структурообразования цементного камня, дисперсно-армированного базальтовым волокном в пенобетонах;
- определение физико-механических характеристик неавтоклавных пенобетонов, дисперсно-армированных базальтовым волокном;
- проведение опытно-промышленных испытаний и разработка технологического регламента по изготовлению пенобетонов неавтоклавного твердения с базальтовым волокном;
- выполнение технико-экономического анализа использования базальтового волокна в качестве дисперсной арматуры для производства неавтоклавного пенобетона.

Научная новизна:

1. Установлено, что по границе цементного камня и базальтового волокна, находящегося в аморфном состоянии, проходит хемосорбционное взаимодействие с появлением дополнительных новообразований, относящихся к низкоосновным гидросиликатам кальция.

2. Установлено, что базальтовое волокно состоит из еще более тонких волокон. На их поверхности в местах механических дефектов создаются

центры кристаллизации, с образованием сети тонких гексагональных пластин и игольчатых кристаллов, срастающихся со сферическими зёрнами цементной системы, дополнительно усиливая действие волокна как дисперсной арматуры. Волокно имеет полую структуру в торцевую часть которой проникают продукты гидратации с образованием кристаллических сростков. Благодаря этому происходит увеличение прочности цементного камня.

3. Установлено, что оптимальная длина волокна равна 12 мм. При такой длине волокна происходит армирование не только одной межпоровой перегородки, но и армирование смежных перегородок пенобетона, которое позволяет связать несколько пор в один ассоциат.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны и предложены составы неавтоклавного пенобетона, дисперсно-армированного базальтовым волокном, различной плотности, которые отличаются от известных тем что, для улучшения физико-механических и эксплуатационных свойств, содержат базальтовое волокно в количестве от 0,1 до 0,5 % от массы цемента (патент №2396233), как для монолитного пенобетона, так и для блоков, с технологическими и эксплуатационными показателями, которые соответствуют нормативным физико-механическим характеристикам для пенобетонов неавтоклавного твердения. Значительно улучшены физико-механические показатели пенобетонов: прочностные характеристики при сжатии для марки D400 $1,4 \div 1,7$ МПа, для марки D800 $4,00 \div 4,53$ МПа, при изгибе для марки D400 $0,75 \div 0,88$ МПа, для марки D800 $2,10 \div 2,31$, повышение марки по морозостойкости до F100 и уменьшение усадки при высыхании до 1,37 мм/м.

2. Предложена технологическая схема производства неавтоклавного пенобетона, дисперсно-армированного базальтовым волокном.

Объект исследований.

Пенобетоны, дисперсно-армированные базальтовым волокном.

Предмет исследований.

Взаимодействие базальтового волокна с цементной матрицей и влияние его на физико-механические свойства дисперсно-армированных пенобетонов

Положения выносимые на защиту:

критерии структурообразования пенобетонов, дисперсно-армированных базальтовым волокном:

- результаты исследования структуры цементного камня пенобетона, дисперсно-армированного базальтовым волокном;
- составы и технология производства дисперсно-армированного пенобетона;
- результаты опытно-промышленного апробирования технологии производства пенобетонов, дисперсно-армированных базальтовым волокном.

Апробация работы.

Основные результаты проведенных исследований были доложены и обсуждены:

- на ежегодных научно-технических конференциях КрасГАСА 2006, 2007 г;
- Всероссийской конференции «Актуальные проблемы строительной отрасли»: 65-я научно-техническая конференция НГАСУ (г. Новосибирск, 2008 г.);
- Всероссийском конкурсе «Студенты, аспиранты и молодые ученые – малому наукоемкому бизнесу (Ползуновские гранты) (г. Барнаул, 2009 г.);
- Международной научно-технической конференции «достижения и проблемы материаловедения и модернизации строительной индустрии. Материалы 15 академических чтений РААСН»: (г. Казань, 2010 г.).

Личный вклад автора.

Вклад автора состоит: в обосновании выбора направления исследования; разработке составов дисперсно-армированных пенобетонов на основе местных материалов; обобщении полученных результатов, изложенных в диссертационной работе; выпуске опытно-промышленной партии блоков из дисперсно-армированных пенобетонов и внедрении результатов в производство.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 7 работах, в том числе в двух публикации в изданиях, рекомендованных ВАК. Получен патент на изобретение № 2396233.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов, списка используемой литературы из 134 наименований, изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 30 рисунков и 25 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, поставлена цель работы, определены задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава содержит аналитический обзор научной литературы посвященной разработкам дисперсно-армированных бетонов. Проведен обзор различных видов дисперсной арматуры, выявлены их преимущества и недостатки. Рассмотрены вопросы производства пенобетонов по различным технологиям и возможность применения в них дисперсного армирования.

Во второй половине XIX столетия отечественными научно-исследовательскими институтами, проектными и строительными организациями выполнен значительный объем работ, позволяющий выделить проблему дисперсного армирования бетонов в направлении с широкими потенциальными возможностями для его реализации в строительном производстве. Подтверждением этому являются многочисленные примеры

успешного применения дисперсно-армированных бетонов не только в практике зарубежного строительства, но и в нашей стране.

Структура пенобетона при использовании базальтовых волокон приближается к структуре пенобетона, армированного стальной сеткой, но базальтопенобетон имеет более высокую прочность, так как армирующее его базальтовое волокно обладает более высокой степенью дисперсности в армируемом камне, а само волокно имеет более высокую прочность, чем стальная сетка. Базальтопенобетонные конструкции могут выдерживать большие напряженные деформации благодаря тому, что само волокно при растяжении пластических деформаций не имеет, а по упругости превосходит сталь. При этом относительная деформация цементного камня без образования трещин достигает $0,9 \div 1,1$ %. Такая деформация в $45 \div 55$ раз превышает граничное удлинение неармированного цементного камня. При использовании волокон прочность практически не уменьшается. Увеличение прочности цементного камня происходит за счет влияния базальтового волокна на концентрации напряжений в местах ослабленных структурными дефектами, либо повышенной пористости.

Предложено вводить в пенобетоны дисперсную арматуру (базальтовое волокно), которая существенно повышает их физико-механические и эксплуатационные показатели.

Во второй главе приведены основные характеристики сырьевых материалов, применяемых в диссертационных исследованиях, а именно: в качестве вяжущего использовался портландцемент марки ПЦ400-Д0 Ачинского цементного завода, в качестве мелкого заполнителя – песок Березовского месторождения с модулем крупности $M_{кр} = 1,85$, в качестве порообразователя – пенообразующая добавка пеноконцентрат – Laston представляющий собой водный раствор животной крови со стабилизаторами, дисперсная арматура – базальтовое волокно произведенное из базальтов Торгашинского месторождения. Базальтовое волокно, по данным рентгенофазного анализа, в основном представлено кремнеземом, имеющим аморфное строение.

