

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЛЕГКИЕ БЕТОНЫ

А.С. ИНОЗЕМЦЕВ, Е.В. КОРОЛЕВ

А.С. ИНОЗЕМЦЕВ, Е.В. КОРОЛЕВ

ВЫСОКО ПРОЧНЫЕ ЛЕГКИЕ БЕТОНЫ



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2022

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет

А. С. Иноземцев, Е. В. Королев

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЛЁГКИЕ БЕТОНЫ

Монография

Санкт-Петербург
2022

УДК 691+691.327.3

ББК 38.626.1

И67

Рецензенты

Гусев Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор, президент Российской и Международной инженерных академий, член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки РФ, лауреат семи Государственных премий и премий Правительства СССР и РФ в области науки и образования.

Федосов Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, академик РААСН, академик Петровской академии наук и искусств, заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники.

Иноземцев, А. С.

И67

Высокопрочные лёгкие бетоны : монография / А. С. Иноземцев, Е. В. Королев ; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2022. – 192 с. – Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-9227-1265-1

В монографии рассматриваются этапы исследования структурообразования и разработки высокопрочных лёгких бетонов – строительных материалов, сочетающих низкую среднюю плотность и высокую прочность. Результаты, представленные в работе, не только имеют практическую ценность, но и содержат различные методические приёмы для анализа структурообразования цементных материалов, в том числе с минеральными добавками. Дано описание реологической аномалии, возникающей в цементно-минеральных смесях, и показана ведущая роль пластификатора.

Монография предназначена для специалистов строительной отрасли, педагогических и научных работников, аспирантов и студентов специальностей и направления подготовки «Строительство».

Табл. 59. Ил. 82. Библиогр.: 222 назв.

Печатается по решению Научно-технического совета СПбГАСУ

УДК 691+691.327.3
ББК 38.626.1

ISBN 978-5-9227-1265-1

© Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет, 2022
© Иноземцев А. С., Королев Е. В., 2022

Теория без практики мертва и бесплодна,
а практика без теории бесполезна и пагубна.

*П. Л. Чебышев, русский математик
и механик, XIX в.*

ВВЕДЕНИЕ

Строительное материаловедение является объектом пристального внимания специалистов, предметом для исследований и разработок. Для всех других строительных материалы и изделия – это материальный ресурс для практического использования.

Исследователи по-разному определяют развитие строительного материаловедения, но в целом выделяют три этапа. Первый этап – это длительный период формирования и сохранения мастерства, когда отдельные хранители знания овладевали технологиями получения и применения тех или иных строительных материалов. Эти технологии, систематизированные с применением естественно-научных знаний, предопределили наступление следующего этапа – периода строительного искусства. На этом этапе происходит переход на массовое производство строительных материалов. Кроме того, проводится систематизация накопленных знаний: определяются области применения строительных материалов, формулируются требования к компонентам, устанавливаются основные закономерности влияния рецептурных и технологических факторов на свойства материала, создаются новые виды строительных материалов и изделий, а также разрабатываются новые индустриальные способы их производства. В результате систематизации и обобщения знаний сформировались две самостоятельные и взаимодополняющие теории: полиструктурная теория В. И. Соломатова и теория искусственных строительных конгломератов И. А. Рыбьева.

Эти теории стали основой для третьего этапа развития строительного материаловедения, на котором также выделяются две составляющие – теория и практика. В указанных теориях изложены системно-структурный подход (факторы – структура – свойства) и фундаментальная взаимосвязь между свойствами (закон створа, имеющий статус открытия). В соответствии с этими теориями строительные материалы представляются полиструктурными, то есть состоящими из нескольких разномасштабных структурных уровней. На каждом иерархическом структурном

уровне может быть реализован системно-структурный подход. Такой методический приём позволяет не только исследовать закономерности структурообразования материала, выявить доминирующие рецептурные и технологические факторы, но и алгоритмизировать процедуру разработки материала.

На основе системного анализа и теории принятия решения идеи, изложенные в теориях строительного материаловедения, получили необходимое обоснование и развитие. В частности, обосновано отнесение строительных материалов к сложным техническим системам с характерными для таких систем свойствами [1–4], обоснована эффективность материалов с природоподобными параметрами структуры [5], выявлен техногенный метасоматоз [6, 7], обоснованы критерии качества строительных материалов, имеющих высокую технико-экономическую эффективность [8, 9] и многое другое.

Теории строительного материаловедения принципиально важны как для обучения специалистов в области строительного материаловедения, так и для дальнейшего совершенствования методических подходов. Однако для указанных теорий присущи недостатки, из которых принципиально важным является отсутствие «предсказательной силы», то есть способности прогнозировать результаты при варьировании величин различных факторов (например, аналогично закону Боломея – Скрамтаева). Создание теории, лишённой этого недостатка, является одной из фундаментальных задач третьего этапа развития строительного материаловедения.

В отличие от «потенциального» подхода, представленного в теориях строительного материаловедения, другим принципиально важным направлением его развития является анализ кинетики структурообразования строительных материалов. Естественно, знания о скорости формирования параметров структуры и их взаимосвязи с эксплуатационными свойствами материала существенно дополняют теоретические обобщения. Значимые результаты в данном направлении были получены при привлечении фундаментальных теорий естествознания [10–14].

Очевидно, что структурообразованию любого строительного материала присущи особенности, для анализа которых могут быть использованы методические приёмы, имеющие более широкое применение. В данной монографии представлены способы анализа структурообразования, апробированные на высокопрочных лёгких бетонах, но и пригодные для исследования других строительных материалов.

Количественные оценки демонстрируют, что разработка материалов, обладающих свойствами, характерными как для конструкционных, так и для теплоизоляционных материалов, перспективна в связи с высоким технико-экономическим потенциалом их применения. К такой группе строительных материалов относятся высокопрочные лёгкие бетоны.

В монографии последовательно представлены этапы исследования и разработки высокопрочных лёгких бетонов: обоснование выбора объекта исследования и результаты, полученные мировым сообществом (глава 1), методические аспекты разработки строительных материалов с обоснованием выбора компонентов и параметров структуры (глава 2), анализ структурообразования цементно-минеральной матрицы высокопрочных лёгких бетонов (глава 3), технологические свойства бетонной смеси и эксплуатационные свойства высокопрочных лёгких бетонов (глава 4), практические аспекты апробации технологии и технико-экономическое обоснование применения таких бетонов в различных областях (глава 5).

В монографии представлены результаты, полученные при выполнении различных исследований в рамках:

– стипендии Президента Российской Федерации молодым учёным и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики СП-565.2012.1 по теме «Энергоэффективный наномодифицированный высокопрочный лёгкий бетон» (2012–2014 гг.);

– НИР в рамках программы УМНИК Фонда содействия инновациям № 2392ГУ2/2014 от 20.06.2014 «Разработка составов наномодифицированных высокопрочных лёгких бетонов» (2014 г.);

– гранта Президента Российской Федерации по поддержке молодых российских учёных – кандидатов наук МК-5950.2015.8 по теме «Разработка технологии энергоэффективных наномодифицированных высокопрочных лёгких бетонов полифункционального назначения с повышенными эксплуатационными свойствами» (2015–2016 гг.);

– прикладных научных исследований в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по теме «Разработка новой технологии энерго- и ресурсоэффективных наномодифицированных композиционных материалов для строительства в эксплуатационных условиях Тихоокеанского региона на основе региональных сырьевых ресурсов России и Вьетнама» № 14.583.21.0072 (RFMEFI58318X0072) (2018–2020 гг.);

– гранта Президента Российской Федерации по поддержке молодых российских учёных – кандидатов наук МК-1394.2020.8 по теме «Разработка полифункционального строительного материала на минеральной основе для 3D-печати» (2020–2021 гг.);

– НИОКР в рамках программы СТАРТ-1 Фонда содействия инновациям № 3880ГС1/63119 по теме «Технология производства изделий из эффективного лёгкого строительного композита с повышенными эксплуатационными свойствами» (2021 г.);

– НИР в рамках государственного задания на тему «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз» № FSWG-2020-0007 при поддержке Министерства науки и высшего образования (2020–2022 гг.).

Научное обоснование технологических решений представлено в диссертациях на соискание учёной степени кандидата технических наук по научной специальности «Строительные материалы и изделия»:

- Структура и свойства наномодифицированных высокопрочных лёгких бетонов (автор: Иноземцев Александр Сергеевич, научный руководитель: Королев Е. В.);

- Высокопрочные лёгкие фибробетоны конструкционного назначения (автор: Зьонг Тхань Куй, научный руководитель: Королев Е. В.).

Техническая новизна технологических решений защищена патентами Российской Федерации на изобретение:

- Высокопрочный лёгкий бетон RU 2515450 C1 от 10.05.2014 г.;
- Высокопрочный лёгкий фибробетон RU 2548303 C1 от 20.04.2015 г.;
- Наномодифицированный высокопрочный лёгкий бетон RU 2718443 C1 от 06.04.2020 г.;

- Лёгкий строительный композит RU 2773899 C1 от 14.06.2022 г.;
- Наномодифицированный высокопрочный лёгкий бетон на композиционном вяжущем RU 2775585 C1 от 26.07.2022 г.

