

Ф.Н.РАБИНОВИЧ

**КОМПОЗИТЫ
НА ОСНОВЕ
ДИСПЕРСНО
АРМИРОВАННЫХ
БЕТОНОВ**

**Вопросы теории и проектирования,
технология, конструкции**

Москва 2011

Ф.Н.РАБИНОВИЧ

КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНО АРМИРОВАННЫХ БЕТОНОВ

Вопросы теории и проектирования,
технология, конструкции

четвертое издание,
переработанное и дополненное

Предисловие академика РАН И.Н. Фридляндера
Предисловие академика РАН Е.П. Велихова



Издательство Ассоциации строительных вузов
Москва - 2011

Рабинович Ф.Н.

Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: Монография – М.: Издательство АСВ, 2011. – 642 с.

ISBN 978-5-93093-854-8

Рассмотрены теоретические вопросы структурообразования и технологии получения композитов на основе дисперсно армированных бетонов, свойства этих материалов, методы проектирования конструкций с их применением. Особое внимание уделено принципам дисперсного армирования различных модификаций бетонных матриц (цементного камня, цементно-печаного раствора, бетона с крупным заполнителем) при использовании для них в качестве армирующих компонентов стальных, стеклянных, базальтовых волокон, волокон органического происхождения. Рассмотрены области рационального использования указанных композитов в конструкциях различного функционального назначения, в том числе вопросы экономики и примеры реального применения конструкций в практике строительства.

Для студентов и аспирантов, научных и инженерно-технических работников.

Рекомендовано к изданию секцией строительных конструкций зданий Научно-технического совета ОАО "ЦНИИПромзданий"

ISBN 978-5-93093-854-8

© Издательство АСВ, 2011

© Рабинович Ф.Н., 2011



РАБИНОВИЧ ФЕЛИКС НИСОНОВИЧ

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «ЦНИИПромзданий», профессор по совместительству кафедры «Архитектурные конструкции» «МАРХИ», Лауреат Премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, Почетный строитель России, член Научного совета «Механика разрушения» Академии архитектуры и строительных наук РФ, НТС ОАО «ЦНИИПромзданий», аккредитован в качестве эксперта ГК «РоснаноТех».

Родился в 1932г. в г.Бобруйске (Белоруссия), в 1956г. окончил факультет «Промышленное и гражданское строительство» в Куйбышевском (ныне г.Самара) инженерно-строительном институте, до 1963г. работал на строительных объектах Безымянской ТЭЦ Главсредневольтэнергостроя (г.Куйбышев). В 1963г. поступил в очную аспирантуру ЦНИИПромзданий Госстроя СССР. С 1967 по настоящее время работает в этом же институте (ныне ОАО «ЦНИИПромзданий»), совмещает с 2009г. научную работу с педагогической в Московском Архитектурном институте.

Автор более 150 печатных работ, в том числе четырех монографий, включая издание на английском языке, 45 авторских свидетельств и патентов на изобретения, имеет нагрудный знак «Изобретатель СССР», серебряную медаль «ВДНХ СССР», являлся руководителем и с его участием разработаны разделы СНиПа «Инженерные сооружения промышленных предприятий», «Резервуары для нефти и нефтепродуктов. Газгольдеры», руководителем и одним из авторов нормативных документов – Свод правил ЦБ РФ «Сталефибробетонные ограждения защищаемых помещений учреждений Центрального Банка Российской Федерации», в течение двенадцати лет (1998-2000гг.) являлся руководителем проектов Федеральной программы по приоритетному направлению «Композиционные материалы», в рамках которых были разработаны, в том числе наземные сооружения для захоронения радиоактивных отходов, являлся участником многих отечественных и международных конференций и симпозиумов, в том числе второго и третьего международных Форумов по нанотехнологиям (2009-10 гг.).

Область научных интересов: композиционные материалы и конструкции с их применением (теория, технология, проектирование). Область увлечений: фотография, путешествия, книги, почтовые марки.

ПРЕДИСЛОВИЕ - I^{*)}

Во второй половине прошлого столетия в области конструкционного материаловедения получило развитие новое направление, связанное с созданием эффективных композиционных (композитных) материалов, получающих в настоящее время широкое распространение в технике. Появлению современных разновидностей композиционных материалов способствовали в значительной мере исследования, относящиеся к общей механике твердых тел, которые показали, что теоретическая прочность этих тел существенно (на несколько порядков) превосходит показатели прочности реальных материалов. Теперь хорошо известно, что указанные различия являются следствием неизбежных технологических дефектов, возникающих в структуре материалов при их изготовлении.

Гриффитс, исследуя характер хрупкого разрушения стекол, выдвинул гипотезу, в соответствии с которой теоретическая прочность может быть достигнута в стеклянной нити, если ее толщина будет соизмерима с размером молекул, поскольку при этом могут быть созданы предпосылки, исключающие возможность возникновения дефектов в структуре подобной нити.

Технологические задачи, связанные с решением вопросов получения высокопрочных нитей, привлекли к себе внимание многих научно-исследовательских лабораторий в разных странах. Подобные нити-волокна используются теперь в качестве армирующих компонентов в композитах различного функционального назначения.

Области технического использования композиционных материалов весьма обширны: от автомобилестроения, авиационной и космической техники до искусственных костей, используемых при хирургических операциях, бытовых аксессуаров и спортивного инвентаря. Основой этих материалов являются металлические, полимерные, керамические и другие подобные разновидности матриц, для которых в качестве армирующих компонентов используются высокопрочные искусственные волокна органического и неорганического происхождения.

Строительство представляет одну из наиболее материалоемких (и энергоемких) отраслей производственной деятельности во всем мире. Наиболее доступным и широко применяемым материалом в строительстве является бетон и именно бетон, обладающий необходимыми пластическими свойствами при формировании конструкций, мог бы служить основой для создания эффективных разновидностей композиционных материалов, приемлемых для практики строительства.

Настоящая книга посвящена теоретическим и технологическим вопросам получения композитов на основе бетонных матриц, дисперсно армированных искусственными волокнами, методам проектирования конструкций с применением этих материалов, областям их эффективного применения в строительстве.

Бетон обладает определенными специфическими свойствами, характеризующими его как хрупкое твердое тело с химически активной щелочной средой, возникающей в его объеме в процессе гидратации цементных вяжущих. Бетон является гетерогенным материалом с весьма неоднородной структурой его строения. Предельные деформации бетона при растяжении существенно ниже, чем, например, у стали, стекла и полимерных материалов.

Эти свойства бетона предопределили необходимость решения специальных научных задач, относящихся к выявлению оптимальных условий совмещения подобной матрицы с различными видами армирующих волокон, технические характерис-

^{*)}Предисловие - I и следующие за ним Предисловие - II и Введение - I, представленные ранее в третьем издании книги, сохранены также в настоящем издании. Они раскрывают состояние рассматриваемой в книге темы, получившей последующее отражение в четвертом издании - Предисловие - III и IV и Введение - II.

тики которых (прочность, модуль упругости, предельные деформации при растяжении, сопротивление к воздействиям щелочной среды) изменяются в широком диапазоне.

Достоинством рассматриваемой книги является представленный в ней системный подход к решению теоретических и прикладных вопросов, связанных с созданием исследуемых композитов, с оценкой их способности оказывать сопротивление механическим воздействиям, в том числе с учетом экспериментально-теоретического анализа физико-механических и физико-химических взаимодействий, возникающих на границе раздела совмещаемых друг с другом исходных компонентов. Впервые при исследовании подобной системы устанавливается связь между параметрами диспергирования армирующих компонентов в объеме бетона и строением его структурных элементов, позволяющая в целом предопределить условия наиболее эффективной работы композита при его нагружении. Представлены данные, позволяющие объяснить различные аспекты поведения композита, в том числе макроповедение, связанное с ориентацией и анкерровкой волокон, с их разрывом и выдергиванием, с кинетикой трещинообразования и в конечном счете с разрушением материала. Важно, что теоретические и экспериментальные исследования связаны с анализом методов проектирования конструкций, изготавливаемых с применением рассматриваемых композитов.

Заслуживают внимания приведенные в книге различные варианты технологических приемов получения дисперсно армированных бетонов, примеры исполнения несущих и ограждающих конструкций с использованием подобных бетонов. На многие эти решения выданы авторские свидетельства и патенты на изобретение.

Автор книги известный специалист в исследуемой области, его первые работы стояли у истоков возникновения рассматриваемого направления. Предыдущие два издания настоящей книги были встречены с интересом, быстро разошлись и стали библиографической редкостью.

Последние 12 лет (с 1989 по 2000г) автор являлся руководителем ряда проектов, выполнявшихся в рамках целевой федеральной программы по приоритетному направлению "Композиционные материалы". Данные определенной части указанных исследований представлены в настоящей книге

Есть все основания надеется, что настоящая книга будет стимулировать дальнейшее развитие производства композитов на основе дисперсно армированных бетонов, а также поможет многим специалистам научно-исследовательских, проектных и строительных организаций в решении прикладных задач по использованию рассматриваемых композитов в строительстве.

Академик РАН И.Н.Фридландер

ПРЕДИСЛОВИЕ - II

Первое издание настоящей книги вышло в 1989г. Второе дополненное представлено Oxford & IBH Publishing Co. PVT. LTD на английском языке в 1994г. Оба издания посвящены дисперсно армированным бетонам, для которых в качестве армирующих компонентов используются различные модификации высокопрочных (металлических и неметаллических) волокон. Рассмотрены различные аспекты этого направления, в том числе теоретические вопросы структурообразования и технологии получения дисперсно армированных бетонов, свойства этих материалов, приемы проектирования конструкций с их использованием, области применения.

За прошедшие более чем десять лет после издания указанных книг, рассматриваемое в них направление не только не утратило своей актуальности в условиях достаточно жестких экономических реформ, но, напротив, приобрело еще более широкое научное и прикладное значение. Дисперсно армированные бетоны завоевывают свое пространство в условиях конкуренции на современном рынке конструкционных строительных материалов. Информация о данном направлении стала важной для более широкого круга читателей. Эти обстоятельства стали основанием для того, чтобы подготовить третье дополненное издание книги с учетом данных, полученных в последние годы.

В третьем издании книги автор стремился в более полной мере раскрыть структурные различия в весьма разнородных по своему строению модификациях дисперсно армированных материалов, для которых в качестве матрицы могут использоваться в одном случае цементный камень, в другом – цементно-песчаный раствор или бетон с крупным заполнителем; представлялось важным установить также различия в технических принципах, каждый из которых мог бы обеспечить наиболее высокий уровень эффективности дисперсного армирования с учетом особенностей структуры этих достаточно неодинаковых матриц, и, наряду с тем, найти то, что объединяет их и позволяет идентифицировать под одним общим названием.

Структурное построение книги в значительной мере переработано. Ее содержание в отличие от первых двух изданий состоит из трех частей включающих пятнадцать глав, семь из которых написаны заново, в остальные внесены существенные дополнения.