Приводятся основные сведения о методах и методиках исследований исходных сырьевых материалов, химический и минералогический состав, излагается методика статистической обработки результатов исследований.

Для изучения физико-химических процессов структурообразования применяли комплексные методы исследования рентгенофазового и микроскопического анализа. Использовали следующие установки: дифрактометр D8 ADVANCE (Германия), сканирующий электронный микроскоп JEOLJSM 7001F (Япония), оптический микроскоп Leika DML .

Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, были обработаны в программе STATISTIKA, математическая обработка данных осуществлялась в программе Mathcad.

Исследование основных физико-механических и эксплуатационных свойств пенобетонов, дисперсно-армированных базальтовыми волокнами, проводилось в соответствии с методиками действующих стандартов.

В третьей главе рассмотрены теоретические основы получения пенобетонов с дисперсным армированием базальтовыми волокнами, произведенными из базальтов Торгашинского месторождения.

Получение пенобетона с увеличенными прочностными показателями связано с факторами, определяющими совместную работу заполнителя и дисперсной арматуры. Мелкодисперсные частицы дисперсной арматуры повышают сложность системы, способствуют упорядочению субмикроструктуры, так как проявляется, начиная с самого раннего возраста, рост активности. Тем самым волокна улучшают микроструктуру, снижают внутренние напряжения и усадку цементного камня. Возможность влиять на уровни структуры определяется размерами частиц волокон, которые интегрируются в единичную систему. Настраиваемая структура из неупорядоченного состояния переходит в микрооднородное.

Помимо этих процессов на поверхности волоконистых частиц базальтового волокна происходят процессы хемосорбционного взаимодействия. Значительный эффект проявляется вследствие участия этих частиц в реакциях гидратации с увеличением объемов более прочных и устойчивых продуктов реакции.

Поэтому в качестве армирующих элементов принято базальтовое волокно, способное хемосорбционно взаимодействовать с продуктами гидратации цемента, имеющее низкую плотность, достаточно высокую коррозионную стойкость и как результат, высокую эффективность.

Исследование базальтовых волокон на оптическом микроскопе показало, что они имеют форму трубчатых волокон бурого цвета длиной 10÷20 мм, толщиной 15÷20 мкм с ровной поверхностью, полых, блестящих, что соответствует базальтовым стеклам плагиоклазового состава с показателем преломления 1,5 %. Химический состав и рентгенофазовый анализ базальтового волокна, представлены, соответственно, в табл. 1 и на рис. 1

Таблица 1

Химический состав базальтового волокна

Месторождения (горные породы)	Содержание оксида, %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	п.п. п
Торгашинское (базальты, диабазы)	48,1 5	16,72	12,66	9,61	4,36	3,84	1,81	1,60	1,25
Кайеркан, угольный разрез №2 (базальты)	51,4 0	14,83	10,26	11,45	5,92	2,42	1,20	0,84	1,68

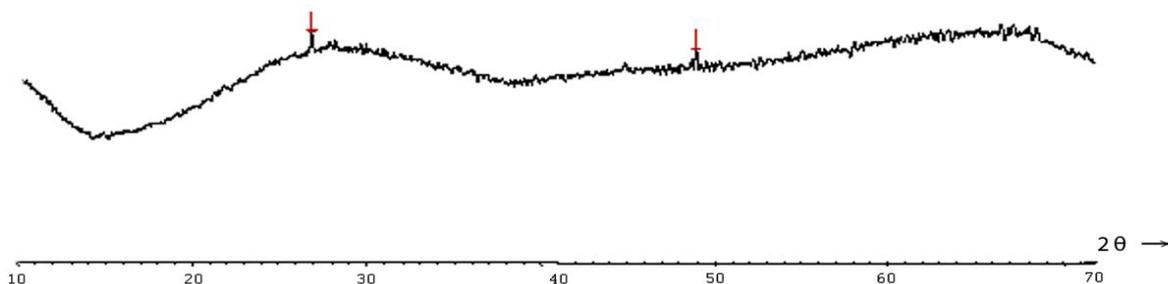


Рис. 1. Диффрактограмма базальтового волокна

Исследования влияния длины и количества вводимого волокна в цементную композицию оценивались по пределам прочности при изгибе и сжатии в возрасте 28 суток.

Результаты исследований представлены в табл. 2.

Таблица 2

Прочность цементных композиций

№ опыта	Количество волокна, % от массы цемента	Длина волокна, мм	Прочность цементных композиций в возрасте 28 суток, МПа	
			при изгибе	при сжатии
1(контрольный)	-	-	11,7	60,0
2	0,10	6	15,4	62,5
3	0,10	12	17,5	64,9
4	0,10	18	18,3	67,8
5	0,15	6	23,1	75,3
6	0,15	12	24,6	77,8
7	0,15	18	25,3	78,4
8	0,20	6	28,5	85,4
9	0,20	12	30,7	88,6
10	0,20	18	29,5	86,7
11	0,25	6	29,0	85,7
12	0,25	12	27,7	80,3
13	0,25	18	26,2	79,6

Анализируя полученные результаты исследований цементных композиций армированных базальтовыми волокнами длиной от 6 до 18 мм (0,10÷0,25 % от массы цемента), можно сделать вывод, что наилучшими показателями к 28 суткам твердения имел базальтоцемент с длиной волокна 12 мм и количеством вводимого волокна 0,2 % от массы цемента. Прочность на изгиб и сжатие такой композиции возросла по сравнению с прочностью неармированного цементного камня на 100÷160 % при изгибе и на 35÷50 % при сжатии. Дальнейшее повышение содержания волокна в композиционном материале приводит к образованию комовых включений приводящих к созданию неравномерной структуры композиции, в результате чего уменьшается прочность как при изгибе, так и при сжатии.

Для сравнения прочностных показателей цементных композиций, в систему вводились базальтовые и полипропиленовые волокна в равных количествах. В/Ц композиций 0,25. Результаты физико-механических представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Прочность при изгибе цементных композиций

Прочность при изгибе цементной композиции, МПа								
Цемент			Цемент с базальтовым волокном (0,2%)			Цемент с полипропиленовым волокном (0,2%)		
7 сут.	28 сут.	60 сут.	7 сут.	28 сут.	60 сут.	7 сут.	28 сут.	60 сут.
6,5	11,7	11,9	10,2	30,7	37,6	9,7	23,4	24,1

Таблица 4

Прочность при сжатии цементных композиций

Прочность при сжатии цементной композиции, МПа								
Цемент			Цемент с базальтовым волокном (0,2%)			Цемент с полипропиленовым волокном (0,2%)		
7 сут.	28 сут.	60 сут.	7 сут.	28 сут.	60 сут.	7 сут.	28 сут.	60 сут.
42,1	60,0	62,1	56,9	88,6	97,5	60,1	87,4	90,0

Анализ полученных результатов испытаний показал, что цементные образцы, дисперсно-армированные базальтовыми и полипропиленовыми волокнами, имеют прирост прочности в сравнении с контрольными образцами как в возрасте 7 суток, так и в возрасте 60 суток. Сравнение армированных цементных образцов выявило больший прирост прочности цементных композиций с базальтовым волокном, что, в свою очередь, не может объясняться лишь параметрами армирующего волокна.