Монография предназначена для специалистов строительной отрасли, педагогических и научных работников, аспирантов и студентов специальностей и направления подготовки «Строительство».

* * *

Монография издаётся при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания на тему «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз» № FSWG-2020-0007.

ГЛАВА 1. ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЛЁГКИЕ БЕТОНЫ. ТRENДЫ РАЗВИТИЯ

1.1. Опыт применения

Улучшение эксплуатационных свойств строительных материалов для повышения эффективности их применения является основополагающей материаловедческой задачей. Технологии производства лёгких бетонов, получивших широкое распространение в строительстве, качественно меняются – совершенствуется структура, повышаются свойства материалов и расширяется область их применения. Значительный резерв повышения эффективности строительных материалов сосредоточен в получении строительных материалов, применимых в нескольких областях. Перспективны следующие направления повышения их эффективности [15]:

1. Энергоэффективность:

- *конструкционные лёгкие материалы* – материалы с низкой средней плотностью, имеющие требуемую конструкционную прочность;
- *композиционные вяжущие вещества* – гидравлические вяжущие вещества, содержащие комплекс минеральных и органоминеральных компонентов, в том числе вторичные ресурсы (отходы промышленности), повышающие долговечность материала;
- *полимерные композиционные материалы* – материалы на основе термопластов и реактопластов с повышенной тепло-, термо- и атмосферостойкостью;
- *цементные вяжущие* на основе многотоннажных отходов промышленности, применяемые в неответственных конструкциях;
- *комплексы добавок*, обеспечивающих повышение качества и снижение энергоёмкости продукции;

- *композиционная арматура* – технологическая арматура, изготовленная из неметаллических компонентов;
- *добавки-адгезивы* – вещества, повышающие прочность сцепления арматуры с бетоном и/или с заполнителем;
- *добавки-демпферы* – вещества, обеспечивающие снижение внутренних напряжений и блокирование протекания коррозионных процессов на границе раздела «матричный материал – дисперсная фаза».

2. Безопасность:

- *биостойкие материалы* – материалы, ингибирующие процессы жизнедеятельности микроорганизмов;
- *радонобезопасные материалы* – материалы, предотвращающие эмиссию радона в помещения;
- *трещиностойкие материалы* – материалы, имеющие повышенный коэффициент трещиностойкости (коэффициент интенсивности напряжений первого рода).

3. Материалы-преобразователи и декоративные покрытия:

- *материалы с регулируемыми декоративными характеристиками* – материалы, способные к изменению цветовой гаммы (и рисунка) в зависимости от освещённости и предпочтений потребителя;
- *теплоизлучающие материалы* – материалы, преобразующие электричество в тепловую энергию;
- *теплогенерирующие материалы* – материалы, преобразующую механическую нагрузку в тепловую энергию;
- материалы, имеющие *фотокаталитическую активность* и обеспечивающие снижение уровня загрязнения воздуха;
- материалы, обеспечивающие создание покрытий с *регулируемой фальшностью*.

Представленные материалы в настоящее время разрабатываются различными группами исследователей. Значительный интерес вызывают материалы, сочетающие низкую среднюю плотность и высокую прочность, конструкционные лёгкие материалы.

Конструкционный лёгкий бетон применяется в различных областях, включая возведение многоэтажных каркасных зданий, мостовых сооружений, морских нефтяных платформ и других предварительно напряжённых железобетонных элементов конструкций [16, 17]. Использование конструкционного лёгкого бетона позволяет решить проблемы большого веса зданий и сооружений, их устойчивости в про-

цессе эксплуатации. Благодаря сочетанию свойств конструкционного лёгкого бетона обеспечиваются широкие возможности при проектировании и экономическая эффективность строительства за счёт увеличения полезной нагрузки конструкций, улучшения сейсмостойкости, пожаробезопасности, возможности уменьшения сечения конструкций, снижения материалоемкости (бетона и арматурной стали), а также дополнительные преимущества при транспортировке и монтаже сборных элементов.

Опыт применения бетона известен с древних времён, однако нехватка сырья для заполнителей существовала уже давно [18]. Для территорий, не обладающих сырьевой базой, основным решением, альтернативным производству заполнителя из плотных пород, было измельчение пористой пемзы или вулканического шлака. Развитие производств лёгких заполнителей способствовало расширению опыта применения конструкционных лёгких бетонов. Высокий спрос на вспученные заполнители и бетонные изделия из них обеспечивало гражданское строительство, особенно в период развития высотного строительства в США.

Бетоны на пористых заполнителях стали применяться не только в малоэтажном строительстве, но и при возведении каркасных многоэтажных зданий. Первое из таких зданий в Великобритании построено с использованием конструкционного лёгкого бетона в 1958 году в Брентфорде [19, 20]. Конструкционный лёгкий бетон успешно используется почти четыре десятилетия производителями сборного и предварительно напряжённого бетона в Северной Америке [18]. При этом применение такого бетона начинает распространяться на большепролётные конструкции. Первым небоскрёбом, в котором в надземных конструкциях полностью был применён конструкционный лёгкий бетон, является здание Dallas Statler-Hilton высотой 18 этажей, построенное в 1955 году [19]. Впоследствии в разные годы различные сооружения становились самыми высокими объектами, в которых во всех несущих элементах этажей и перекрытий полностью применялся конструкционный лёгкий бетон. Это 180-метровые башни Marina City в г. Чикаго (1962 г.) и 184-метровая башня Park Regis Tower в г. Сидней (1967 г.).

В Европе конструкционные лёгкие бетоны также широко применяются [21]. Так, например, только в Норвегии в период с 1989 по 1997 гг. уложено примерно 200 тыс. м³ таких бетонов. Среди уникальных соору-

жений – здание в Нью-Йоркском международном аэропорту, в котором четыре секции, перекрывающие помещение площадью 90×60 м, изготовлены из керамзитобетона, а также купол актового зала Иллинойского университета, при возведении которого замена тяжёлого бетона на лёгкий позволила снизить массу здания почти на 7,0 тыс. т.

Применение конструкционного лёгкого бетона не ограничивалось высотными жилыми и офисными зданиями. Использование конструкций с меньшим сечением из этого бетона позволило расширить архитектурные возможности при строительстве, в том числе и общественных зданий. Один из таких примеров – сложная форма кровли терминала аэропорта Кеннеди в виде коноида или гиперболического параболоида, толщина используемых внешних плит в конструкции была уменьшена до 63,5 мм [19].

Существуют также примеры [19], демонстрирующие возможность увеличения этажности зданий за счёт использования лёгкого бетона. Сочетание конструктивных решений компании Southwestern Bell Telephone Company и низкой средней плотности лёгкого бетона позволило увеличить высоту существующего здания с 14 до 28 этажей, что на 6 этажей больше, чем это было возможно при использовании тяжёлого бетона. Офисное здание в Оттаве, первоначально спроектированное на 22 этажа конструкций из тяжёлого бетона, было построено за счет применения легкого бетона на 25 этажей больше, а высоту Магнолийского государственного совета в городе Джексон увеличили с 2 до 6 этажей.

Помимо общественных и жилых зданий, из лёгкого бетона построено более 800 мостовых сооружений в Северной Америке. Это мост Sebastian Inlet 1965 года постройки [18], два моста Chesapeake Bay, возведённые в 1953 и 1975 годах. При строительстве моста San Francisco-Oakland Bay использование конструкционного лёгкого бетона позволило уменьшить вес каждого квадратного метра сооружения на 122 кг (итоговая масса 14 333 т) [19]. Это, в свою очередь, позволило уменьшить площадь сечения и стоимость элементов в верхней части моста и существенно снизить нагрузку на основание. При этом экономия составила 3 млн долл. США. Позднее, в 1999 году, на юге Норвегии был построен самый большой мост Stolma Bridge со свободной консольной конструкцией с длиной основного пролёта 301 м [22].

В России наибольшее распространение получили высокопрочные лёгкие бетоны на керамзитовом заполнителе [23]. В последнее время по-

является опыт реконструкции мостов из лёгких бетонов на полых микросферах. Так, в г. Кимры Тверской области такой бетон использовался для восстановления плит моста через р. Волгу [24–26].

Применение конструкционного лёгкого бетона в сборных конструкциях особенно актуально в сложных эксплуатационных условиях сооружений. Например, при строительстве надземной части стадиона Dodger Stadium в городе Лос-Анджелесе большинство конструктивных элементов (перекрытия, колонны, лестницы) были изготовлены из бетона на сланцевом заполнителе. В высотном строительстве пример сборного строительства из конструкционного лёгкого бетона – здание Standard Bank высотой 139 м в городе Йоханнесбурге [27], где были использованы 10-метровые плиты двутаврового сечения толщиной 75 мм. В ряде случаев сборные конструкции из лёгкого бетона обеспечивают высокую экономическую эффективность в сложных архитектурных проектах, например, при строительстве кровли терминала в аэропорту города Окленд удалось снизить стоимость строительства на 30 %.