В первой части книги рассматриваются соответственно свойства минеральных вяжущих веществ (цемента и гипса), являющихся основой для получения матриц и оказывающих различное влияние на армирующие компоненты; свойства различных видов используемых для дисперсного армирования волокон, поведение которых также различается при воздействии на них продуктов гидратации вяжущих. Обсуждаются основные принципы технологии получения дисперсно армированных бетонов в зависимости от вида используемых для них армирующих компонентов; существенно расширен круг вопросов, относящихся к теории и проектированию конструкций с применением таких бетонов, а также данные экспериментальных исследований, связанных с изучением свойств подобных материалов.

Вторая часть развивает главным образом теоретические концепции, связанные с моделированием структуры дисперсно армированных бетонов, с особенностями их поведения с учетом не только силовых факторов, но и объема работы (энергии), которую необходимо затратить при разрушении.

В третьей части представлен значительно более широкий объем данных, относящихся к несущим и ограждающим конструкциям из дисперсно армированных бетонов, областям их рационального использования в строительстве, вопросам экономики.

Название книги в третьем издании связано с ключевым выражением “композиты”, идентифицирующим дисперсно армированные бетоны как разновидность более обширного класса конструкционных материалов и, наряду с тем, указывающим на общность принципов, которые принимаются за основу при получении этих материалов, независимо от вида используемых для них исходных компонентов.

Основные концепции, которые получили развитие в третьем издании книги (главы 3 и 6), связаны в значительной мере с оптимизацией уровней дисперсного армирования бетонов, прежде всего за счет создания равновесия между дисперсным распределением макроструктурных ячеек в объеме бетона (соответственно макроструктурных неоднородных включений в бетонной матрице) и распределением (диспергированием) всего объема армирующих компонентов (волокон). Проникновение в процессы, позволяющие обеспечить подобное равновесие, умение управлять ими, по мнению автора, имеют фундаментальное значение для композиционных материалов в целом и для дисперсно армированных бетонов, в частности, особенно если учесть, что структура бетонов отличается существенно более высоким уровнем гетерогенности в сравнении, например, с металлами, полимерами, керамикой.

Одна из задач третьего издания книги (главы 7 и 9) основывалась на стремлении установить граничные условия, при которых уменьшение диаметров волокон и соответственно увеличение удельной поверхности их контакта с бетонной матрицей приводит к качественным изменениям работы армированного бетона, в том числе создает предпосылки для существенного повышения его трещиностойкости, вплоть до обеспечения в конечном счете уровня работы композита без трещин при нагрузках близких к разрушающим с использованием при этом в наиболее полной мере высокой прочности волокон.

Не менее важное значение в рассматриваемых случаях имеет существенное повышение объема работы, которую необходимо затратить на разрушение дисперсно армированного бетона не только при статических, но главным образом при ударных динамических нагрузках, что в свою очередь может быть успешно использовано в процессе проектирования и возведения достаточно обширной номенклатуры строительных конструкций (главы 12-14).

Композиты на основе дисперсно армированных бетонов могут служить также эффективным средством архитектурной выразительности возводимых зданий и сооружений (глава 15).

Первые исследования, относящиеся к рассматриваемой области, были проведены автором в ЦНИИПромзданий Госстроя СССР в начале 60-х годов. При этом следует заметить, что проведение указанных работ и их дальнейшее развитие оказались возможными благодаря в значительной мере вниманию и поддержке первого директора и основателя ЦНИИПромзданий К.Н.Карташова. Автор сохраняет также добрую память о своих первых научных наставниках профессорах А.Е. Шейкине (МИИТ) и Г.И. Бердичевском (НИИЖБ).

Тема, рассматриваемая в настоящей книге, являлась предметом внимания многих специалистов как в нашей стране, так и за рубежом (Англия, США, Франция, Япония и др.).

Во второй половине прошлого 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.

Возникла ситуация, предопределившая целесообразность обобщения накопленного опыта. Работы в данном направлении могли бы быть представлены в серии книг, написанных разными авторами, причем это было бы весьма полезно, так как при этом мог бы быть создан своего рода многомерный эффект, позволяющий оценить данное направление с разных точек зрения и это, безусловно, способствовало бы получению более полных представлений как в области теории, так и прикладных вопросах, связанных с созданием и применением дисперсно армированных бетонов в строительстве.

К числу одной из подобных книг, по замыслу автора, должна относиться предлагаемая монография. В ней представлено обобщение работ, выполненных преимущественно в ЦНИИПромзданий Госстроя СССР и далее в ОАО «ЦНИИПромзданий». Вместе с тем, в некоторых, наиболее интересных, по мнению автора, случаях рассматриваются примеры практического использования дисперсно армированных бетонов, реализованные также другими исследовательскими (отечественными и зарубежными) организациями.

При этом книга остается монографией, написанной с определенной точки зрения и развивающей определенный круг идей. Задачей книги не являлось представление в ней исчерпывающего обзора литературы или изложение всех существующих представлений о данной области. Цитируется лишь литература, имеющая непосредственное отношение к идейному содержанию книги.

Проведенные в ЦНИИПромзданий работы в рассматриваемом направлении осуществлялись специализированной группой и затем сектором «Конструкции из композитных материалов» под руководством и с участием автора. За прошедшие более чем 40 лет после начала этих работ участие в них принимало несколько поколений сменивших друг друга сотрудников. Автор рад возможности выразить здесь свою признательность всем своим коллегам, с кем ему выпала честь совместно работать. При этом автор выражает особую благодарность инженерам Г.И.Максаковой, О.А. Легченковой и И.В.Махновскому, принимавшим активное участие в проведении экспериментальных исследований, обработке полученных данных, непосредственно в проектировании, а также к.т.н. Л.Л.Лемышу, за участие в исследованиях и полезные дискуссии при обсуждении полученных результатов.

Автор благодарен заменившим К.Н.Карташова на посту директора ЦНИИПромзданий профессорам Ю.Н.Хромцу и С.Н.Булгакову, неизменно проявлявшим интерес к проблеме дисперсного армирования бетонов и поддерживающим это направление, и особенно генеральному директору ОАО «ЦНИИПромзданий» профессору В.В.Граневу, внимание которого к данному направлению и поддержка в условиях рыночных преобразований оказались совершенно необходимыми для продолжения рассматриваемых работ.

Автор сохраняет добрую память и чувство благодарности зав. лабораторией покрытий и кровель д.т.н. М.И. Поваляеву и руководителю отдела инженерных сооружений ЦНИИПромзданий к.т.н. Н.А. Ушакову, обеспечившим благоприятные условия для работы специализированной исследовательской группы.

Кроме того, автор считает необходимым выразить свою признательность руководителям организаций Г.Б. Будницкому (ЗАО «Корпорация АРКТУР»), В.М. Фрумкину (ОАО «Спецжелезобетонстрой»), Н.В. Парышеву (ЗАО «Курганстальмост»), В.П. Воронину (РАО ЕЭС России), осуществившим финансовую поддержку работы над настоящей книгой.

Автор, безусловно, благодарен О.А.Меньшиковой и Д.А. Матвееву за помощь по набору рукописи книги на компьютере, а также М.Б.Третьяковой и К.Д.Поюровской за поддержку стремления автора довести работу над книгой до своего завершения.

апрель, 2004г.

Ф.Н.Рабинович

ПРЕДИСЛОВИЕ - III

Композиционные материалы, в том числе их модификации на основе дисперсно армированных бетонов, получают широкое распространение во всем мире. В книге представлена обширная номенклатура конструкций с применением рассматриваемых материалов, используемых при возведении объектов общестроительного и специального назначения. Особенностью этих конструкций является то, что их армирующими компонентами являются высокопрочные искусственные волокна, дисперсно распределяемые в объеме бетона, волокна, частично или полностью исключающие применение традиционной стержневой арматуры. Подобный вид армирования существенно повышает трещиностойкость конструкций, вязкость их разрушения, возрастает сопротивление динамическим воздействиям, снижаются трудозатраты на производство работ и время, необходимое для возведения строительных объектов.

Эти обстоятельства играют исключительную роль, когда приходится сталкиваться с нетрадиционными условиями возведения сооружений (труднодоступные районы строительства, сооружения, возводимые в акватории морского шельфа), или в экстремальных ситуациях природных явлений (землетрясения, наводнения), либо при техногенных авариях (например, на объектах АЭС), Композиты на основе дисперсно армированных бетонов в этих ситуациях могут способствовать более эффективному их преодолению в сравнении с традиционными решениями.

Книга посвящена комплексному рассмотрению представленной в ней темы: вопросам теории, технологии, методам проектирования, эффективным решениям и областям рационального применения рассматриваемых конструкций, в том числе в нетрадиционных условиях их эксплуатации.

Можно привести в качестве иллюстрации некоторые направления потенциального применения композитов на основе дисперсно армированных бетонов на объектах, относящихся к отрасли атомной энергетики.

- Хорошо известно, что освоение обширных северных территорий России может быть осуществлено при условии их обеспечения электроэнергией. Один из вариантов решения задачи предусматривал транспорт по Северному морскому пути и далее вниз по сибирским рекам мини-блоков АЭС, размещенных на понтонах, которые на месте их постоянной дислокации должны были выполнить функции фундаментов АЭС. Были рассмотрены три варианта решения задачи (автор книги являлся одним из участников проекта): в стальном, железобетонном и комбинированном исполнении с применением в последнем случае преднапряженного сталефибробезбетона (т.е. с применением в том числе дисперсно армированного бетона). Важной задачей являлось снижение до минимума массы понтонов.

Стальной вариант (масса 2000 т) обеспечивал предельное снижение массы, но это решение нуждалось в осуществлении трудоемких работ, учитывая условия севера, по превращению понтона за счет его обетонирования в фундамент блоков АЭС.

Железобетонный вариант (масса 5000 т) являлся наиболее невыгодным с точки зрения, оценивающей массу понтона, но в условиях эксплуатации отпадала необходимость в проведении работ по устройству фундаментов.

Комбинированный вариант с применением дисперсно армированного бетона (3500 т) обеспечивал экономию массы в сравнении с железобетонным решением и исключал необходимость проведения дополнительных работ по возведению фундамента в сравнении с вариантом стального понтона.

- Не менее важное направление имеет отношение к освоению месторождений природного газа на российском континентальном шельфе и, как следствие,

возникновение актуальной задачи транспорта этого газа в различные регионы земного шара (потребителям).

Россия является страной, освоившей методы строительства атомных подводных лодок. Именно поэтому возник вариант, предусматривающий возможность осуществления системы подводного производства и транспортирования сжиженного природного газа, обеспечивающей в том числе необходимый уровень безопасности этого процесса. Принималось во внимание, что системы транспортирования сжиженного газа с использованием подводных судов-газовозов могут быть менее уязвимыми от угрозы прямых террористических актов.

Корпус подводного газовоза состоит из двух оболочек скрепленных шпангоутами. В определенных частях газовоза в пространстве между оболочками размещен твердый балласт в виде тяжелого судостроительного бетона. Балласт обеспечивает постоянное размещение газовоза в подводном положении.