Зависимость прочности на сжатие и изгиб и выявления оптимального состава цементной композиции, дисперсно-армированной базальтовым волокном представлена на рис. 2, полученным методом математического планирования эксперимента.

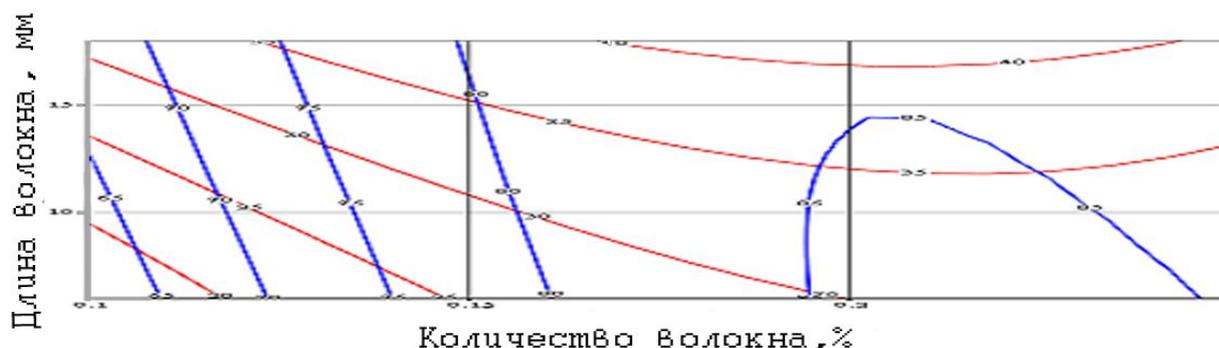


Рис. 2. Изолинии оптимального состава цементной композиции дисперсно-армированной базальтовым волокном

На рис. 2 хорошо видно, что при содержании волокна от 0,18 до 0,23 % от массы цемента и длине волокна от 12 до 15 мм наблюдаются максимальные значения прочности при изгибе и сжатии.

Для оценки качества структуры цементирующего вещества межпоровых перегородок дисперсно-армированного пенобетона и анализа поведения базальтового волокна в цементной системе во времени проводились исследования дисперсно-армированного базальтовым волокном цементного камня, в сравнении с контрольными образцами – цементным камнем без него.

Были проведены следующие исследования: рентгенофазовый анализ продуктов гидратации цементного камня, дисперсно-армированного базальтовым волокном, и контрольного образца цементного камня в возрасте 28 суток и 36 месяцев; выполнен микроструктурный анализ образцов аналогичных составов в возрасте 36 месяцев.

Были сделаны следующие предположения:

- базальтовое волокно, состоящее из аморфной фазы, что подтверждено дифрактограммой исходного волокна, (рис. 1), его химический состав приведен в табл. 1, должно активно хемосорбционно взаимодействовать с продуктами гидратации цемента с появлением новообразований относящихся к низкоосновным гидросиликатам кальция CSH(B), которые упрочняют структуру цементного камня;

- поскольку пенобетоны обладают повышенной трещиностойкостью, в следствие усадочных деформаций, наиболее целесообразно применение дисперсного армирования базальтовыми волокнами, что должно повысить их стойкость и эксплуатационные свойства.

На рис. 3 представлены дифрактограммы контрольных образцов цементного камня в возрасте 28 суток и 36 месяцев. Дифрактограммы дисперсно-армированного базальтовым волокном цементного камня приведены на рис. 4 соответственно.

Сравнительный анализ дифрактограмм продуктов гидратации показал ряд дифракционных отражений, соответствующих следующим эффектам: снижению содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по сравнению с соответствующим пиком на дифрактограмме контрольного образца цементного камня ($d=0,489$ нм) и повышению пика $d=0,218$ нм, который можно отнести к присутствию гидросиликатов кальция общей формулы CSH(B). В отражениях $d=0,262$ нм и $d=0,148$ нм наблюдается увеличение не только высоты, но и площади пика на дифрактограмме продуктов гидратации системы «цементный камень+базальтовое волокно», которое вероятно, связано с наложением отражений $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и гидроосиликатов кальция, что происходит при одновременном уменьшении аморфной фазы. Дополнительно появились значительные дифракционные отражения $d=0,228$ нм и $d=0,176$ нм, соответствующие кварцу.

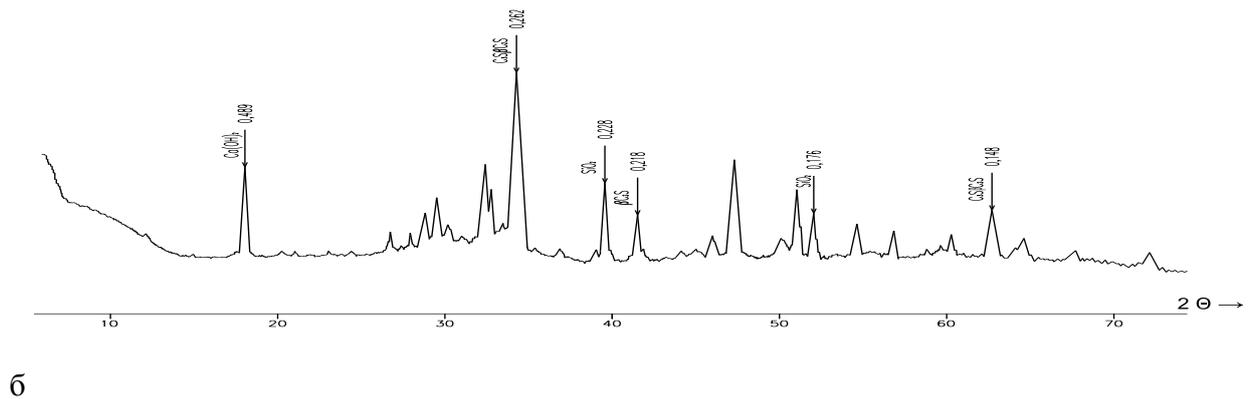
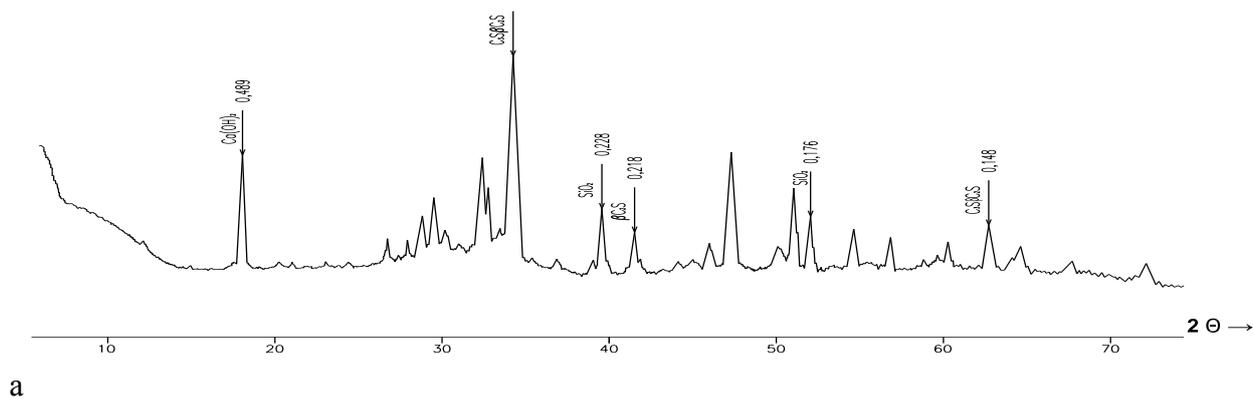