В мире накоплен богатый опыт применения предварительно напряжённых конструкций из лёгкого бетона при строительстве высотных зданий [28] (табл. 1.1). Среди отмеченных объектов можно выделить небоскрёбы высотой до 220 м в городе Хьюстон, 180-метровое многоэтажное здание в городе Сидней, высотный объект в Лондоне (142 м), мост в округе Оуэн (штат Кентукки) в США с пролётом до 105 м.

При проектировании плавающих бетонных конструкций прочность бетона и его плотность являются основными параметрами. Помимо очевидного преимущества меньшей средней плотности конструктивных лёгких бетонов по сравнению с традиционным тяжёлым бетоном, такой материал имеет лучшие теплоизоляционные характеристики и плавучесть, что формирует перспективы его широкого применения в строительстве плавучих конструкций (табл. 1.2).

Снижение средней плотности бетона и, как следствие, массы сооружения является наиболее предпочтительным для таких объектов, что объясняется их лучшей стабильностью при воздействии ветровых и волновых потоков в процессе эксплуатации [30]. В то же время этот фактор важен для повышения плавучести мостов [31].

Приведённые примеры показывают мировую тенденцию в строительстве по использованию конструктивных лёгких бетонов, объясняемую широкой областью их применения – от многоэтажных конструк-

Таблица 1.1

**Строительные объекты и технические характеристики лёгкого бетона,
использованного при возведении высотных зданий, мостов и специальных
сооружений [19]**

Тип	Название объекта	Год	Город	Предел прочности при сжатии $R_{сж}$, МПа	Средняя плотность $\rho_{ср}$, кг/м ³	Удельная прочность $R_{уд}$, МПа
Высотные здания	Башни Marina City	1962	Чикаго	25...28	1680	14,9
	Башня Australia Square	1967	Сидней	30...33	1870	16,0
	Башня Lake Point	1968	Чикаго	25...28	1730	14,5
	Здание Standard Bank	1968	Йоханнесбург	35...38	1950	18,0
	Административное здание BMW	1973	Мюнхен	30...33	1850	16,2
Мосты	Woodrow Wilson Bridge	1961	Вашингтон	35...38	1840	19,0
	Martinez Benicia Bridge	1962	Калифорния	28	1840	15,2
	Silver Creek Overpass Bridge	1968	Юта	22	1600	13,8
	The Friarton Bridge	1988	Шотландия	30...33	1700	17,6
	Cooper River Bridge	1992	Южная Каролина	28	1800	15,6
Специальные сооружения	Терминал аэропорта Кеннеди	1960	Нью-Йорк	35...38	1850	18,9
	Выставочный комплекс	1974	Калгари	40...44	1850	21,6
	Стадион Westpac Trust	1999	Веллингтон	35...38	1800	19,4
	Немецкий технический музей	2001	Мюнхен	25...28	1400	17,9
	Тяжёлый оффшорный подъемник	2009	Роттердам	35...38	1580	22,2

ций и большепролётных перекрытий до сооружений сложной архитектурной формы.

Снижение веса конструктивных элементов зданий позволяет решать сложные архитектурные задачи и расширить область применения легких бетонов при строительстве многоэтажных и высотных зданий, возведении большепролётных сооружений, устройстве сложных строительных объектов, в которых применение высокоплотных материалов невозможно. Кроме того, такие бетоны могут быть рекомендованы для строительства в сейсмоопасных районах или в местах пролегания подземных коммуникаций (линии метрополитена, тоннели и т. д.).

Таблица 1.2

Строительные объекты и технические характеристики конструкционного лёгкого бетона, использованного при возведении оффшорных и плавучих бетонных конструкций [29]

Тип	Название объекта	Год	Страна	Предел прочности при сжатии $R_{ск}$, МПа	Средняя плотность $\rho_{ср}$, кг/м ³	Удельная прочность $R_{уд}$, МПа
Плавучие конструкции	Наклонная башня	1984	Норвегия	71	1920	37
	Платформа Snorre	1991		65	1970	33
	Платформа Heidrum	1995		71	1940	36
	Платформа Troll A и Troll B	1995		70...75	2250	31...33
	Нефтяная платформа Hibernia	1997	Канада	80	2170	37
Понтонные мосты	Мост Bergsøysundet на 7 понтонах	1992	Норвегия	55	1900	29
	Мост Nordhordland на 10 понтонах	1994		55	1900	29

1.2. Существующие технологии

Как известно, снижение средней плотности бетонов за счёт насыщения его газовой фазой или введения лёгких (пористых) заполнителей приводит к уменьшению прочности материала [32]. Поэтому получение материала с высокой прочностью при снижении его средней плотности в настоящее время – одна из проблем строительной отрасли. Актуальной задачей является получение конструкционных лёгких бетонов со средней плотностью менее 1500 кг/м³ и прочностью на сжатие более 50 МПа или удельной прочностью более 30 МПа, которые принято называть высокопрочными лёгкими бетонами.

Учитывая высокую распространённость конструкционных лёгких бетонов в практике строительства в странах Америки и Европы, можно провести анализ эффективных решений, позволивших получить материал с наименьшей плотностью и большей прочностью (максимальной удельной прочностью).

Заполнитель является важным компонентом бетона, оказывающим существенное влияние на параметры структуры и свойства материала. Международный опыт показывает возможность получения конструкционного лёгкого бетона на вспученных заполнителях с прочностью

от 57 до 102 МПа при средней плотности от 1600 до 1900 кг/м³ [33]. В России опыт основывается преимущественно на разработках составов на керамических заполнителях [34]. В зависимости от размера керамзитового заполнителя могут быть получены лёгкие бетоны со средней плотностью 1500...1600 кг/м³ и прочностью при сжатии 37...44 МПа. В странах Тихоокеанского региона в последнее время высокий потенциал и перспективу для производства конструкционного лёгкого бетона имеет заполнитель из золы-уноса [35]. В зависимости от содержания золыного заполнителя достигается средняя плотность лёгкого бетона 1650...2015 кг/м³ [36]. При этом прочностные характеристики могут варьироваться от 23 до 74 МПа и от 2,0 до 4,9 МПа для предела прочности при сжатии и изгибе соответственно. Использование золыного заполнителя фракций 4...8 и 8...16 мм в определённом соотношении совместно с кварцевым песком, портландцементом, минеральной добавки из золошлаковой смеси при затворении раствором поликарбоксилатного пластификатора позволяет получить конструкционный лёгкий бетон со средней плотностью 1850 кг/м³ и прочностью до 54 МПа [37]. За счёт высокого расхода портландцемента и небольшого размера лёгкого заполнителя (9 или 13 мм) некоторые предприятия изготавливают бетон с прочностью 40...50 МПа [38].

Прочность при сжатии является основным параметром для конструкционных лёгких бетонов, к которым относят материал со средней плотностью от 1600 до 2000 кг/м³ и прочностью на сжатие более 15 МПа [39]. Прочность бетона формируется из механических свойств заполнителя и цементной матрицы, а также связана с протеканием физико-химических процессов на границе раздела фаз [40–42]. К физическим процессам можно отнести уплотнение зоны контакта вследствие миграции жидкости из цементно-минеральной матрицы в пористые частицы заполнителя. Химические процессы характеризуются накоплением кристаллов гидроксида кальция на внешней оболочке заполнителя [43]. Использование пуццолановых добавок, таких как микрокремнезём, зола-уноса, метакаолин, вулканическая пыль, сланцы или кальцинированная глина, как и для традиционных бетонов, способствует повышению прочности [44]. В сочетании с водоредуцирующими добавками можно обеспечить прочность таких лёгких бетонов до 35...70 МПа при средней плотности 1500...1900 кг/м³ [45]. Использование диоксида кремния или уменьшение В/Ц-отношения позволяет, как и для традици-

онных бетонов, значительно снизить воздухопроницаемость композита на зольном заполнителе [44].

К особенностям структуры зольного заполнителя можно отнести наличие спечённой оболочки, образующейся в процессе обжига при температуре более 1000 °С. Более плотная структура внешних слоёв заполнителя снижает как воздухопроницаемость бетона [1], так и способность диффузии агрессивных сред, содержащих хлористые или сульфатные соединения [2].

Учитывая особенности химического состава сырья для получения зольного заполнителя, необходимо уделить внимание пуццолановой активности такого заполнителя. По мере увеличения температуры термообработки бетонных изделий из зольного заполнителя увеличивается пуццолановая реакционная способность между заполнителем и цементной пастой [3]. С одной стороны, протекание пуццолановой реакции между зольным заполнителем и цементной пастой незначительно [46], с другой – реакционная способность заполнителя сравнима с реакционной способностью самой золы-уноса [47, 48].