Вариант совершенствования этого конструктивного решения предусматривает применение во внутреннем пространстве между оболочками композитов на основе модификации тяжелого дисперсно армированного бетона, выполняющего функции не только балласта, но и конструкционного материала, обеспечивающего более высокий уровень совместной работы несущих оболочек газовоза за счет создания необходимых связей этого бетона с обшивками-оболочками, бетона воспринимающего возникающие в корпусе газовоза нормальные и сдвигающие усилия и одновременно, повышающего уровень защиты грузовых емкостей от ударов при столкновении с другими судами, включая преднамеренный таранный удар. Имеются также основания считать, что включение тяжелого дисперсно армированного бетона в совместную работу с корпусом судна, может обеспечить снижение материалоемкости основных несущих конструкций газовоза, его стоимость в целом.

- События, связанные с возникновением непредписанных ситуаций на АЭС, всегда становились достоянием чрезвычайных обстоятельств, например аварии на АЭС (Чернобыль, Украина), АЭС «Фукусима» (Япония). В критических ситуациях заглущку работы реакторов производили тяжелым бетоном. При этом, становится очевидным факт, что используемый материал должен не только уменьшать (в предельном случае полностью исключать) влияние радиации на окружающую среду, но и обладать такими свойствами, которые могли бы обеспечить надежность работы этого материала (прочность, трещиностойкость и т.д.) в создавшихся условиях, в том числе с течением времени.

Свойства, какими обладают композиционные материалы на основе дисперсно армированных бетонов (высокая прочность, сопротивление к возникновению и раскрытию трещин, ударная вязкость, возможность использования в качестве армирующих компонентов волокон тяжелых металлов, например фрезерованных волокон свинца, специальных видов цемента и бетонов, добавок и заполнителей) могут весьма эффективно использоваться для минимизации последствий, возникающих на атомных электростанциях. Это направление, безусловно, заслуживает внимательного отношения.

В практической деятельности людей существует обширная палитра сфер, в которой композиты на основе дисперсно армированных бетонов могут и должны занять достойное место в ряду современных конструкционных материалов. Здесь можно только перечислить потенциальные направления: например, защитные сооружения для предотвращения и затем для ликвидации последствий, возникающих при землетрясениях и наводнениях, обладающие высокой надежностью работы

дисперсно армированные бетонные основания платформ для добычи природных ископаемых на дне морского шельфа, подводные захоронения – укрытия остатков взрывоопасных продуктов военных лет, например, в акватории Балтийского моря и др.

Настоящая монография – четвертое издание. Это обстоятельство является отражением интереса к этой книге, книгу читают, в том числе, как следует полагать, не только специалисты, но и все, кто интересуется новым в развитии технической мысли, книга, несомненно, будет полезна студентам и аспирантам.

Выражаю уверенность в том, что книга будет способствовать дальнейшему развитию рассматриваемого в ней направления.

Академик РАН Е.П.Велихов

ПРЕДИСЛОВИЕ - IV

Время, прошедшее после выхода в свет третьего издания книги (2004 г.) показало, что интерес к дисперсно армированным бетонам не уменьшается^{*)}, напротив, возросло количество организаций, связанных с производством и применением этих бетонов в реальном строительстве, в периодической печати увеличилось число публикаций, посвященных этому направлению.

В четвертом издании книги представлены новые данные, относящиеся к теории дисперсного армирования бетонных материалов, к практике их применения на строительных объектах.

Несмотря на вполне очевидные успехи в области распространения композиционных материалов на основе дисперсно армированных бетонов, до сих пор сохраняет свое значение важная проблема, касающаяся правильного понимания и истолкования ряда технических определений, в том числе понятий и терминов, имеющих отношение к рассматриваемой в книге теме. В частности, наиболее часто используемый термин «диспергирование», определяющий границы оптимального распределения армирующих волокон в бетоне, соответственно, фиксирующий следствия, вытекающие из этого распределения, для многих специалистов (конструкторов, технологов) все еще остаются раскрытыми не в полной мере.

Именно поэтому автор в самом начале книги – в дополнительном «Введении» к четвертому изданию, счел необходимым уделить внимание более подробному обсуждению смысла рассматриваемых понятий – терминов, и, с другой стороны, оценить эту тему с позиций ретроспективного анализа возникновения новых научных направлений, порождающих эти понятия, термины.

Кроме того, представлялось целесообразным связать существующие представления, касающиеся работы дисперсно армированных бетонов при их нагружении, с областью, относящейся к механике разрушения твердых тел, т.е. тел, содержащих в своем объеме еще до приложения внешней нагрузки трещины. При этом рассмотрено изменение состояния этих тел в процессе их нагружения в зависимости от системы пересечения плоскости трещины армирующими волокнами. В данном случае важное значение, по мнению автора, приобретают вопросы, отражающие кинетику необратимых изменений в состоянии этих тел, обуславливающих повышение их энтропии с происходящими при этом изменениями «порядка - беспорядка» в структуре тел. Приведены зависимости, связанные с учетом силовых, энергетических, химических факторов для оценки в конечном счете поведения дисперсно армированных бетонов вплоть до их критического состояния в процессе разрушения.

Структура содержания книги в четвертом издании в основном сохранена. Книга дополнена новыми разделами, включенными в состав ранее представленных глав. Наряду с тем, представлены две новые главы, дополняющие содержание книги в целом.

Представлены данные, относящиеся к методам изготовления дисперсно армированных бетонов по технологии торкретирования, получающей все более широкое распространение при возведении, ремонте и восстановлении строительных конструкций (гл.2, разд.2.3).

Получены новые результаты численного анализа (в табличной форме), относящиеся к пределам минимально необходимого содержания волокон в дисперсно армированном бетоне на основе более высоких классов бетона по прочности на сжатие и более широкого диапазона значений прочности волокон (фибр), используемых в современном строительстве (гл.3, разд.3.3).

^{*)} Данное направление в 2007 г. отмечено Премией Правительства РФ в области науки и техники.

Более широкое внимание уделено вопросам применения полимерных волокон для дисперсного армирования бетона, в том числе полипропиленовых с учетом сопоставления их работы со стальными волокнами. Впервые получено объяснение физического смысла, определяющего область эффективного применения полимерных волокон в качестве армирующих компонентов для бетонных матриц. Полученные данные развивают существующие представления о границах рационального использования полимерных волокон в практике строительства (гл.4, разд.4.4).

Ранее в разделе 12.5.2 книги (глава 12) были изложены в общем виде принципы крепления стеклофибробетонных панелей и деталей к несущим конструкциям зданий с примерами их исполнения. К сожалению, эти данные были ограничены и не охватывали достаточно обширного диапазона проектных ситуаций, с которыми сталкиваются архитекторы и строители. В четвертом издании книги рассмотрен более широкий круг вопросов, относящихся к данной теме. При этом, наряду с результатами, полученными в ОАО «ЦНИИПромзданий», обобщены сведения, приведенные в европейских источниках, в том числе в источниках Ассоциации «GRC» (Англия). Рассмотрены основные принципы проектирования стеклофибробетонных конструкций с учетом особенностей их работы в процессе эксплуатации (глава 16).

Важную роль в формировании каркаса дисперсного армирования играют соотношения, отражаемые объемными и плоскостными параметрами распределения волокон в бетоне. Эти соотношения определяют граничные условия оптимизации структуры дисперсного армирования, в том числе с учетом распределения в объеме бетона зерен крупного заполнителя.

В четвертом издании книги автор стремился установить численные выражения граничных значений рассматриваемых соотношений, выявить сингулярные точки исследуемых зависимостей, развить эту тему, рассмотренную ранее в главе 6, дополнив ее данными анализа с учетом геометрических характеристик используемых волокон, их ориентации и количества в объеме бетона. В результате получены аналитические зависимости (формулы, графики), отражающие диапазон оптимальных соотношений компонентов, формирующих структуру рассматриваемого бетона (глава 17).

Нетривиальные инженерные задачи возникли в 2010 г. в связи с аварией нефтяной платформы Компании «Бритиш Петролиум» в Мексиканском заливе. Авария привела к серьезным техническим и экологическим последствиям. Необходимость решения задач, связанных с ликвидацией подобных аварий, может возникнуть также в будущем. Автором книги предложен вариант технического решения устройства (резервуара – капсулы) способного, доставить на дно моря фиброармированный бетон для возведения саркофага-укрытия над такой скважиной (гл.14, разд.14.4).

Завершение работы над четвертым изданием книги совпало с пятидесятилетием института ОАО «ЦНИИПромзданий». В связи с этим, уместно здесь выразить уважение памяти основателя института К.Н. Карташова. Института в котором автор книги проработал почти 47 лет. Преодолевая преграды (включая кризисные ситуации) институт всегда стремился сохранить свою репутацию на высоком уровне. Это в значительной мере заслуга, стоявшего, как и прежде «у руля» генерального директора института, профессора В.В. Гранева, традиционно поддерживающего работу автора и развиваемое им научное направление. Вполне понятно, что автор высоко оценивает эту ситуацию, позволившую в том числе осуществить работу над настоящим изданием книги.

При этом совершенно необходимо здесь выразить глубокое уважение к памяти академика РАН И.Н.Фридляндера, ушедшего из жизни в 2009 г. И.Н.Фридляндер являлся выдающимся ученым в области конструктивных материалов для авиокосмической и атомной техники, председателем Ученого Совета Миннауки РФ

по композиционным материалам. Он с большим вниманием следил за развитием исследований в области создания композиционных материалов на основе дисперсно армированных бетонов. В 2004 г. им было представлено Предисловие к третьему изданию настоящей книги. Общение с ним всегда было интересным, его замечания всегда были по- существу, рекомендации – конкретны.

Автор книги выражает также удовлетворение тем, что направление, представленное в книге, было поддержано в «Курчатовском институте» (РНИИ) академиком РАН Е.П. Велиховым. Если быть точнее, то внимание к этому направлению проявилось намного раньше, после событий на Чернобыльской АЭС. Возникла необходимость в исследованиях, связанных в том числе со специальными модификациями композитов на основе дисперсно армированных бетонов, т.е. с композитами, которые могли быть эффективно использованы в области, имеющей отношение к атомной промышленности. Академик Е.П. Велихов внимательно следил за развитием данного направления, способствовал этому развитию, при этом наиболее важное значение приобретали результаты, которые могли иметь практический выход.

Автор книги благодарен академику Е.П. Велихову за представленное им Предисловие к настоящей книге и в полной мере разделяет точку зрения о том, что композиционные материалы на основе дисперсно армированных бетонов обладают значительными потенциальными возможностями для их использования при восстановлении, реконструкции и возведении сооружений различного назначения, в том числе объектов, относящихся к атомной промышленности в экстремальных условиях, с которыми неизбежно приходится сталкиваться в разных регионах земного шара.

Автор считает также своим необходимым долгом выразить признательность руководителям строительных компаний и фирм, в том числе А.В. Рогатинскому (ООО «Рустехпром»), К.Ю. Белобородову (ООО «Компания ГПР «Инжстрой»), А.М. Горбу (Компания «Concrete Engineering»), С.М.Баеву (ЗАО «Служба защиты сооружений»), которые сочли возможным оказать необходимую финансовую поддержку работам, связанным с изданием настоящей книги, поддержку, которая, безусловно, имела важное значение.