Рис.3. а - дифрактограмма цементного камня, в возрасте 28 суток; б - дифрактограмма цементного камня, армированного базальтовым волокном в возрасте 28 суток.

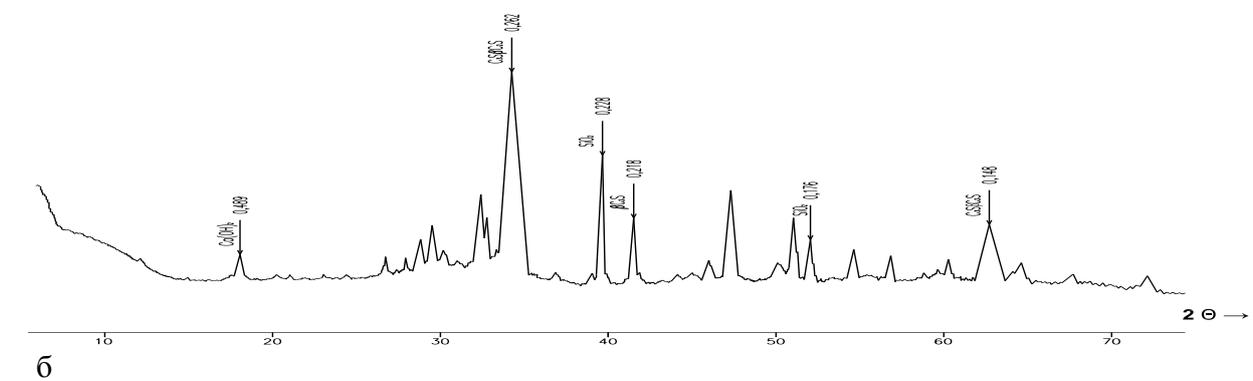
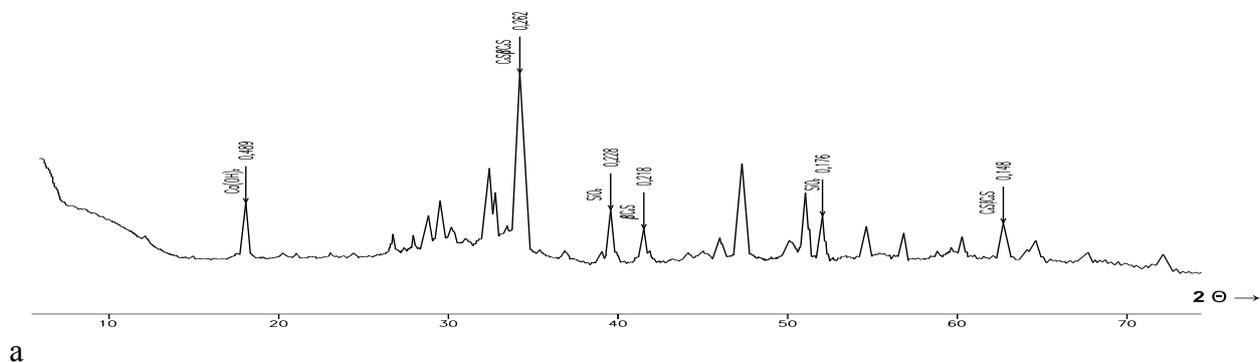


Рис.4. а - дифрактограмма цементного камня, в возрасте 36 месяцев; б - дифрактограмма цементного камня, армированного базальтовым волокном в возрасте 36 месяцев

На основании этих данных можно предположить, что взаимодействие волокна с цементной системой происходит только в поверхностном слое с сохранением целостности базальтового волокна во времени. Очевидно, что основность гидросиликатов на границе фаз «волокно–цементный камень» понижается а, следовательно, повышается долговечность волокна и системы в целом.

Для составления более объективной характеристики объекта была исследована его микроструктура, причем рассматривались взаимосвязанные места в направлении залегания волокон в цементной системе, т.е. производилась панорамная съемка (рис.5-8).

Изучение морфологии новообразований в материале позволило установить, что структура образца цементного камня, дисперсно-армированного базальтовым волокном, представлена в основном сросшимися агломератами, состоящими из сферических (размером $5\div 25$ мкм) и зернистых образований, цементной матрицы, между которыми расположены волокна, на поверхности которых присутствуют тонкие, гексагональные пластины и игольчатые кристаллы, срастающиеся с цементными зёрнами, и являющиеся продуктами взаимодействия поверхностного слоя волокна и продуктами гидратации цементной системы.

Следует отметить, что новообразования имеют большую плотность, чем кристаллы цементного камня. Волокно пронизывает сросшиеся агломераты, состоящие из округлых зёрен CSH. Новообразования в основном расположены по границе цементного камня и базальтового волокна, состоящего в основном из аморфного кремнезема, что свидетельствуют о хемосорбционном взаимодействии с появлением дополнительных новообразований, возможно относящихся к низкоосновным гидросиликатам кальция (рис. 5).