В России для получения лёгких бетонов предлагается использовать стеклогранулят, представляющий собой обжиговый заполнитель с насыпной плотностью 150...300 кг/м³ и прочностью в цилиндре 0,5...2,0 МПа [49], полученный путём предварительной обработки кремнезёмистых пород щелочным компонентом с последующим обжигом во вращающихся печах. Однако область применения такого материала ограничивается конструкционно-теплоизоляционными бетонами, так как прочность при сжатии не превышает 15 МПа [50].

Проницаемость лёгкого бетона на пористом заполнителе на 50 % больше, чем у тяжёлого бетона на плотном заполнителе с аналогичным соотношением компонентов [51, 52]. При этом проницаемость бетона на мелком пористом заполнителе меньше, чем у составов, приготовленных с крупным или комбинированным заполнителем при прочих равных условиях [51].

В России также накоплен теоретический и практический опыт применения полых микросфер в композиционных материалах с повышенными эксплуатационными свойствами [25, 53]. Использование в составе бетона базальтового микроволокна (длина 500 мкм, диаметр 10 мкм), модифицированного полиэдральными многослойными углеродными наноструктурами фуллероидного типа, позволило получить компози-

ты, наполненные полыми алюмосиликатными микросферами, со средней плотностью 1630...1680 кг/м³ и пределом прочности при сжатии 42,7...46,9 МПа. Удельная прочность таких лёгких бетонов составляет 25,4...28,7 МПа.

Важным вопросом применения алюмосиликатных микросфер в цементных смесях является их стабильность в условиях благоприятных для протекания щелочесиликатной реакции [54]. Показано, что признак пуццолановой реакционной способности микросфер – меньшее на 5 % содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в цементных смесях по сравнению с композициями без них. Это может свидетельствовать о пуццолановой реакционной способности микросфер и расходовании извести в процессе гидратации. Однако расширение образцов раствора с микросферами не превышает 0,05 и 0,1 % в возрасте 3 и 6 месяцев твердения при температуре 28...30 °С соответственно, независимо от содержания $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, варьируемого в диапазоне 0,8...1,25 % по методике [55]. Это указывает на то, что микросферы не являются потенциально опасным компонентом для цементных систем с точки зрения последствий саморазвивающейся щелочесиликатной реакции – щелочной коррозии. При этом зафиксировано отсутствие портландита в образцах, твердевших при температуре 80 °С, что указывает на полное поглощение $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в результате пуццолановой реакции при соотношении микросфер к портландцементу 1 : 2. Это обстоятельство – реакционная активность микросфер по отношению к $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – должно быть учтено при проектировании состава бетона, особенно для регионов с повышенным уровнем атмосферных осадков и влажностью.

Производство искусственных лёгких заполнителей требует высокотемпературной обработки до 1000...1200 °С [56], что приводит к высокому расходу топлива и снижает экономическую эффективность их применения в композиционных материалах. Использование природных минеральных заполнителей связано с экологическими рисками истощения ресурсов. Альтернативным источником лёгких заполнителей могут быть отходы производств различных отраслей промышленности. Одним из таких материалов могут выступать раковины масличной пальмы или скорлупа ядерных пальм, которые являются отходами сельскохозяйственного сектора в тропических и субтропических странах. Известен опыт использования раковин пальм в качестве крупного заполнителя для изготовления конструкционных лёгких бетонов с сопоставимыми

эксплуатационными свойствами равнопрочных лёгких бетонов [57–62]. Имеется опыт получения лёгкого бетона из такого заполнителя с прочностью на сжатие до 30 МПа [63, 64]. Марочная прочность при сжатии таких бетонов может достигать 43...48 МПа, если средняя плотность будет находиться в диапазоне 1870...1990 кг/м³ [65].

Применение лёгких композитов в гражданском, морском или специальном строительстве давно признано обоснованным и надёжным [66–68]. В настоящее время такие бетоны изготавливают с использованием сланцев, керамзита или вспученного шлака [69], а в последние годы получают распространение пемза, перлит, микросферы, диатомит, вспененное стекло и аэрогель [70].

За последние 10 лет возможности получения лёгких бетонов с повышенной прочностью существенно расширились. Это подтверждает анализ отечественных патентных источников [25, 71–92]. В сравнении с мировым опытом [93] (рис. 1.1) особенно заметны текущие достижения, которые позволили получить высокую прочность при меньшей средней

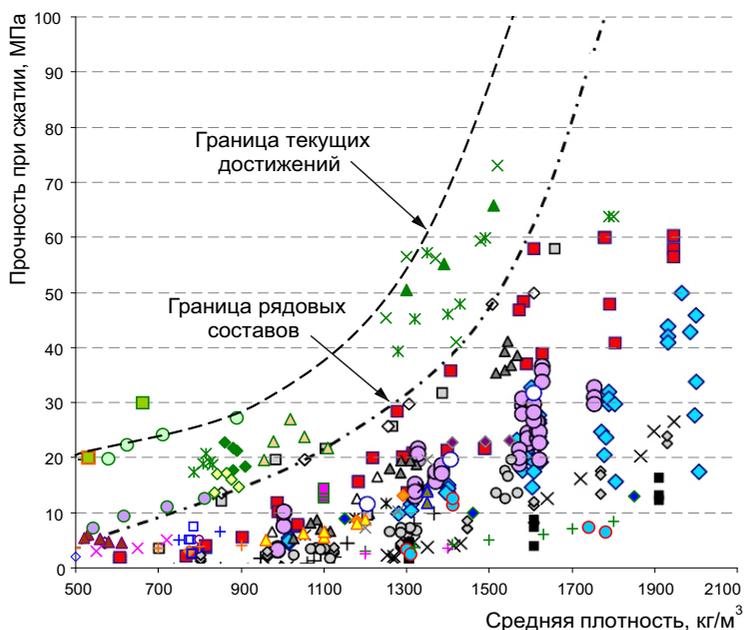


Рис. 1.1. Текущие достижения в разработке лёгких бетонов с повышенной прочностью

плотности материала. При этом наибольшее значение удельной прочности наблюдается у составов с цементной матрицей и наполненных полыми микросферами (на рис. 1.1 показаны зелёным маркером).

Опыт показывает, что применение керамзитовых заполнителей позволяет достигнуть высоких показателей удельной прочности – до 30 МПа. Высокие значения удельной прочности $R_{уд}$ достижимы в верхних границах плотностей лёгких бетонов – при средней плотности не менее 1800 кг/м³ ($R_{уд} \geq 55$ МПа). При дальнейшем снижении средней плотности выбранный показатель технической эффективности не превышает 30 МПа. Но развитие производства новых эффективных заполнителей позволит существенно расширить возможности создания лёгких бетонов с высокой прочностью. Наиболее перспективным компонентом, используемым в качестве заполнителя, становятся микросферы. Составы с полыми микросферами обладают $R_{уд} \geq 62$ МПа при $\rho_{cp} \geq 1600$ кг/м³ и $R_{уд} > 30$ МПа при средней плотности ниже 1600 кг/м³.

ГЛАВА 2. ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

2.1. Системный подход к разработке материала

Для современного строительного материаловедения характерно широкое использование достижений естественно-научных и математических наук. В числе последних, наряду с математической теорией эксперимента и численным моделированием, важнейшее место занимают исследование операций и системный анализ [94–96]. В системном анализе строительные материалы представлены как сложные технические системы, имеющие соответствующие системные атрибуты [97, 98]. Важной задачей системного анализа строительных материалов является выявление структурной связи, определяющей возникновение из механической смеси компонентов сложноструктурированной системы.

Разработка материала как процесс включает несколько последовательных аналитических и экспериментальных этапов:

1. Декомпозиция системы качества материала.
2. Классификация свойств материала на экстенсивные и интенсивные.
3. Определение управляющих рецептурных и технологических факторов.
4. Обоснование выбора компонентов и/или параметров структуры.
5. Проведение экспериментальных исследований и получение экспериментально-статистических моделей влияния управляющих рецептурных и технологических факторов.
6. Многокритериальная оптимизация рецептуры и режима изготовления материала.
7. Экспериментальная проверка результата оптимизации и уточнение рецептуры и режима изготовления материала.

Назначение первого этапа разработки заключается в определении перечня и величин свойств материала, совокупность которых определит его качество [99]. Очевидно, что перечень свойств зависит от области применения материала, а величины свойств – от уровня научно-технического развития (прототипов) или требований потребителя. Соответствие перечня и величин свойств их граничным значениям характеризует качество материала. Материал соответствует требованиям потребителя, т. е. является качественным при выполнении условий

$$I_j \geq I_{c,j}, \quad j = \overline{1, l_p}, \quad (2.1)$$

где I_j – фактическое значение свойства;

$I_{c,j}$ – нормативная величина свойства;

l_p – количество свойств в перечне, определяющем область применения и качество материала.

Однако также важно оценивать затраты на достижение заданного качества материала. Для этих целей предложен критерий технико-экономической эффективности [100]:

$$k_{ef} = k_t \frac{\delta F}{|\delta C|}, \quad (2.2)$$

где δF – относительное изменение качества материала ($\delta F = (F_n - F_b)/F_b$); здесь индексом n обозначен новый материал, индексом b – базовый материал, величины свойств которого использованы в качестве нормативных);

δC – относительное изменение стоимости материала ($\delta C = (C_n - C_b)/C_b$);

k_t – коэффициент, характеризующий возможность реализации технологического решения, повышающего качество материала.