Автор по-прежнему благодарен О.А. Меньшиковой и Е.В. Осипову, взявшим на себя работу по набору рукописи книги на компьютере.

апрель 2011 г.

Ф.Н. Рабинович

ВВЕДЕНИЕ - I

Современное строительство неразрывно связано с задачами, имеющими отношение к повышению эффективности строительного производства, снижению стоимости и трудоемкости технологических процессов, экономному использованию материальных и энергетических ресурсов, применению новых прогрессивных материалов.

Одним из перспективных конструкционных материалов являются дисперсно армированные бетоны. Такие бетоны представляют собой одну из разновидностей обширного класса композиционных (композитных) материалов, которые в настоящее время все более широко применяются в различных отраслях промышленности. Дисперсное армирование осуществляется волокнами-фибрами, равномерно распределенными в объеме бетонной матрицы. Для этого используются различные виды металлических и неметаллических волокон минерального или органического происхождения. Отсюда следует широко распространенное в технической литературе название — фиброармированный бетон или в зависимости от вида используемых волокон — сталефибробетон, стеклофибробетон и т. д.

Номенклатура искусственных волокон весьма обширна: от чрезвычайно дефицитных, например из карбида или нитрида кремния, бора, углерода, сапфира, вольфрама, до сравнительно доступных для применения в массовом строительстве — стальных, стеклянных, базальтовых, полимерных. В качестве армирующих элементов для бетонов могут использоваться и природные волокна: древесные (целлюлозные), сизалевые, бамбуковые, тростниковые, джутовые и др. Однако в конструктивном отношении они уступают искусственным волокнам.

К дисперсно армированным бетонам относят и такие материалы, как, например, асбестоцемент и армоцемент. В технической литературе эти материалы освещены достаточно подробно, поэтому в настоящей книге не рассматриваются.

Понятие “дисперсно армированные бетоны” достаточно широкое. Имеются предпосылки для создания разнообразных типов таких бетонов с различными сочетаниями как самих волокон, так и различных видов неорганических матриц не только на основе цемента и гипса, но и с применением, в частности, фосфатных связок, керамических и других материалов.

В настоящее время интерес к использованию искусственных волокон как основы конструкционных материалов для практического применения в строительстве заметно возрос, особенно в связи с работами по использованию таких волокон в качестве арматуры для различных видов цементных и гипсовых растворов и бетонов. Значительно увеличился объем публикаций, посвященных различным аспектам дисперсного армирования бетонных материалов. В последние годы проведены конференции и научно-технические семинары, на которых обсуждены результаты научно-исследовательских работ, а также вопросы практического использования дисперсно армированных бетонов в строительстве. Этой же проблеме были посвящены международные конгрессы и симпозиумы (США, Англия, Канада, ФРГ, Япония и др.)

Чем можно объяснить значительный интерес к дисперсному армированию бетонов, который проявляется в настоящее время во многих странах. С одной стороны, это естественное стремление специалистов существенно повысить прочность на растяжение, трещиностойкость и ударную вязкость бетонных материалов, а с другой — рост заинтересованности строительных организаций в получении эффективных армированных бетонных конструкций, к которым современное строительство предъявляет все более высокие требования.

Следует также учитывать связанное с развитием техники ужесточение условий эксплуатации конструкций, которое обуславливает необходимость дальнейшего совершенствования номенклатуры конструкционных материалов, улучшения их качества, повышения универсальности.

В 1977г. Постановлением Совета Министров СССР №2 "О некоторых мерах по повышению технического уровня производства железобетонных конструкций и более эффективному использованию их в строительстве" было рекомендовано усилить внимание к работам по созданию более эффективных железобетонных конструкций, в том числе за счет применения новых видов армирования, включая дисперсное армирование с применением высокопрочных волокон. Этим же вопросам было посвящено постановление Президиума Центрального правления НТО строительной индустрии от 22 марта 1979г. "О развитии работ по созданию и внедрению конструкций промышленных зданий и сооружений с применением фибробетона".

Необходимо учесть и то, что рост производства промышленной продукции приводит к непрерывному увеличению потребления природных ресурсов, повышению расхода энергии, увеличению образующихся отходов, загрязнению окружающей среды и т.д. Поэтому выбор материалов для строительства требует строгого учета всех этих факторов.

Важными в настоящее время являются вопросы экономии энергии, необходимой для производства различных строительных материалов. Известно, в частности,* что количество энергии, требующейся для производства бетонов, оказывается минимальным по сравнению с количеством энергии (приведенной к единому эквиваленту), необходимой для изготовления стали, алюминия, стекла, кирпича, пластмасс. Производство бетонных материалов помимо этого требует меньшего по сравнению с производством стали расхода воды и в меньшей степени влияет на загрязнение окружающей среды. Армирование бетонов приводит к соответствующему повышению энергоемкости материала. Так как применение армированных сталью бетонов осуществляется в широких масштабах, становится существенной проблема максимального сокращения расхода металла и наиболее рационального его использования в бетоне.

Например, во многих случаях армирование бетонов стальной арматурой осуществляется только исходя из действующих на конструкцию усилий во время транспортирования или монтажа. При этом толщина конструктивных элементов устанавливается, как правило, не менее 60-80мм (поскольку необходимо предусматривать достаточную толщину бетонного защитного слоя для предохранения арматуры от коррозии). Вполне очевидно, что указанная толщина элементов с точки зрения прочности может оказаться неоправданной. Это приводит к неизбежному перерасходу конструкционных материалов, в том числе арматуры, которая при эксплуатации конструкций практически не выполняет своего прямого назначения. Кроме того, значительное количество стали в железобетонных конструкциях расходуется на монтажную, поперечную и распределительную арматуру. Коэффициент использования арматуры колеблется от 1,3 до 4,5**. Как видно, имеются потенциальные возможности снижения расхода арматуры в конструкциях. Поэтому дальнейшее совершенствование бетонных материалов должно предусматривать не только улучшение их механических характеристик, но и изыскание путей наиболее рационального использования металлической арматуры, а также создание новых эффективных армирующих материалов.

В настоящее время достигнуты значительные успехи в области повышения активности минеральных вяжущих веществ — цемента и гипса, используемых для изготовления различных видов бетонов. Это позволило разработать составы бетона с пределом прочности на сжатие до 80-100МПа, а гипсовых отливок до 50МПа. Однако прочность растворов и бетонов при растяжении остается во много раз ниже прочности на сжатие. В связи с этим использование волокон в качестве арматуры с целью преодоления недостаточной прочности при растяжении бетонных материалов

*Kreijger P.S. Beton is onze planetaire huishouding. "Cement", 1974, №3, P.93-101.

**Байков В.Н. Железобетонные конструкции. — М., 1974. — 654с.

может создать предпосылки для получения бетонов нового типа, с более широкими возможностями их применения в строительстве.

Как и в традиционно армированных структурах, упрочнение волокнами основывается на предположении, что материал бетонной матрицы передает волокнам приложенную нагрузку посредством касательных сил, действующих по поверхности раздела, и, если модуль волокна больше модуля матрицы, то основную долю приложенных напряжений воспринимают волокна, а общая прочность композиции пропорциональна их объемному содержанию.

Принципы построения композитов лежат в основе организации структуры многих природных материалов*. Например, легкий и прочный бамбук является характерным композиционным материалом, в котором мягкая целлюлозная составляющая упрочнена вытянутыми в нитку кристаллами оксида кремния. Совершенную композицию представляют собой кости**. Дисперсное распределение кристаллов извести в кости, их сцепление и ориентация в коллагене обеспечивают не только высокую прочность, но и трещиностойкость композита. Трещины, которые могли бы развиться в кости под нагрузкой благодаря прочной связи кристаллов извести с пластичным коллагеном, блокируются, при этом значительно снижается «чувствительность» материала к внешним воздействиям. Вместе с тем материал, подобный кости, не мог бы являться эффективной арматурой для бетона, так как модуль упругости костной ткани (21000 МПа) практически не превышает модуля упругости рядового бетона. Тем не менее соотношения между модулями костей и биологических тканей (для которых кости являются армирующим материалом) изменяются в пределах 35-100, т.е. значительно превышают те же соотношения между модулями арматурной стали и бетона.

В исследованиях, относящихся к дисперсному упрочнению бетонных материалов, можно выделить два направления. Одним из них для решения данной задачи предлагается применение специальных затравок, интенсифицирующих процессы твердения бетона и улучшающих его физико-механические показатели. В работах профессора В.В. Тимашева*** в качестве таких затравок использовались нитевидные кристаллы гидросиликатов кальция, достаточно близкие по своим физическим и физико-химическим параметрам к новообразованиям, возникающим при гидратации цементных вяжущих. Данный метод позволял обеспечить повышение прочности бетона на изгиб до 2-4 раз. Определенный интерес представляет направленная кристаллизация новообразований в процессе твердения бетона, т. е. обеспечение дисперсного самоармирования бетона за счет образования в его объеме ориентированных сростков новообразований в виде кристаллогидратов, позволяющих существенно повысить прочность образцов. Говоря о безусловной перспективности этого направления, следует, однако, отметить, что в данном случае вряд ли могут быть полностью устранены различия между прочностью бетона на сжатие и растяжение, поскольку модули упругости новообразований в виде дисперсной кристаллической фазы и материала бетонной матрицы в целом незначительно отличаются друг от друга.

Второе направление основано на применении для повышения прочности бетонной матрицы армирующих волокон, отличающихся по своему составу от материала матрицы и способных в процессе работы композиции воспринимать более высокие по сравнению с матрицей растягивающие напряжения. Получаемый эффект упрочнения в значительной мере зависит от вида используемых волокон, характера их сцепления и ориентации в объеме бетона, химической устойчивости по отношению к продуктам гидратации цементных вяжущих.

*Патури Ф. Растения – гениальные инженеры природы. – М., 1979. – 179с.

**Касавина Б.С., Торбенко В.П. Жизнь костной ткани. – М., 1979. – 148с.

***Тимашев В.В., Сычева Л.И., Никонова Н.С. К вопросу о самоармировании цементного камня // Труды МХТИ им Д.И.Менделеева. – М., 1976. – вып.92. – С.45-51.

В качестве исходных армирующих материалов для бетона используются металлические, минеральные и органические волокна в виде непрерывных нитей (сеток, тканей и других подобных рулонных материалов) или в виде коротких отрезков волокон — фибр (рис. 1).

Методами дисперсного армирования предусматриваются возможности получения направленной и произвольной (свободной) ориентации волокон в объеме бетона. Направленная ориентация реализуется главным образом при использовании непрерывных нитей, жгутов, различного рода тканых и нетканых сеток, разреженных тканей и других аналогичных материалов. Подобный вид ориентации может быть также осуществлен при армировании бетона короткими волокнами, в частности стальными фибрами при формировании изделий, например в магнитном поле.

Произвольная ориентация осуществляется, как правило, короткими волокнами, однако в этом случае могут использоваться и рулонные материалы в виде холстов, матов и вуалей, в которых волокна не имеют организованного переплетения. На практике в конструкциях могут реализовываться различные виды произвольной ориентации.