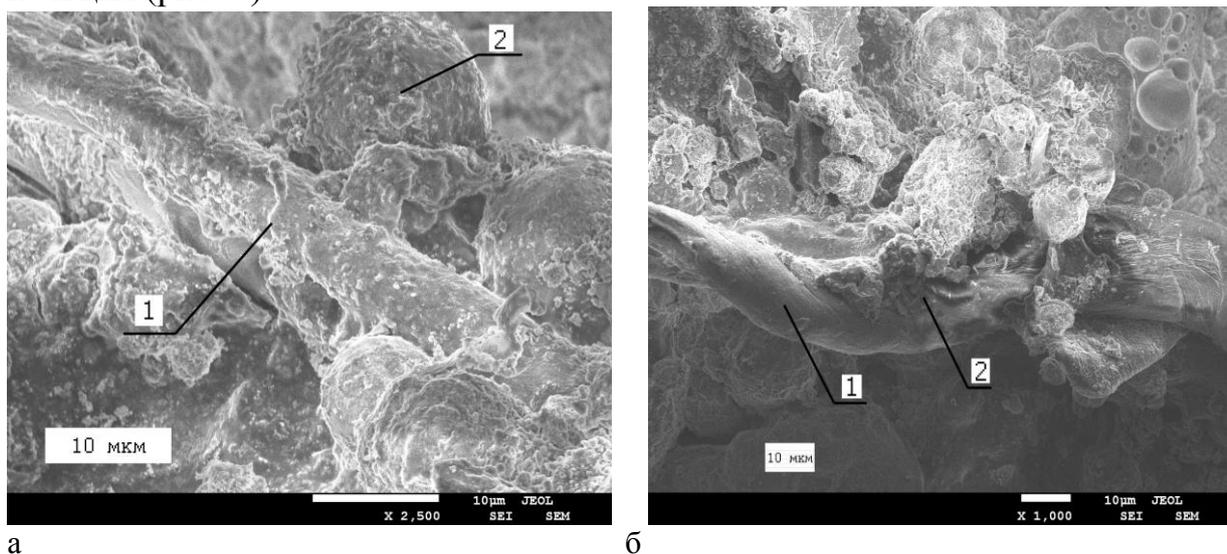
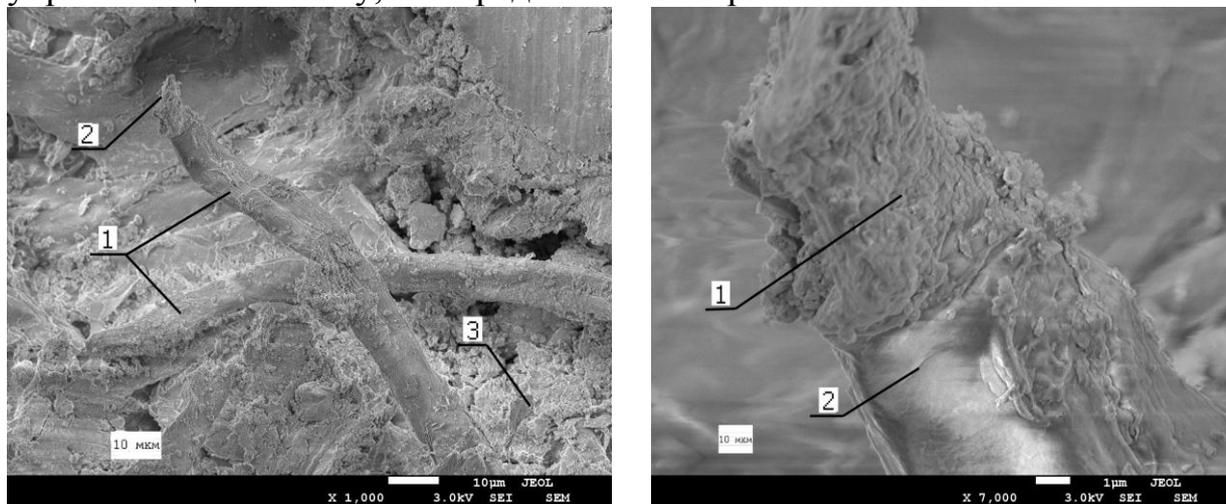


Рис. 5. Сканирующая электронная микроскопия цементного камня в возрасте 36 месяцев, дисперсно-армированного базальтовым волокном: а: 1 – базальтовое волокно; 2 – цементная система; б: 1 – базальтовое волокно; 2 – кристаллические сrostки новообразований.

Обращает на себя внимание явно видимый эффект «наполненности» волокна в его торцевых частях. Поскольку волокна имеют полую структуру наружным диаметром $10\div 15\mu\text{м}$ и длиной 12 мм, представляя тем самым тонкую длинную пору, в торцевую часть которой проникают продукты гидратации цемента с образованием кристаллических сростков, упрочняющих систему, что представлено на рис. 6.



а

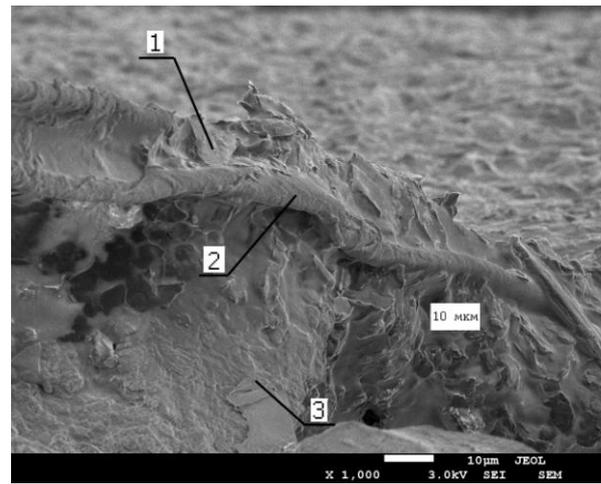
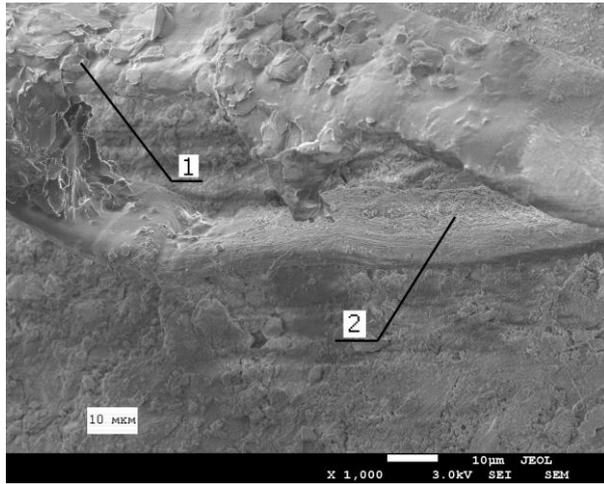
б

Рис. 6. Сканирующая электронная микроскопия цементного камня в возрасте 36 месяцев, дисперсно-армированного базальтовым волокном: а: 1 – базальтовое волокно; 2 – кристаллические новообразования; 3 – цементная система; б: 1 – кристаллические новообразования; базальтовое волокно.

Сеть тонких кристаллов, образующихся на поверхности цементной матрицы, дополнительно усиливает действие волокон как дисперсной арматуры, так как для разрыва содержащего ее пенобетона необходимо приложить большие усилия. Таким образом, увеличивается прочность, соответственно и долговечность цементного камня пенобетона, особенно прочность при изгибе.