Для усиления эффективности технологических решений, снижающих стоимость материала, величину относительной стоимости δC можно заменить на $\delta C = C_n/C_b$. Если аналогичную замену сделать для относительного изменения качества ($\delta F = F_n/F_b$), то критерий технико-экономической эффективности будет равен

$$k_{ef} = k_t \left(\frac{C_b}{C_n} \right) \left(\frac{F_n}{F_b} \right). \quad (2.3)$$

Формулирование количественной оценки качества материала может проводиться различными способами. Однако удобным способом является представление качества материала в виде обобщённого критерия вида

$$F_i = \alpha_1 \sqrt[n]{\frac{I_1}{I_{1,c}} \times \frac{I_2}{I_{2,c}} \times \dots \times \frac{I_n}{I_{n,c}}} + \alpha_2 \sqrt[m]{\frac{I_{n+1}}{I_{n+1,c}} \times \frac{I_{n+2}}{I_{n+2,c}} \times \dots \times \frac{I_m}{I_{m,c}}} + \dots, \quad (2.4)$$

где α_i – коэффициент весомости группы свойств.

Существует классификация показателей качества строительных материалов [97], которая подразделяет их на следующие группы:

- технический уровень продукции;
- стабильность показателей качества продукции;
- экономическая эффективность производства продукции;
- конкурентоспособность продукции на внешнем рынке.

Важно также отметить, что даже существенное увеличение небольшого количества свойств, входящих в перечень, определяющий качество материала, не приводит к значимому росту обобщённого критерия F_i (рис. 2.1) [101]. Особенно сильно нивелирование кратного повышения величины свойства происходит при увеличении количества свойств, входящих в группу показателей качества, в которой находится следующее свойство:

$$\chi = \alpha (\sqrt[m]{b} - 1), \quad (2.5)$$

где χ – относительное изменение обобщённого критерия качества материала;

b – коэффициент кратности увеличения свойства $b = I_n/I_b$;

m – количество свойств, формирующих группу показателей качества.

Коэффициент k_i позволяет оценить возможность реализации технологического решения и сократить продолжительность адаптации предлагаемого материала к производственным условиям. Естественно предположить, что все рецептурные и технологические факторы могут случайно отклоняться от заданного значения, установленного в разработанном технологическом решении. Предположим, что эта величина постоянна и равна δ (рис. 2.2). Кроме того, предположим, что предложенное технологическое решение позволяет получить величину свойства, равную $I(f_i)$ (точка N). Причём $I(f_i)$ превышает нормативную величину этого свойства I_c , но меньше или равно максимальной величине свойства I_{\max} (точка M), то есть $I_{\max} \geq I(f_i) \geq I_c$.

Очевидно, что случайное изменение величины фактора f_i не должно приводить к случаю, когда вели-

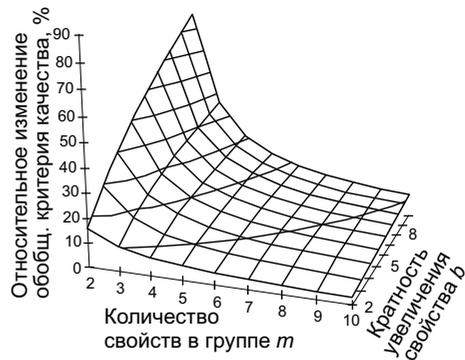


Рис. 2.1. Относительное изменение обобщённого критерия качества материала

чина свойства будет меньше его нормативного значения. Это указывает, что должен существовать диапазон изменения фактора $\Delta f_{д,i}$, гарантирующий выполнение условия $I(f_i) \geq I_c$. Абсцисса начала этого диапазона (точка B_0) будет равна

$$f_{д,н} = \frac{f_{с,н}}{1-\delta}, \quad (2.6)$$

а окончание диапазона (точка B_1)

$$f_{д,к} = \frac{f_{с,к}}{1+\delta}. \quad (2.7)$$

Допустимый диапазон изменения фактора с учётом абсцисс начала и окончания будет равен

$$\Delta f_{д,i} = \frac{f_{i,c}(1+\delta) - 2\delta f_{с,к}}{1-\delta^2}. \quad (2.8)$$

Диапазон изменения фактора при технологическом решении (точка N) будет равен

$$\Delta f_i = \frac{2\delta f_{i,c}}{1-\delta^2}. \quad (2.9)$$

При нахождении интервала варьирования технологического решения Δf_i внутри допустимого диапазона $\Delta f_{д,i}$ вычислить коэффициент возможности реализации технологического решения k_t можно по формуле

$$k_t = \frac{\Delta f_{д,i}}{\Delta f_i} = \frac{\Delta f_{i,c}(1+\delta) - 2\delta f_{с,к}}{2\delta f_i}. \quad (2.10)$$

В случае если интервал варьирования технологического решения Δf_i находится вне допустимого диапазона $\Delta f_{д,i}$, то есть абсцисса начала диапазона Δf_i меньше и/или абсцисса окончание диапазона $\Delta f_{д,i}$ больше, то величина коэффициента принимается $k_t = 0$.

Основными параметрами зависимости свойства I от фактора f_i являются относительное максимальное увеличение свойства ($\Delta I_{\max, \text{отн}} = \Delta I_{\max} / I_{\max}$) и величина допустимого диапазона $\Delta f_{д,i}$. С увеличением соотношения этих параметров величина коэффициента возможности реализации технологического решения k_t после некоторого предельного значения, равного ($\Delta I_{\max, \text{отн}} / \Delta f_{д,i}$), начинает уменьшаться (рис. 2.3). Абсцисса пре-

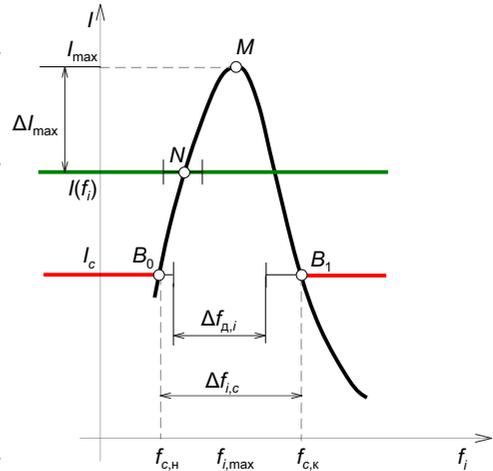


Рис. 2.2. Зависимость свойства I от фактора f_i

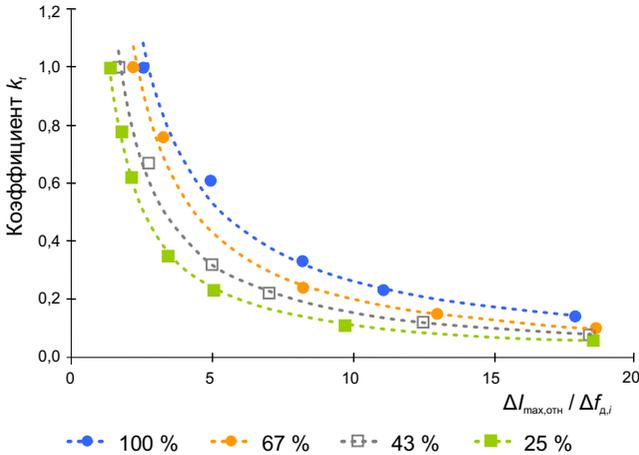


Рис. 2.3. Зависимость коэффициента k_t от соотношения параметров и $\Delta f_{д,i}$

дельного значения соотношения ($\Delta I_{\max, \text{отн}} / \Delta f_{д,i}$) увеличивается с ростом относительного максимального увеличения свойства $\Delta I_{\max, \text{отн}}$. Однако необходимо отметить, что с увеличением $\Delta I_{\max, \text{отн}}$ скорость роста предельного значения ($\Delta I_{\max, \text{отн}} / \Delta f_{д,i}$) уменьшается (рис. 2.4).