Плоско-произвольная ориентация характеризуется равновероятным и неограниченным (свободным и хаотичным) распределением волокон в плоскости (в двухмерном пространстве). Дисперсное армирование в этом случае реализуется главным образом в тонкостенных изделиях в виде плоских листов, плит, а также в элементах, обладающих криволинейной формой. Толщина изделий в этом случае меньше, как правило, длины используемых волокон, при этом углы наклона волокна по отношению к поверхности изделий сравнительно небольшие.

Объемно-произвольная ориентация характеризуется равновероятным и неограниченным (свободным и хаотичным) распределением коротких армирующих волокон во всем объеме бетона (в трехмерном пространстве). Углы наклона волокон по отношению к поверхности изделий от 0 до 90°, размеры изделий во всех направлениях значительно превышают длину волокон.

Стесненно-произвольная ориентация имеет место, когда, по меньшей мере, два геометрических параметра элементов конструкций, например их высота и ширина, ограничены в размерах, что стесняет свободу произвольной ориентации армирующих волокон в объеме бетона. Подобная ситуация наблюдается при дисперсном армировании балок, ребер плит, различного рода перемычек и т.д. Чем меньше размеры поперечного сечения изделий, тем в большей мере ограничены возможности свободной ориентации армирующих волокон. Анализ показывает, что эффект стеснения ориентации волокон проявляется в основном в тех случаях, когда соответствующие размеры изделий превышают длину армирующих волокон не более чем в 5 раз. При более значительных размерах поперечного сечения изделий эффект стеснения заметно снижается, параметры ориентации волокон в бетонной матрице в этом случае приближаются к параметрам плоско- или объемно-произвольного армирования.

По своему характеру дисперсное армирование может осуществляться одним видом фибр или смесью разных фибр (разной длины и разного состава). Значительный интерес представляет применение дисперсной арматуры для традиционно армированных железобетонных конструкций, в которых часть стержневой арматуры заменяется на фибровую (комбинированное армирование). Вполне очевидно, что технологические методы изготовления таких конструкций зависят в значительной мере от вида используемых для них армирующих материалов.

Принципы технологии и приемы дисперсного армирования зависят во многом от вида используемых бетонных матриц. На практике для изготовления дисперсно армированных конструкций используются обычный тяжелый бетон с ограниченной величиной зерен крупного заполнителя, цементно-песчаный раствор, а также цементный или гипсовый камень. В ряде случаев целесообразно использование лег-

ких бетонов. Вид бетона определяет характер рационального для него вида дисперсного армирования и оптимальные значения геометрических параметров дисперсной арматуры.

При решении вопросов дисперсного армирования бетонных материалов необходимо учитывать, что не все искусственные волокна способны противостоять воздействиям среды гидратирующихся цементов. Например, стеклянные волокна обычного состава подвергаются интенсивной коррозии в твердеющем бетоне на портландцементе и практически не вступают в химическое взаимодействие с продуктами гидратации гипсовых вяжущих. Напротив, стальные волокна заметно корродируют в композициях на основе гипса, причем те же волокна надежно защищаются от процессов коррозии в гидратирующейся среде цементных вяжущих. Эти обстоятельства должны учитываться при назначении оптимальных составов композиции “бетон-волокно”.

Исследования показывают, что дисперсное армирование обеспечивает повышение прочности сечений сжатых, растянутых и изгибаемых элементов конструкций, увеличивает их трещиностойкость, ударную вязкость, термическое сопротивление и другие физико-механические показатели. Имеются примеры успешного применения дисперсно армированных бетонов в конструкциях различного назначения: стеновых панелях, плитах покрытий, днищах резервуаров, сваях, трубах, лотках коммуникационных каналов, полах промышленных зданий, дорожных и аэродромных покрытиях, несъемной опалубке для возведения монолитных конструкций и др. Дисперсное армирование приводит в ряде случаев к снижению материалоемкости конструкций, стоимости и трудоемкости изготовления по сравнению с традиционными решениями. Это достигается в значительной мере за счет частичного или полного отказа от необходимости применения в конструкциях традиционных арматурных сеток и каркасов, а также в результате перевода во многих случаях комплекса производства арматурных работ в процессе изготовления армированной бетонной смеси непосредственно в бетоносмеситель.

Дальнейшее внедрение дисперсно армированных бетонов в практику строительства должно быть связано в первую очередь с решением вопросов использования волокнистой (фибровой) арматуры необходимого качества и освоением технологических процессов на действующих заводах строительной индустрии.

Работы по созданию дисперсно армированных бетонов и конструкций с их применением основываются в значительной мере на фундаментальных исследованиях, относящихся к технологии изготовления, теории, расчету и проектированию железобетонных конструкций, в развитии которых большой вклад внесли известные ученые Ю.М.Баженов, В.Н.Байков, О.Я.Берг, В.М.Бондаренко, А.А.Гвоздев, Ю.В.Зайцев, Б.А.Крылов, К.В.Михайлов, А.В.Носарев, В.Б.Ратинов, Б.Г.Скрамтаев, М.М.Холмянский, А.Е.Шейкин и др.

Работы, относящиеся к исследованиям стеклоармированных композиций на основе цементных вяжущих, получили свое отражение в трудах К.Л.Бирюковича, П.П.Будникова, М.Т.Дулебы, М.А.Краснова, Т.Г.Маркаряна, Р.М.Мхикяна, А.А.Пашенко, В.М.Рудого, В.П.Сербина. Большая заслуга в исследованиях сталефибробетонных конструкций принадлежит Г.И.Бердичевскому, И.В.Волкову, А.М. Горбу, Ф.А.Гофштейну, К.М.Королеву, О.В.Коротышевскому, Л.Г.Курбатову, И.А.Лобанову, В.П.Романову, К.В.Талантовой, Г.К.Хайдукову, Г.А.Шикунову, В.В.Шугаеву, Ф.Ц.Янкеловичу.

Значительный вклад в организацию и развитие научно-исследовательских и опытно-промышленных работ в области дисперсно армированных бетонов внесли Б.А.Крылов, Л.Г.Курбатов, К.В.Михайлов, Д.Л.Орлов, Г.К.Хайдуков.

В настоящую книгу включены результаты исследований, выполненных автором в ЦНИИПромзданий Госстроя СССР начиная с 1964г и с 1994г в ОАО “ЦНИИПромзданий”. Работы выполнялись в сотрудничестве с рядом научно-исследовательских и

учебных институтов (НИИЖБ, ЛенЗНИИЭП, Ростовский Водоканалпроект, ЛатНИИ-Строительства, Карагандинский Промстройпроект, ВНИИСтроммаш, НИИЦемент, Киевский Политехнический институт, МИСИ (МГСУ) им. В.В.Куйбышева, МХТИ (МГХТУ) им. Д.И.Менделеева).

Целью работы над книгой являлось обобщение и систематизация результатов исследований, относящихся к теоретическим и практическим аспектам применению дисперсно армированных бетонов в строительстве. Книга содержит данные об особенностях и свойствах исходных материалов, используемых для получения дисперсно армированных бетонов, в том числе сведения о минеральных вяжущих и армирующих волокнах, об их взаимодействии в композиции. Представлялось целесообразным осветить общие закономерности дисперсного армирования бетонов, рассмотреть причины, приводящие к существенному изменению свойств композиции в зависимости от структуры ее армирования, вида используемых материалов и технологических методов совмещения бетонной смеси с армирующими волокнами. Освещаются данные, относящиеся к технологии изготовления дисперсно армированных конструкций, вопросы их проектирования, опыт применения и результаты экономических сопоставлений.

Автор с благодарностью примет все замечания и пожелания как по форме представленного материала, так и по его содержанию.

ГЛАВА 1

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫХ БЕТОНОВ

1.1. МИНЕРАЛЬНЫЕ ВЯЖУЩИЕ

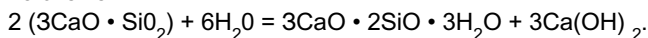
Свойства минеральных вяжущих веществ подробно исследованы и описаны в технической литературе [1, 27, 35]. Менее изучены вопросы влияния минеральных вяжущих на свойства дисперсно-армированных композиций и, в первую очередь, на их способность оказывать сопротивление во времени силовым и другим видам воздействий. Характер такого влияния зависит в значительной мере от вида вяжущих и армирующих волокон, используемых для получения композиционных материалов. Особое значение при этом имеют химические и физико-механические взаимодействия в контактной зоне между бетонной матрицей и волокнам.

Большое внимание в настоящее время уделяется композиции “бетон — минеральное волокно”. Существуют две точки зрения в оценке взаимодействий, протекающих в этой композиции. Одна из них основывается на том, что физико-механические свойства данной композиции и прежде всего характеристики ее длительной прочности зависят главным образом от развития в процессе гидратации вяжущих кристаллизационного давления, обусловливаемого эпитаксическим ростом кристаллогидратов на поверхностных дефектах волокон, способным нанести им значительные повреждения и соответственно привести к заметному снижению прочности композиции. По нашему мнению, данное представление преувеличивает роль влияния механических воздействий в бетоне на армирующие волокна. Установлено, например, что в цементном камне на глиноземистом цементе, армированном стеклянными волокнами, снижение прочности во времени при прочих равных условиях меньше, чем в композиции на основе портландского цемента. Вместе с тем, процессы кристаллизации новообразований в цементном камне на глиноземистом цементе протекают более интенсивно по сравнению с портландцементом и кристаллический сросток цементного камня более плотный при равных условиях твердения. Соответственно механические воздействия, обусловленные ростом кристаллогидратов глиноземистого цемента на армирующие волокна, более активные. Другой, наиболее вероятный подход — это превалирующее значение в подобных системах химических взаимодействий между продуктами гидратации вяжущего и армирующими волокнами.

Представляется целесообразным рассмотреть здесь только те характерные особенности вяжущих веществ, которые имеют наиболее важное значение для обеспечения необходимых конструктивных качеств дисперсно армированных бетонов. При этом ограничимся рассмотрением свойств портландского (силикатного) и глиноземистого (алюминатного) цементов, а также гипсовых вяжущих. Новообразования, возникающие в процессе гидратации этих вяжущих, существенно различаются по своему составу и свойствам и соответственно по характеру их возможного взаимодействия с различными видами армирующих волокон. С этой точки зрения другие разновидности минеральных вяжущих веществ (шлакопортландцемент, пуццолановый и магнезиальный цементы, гипсоцементнопуццолановые вяжущие) занимают промежуточное положение, поэтому их свойства под данным углом зрения здесь не рассматриваются.

Портландцемент. Среда гидрагирующихся портландских цемента является активной щелочной средой ($\text{pH} = 13$ и более). Это определяет влияние такой среды на армирующие волокна. Продукты гидратации портландских цемента надежно предохраняют от коррозии металлическую арматуру, но оказываются достаточно агрессивными по отношению к любым видам минеральных (стеклянных, базальтовых) волокон. Основными составляющими портландцементного клинкера являются силикаты кальция: алит - $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (или C_3S) в количестве 45-55%, белит - $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (или C_2S) 20-25%, трехкальциевый алюминат - $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (или C_3A) 8-13% и четырехкальциевый алюмоферрит - $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (или C_4AF) 12-18%. Для регулирования сроков схватывания в портландцемент также вводится 3—5 % гипса.