По данным В. В. Тимашева, активная аморфная кремнекислота, введенная в состав цемента, способствует развитию тончайших игольчатых кристаллов на поверхности цементных зерен, а также крупных, но чрезвычайно тонких гексагональных пластин в межзерновом пространстве. Пластинчатые кристаллы такой формы и размеров наблюдаются только в системе аморфного кремнезема. Нечто подобное развивается в системе «базальтовое волокно-цементный камень» (рис. 7). По составу они являются гидросиликатами кальция низкой основности (порядка 0,2 – 0,4), образовавшимися в зонах раствора, пересыщенных ионами Si^{4+} . Количество таких кристаллов и гелеобразной массы возрастает с увеличением содержания оксида кремния, а количество кристаллов гидроксидов кальция и карбоната кальция уменьшается.

Надо отметить, что такие процессы характерны не для всего объема цементного камня, а только по границе раздела «волокно-цементный камень».

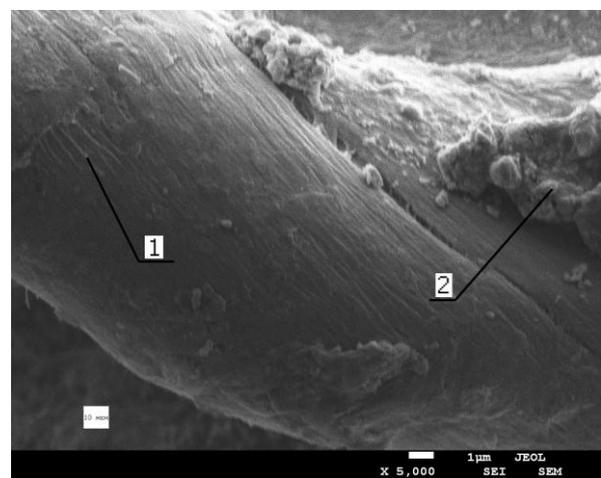
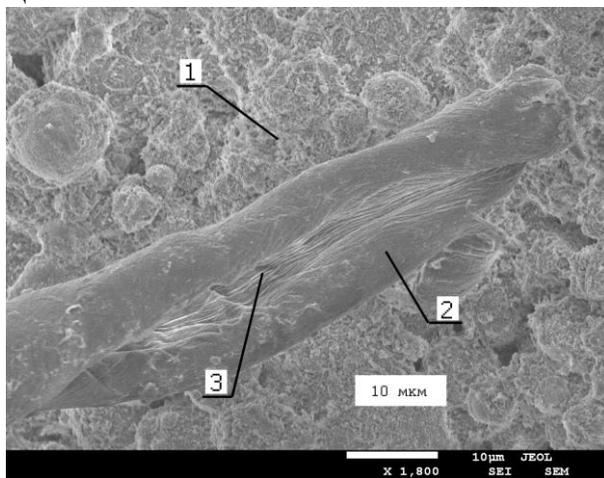


а

б

Рис. 7. Сканирующая электронная микроскопия цементного камня в возрасте 36 месяцев, дисперсно-армированного базальтовым волокном: а: 1 – пластинчатые кристаллы новообразований; 2 – базальтовое волокно; б: 1 – пластинчатые кристаллы новообразований; 2 – базальтовое волокно; 3 – цементная система.

Из рис. 8 видно, что базальтовое волокно состоит из еще более тонких волокон. На их поверхности в местах механических дефектов создаются центры кристаллизации, с образованием сети тончайших вытянутых кристаллов, срастающихся со сферическими зёрнами цементной системы, дополнительно усиливая действие волокна как дисперсной арматуры. Благодаря этому происходит увеличение прочности и долговечности цементного камня.



а

б

Рис.8. Сканирующая электронная микроскопия цементного камня в возрасте 36 месяцев, дисперсно-армированного базальтовым волокном а: 1 – цементная система; 2 – базальтовое волокно; 3 – тончайшие волокна; б: 1 – тончайшие волокна; 2 – кристаллические новообразования.

Исследованиями структуры новообразований установлено, что они образуют гелеобразный пространственно связанный каркас, дополнительно усиленный армирующим действием волокон, который, по мнению А. В. Волженского, обеспечивает высокие прочностные показатели материалов. Такая гелеобразная структура характеризуется большой релаксируемостью напряжений, а следовательно, большой возможностью пластических

деформаций и тем самым повышенной трещиностойкостью, что особенно важно при изготовлении пенобетонов неавтоклавного твердения.

Подобная структура, где микротрещины развиваются медленно в результате их блокирования в процессе пластических деформаций, должна обеспечить пенобетонам высокие эксплуатационные свойства, хорошую морозостойкость и долговечность.

В четвертой главе приводятся результаты исследования физико-механических и эксплуатационных показателей пенобетонов и пенобетонов, дисперсно-армированных базальтовыми волокнами.

Так как дисперсно-армированные пенобетонные смеси способны к самопроизвольному формированию агрегированных структур в виде кластеров, поэтому размеры последних должны быть пропорциональны геометрическим параметрам волокон, а эффективность их упрочнения в период преобладания вязких связей должна зависеть от длины армирующих волокон. Следовательно, геометрические параметры волокна могут влиять на кинетику пластической прочности дисперсно-армированных пеносмесей.

Введение волокна в пенобетонные смеси весьма существенно влияет на меру связности всех типов дисперсных частиц друг с другом. Протяженные поверхности раздела фаз (волокна) изменяют энергетические и геометрические параметры вязких связей между частицами твердой фазы на раннем этапе структурообразования. Это выражается в повышении пластической прочности пеносмесей. Установлено влияние базальтового волокна на агрегативную устойчивость пеносмесей. Смеси содержащие волокно не имели признаков расслоения и осадки.

В табл. 5 приведены показатели пластической прочности пенобетонных и дисперсно-армированных смесей, которые сохранили или в допустимых пределах изменили поровую структуру, полученную при перемешивании.

Таблица 5

Пластическая прочность пенобетонных и дисперсно-армированных смесей

Время твердения смеси, мин	Пластическая прочность, Па		
	Пенобетон	Пенобетон с полимерным волокном	Пенобетон с базальтовым волокном
1	2	3	4
5	58,5	69,7	66,3
10	66,2	72,1	69,8
15	68,1	78,9	74,2
20	74,3	86,7	80,7
25	76,5	99,1	92,5
30	77,5	108,3	94,6
35	80,1	112,9	98,5
40	81,5	116,5	112,5
45	87,8	138,9	136,8

1	2	3	4
50	88,9	140,0	139,4
60	92,4	141,8	146,5
75	94,5	147,8	152,3
90	98,6	166,5	189,3
105	114,4	180,8	201,9
120	125,7	257,0	312,1
135	137,6	268,2	322,8
150	147,8	316,9	349,6
165	155,2	419,6	598,6
180	163,8	494,8	755,0
195	280,3	735,0	1047,2

Анализируя результаты можно сделать вывод, что базальтовые волокна не пронизывают поры, а проходят по межпоровым перегородкам, что с одной стороны ведет к увеличению пластической прочности смеси, а с другой к уплотнению частиц в межпоровых перегородках пенобетона. Смеси содержащие волокно, не имели признаков расслоения и осадки.