Представленные результаты демонстрируют следующее. Возможность реализации разработанного технологического решения по получению нового материала существенно возрастает при изменении свойства в широком диапазоне варьирования фактора $\Delta f_{д,i} = \max$ и при величине $\Delta I_{\max, \text{отн}} = \max$. При изменении свойства материала в узком диапазоне варьирования фактора (так называемые «острые» зависимости свойства) возможность реализации технологического решения значительно снижается. Нивелировать этот негативный эффект можно только при значительном увеличении соотношения $\Delta I_{\max} / I_{\max}$, что идентично снижению требования к показателю качеству нового материала. Однако этот приём также имеет ограничение к применению

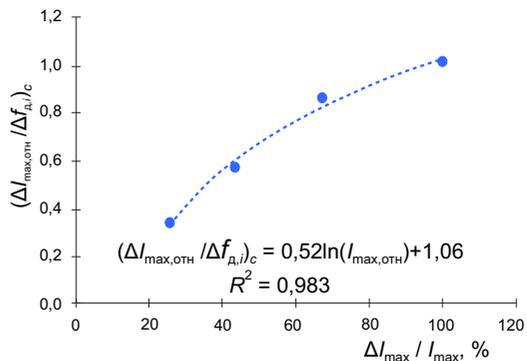


Рис. 2.4. Зависимость предельного значения $(\Delta I_{\max, \text{отн}} / \Delta f_{д,i})_c$ от относительного максимального увеличения свойства

нию, так как скорость увеличения предельного значения соотношения $\Delta I_{\max}/I_{\max}$ быстро снижается с ростом соотношения $\Delta I_{\max}/I_{\max}$. Из данных рис. 2.4 эта скорость равна

$$\vartheta = \frac{0,52}{\Delta I_{\max, \text{отн}}}. \quad (2.11)$$

Влияние нескольких факторов закономерно оказывает более существенное влияние на возможность реализации технологического решения (табл. 2.1):

$$k_t = 2 \prod_{i=1}^n \Phi \left(\frac{\Delta f_{д,i}}{\delta} \right), \quad (2.12)$$

где $\Phi(x)$ – функция Лапласа;

n – количество факторов.

При $\Delta f_{д,i}/\delta > 4$ коэффициент, характеризующий возможность реализации разработанного технологического решения по получению нового материала, близок к единице (табл. 2.1). При $\Delta f_{д,i}/\delta < 3$ состав материала оказывает существенное влияние на устойчивость технологического процесса к случайному варьированию рецептурных факторов, особенно при использовании оборудования, не позволяющего производить дозирование малых количеств компонентов ($\Delta f_{д,i}/\delta < 1$).

Далее рассмотрим *аналитические этапы* разработки ВПЛБ в соответствии с представленным алгоритмом.

Таблица 2.1

Зависимость k_t от соотношения $\Delta f_{д,i}/\delta$ и количества рецептурных и технологических факторов

Количество факторов	Соотношение $\Delta f_{д,i}/\delta$					
	0,5	1	2	3	4	5
3	0,056	0,318	0,869	0,992	0,999	1,00
4	0,022	0,217	0,830	0,989	0,999	1,00
5	0,008	0,148	0,792	0,986	0,999	1,00
10	$6,78 \cdot 10^{-5}$	0,022	0,862	0,973	0,999	1,00

2.1.1. Декомпозиция системы качества материала

Важной начальной аналитической задачей при разработке материала является проведение декомпозиции критериев качества объекта исследования. С учётом области применения декомпозицию критериев качества высокопрочного лёгкого бетона можно представить в следующем виде (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Система показателей качества ВПЛБ

№ п/п	Группа	Показатель
<i>Технологические свойства</i>		
1	Подвижность бетонной смеси	Подвижность
		Однородность
		Сохранение объёма*
2	Параметры состояния и структурные показатели	Сроки схватывания*
		Водоудерживающая способность*
		Средняя плотность
		Пористость
<i>Эксплуатационные свойства</i>		
1	Прочность	Прочность при изгибе
		Прочность при сжатии
		Прочность в слое*
		Сопротивление удару
		Сопротивление истиранию
		Прочность при раскалывании
		Динамическая прочность
		Прочность сцепления с арматурой
2	Деформационные свойства	Модуль упругости
		Коэффициент Пуассона
		Коэффициент интенсивности напряжений (трещиностойкость)
		Усадка
		Ползучесть
3	Стойкость в процессе эксплуатации	Водопоглощение по массе
		Водонепроницаемость
		Коэффициент водостойкости
		Коэффициент химической стойкости при воздействии ионов Cl^{-1} и SO_4^{-2}
		Марка по морозостойкости
4	Теплофизические свойства	Коэффициент теплопроводности
		Коэффициент температуропроводности
		Удельная теплоёмкость

* Для составов, применяемых в технологии 3D-печати.

С учётом особенностей использования материалов в технологии 3D-печати вводятся дополнительные показатели «водоудерживающая способность», «сохранение объёма», «сроки схватывания», определяющие удобоукладываемость смеси для последующего экструдирования,

и «прочность в слое», характеризующую конструкционные свойства при послойном формовании.

2.1.2. Классификация свойств материала

Эта процедура проводится для выделения свойств, величина которых значительно зависит от параметров структуры. Эти свойства получили наименование *интенсивных свойств*. Выделение управляющих рецептурных и технологических факторов, а также многокритериальная оптимизация рецептуры материала и технологического режима его изготовления проводятся, как правило, по этим свойствам.

Также в перечень свойств, определяющих качество материала, входят *экстенсивные свойства*. Их величина в основном зависит от содержания и характеристик компонентов, поэтому эти свойства можно использовать для обоснования выбора компонентов.

Декомпозиция системы критериев качества ВПЛБ (см. табл. 2.2) демонстрирует, что большинство свойств относятся к группе интенсивных свойств. К экстенсивным свойствам можно отнести среднюю плотность, теплопроводность и теплоёмкость материала. Для этих свойств влияние плёночного состояния матричного материала, являющегося результатом взаимодействия на границе контакта с минеральными компонентами, минимально. Указанное следует из формулы для определения относительного изменения средней плотности материала [102]:

$$\delta\rho_c = \frac{K_m K_h}{K_p + \left(\frac{1-v_m}{v_m}\right) \frac{\rho_f}{\rho_m}}, \quad (2.13)$$

где ρ_f – плотность минерального компонента;

ρ_m – плотность матричного материала (искусственного камня);

v_m – объёмная доля матричного материала;

$K_m = \rho_t/\rho_m$ – коэффициент, характеризующий плотность матричного материала в плёночном состоянии ρ_p , $K_m > 1$;

ρ_t – плотность матричного материала в плёночном состоянии;

$K_h = h_t/h_0$ – коэффициент, характеризующий толщину матричного материала, находящегося в плёночном состоянии h_p , $K_h < 1$;

h_0 – толщина слоя матричного материала между минеральными компонентами;

$K_p = 1 - K_p$ – коэффициент плотности материала, $K_p < 1$;

$K_p = v_p/v_m$ – коэффициент, характеризующий содержание пор в материале;

v_p – объёмная доля пор.

Расчёты показывают, что при изменении параметров формулы (2.13) в широком диапазоне значений относительное изменение средней плотности материала $\delta\rho_c$ не превышает 5 %.

2.1.3. Выделение управляющих рецептурных и технологических факторов

Это весьма важный этап разработки материала. Он заключается в анализе всех явлений, процессов и взаимодействий, которые могут происходить в материале. Эта процедура – *декомпозиция интенсивных свойств по явлениям, процессам и фазам (компонентам)* – проводится до определения элементарных факторов [98].

Декомпозиция интенсивных свойств проводится последовательно по масштабным уровням по принципу от общего к частному:

Уровень I > Уровень II > Уровень III > Уровень IV > ... > Уровень N.

При этом устанавливаются сопряжения (взаимосвязи) между факторами. *Управляющим фактором* является фактор, для которого количество (число) сопряжений *максимально*.

Рецептура, параметры структуры и интенсивность физико-химических процессов структурообразования определяют величину интенсивных свойств (табл. 2.3).

Данные табл. 2.3 демонстрируют, что перечень управляющих факторов может быть достаточно большим. Однако некоторые из них при обос-

Таблица 2.3

Декомпозиция интенсивных свойств ВПЛБ

Масштабный уровень	Фактор	Сопряжение факторов
Уровень I	1.1 Вид вяжущего	–
	1.2 Вид заполнителя	–
	1.3 Вид минеральной добавки	–
	1.4 Вид функционального наполнителя	–
	1.5 Вид пластификатора	–
	1.6 Вид наноразмерного модификатора	–
	1.7 Вид САП*	–
	1.8 Вид фибры	–
	1.9 Внутренние напряжения	–
	1.10 Структура бетона	–