Гидратация трехкальциевого силиката (основного минерала портландцемента) протекает по схеме



В качестве продуктов гидратации образуются гидросиликаты кальция и гидроксид кальция, которые и определяют в значительной мере свойства цементного камня.

В процессе гидратации портландцементного клинкера наряду с гидросиликатами кальция и гидроксидом кальция образуются также другие формы кристаллогидратов: гидросульфалюминаты, гидроалюминаты, гидроферриты кальция и др. Условия их образования и влияние на свойства цементного камня достаточно хорошо изучены и подробно рассмотрены в литературе.

С химической точки зрения, основным компонентом жидкой фазы твердеющего портландцемента, определяющим в основном ее влияние на армирующие волокна, является гидроксид кальция, активно взаимодействующий с компонентами стекла. В результате воздействия щелочесодержащей жидкой фазы твердеющего цемента происходит коррозионное разрушение стеклянных волокон вследствие выщелачивания и разрушения их кремнекислородного каркаса при длительном контакте с этой средой.

При решении вопросов применения портландцементов для дисперсно-армированных бетонов важное значение имеет определение оптимальных соотношений между фазами алита в цементном вяжущем и белита. Повышенное содержание алита в портландском цементе обычно является положительным фактором с точки зрения защиты от коррозии металлической арматуры и соответственно стальных фибр. В то же время снижение содержания алита и повышение количества белитовой фазы в портландцементе уменьшает, как правило, интенсивность агрессивного влияния среды гидратации цемента по отношению к стеклянным волокнам.

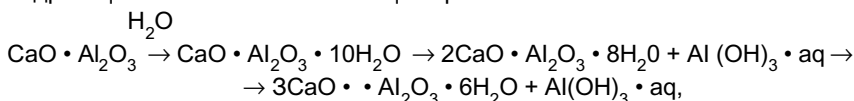
Исследования, связанные с разработкой оптимальных составов белитовых портландцементов для стеклоармированных композиций были выполнены в нашей стране под руководством А.А.Пашенко и В.П.Сербина [15]. Такой цемент получали из сырьевой смеси на основе известняково-базальтовых горных пород. Перспективным также оказался специальный состав сульфатированного портландцемента, в котором отсутствовали традиционные клинкерные минералы C_3S и C_3A , а основными минералами являлись сульфосиликат кальция $2(\text{C}_2\text{S}) \cdot \text{CaSO}_4$; сульфалюминат кальция $3(\text{CA}) \cdot \text{CaSO}_4$ и белит. Исходными сырьевыми материалами для получения сульфатированного портландцемента являлись: известняк, глина, гипсовый камень, фосфогипс. Важно, что свободной извести в продуктах гидратации такого цемента обнаружено не было, значения pH гидратирующегося цемента составляют 9,8—10, т. е. они, как видно, ниже по сравнению с pH стандартного портландцемента и близки к значениям pH глиноземистого цемента.

Глиноземистый цемент. Объемы промышленного производства и применения в строительстве глиноземистого цемента ниже, чем портландских цемента. Стоимость глиноземистого цемента значительно выше стоимости портландцемента.

Вместе с тем, глиноземистые цементы обладают многими ценными свойствами. Основным преимуществом глиноземистого цемента по сравнению с портландскими цементами является быстрый рост прочности в процессе твердения. Проектная прочность бетонов на глиноземистом цементе регистрируется обычно через 3 сут, что создает предпосылки для более быстрого изготовления и ввода конструкций в эксплуатацию. Бетоны на глиноземистом цементе более плотны и водонепроницаемы. Глиноземистый цемент является одним из компонентов для получения расширяющихся цементов, в том числе бетонов на напрягающем цементе. Затвердевший глиноземистый цемент оказывается в ряде случаев более стойким ко многим агрессивным средам, а также более инертным в химическом отношении и менее агрессивным ко всем видам минеральных волокон, чем обычный портландцемент. В связи с этим применение глиноземистого цемента может оказаться в ряде случаев технически оправданным и экономически обоснованным, например, при небольшом его расходе в тонкостенных стеклоармированных конструкциях, а также при реконструкции, восстановительных работах и т. д. Стоимость глиноземистого цемента значительно ниже стоимости всех видов полимерных материалов, получающих применение в конструкционных стеклопластиках.

В отличие от портландцементов глиноземистый цемент состоит в основном из алюминатов кальция, среди которых наиболее важным и определяющим свойства вяжущего является моноалюминат кальция $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (CA). Содержание его в глиноземистом цементе составляет 50 — 60 %. Помимо моноалюмината кальция глиноземистый цемент в своем составе имеет: $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_{12}A_7); $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ (CA_2); $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ (C_2AS); $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S); $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$; $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$; $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Гидратация моноалюмината кальция протекает по схеме:



т. е., при гидролизе и гидратации алюминатов кальция выделяются гидроалюминаты кальция и гидроксид алюминия (гиббсит). Гиббсит в отличие от $\text{Ca}(\text{OH})_2$ — нерастворимое в воде основание с амфотерными свойствами. Значения pH гидратирующей среды глиноземистого цемента изменяются в пределах 9,5 — 11, т. е. они ниже, чем у стандартных портландцементов.

При получении стеклоармированных композиций на основе глиноземистого цемента важно учитывать, что прочность бетона на этом вяжущем с течением времени в определенных условиях может изменяться как в сторону повышения, так и заметно-го снижения. Большое значение имеют температурные условия, при которых осуществляется процесс гидратации цемента. С целью определения оптимальных условий твердения бетона на глиноземистом цементе в работе [36] была принята гипотеза о существенном влиянии на длительную прочность этого бетона начальных условий формирования структуры цементного камня и прежде всего температуры, развивающейся в объеме материала.

Было показано, что фазовый состав цементного камня в первый период его твердения определяется начальной температурой в образце, величина которой зависит от температуры окружающей среды, размеров образца и проявляющегося в нем экзотермического эффекта, состава раствора (бетона) и водоцементного отношения. Выяснено, что известные данные о благоприятном твердении растворов (бетонов) на глиноземистом цементе при температуре окружающей среды не выше 20 - 25°C должны приниматься с определенной осторожностью, так как оптимальные режимы гидратации этого вяжущего зависят от всего комплекса указанных выше факторов.

Кривые скорости тепловыделения во времени у глиноземистого цемента определяются кинетикой процесса его гидратации [36]. В соответствии с этим процес-

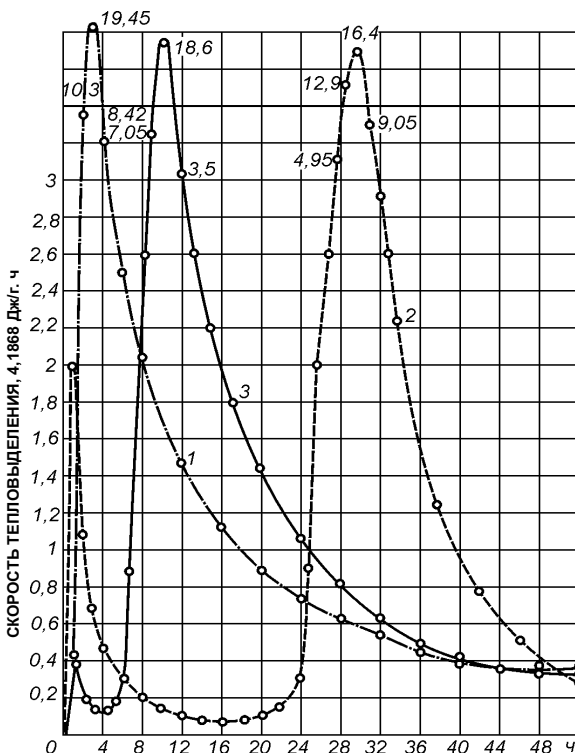


Рис. 1.1. Скорость тепловыделения при твердении цементного теста в условиях различных температур окружающей среды

1 - при 38°C; 2 - при 21°C; 3 - при 9°C

сом скорость тепловыделения в первый период гидратации цемента повышается и, достигнув максимума, через короткий промежуток времени начинает уменьшаться. В последующий период гидратации глиноземистого цемента скорость тепловыделения снова начинает возрастать и достигает нового максимума. Положение второго максимума на кривой скорости тепловыделения цемента существенно изменяется в зависимости от температуры окружающей среды (рис.1.1). С повышением температуры окружающей среды температурный максимум на диаграмме “температура — время” и соответствующая ему максимальная скорость гидратации цемента смещаются вправо от оси ординат. Наибольшее их смещение наблюдается в интервале температур 20 - 30°C и особенно при 24°C. В этом случае регистрируется наибольшая задержка тепловыделений, значительно увеличиваются сроки схватывания, существенно снижается степень гидратации и соответственно образуются структуры с более низким уровнем их прочности (табл.1.1).

Введение стеклянных волокон в цементный камень не оказывает существенного влияния на его сопротивление сжимающим усилиям. Прочность на сжатие материала в этом случае определяется в основном прочностью цементного камня. На рис.1.2 приведены данные по изменению прочности цементного камня в зависимости от температуры, из которых следует, что образцы, твердевшие при 20 и 30°C, имеют наиболее низкую прочность. С течением времени разница между прочностью этих образцов и прочностью образцов, твердевших первые трое суток при более низких или повышенных температурах, несколько уменьшается, однако прочность цементного камня, твердевшего при 20-30°C, всегда остается ниже.

Согласно известным положениям, повышение температуры должно облегчать растворение цемента и увеличивать скорость гетерофазного процесса гидратации частиц вяжущего, поскольку вязкость дисперсионной среды с ростом температуры

Характеристики твердения цементного теста на глиноземистом цементе при различных температурах окружающей среды

Температура окружающей среды, °С	Время τ_{max} от начала затворения до максимальной температуры в цементном тесте, ч-мин	Сроки схватывания (начало-конец), $\tau_n - \tau_k$ ч-мин	$\tau_{max} - \tau_k$, ч-мин	Время от момента затворения цементной водой до испытания образцов, ч	Изменение предела прочности в момент спада температуры в цементном тесте	
					МПа	%
6	7-25	4-25--6-30	0-55	16	21,9	124
18	12-10	7-50--9-35	2-35	21	17,7	100
24	26-55	10-20--15-45	11-10	31	4,9	27
34	13-30	4-00--6-05	7-25	15	8,3	48
42-45	7-20	4-15--6-25	1-55	9	15,8	90

уменьшается, а коэффициент диффузии возрастает. Поэтому естественно было бы ожидать сокращения продолжительности твердения глиноземистого цемента в условиях указанных температурных пределов, по крайней мере в сравнении с более низкими температурами.