Прочность пенобетона зависит от структуры твердой фазы образующейся в процессе его твердения в результате взаимодействия дисперсных частиц вяжущего и заполнителя, обусловленного силами молекулярного взаимодействия.

При твердении пенобетона частицы кремнеземистого компонента, имеющие сравнимую с цементом дисперсность, растворяются в поверхности и вступают во взаимодействие с продуктами гидролиза и гидратации вяжущего с образованием низкоосновных гидросиликатов и гидроалюминатов кальция.

Последние вследствие близости структур со структурой кремнеземистого компонента срастаются с ним по всей поверхности, образуя сплошной контакт. Разрастающиеся частицы кремнеземистого компонента, перемещаясь в жидком пересыщенном растворе реагирующих веществ, сближаются между собой и контактируют с образованием прочного кристаллического сростка. Аналогичным образом контактируют между собой зерна цемента. В промежутках между зернами цемента и песка образуется коагуляционная структура синтезированных гидратных соединений кальция.

Вместе с тем высокая прочность гидросиликатов кальция, конденсационно-кристаллизационный характер структуры твердой фазы, прочное срастание продуктов реакции вяжущего с поверхностью зерен кремнеземистого компонента, высокая степень кристаллизации продуктов реакции обеспечивают пенобетону достаточно высокую прочность при твердении в естественных условиях, в более поздние сроки твердения

По общепринятой терминологии структуры дисперсных частиц, разделенных тонкими жидкими прослойками дисперсной среды, относятся к структурам с «дальней» коагуляцией, а структуры с непосредственным

контактом частиц – к конденсационным или структурам с «ближней» коагуляцией. Переходом от «дальней» коагуляции к «ближней» П. А. Ребиндер, применительно к цементам, рассматривал как временной процесс собирательной рекристаллизации, сопровождающейся образованием конденсационно-кристаллизационной структуры контактов срастания. В нормальных условиях твердение пенобетона, изготавливаемого преимущественно на цементном вяжущем, растягивается во времени и имеет экспоненциальный возрастающий характер. Это значит, что через некоторое время прочность неавтоклавного пенобетона может достигнуть прочности автоклавного газобетона, практически не изменяющейся или часто снижающейся во времени вследствие карбонизации и других воздействий.

Решением данной задачи может стать введение базальтового волокна в пенобетоны неавтоклавного твердения. Согласно проведенным исследованиям введение базальтового волокна ускоряет процесс твердения, результатом чего является повышение прочности пенобетонов.

Изменение прочности при сжатии во времени для дисперсно-армированных пенобетонов плотностью D 400 и D 800 представлены на рис. 9 а и б соответственно.



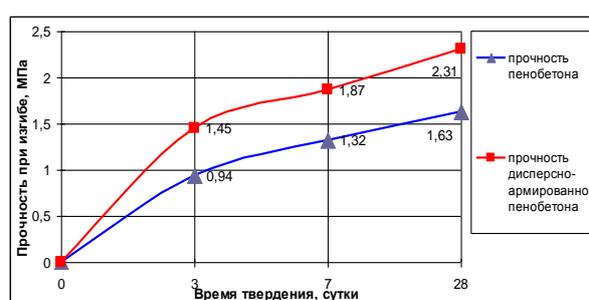
а

б

Рис. 9. Предел прочности при сжатии: а - плотностью D 400; б - плотностью D 800

В результате проведенных исследований прирост прочности пенобетонов, дисперсно-армированных базальтовым волокном, на 3 сутки твердения составляет практически 100 % от обычного пенобетона. Прирост прочности при сжатии на 28 сутки твердения для плотности D 400 составляет 54 %, для плотности D800 составляет 36 %.

Изменение прочности при изгибе во времени дисперсно-армированных пенобетонов плотности D400 и D800 представлены на рис. 10 а и б соответственно.



а

б

Рис. 10. Предел прочности при изгибе: а - плотностью D 400; б - плотностью D 800

Анализ полученных результатов показал, что прирост прочности при изгибе для марки по плотности 400 69 %, а для марки D800 – 42 %.

В настоящее время для пенобетонов морозостойкость является единственным нормируемым показателем их долговечности. Особенность пенобетона – большое количество замкнутых пор, заполняющихся водой лишь при особых условиях. Вследствие этого даже после нескольких месяцев выдерживания образцов пенобетона в воде середина образцов остается относительно сухой. Система замкнутых, не заполняемых водой пор в пенобетоне, образует буферные емкости, в которые перемещается избыток воды. Таким образом, структура пенобетона создает предпосылки для его высокой морозостойкости.

Результаты испытаний представлены на рис. 11

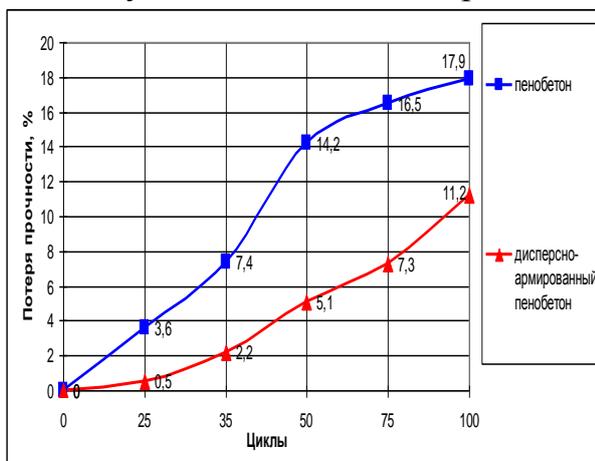


Рис. 11. Морозостойкость пенобетона и дисперсно-армированного пенобетона плотностью D800

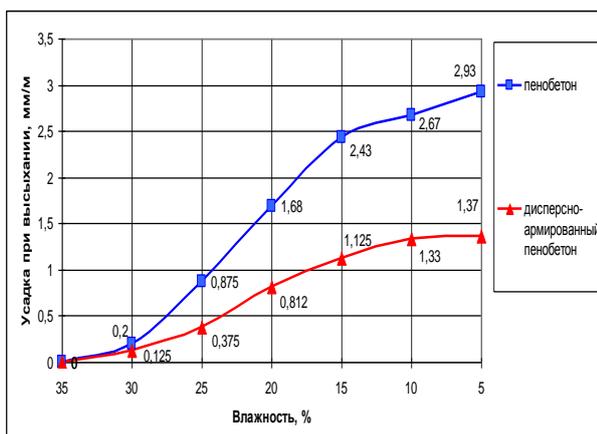


Рис. 12. Усадка при высыхании пенобетона и дисперсно-армированного пенобетона

Несущественное влияние на величину λ оказывает вид вяжущего, условия твердения и другие факторы. Это объясняется тем, что материал стенок, образующих поры, состоит из цементного камня или близкого к нему гидросиликатного каркаса. Поэтому, величина пористости и соответственно средней плотности преимущественно определяет теплопроводность пенобетона.