Масштабный уровень	Фактор	Сопряжение факторов	
Уровень II	2.1	Количество вяжущего	1.1
	2.2	Интенсивные свойства вяжущего	1.1
	2.3	Количество заполнителя	1.2
	2.4	Прочностные свойства заполнителя	1.2
	2.5	Количество минеральной добавки	1.3, 2.2
	2.6	Интенсивные свойства минеральной добавки	1.3
	2.7	Количество функционального наполнителя	1.4, 1.10
	2.8	Прочностные свойства функционального наполнителя	1.4
	2.9	Количество пластификатора	1.1, 1.5
	2.10	Активность наноразмерного модификатора	1.6
	2.11	Концентрация САП*	1.7,
	2.12	Количество САП*	1.7, 2.1
	2.13	Количество фибры	1.8, 1.9
	2.14	Количество воды	1.1, 1.3, 2.1, 2.2, 2.7, 2.9–2.13
	2.15	Режим перемешивания	1.5, 2.1–2.14
	2.16	Режим формования	1.5, 2.1–2.14
	2.17	Режим тепловой обработки	2.1, 2.2, 2.6, 2.14
Уровень III	3.1	Активность вяжущего	2.1, 2.2, 2.5, 2.6, 2.10, 2.13
	3.2	Минерально-фазовый состав цементного камня	2.5, 2.6, 2.14, 3.1
	3.3	Прочность и модуль упругости цементного камня	2.5, 2.6, 2.10, 2.11, 2.14, 2.17, 2.18, 3.1, 3.2
	3.4	Прочность и модуль упругости заполнителя	2.4
	3.5	Дисперсность минеральной добавки	2.5, 2.6, 2.14
	3.6	Активность минеральной добавки	2.6, 3.5
	3.7	Дисперсность функционального наполнителя	2.7, 2.13
	3.8	Прочность и модуль упругости функционального наполнителя	2.7, 2.8, 3.7
	3.9	Однородность и подвижность бетонной смеси	2.1, 2.3, 2.5, 2.7, 2.9, 2.10–2.13, 3.5, 3.7, 3.13
	3.10	Геометрические размеры фибры	2.13
	3.11	Геометрические размеры САП	2.11
	3.12	Водоудерживающая способность	2.1, 2.5, 2.7, 2.12, 2.14
	3.13	Прочность на границе раздела фаз (наполнитель/ЦММ)	2.14, 3.1–3.3, 3.8, 3.12
	3.14	Прочность и модуль упругости фибры	2.13
	3.15	Продолжительность и интенсивность перемешивания	2.1, 2.3, 2.5, 2.7, 2.9, 2.10–2.14, 3.9
	3.16	Продолжительность и интенсивность формования	2.1, 2.3, 2.5, 2.7, 2.9, 2.10–2.14, 3.9
	3.17	Продолжительность и интенсивность тепловлажностной обработки	2.1, 2.5, 2.7, 2.10–2.14, 3.1, 3.2, 3.6

Окончание табл. 2.3

Масштабный уровень	Фактор	Сопряжение факторов	
Уровень IV	4.1	Химический состав вяжущего	3.1, 3.2, 3.3, 3.15, 3.17
	4.2	Химическая активность заполнителя	3.4, 3.9
	4.3	Химическая активность минеральной добавки	3.1–3.3, 3.5, 3.9, 3.12, 3.13, 3.15–3.17
	4.4	Химическая активность функционального наполнителя	3.1–3.3, 3.8, 3.13, 3.17
	4.5	Химическая активность наноразмерного модификатора	3.3, 3.9, 3.13
	4.6	Шероховатость поверхности наполнителя	3.9, 3.13
	4.7	Химический состав пластификатора	3.5, 3.9
	4.8	Структура пластификатора	3.5, 3.9
	4.9	Химический состав САП*	3.1, 3.3, 3.9, 3.11–3.13, 3.16, 3.17
	4.10	Структура САП*	3.1, 3.3, 3.9, 3.11–3.13, 3.16, 3.17
	4.11	Форма сечения и рельеф поверхности фибры	3.3, 3.9, 3.13, 3.14
	4.12	Химическая активность фибры	3.3, 3.9, 3.13, 3.14

* САП – суперабсорбирующий пример, применяемый в высокопрочных лёгких бетонах твердеющих в неблагоприятных условиях.

новании выбора компонента могут быть приняты постоянными и исключены из перечня управляющих факторов, варьирование которых и установление влияния на показатели качества материала проводится на экспериментальном этапе. Поэтому обоснование выбора компонентов и/или определение диапазона их варьирования является процедурой, сокращающей затраты на разработку материала.

Данные табл. 2.3 обобщены в табл. 2.4, в которой приведены управляющие рецептурные и технологические факторы, оказывающие доминирующее влияние на показатели качества и технологический процесс изготовления материала.

2.1.4. Обоснование выбора компонентов и/или параметров структуры

Процедура обоснования выбора компонентов, как правило, включает два этапа: аналитический и экспериментальный. Аналитический этап заключается в анализе источников научно-технической информации с последующей группировкой данных. Источниками информации для обоснования выбора компонентов являются:

Таблица 2.4

Перечень элементарных управляющих рецептурных и технологических факторов управления структурообразованием ВПЛБ

Уро- вень	Факторы			
	рецептурные		технологические	
	№	Наименование фактора	№	Наименование фактора
II	1	Количество компонентов (вяжущее, минеральная добавка и функциональный наполнитель, пластификатор, наноразмерный модификатор, САП, фибра, вода) Активность наноразмерного модификатора	1	Режим перемешивания
			2	Режим формования
			3	Режим тепловой обработки
III	1	Дисперсность минеральной добавки	1	Продолжительность и интенсивность перемешивания компонентов
	2	Дисперсность функционального наполнителя		
	3	Геометрические размеры фибры	2	Продолжительность и интенсивность формования
	4	Прочность на границе раздела фаз «функциональный наполнитель – цементно-минеральная матрица»		
	5	Геометрические размеры САП		
IV	1	Химическая активность портландцемента	1	Шероховатость поверхности наполнителя
	2	Химическая активность минеральной добавки		
	3	Химическая активность наноразмерного модификатора		
	4	Химическая активность функционального наполнителя		
	5	Химический состав САП	2	Процедурный фактор введения наноразмерного модификатора
	6	Структура САП		
	7	Форма фибры		
	8	Химическая активность фибры		

- 1) опытные данные по эксплуатации изделий, изготовленных из аналогичных материалов;
- 2) теоретические знания и опытные данные по применению компонентов материала;
- 3) научно-техническая информация по аналогам (отчёты, патенты, статьи и т. д.);
- 4) технико-экономические ограничения.

Данные группируются по критерию, включающему в зависимости от области применения разрабатываемого материала удельные характери-

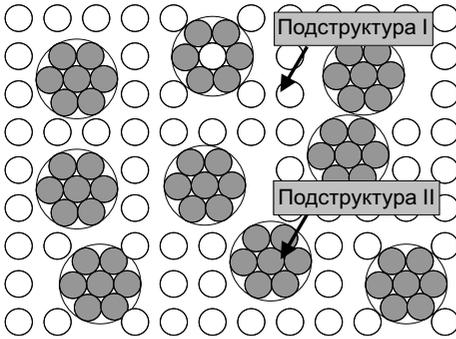


Рис. 2.5. «Двухструктурная модель» композиционного материала [104]

стики, например, удельный расход вяжущего на единицу прочности, коэффициент конструкционного качества, удельную прочность и т. д.

Определение параметров структуры материала [103] является самостоятельной задачей, включающей аналитический и экспериментальный этапы. На аналитическом этапе разрабатываются модели материала, на основе которых определяются характерные соотношения между

компонентами, формирующие соответствующие параметры структуры. На экспериментальном этапе производится проверка модели и уточняются полученные соотношения между компонентами.

В следующих разделах будут рассмотрены способы проектирования составов и выбора параметров структуры различных структурных уровней строительного материала.

2.2. Модель цементно-минеральной матрицы и ВПЛБ

Современные строительные материалы являются многокомпонентными, что, с одной стороны, обеспечивает повышение их эксплуатационных свойств, а с другой – имеет очевидные технологические трудности при изготовлении материала. Структуру современных композиционных материалов можно представить в виде модели, состоящей из двух подструктур (рис. 2.5):

- подструктура I (дисперсионная среда) – степень наполнения $v_{f,\min} = 0,52$;
- подструктура II (дисперсная фаза) – степень наполнения $v_{f,\max} = 0,74$.

Соотношение фаз, когда объёмная доля дисперсной фазы v_f составляет 0,63 и дисперсионной среды – 0,37, обеспечивает формирование «компромиссной» структуры при равном содержании каждой из подструктур, что может быть использовано для определения структурных уровней композита:

$$v_m^k = v_1, \quad (2.14)$$

где v_1 – объёмное содержание $v_1 = 0,16$ [10], соответствующее первому поругу протекания;

k – количество уровней структуры.

Из формулы (2.14) при $v_m = 0,37$ количество структурных уровней равно

$$k = \frac{\ln(v_1)}{\ln(v_m)} = 1,84, \quad (2.15)$$

что указывает на достаточность проектирования композиционных материалов на двух масштабных уровнях: микро- и макроструктуры. При этом оптимизация каждого масштабного уровня должна проводиться по правилу совмещения уровней, которое заключается в следующем: *получение материала с оптимальным макроуровнем возможно посредством совмещения предыдущих масштабных структурных уровней, оптимизированных по критерию, не идентичному для макроуровня, но оказывающему на его величину влияние.* Например, хорошо известно влияние подвижности бетонной смеси на прочность бетона [105], отсюда первый масштабный уровень может быть оптимизирован по подвижности смеси, а второй – по структурно-чувствительному свойству материала, например прочности.