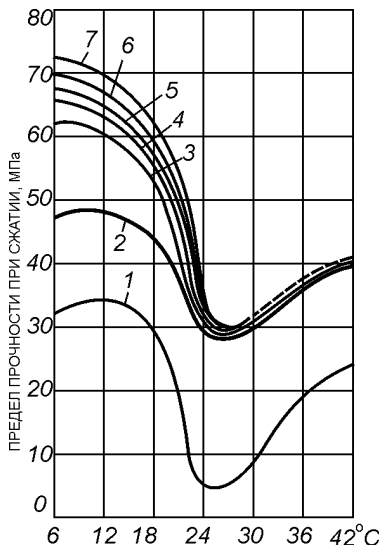


Рис. 1.2. Изменение прочности цементного камня, твердевшего до 3 сут при различных температурах окружающей среды (твердение образцов после 3 сут осуществлялось в нормальных условиях)

1...7 - соответственно 1-3-28-90-180-360-720сут

Как видно из рис.1.1, характер кривых, характеризующих изменение во времени скорости тепловыделения, для глиноземистого цемента аналогичен подобным кривым для портландцемента [36], что указывает на общность механизмов их гидратации. Исходя из экспериментальных данных, а также с позиций современных воззрений на процессы твердения минеральных веществ, наблюдающиеся при твердении глиноземистого цемента явления можно объяснить образованием на исходных зернах вяжущего из продуктов гидратации экраннующих пленок (оболочек) разного состава, разной плотности и растворимости. После образования экраннующих пленок скорость реакции цемента с водой резко замедляется и определяется в основном скоростью диффузионных процессов.

Разный состав и строение пленок обуславливают их различную проницаемость. При температурах ниже 20°C новообразования, составляющие пленки, представлены преимущественно субмикрорекристаллами однокальциевого гидроалюмината CaH_{10} . При 20-30°C пленка образована гелеобразными C_2AH_8 и гидроксидом алюминия $Al(OH)_3$ [36]. Именно в этом случае второй максимум на кривой скорости тепловыделения во времени у гид-

ратирующегося цемента значительно смещается вправо от оси ординат (см. рис.1.1). Соответственно разрушение пленок, как показывают опыты [36], наступает значительно позже конца схватывания цементного теста, т. е. после того, как сформирована жесткая кристаллизационная структура. Наконец, при температуре более 30°C пленка состоит в основном из трехкальциевого гидроалюмината C_3AH_6 и лучше за-кристаллизованного гиббсита. Второй пик в этом случае на кривых изменения скорости тепловыделения во времени начинает смещаться влево, и степень гидратации цемента вновь возрастает. Рассмотренный механизм гидратации цемента на-ходится в соответствии с данными рентгеновского и дифференциально-термического анализов опытных образцов цементного камня [16].

Из данных табл.1.1 следует, что конец схватывания цементного теста (раствора, бетона) предшествует во времени температурному максимуму, и гидратация цемента с максимальной скоростью протекает в период интенсивного формирования кристаллизационной структуры. Начальная прочность цементного камня при прочих равных условиях тем выше, чем меньше промежутков времени между концом схватывания цементного теста и моментом максимального проявления тепловыделений в цементном камне. Напротив, чем больше этот промежуток времени, тем меньше начальная прочность цементного камня.

Установлено [16], что характер изменения прочности в цементном камне во времени, в том числе и ее падения, определяется скоростью перекристаллизации гидроалюминатов кальция, кристаллизацией гиббсита и фазовыми превращениями в направлении $CAH_{10} \rightarrow C_2AH_8 \rightarrow C_3AH_6$ (рис.1.3) Температурные условия в начале твердения цементного камня определяют также во многом и те процессы, которые возможны в этом камне при последующем его твердении. В условиях сравнительно низких и нормальных температур цементный камень уже в начале его твердения имеет достаточно высокие значения прочности, которые остаются на том же высоком уровне и при дальнейшем пребывании этого камня в таких же условиях. Однако высокие значения прочности цементного камня, приобретенные им в начале твердения, могут существенно снизиться в последующем при помещении этого камня на длительный срок в условия с повышенными температурой и влажностью окружающей среды (табл.1.2)

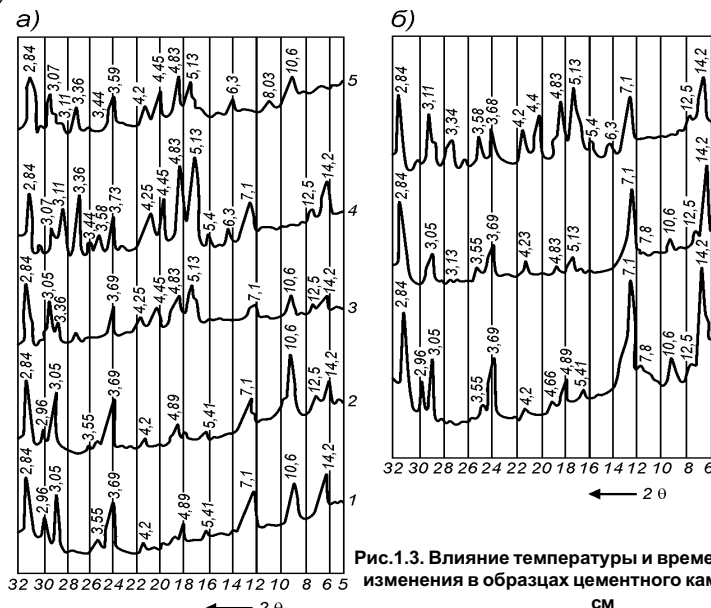


Рис.1.3. Влияние температуры и времени на фазовые изменения в образцах цементного камня размером,

а - 10x10x10; б - 5x5x5; 1...4 - рентгенограммы образцов в возрасте соответственно 3 и 28сут, 1 года, 5 лет, твердевших при 20 ± 2°C; 5 - то же, для образцов в возрасте 3 сут, твердевших при 40 ± 2°C.

Изменения прочности цементного камня на глиноземистом цементе в зависимости от температурных режимов твердения образцов и их возраста

Температурный режим твердения образцов, °С	20±2			30			45		
	3	28	45	60	90	120	150	180	360
Предел прочности при сжатии, Мпа	41,1	50,4	41,4	34,8	29,2	32,6	30,2	30,8	30,2

Если пребывание цементного камня при повышенных температурах (например, при 30—40°С) было непродолжительным (не более 2—3 мес), то прочность его в дальнейшем может полностью или почти полностью восстановиться. При этом чем выше значения начальной прочности и чем меньше проявились фазовые превращения в цементном камне в начале его твердения, тем больше диапазон возможных преобразований в дальнейшем и тем существеннее могут быть последующие колебания (в том числе падения и восстановления) его прочности.

Установлено [16], что прочность цементного камня снижается не ниже определенного уровня, который фиксируется уже в начале твердения в условиях повышенных температур. Относительно низкая прочность цементного камня, регистрируемая в начале его твердения при повышенных температурах, остается на том же уровне и при последующем его твердении в условиях повышенных температур. Колебания прочности в этом случае во времени не достигают существенных значений. Уровень такой конечной прочности цементного камня в воздушно-сухих условиях выше, во влажных — ниже.

Температурные условия в момент формирования структуры цементного камня имеют важное значение и для стеклоармированных композиций на его основе как при испытаниях на сжатие, так и при испытаниях на растяжение. На рис.1.4 приведены данные испытаний на растяжение шести серий образцов на основе глиноземистого цемента, направленно армированных стеклянными (алюмоборосиликатными) волокнами, которые в течение первых 3 сут выдерживались в термостате при различных температурах (от 0 до 30°С с интервалом 6°С) и влажности воздуха 95 ± 5%. Затем все серии образцов хранились в лабораторных условиях при температуре 20 ± 5°С и естественных изменениях влажности окружающей среды. Прочность образцов, выдержанных первые 3 сут при 18°С, была принята за 100%. Данные об изменениях прочности остальных серий образцов приведены на рис.1.4,а. На рис. 1.4,б приведены данные тех же испытаний, но за 100% приняты значения прочности всех шести серий образцов в возрасте 3 сут. Как видно, температурные условия влияют на показатели начальной прочности образцов при их растяжении (см. рис.1.4,а). Диапазон в различиях прочности образцов в последующие сроки их хранения в нормальных условиях сохраняется и составляет примерно 30—35% (см. рис.1.4,б). Хотя прочность на растяжение стеклоармированных композиций определяется в основном сопротивлением армирующих волокон, влияние цементного камня оказывается достаточно заметным, главным образом в обеспечении монолитности работы системы в целом, а также в перераспределении усилий и создании условий, обеспечивающих совместность работы волокон в армированном материале.

Таким образом, для оценки прочности конструкционных материалов на основе глиноземистого цемента необходимо учитывать условия их изготовления и последующей эксплуатации. В нормальных условиях отсутствует опасность существенных снижений прочности бетона, и его несущая способность в процессе эксплуатации может быть достаточно высокой. При условии длительного воздействия повышен-

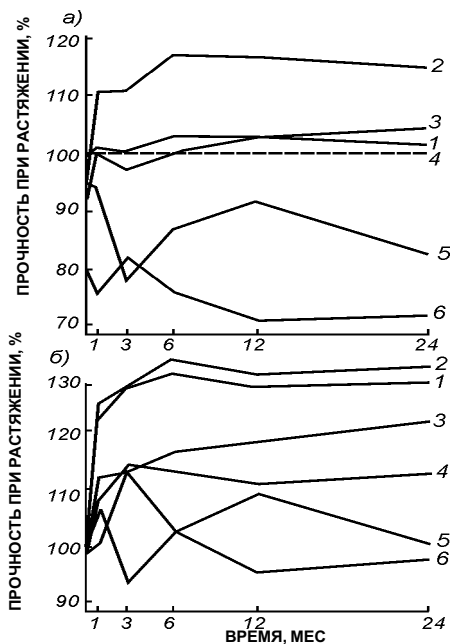


Рис.1.4 Влияние температуры и времени на прочность при растяжении стеклоармированных образцов на основе глиноземистого цемента

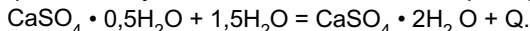
1...6 — твердение образцов в первые 3 сут, соответственно при 0; 6; 12; 18; 24; 30°C

ных температур (что проектировщикам должно быть заранее известно) прочностные параметры этого бетона должны определяться не в нормальных условиях, а в соответствии с той активностью вяжущего, которая и является действительной при повышенных температурах. В данном случае необходим дифференцированный подход как к вопросам оценки несущей способности материала, так и к определению рациональной области его применения и эксплуатации.

Гипсовые вяжущие. Стальная арматура в гипсовых изделиях подвергается интенсивной коррозии. Это связано главным образом с нейтральностью среды твердения гипсового камня ($\text{pH} = 6,5\text{—}8$). Вместе с тем, среда гидратации гипсовых вяжущих оказывается практически инертной ко всем видам минеральных волокон. Поэтому они являются эффективным армирующим материалом для гипсовых изделий.