Результаты испытаний показали, что пенобетон, дисперсно-армированный базальтовым волокном имеет морозостойкость более F100.

Пенобетоны неавтоклавного твердения, имея пористую структуру, более подвержены усадочным явлениям и нуждаются в улучшении показателя усадка. Результаты испытаний усадки представлены на рис. 12. Как видно из рис. 12, усадка пенобетона более чем в два раза превышает усадку дисперсно-армированного пенобетона. Это объясняется сцеплением бетона с волокном, которое снижает внутренние напряжения в теле пенобетона, тем самым предотвращая разрушения. Свойства пенобетона взаимосвязаны между собой. Так, коэффициент теплопроводности (λ) в сухом состоянии зависит в основном от величины средней плотности.

Результаты исследований теплопроводности пенобетонов и пенобетона, дисперсно-армированного базальтовым волокном плотностью D 400 и D 800 представлены в табл. 6

Таблица 6

Результаты испытаний пенобетона и дисперсно-армированного пенобетона на теплопроводность

Наименование показателя	Результаты испытаний	
	Пенобетон	Дисперсно-армированный пенобетон
Коэффициент теплопроводности, В/(м·°С), не более, в сухом состоянии плотностью D 400	0,095	0,097
Коэффициент теплопроводности, В/(м·°С), не более, в сухом состоянии плотностью D 800	0,176	0,181

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что коэффициент теплопроводности пенобетона, дисперсно-армированного базальтовым волокном незначительно выше обычного пенобетона.

В пятой главе приведена технологическая линия производства неавтоклавного пенобетона, дисперсно-армированного базальтовым волокном. За основу взята технологическая линия существующего завода производительностью 20 тыс. м³ в год.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Оптимальное содержание и длина армирующих базальтовых волокон (0,2 % от массы цемента и длиной 12 мм), позволяет получить высокие прочностные показатели дисперсно-армированного цементного камня на изгиб (увеличение на 160%) и на сжатие (увеличение на 47%), в сравнении с неармированными волокнами цементным камнем.

2. На границе цементного камня и базальтового волокна, находящегося в аморфном состоянии, происходит хемосорбционное взаимодействие с продуктами гидратации цемента, с образованием тончайших игольчатых кристаллов на поверхности цементных зерен, а также, крупных, но чрезвычайно тонких гексагональных пластин в межзерновом пространстве, упрочняющих систему целиком.

3. В торцевую часть базальтового волокна проникают продукты гидратации цемента с образованием кристаллических сростков упрочняющих систему целиком.

4. Базальтовое волокно состоит из еще более тонких волокон. На их поверхности в местах механических дефектов создаются центры кристаллизации, с образованием сети тонких гексагональных пластин и игольчатых кристаллов, срастающихся со сферическими зёрнами цементной системы, дополнительно усиливая действие волокна как дисперсной арматуры. Благодаря этому происходит увеличение прочности цементного камня.

5. Разработанные составы пенобетона, дисперсно-армированного базальтовым волокном, отличаются от известных тем, что для улучшения

физико-механических и эксплуатационных свойств, содержат базальтовое волокно в количестве от 0,1 до 0,5 % от массы цемента.

6. Дисперсное армирование пенобетона базальтовым волокном улучшает эксплуатационные свойства:

- Прочность при изгибе и сжатии:
марки 400: изгиб на 69%; сжатие на 55%;
марки 800: изгиб на 42%; сжатие на 36%;
- Морозостойкость пенобетонов, дисперсно-армированных базальтовым волокном повышается до 100 циклов.
- Усадочные деформации дисперсно-армированных пенобетонов уменьшаются более чем в 2 раза.
- Теплопроводность пенобетонов, дисперсно-армированных базальтовым волокном для разных плотностей практически не изменяется.

8. Проведена апробация подобранных составов в заводских условиях на технологической линии двух предприятий города Красноярска. В результате испытаний промышленных партий подтверждено то, что производство дисперсно-армированных пенобетонных блоков можно осуществлять по любым технологиям.

9. Высокие показатели деформативности пенобетонов, армированных базальтовым волокном, дают основание предположить, что данный материал возможно применять в сейсмоопасных районах.

Основные положения диссертации изложены в следующих публикациях:

1. **Калугин. И. Г.** Применение ячеистых бетонов в строительстве / И. Г. Калугин, Д. В. Бычков // Проблемы строительства и архитектуры. Сборник материалов 24 региональной научно-практической конференции. Красноярск. Крас ГАСА. 2006 – 55-56.

2. **Калугин И. Г.** Развитие и применение фибробетонов на основе базальтовой фибры / И. Г. Калугин // Проблемы строительства и архитектуры. Сборник материалов 25-ой региональной научно-практической конференции. Красноярск. СФУ. Институт архитектуры и строительства, 2007 – 25-26.

3. **Калугин И. Г.** Дисперсное армирование ячеистых бетонов базальтовым волокном / И. Г. Калугин // Актуальные проблемы строительной отрасли. 65-я научно-техническая конференция. Новосибирск. НГАСУ (Сибстрин), 2008 – 41-43.

4. Васильевская Н. Г. Управление структурой ячеистых фибробетонов /, Н. Г. Васильевская, И. Г. Енджиевская, **И. Г. Калугин** // Известия вузов. Строительство», №11 - 12, 2010 г. С.12-13с

5. Васильевская, Н. Г. Улучшение эксплуатационных свойств ячеистых бетонов /, Н. Г. Васильевская, И. Г. Енджиевская, **И. Г. Калугин** // Материалы XV академических чтений РААСН международной научно-технической конференции. Казань, 2010 г. С.303-306

6. Васильевская Н. Г. Композиция для изготовления дисперсно-армированного пенобетона. / Н. Г. Васильевская, И. Г. Енджиевская, **И. Г. Калугин**,// Патент на изобретение №2396233 от 10.08.2010 г. 5 с.

7. Васильевская Н. Г. Цементные композиции дисперсно-армированные базальтовой фиброй. /, Н. Г. Васильевская, И. Г. Енджиевская, **И. Г. Калугин**// Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. Томск. №3 – 2011 г. С

Подписано в печать «5» сентября 2011 г.
Формат 60x84/16. Уч – изд. л. 1,2
тираж 100 экз. Заказ № 4834

Отпечатано:
Полиграфический центр Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82