Для дисперсно армированных конструкций целесообразно использовать строительный и высокопрочный (технический) виды гипса. Для производства гипса в нашей стране имеются неисчерпаемые запасы сырья (природный гипсовый камень). Изделия на основе гипса быстро приобретают высокую прочность, обладают высокой огнестойкостью, малой теплопроводностью. Циклы изготовления конструкций с применением гипса имеют, как правило, небольшую продолжительность, что обеспечивает высокую производительность технологического процесса.

Процесс твердения полуводного гипса описывается реакцией его гидратации



Для регулирования сроков схватывания гипсового теста (в том числе и в стеклоармированных композициях) используются добавки-замедлители, включая различные клеи, буру и другие подобные им вещества. В связи с недостаточной водостойкостью изделий на основе гипса их применение рекомендуется в помещениях с относительной влажностью воздуха не более 75%.

В прошлые годы значительные объемы гипса использовались для производства штукатурных растворов. Повышение индустриальности строительных конструкций, улучшение качества их поверхности существенно сократило объемы штукатурных растворов, привело к необходимости расширения номенклатуры и производства сборных гипсовых конструкций, в связи с чем появилась необходимость в решении новых задач, связанных с изысканиями эффективных материалов для армирования

этих конструкций. Исследования показывают, что для армирования указанных конструкций могут использоваться практически любые виды стандартных нещелочестойких стеклянных волокон массового производства. В данном случае важное значение приобретают работы, направленные на повышение водостойкости стеклоармированных гипсовых конструкций, что позволит значительно расширить область их применения.

Определенный интерес представляет применение в дисперсно-армированных конструкциях бетонов на основе гипсоцементно-пуццолановых вяжущих, которые включают 50—80% гипсового вяжущего, 15–20% портландцемента и 10—25% гидравлических добавок. Важно, что гипсоцементно-пуццолановые вяжущие (ГЦПВ) в отличие от обычного гипса обладают более высоким уровнем водостойкости. ЦНИИПромзданий совместно с МИСИ им. В.В. Куйбышева (ныне МГСУ) были проведены специальные исследования по определению оптимальных составов ГЦПВ для стеклоармированных композиций. Наиболее предпочтительными оказались составы 75:10:15 и 80:16:4 (гипс:пуццолановый портландцемент:трепел), при этом значения рН среды твердения не превышали 10—11. Испытания показали, что водопоглощение у образцов на основе ГЦПВ меньше, чем у образцов из гипса. Прочность на сжатие стеклоармированных композиций на основе ГЦПВ при твердении их во влажных и водных условиях повышалась с течением времени, а прочность аналогичных образцов из гипса заметно снижалась. Прочность при растяжении в подобных композициях определяется в основном сопротивлением армирующих волокон, причем стабильность прочности во времени тем выше, чем ниже при прочих равных условиях значения рН среды твердения вяжущего.

1.2. АРМИРУЮЩИЕ ВОЛОКНА, ИХ СВОЙСТВА

Не все волокна отвечают требованиям, которые предъявляются к арматуре бетонов. Здесь прежде всего необходимо учитывать такие показатели, как прочность, деформативность, химическая стойкость армирующего материала, его адгезия к бетону, коэффициент линейного расширения и т. д. Важное значение имеют также вопросы стоимости армирующих материалов и объемы их производства, которые в ряде случаев играют решающую роль. Например, известны идеальные волокна в виде нитевидных монокристаллов (так называемые “усы”), характеризующиеся чрезвычайно высокими прочностью на разрыв и модулем упругости, большой устойчивостью к различным средам. Однако производство этих волокон даже в промышленно развитых странах пока ограничено. В то же время такие распространенные и освоенные промышленностью многих стран волокна, как капрон, нейлон и др., не могут быть эффективно использованы в качестве несущей арматуры, главным образом из-за более низких (по сравнению с бетоном) значений модуля деформации.

В настоящее время используются в основном три вида армирующих волокнистых материалов: волокна (фибры) в виде коротких отрезков тонкой стальной проволоки, стеклянные волокна и волокна на основе полипропилена. Эти материалы различаются по своим свойствам, поэтому к решению вопросов их применения в качестве арматуры необходимо подходить дифференцированно. Наиболее эффективной в конструктивном отношении является стальная фибровая арматура, модуль упругости которой примерно в 6 раз превышает модуль упругости бетона. Элементарные стеклянные волокна диаметром 8—10 мкм по прочности соответствуют высокоуглеродистой холоднотянутой проволоке (1800—2500 МПа), а по плотности в 3,5 раза легче. Модуль упругости стекловолокнистых материалов ниже, чем стали, но примерно втрое превышает модуль упругости бетона и в среднем в 6 раз больше модуля упругости гипсового камня. Это предопределяет реальные возможности применения стеклянных волокон в качестве эффективного армирующего материала.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие-I.....	3
Предисловие-II.....	5
Предисловие -III.....	8
Предисловие-IV.....	11
Введение-I.....	14
Введение-II.....	21
I. ИСХОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....	
Глава 1. Материалы для дисперсно армированных бетонов.....	38
1.1. Минеральные вяжущие.....	38
1.2. Армирующие волокна, их свойства.....	46
Литература.....	85
Глава 2. Технологические методы изготовления дисперсно армированных бетонов.....	87
2.1. Бетоны, армированные стальными фибрами.....	87
2.2. Бетоны, армированные неметаллическими волокнами.....	98
2.3. Торкретфибробетон.....	102
Литература.....	105
Глава 3. Вопросы теории и проектирования.....	107
3.1. Пространственное отображение (моделирование) структуры дисперсно армированного бетона.....	110
3.2. Приведение фибрового (хаотичного) армирования к эквивалентному направленному.....	135
3.3. Оптимальные пределы армирования фибробетонных конструкций.....	173
3.4. Расчет прочности элементов из фибробетона на растяжение и изгиб.....	180
3.5. Расчет элементов из фибробетона по раскрытию трещин и деформациям.....	182
Литература.....	194
Глава 4. Свойства дисперсно армированных бетонов.....	197
4.1. Бетон, армированный стальными фибрами.....	197
4.2. Стеклоармированные композиции на основе цемента и гипса.....	215
4.3. Бетонные материалы, армированные синтетическими волокнами.....	226
4.4. Торкретфибробетон с применением полимерных и стальных волокон.....	228
Литература.....	238
II. РАЗВИТИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ КОНЦЕПЦИЙ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНО АРМИРОВАННЫХ БЕТОНОВ.....	
Глава 5. Совершенствование конструктивных решений стальных фибр.....	241
5.1. Эффективность применения фибр с волнистыми отгибами по концам.....	242
5.2. Расчет прочности растянутой зоны бетонных элементов, армированных фибрами оптимального профиля.....	256
5.3. Пакеты фибр оптимального профиля, технология их изготовления.....	266
Литература.....	271

Глава 6. Условия рационального применения крупного заполнителя в бетонных элементах, армированных стальными фибрами	272
Литература.....	296
Глава 7. Влияние удельной поверхности армирующих волокон на эффективность работы сталефибробетонных конструкций	297
Литература.....	302
Глава 8. Технические особенности работы композитов на основе дисперсно армированных бетонов	303
Литература.....	320
Глава 9. Оптимизация параметров дисперсного армирования фибробетонных конструкций	321
Литература.....	327
Глава 10. Анализ работы композиционных материалов с пластичными и хрупкими матрицами	328
Литература.....	336
Глава 11. Особенности работы композитов на основе бетона дисперсно армированного неметаллическими (стеклянными, базальтовыми) волокнами	337
11.1. Напряженно-деформированное состояние совокупности волокон в стеклоармированных бетонных элементах.....	337
11.2. Устойчивость базальтовых волокон в среде гидратирующихся цементов.....	342
11.3. Прогнозирование изменений во времени прочности стеклофибробетонных композитов.....	347
Литература.....	358
III. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ	360
Глава 12. Несущие и ограждающие конструкции общестроительного назначения	360
12.1. Забивные сваи.....	362
12.2. Плиты покрытий и перекрытий, кровельные панели.....	376
12.3. Колонны и балки.....	388
12.4. Дорожные и аэродромные покрытия, полы.....	399
12.5. Тонкостенные плоские, профилированные и пространственные конструкции ограждений.....	422
12.5.1. Трехслойные стеклоармированные панели покрытий, подвесные потолки, воздуховоды, перегородки.....	425
12.5.2. Стеновые панели, облицовочные плиты, ограждения лоджий, балконов.....	441
12.5.3. Пространственные конструкции.....	462
12.6. Лотки и каналы.....	468
12.7. Несъемная опалубка.....	482
Литература.....	499
Глава 13. Инженерные сооружения	504
13.1. Резервуары для воды, очистные сооружения.....	504
13.2. Резервуары для нефти и нефтепродуктов.....	522
13.3. Подпорные стены.....	550
Литература.....	552
Глава 14. Сооружения специального назначения	554
14.1. Гидротехнические сооружения, тоннели.....	554
14.2. Контейнеры и хранилища для радиоактивных отходов.....	561

14.3. Банковские и музейные хранилища ценностей.....	570
14.4. Сооружения для ликвидации аварийных ситуаций на дне моря.....	580
Литература.....	583
Глава 15. Композиционные материалы как средство архитектурной выразительности.....	585
Литература.....	590
Глава 16. Архитектурные конструкции из стеклофибробетона с дискретным и свободно ориентированным армированием: свойства материала, особенности проектирования	591
16.1. Усадка и температурно-влажностные деформации	591
16.2. Системы крепления стеклофибробетонных панелей.....	593
16.3 Детали крепежных узлов... ..	595
16.4. Конструктивные варианты технических решений крепежных узлов	597
16.5. Монтажные схемы и технические решения крепления стеклофибробетонных стеновых панелей по высоте каркаса здания	604
16.6. Технические решения узлов крепления декоративных изделий фасадов	606
16.7. Сопrotивление длительно действующим нагрузкам	609
16.8. Принципы проектирования стеклофибробетонных конструкций	611
16.8.1. Диаграммы «нагрузка-деформация», особенности разрушения стеклофибробетона	611
16.8.2. Зависимость механических характеристик стеклофибробетона от объемного содержания и длины волокон	613
16.8.3. Влияние времени на изменение механических показателей стеклофибробетона	615
16.8.4. Принципы проектирования	616
Литература	620
Глава 17. Особенности формирования структуры композитов на основе дисперсно армированных бетонов	621
Литература	628
Заключение.....	629

Научное издание

ФЕЛИКС НИСОНОВИЧ РАБИНОВИЧ

**КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ
ДИСПЕРСНО АРМИРОВАННЫХ
БЕТОНОВ**

Вопросы теории и проектирования,
технология, конструкции

четвертое издание,
переработанное и дополненное

Компьютерный набор и верстка: О.А. Меньшикова, Д.А. Матвеев

Лицензия ЛР №0716188 от 01.04.98

Подписано к печати 31.10.11. Формат 70x100/16
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл.40.5 печ. л. Заказ № Тираж 1000экз.

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26,
отдел реализации – оф. 511
тел., факс: (499)183-56-83, e-mail: iasv@mgsu.ru, <http://www.iasv.ru/>

Отпечатано в типографии ППП Типография Наука
121099, Москва, Шубинский пер., 6.