Расчёт состава композиционного материала, соответствующего максимальному содержанию дисперсной фазы на двух масштабных уровнях, предопределяет схему, когда на макроуровне объёмная доля дисперсионной среды, состоящей из минерального вяжущего вещества (портландцемент) и жидкой фазы (водный раствор пластификатора), равна $v_m = 0,37$, а оставшаяся часть – дисперсная фаза в количестве $v_f = 0,63$. При этом к микроуровню также применимо указанное соотношение фаз, то есть дисперсная фаза – портландцемент – занимает объёмную долю, равную 0,63, а дисперсионная среда – вода и добавки – 0,37 (рис. 2.6).

В табл. 2.5 представлен расчёт объёмного содержания по предлагаемой схеме «Этап 1».

В процессе физико-химического взаимодействия воды и гидрофильной твёрдой поверхности на границе раздела фаз формируется более плотный слой, физические свойства которого существенно отличаются

МАКРОУРОВЕНЬ		
$v_{f,2} = 0,63$ Дисперсная фаза (заполнитель и наполнитель)	$v_{m,2} = 0,37$ Дисперсионная среда	
	МИКРОУРОВЕНЬ	
	$v_{f,1} = 0,37$ Жидкая фаза (вода и добавки)	$v_{m,1} = 0,63$ Вяжущее вещество (портландцемент)

Рис. 2.6. Схема проектирования многокомпонентного состава

Таблица 2.5

Расчётное соотношение компонентов

Наименование компонента		Объёмные доли		
		Этап 1	Этап 2	Этап 3
Дисперсионная среда	Вязущее вещество (портландцемент)	0,233	0,233	0,233
	Жидкая фаза (вода с добавками)	0,137	0,219	0,219
Дисперсная фаза	Зёрна размером D	0,630	0,548	0,386
	Зёрна размером d_m			0,143
	Зёрна размером d			0,019

ся от аналогичных характеристик в объёме. С учётом того, что адсорбционная вода в тонких слоях оказывает влияние на распределение фаз в объёме композита, выполним расчёт изменения объёма композита при наличии взаимодействия на границе раздела фаз.

Согласно уравнению абсолютных объёмов:

$$\rho = \rho_m v_m + \rho_f v_f, v_m + v_f = 1, \quad (2.16)$$

где v_i и ρ_i – соответственно объёмное содержание и плотность компонента, формирующего дисперсионную среду – матрицу композита (индекс « m ») и дисперсную фазу – наполнитель « f » соответственно.

Тогда объём композита изменится на величину ΔV :

$$\Delta V = V - V_0, V_0 = \frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}, \quad (2.17)$$

где M_i – масса каждого i -го компонента.

С учетом образования плёночной фазы объём композита рассчитывается как

$$V = V_f + V_p + V_t, \quad (2.18)$$

где индексы « p » и « t » соответственно для объёмной и плёночной фазы дисперсионной среды, объёмы которых составляют

$$V_t = S_{ud} M_f h_t, V_p = \frac{M_m - M_t}{\rho_m} = \frac{M_m - S_{ud} M_f h_t \rho_t}{\rho_m}, \quad (2.19)$$

где h_t и ρ_t – толщина и плотность плёночной фазы соответственно;

S_{ud} – удельная поверхности дисперсной фазы.

С учётом формулы (2.18) объём материала будет равен

$$V = \frac{M_f}{\rho_f} + S_{ud} M_f h_t + \frac{M_m - S_{ud} M_f h_t \rho_t}{\rho_m} \text{ или } V = V_0 - S_{ud} M_f h_t \left(\frac{\rho_t}{\rho_m} - 1 \right). \quad (2.20)$$

Тогда изменение объёма материала будет равно

$$\Delta V = -S_{ud} M_f h_t \left(\frac{\rho_t}{\rho_m} - 1 \right) \quad (2.21)$$

или при замене $M_f = v_{f,0} \rho_f V_0$

$$\frac{\Delta V}{V_0} = -S_{ud} v_{f,0} \rho_f h_t \left(\frac{\rho_t}{\rho_m} - 1 \right), \quad (2.22)$$

где $v_{f,0}$ – объёмная доля дисперсной фазы в материале, в котором отсутствует плёночная фаза.

Объёмная доля дисперсной фазы вследствие уменьшения объёма материала увеличится и будет равна

$$\frac{v_{f,0}}{v_f} = 1 - S_{ud} v_{f,0} \rho_f h_t \left(\frac{\rho_t}{\rho_m} - 1 \right). \quad (2.23)$$

Однако такие характеристики плёночной фазы, как толщина h_t и плотность ρ_f , трудны для эмпирического определения их величины. Но в ряде работ [106] на основе трёхслойной модели показано, что толщина квазикристаллической воды составляет не менее 30 нм, а в [107] – не более 10 нм.

Не менее важны распределение воды на поверхности твёрдых частиц и толщина водной прослойки. Согласно [108] толщина пограничного слоя пропорциональна:

$$h_g = \frac{l}{\sqrt{\text{Re}}}, \quad (2.24)$$

где Re – число Рейнольдса;

l – характерный размер тела.

Эта зависимость позволяет преобразовать формулу (2.23) к виду

$$\frac{v_{f,0}}{v_f} = 1 - \frac{6v_{f,0}}{\sqrt{\text{Re}}} \left(\frac{\rho_t}{\rho_m} - 1 \right). \quad (2.25)$$

Из формулы (2.25) следует, что количество дисперсионной среды Δv_m необходимо увеличить на величину, равную Δv_f :

$$\frac{\Delta v_f}{v_{f,0}} = \frac{6(\rho_t/\rho_m - 1)}{\sqrt{\text{Re}}(1 + 2/\sqrt{\text{Re}})^3}. \quad (2.26)$$

Плотность связанной воды согласно [107] варьируется в широком диапазоне – от 730 до 3020 кг/м³ и зависит от гидрофильности поверх-

ности. Кроме того, определение удельной поверхности дисперсной фазы связано с рядом сложностей, в частности с наличием шероховатости поверхности [108]. Для режима работы современных смесителей с высокими скоростями смешения при граничном значении числа Рейнольдса величина Δv_m равна 0,13. Близкая величина получена в работе [109] и составляет 0,112. Исходя из этого, объём дисперсной и жидкой фазы изменится пропорционально (см. табл. 2.5, столбец «Этап 2»).

Геометрическая модель, представленная на рис. 2.7, используется для определения количества каждой фракции дисперсной фазы многокомпонентного композита.

Объёмная доля фракции дисперсной фазы, диаметр частицы которой D , составит

$$v_{f,D} = v_{f,\max} \frac{\eta_f}{\alpha}, \quad (2.27)$$

где максимальное количество дисперсной фазы $v_{f,\max}$, как показано в табл. 2.5, составляет 0,548, а максимальная степень наполнения η_f сферическими частицами одного диаметра – 0,74; α – коэффициент раздвижки зёрен, который согласно [110] равен

$$\alpha = \left(\frac{D + 2d}{D} \right)^3. \quad (2.28)$$

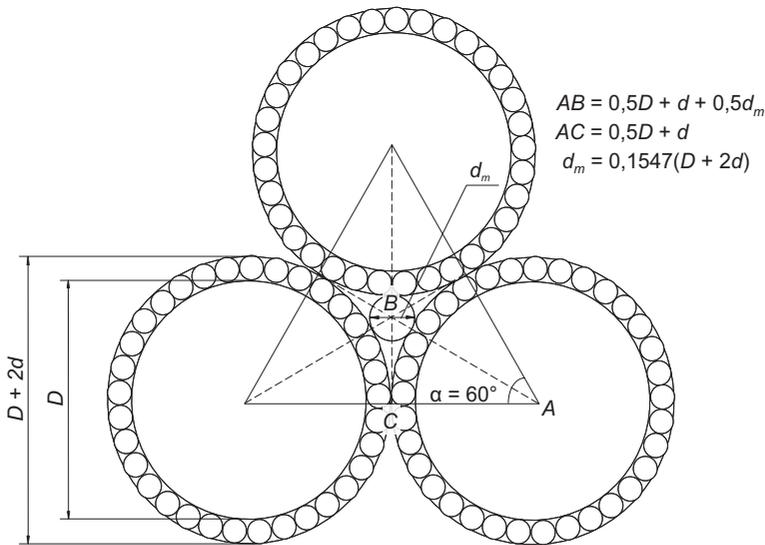


Рис. 2.7. Модель для расчёта количества дисперсных фаз

При известной величине α значение соотношения D/d вычисляется по формуле

$$\frac{D}{d} = \frac{2}{\sqrt[3]{\alpha - 1}}. \quad (2.29)$$

Количества двух более мелких фракций связаны с их диаметрами (d и d_m) соотношениями

$$d = (1 - \eta_f) v_{f, \max}, \quad d_m = \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha} \right) \eta_f v_{f, \max}. \quad (2.30)$$

Результаты аналитического исследования модели (2.14)...(2.30) представлены в табл. 2.5 (столбец «Этап 3») при $\alpha = 1,05$.

Из данных табл. 2.5 (столбец «Этап 3») следует, что суммарное количество компонентов с диаметром d и d_m меньше первого порога протекания v_f . Указанное можно преодолеть посредством подбора дисперсной фазы, где размер частиц будет меньше диаметра частиц вяжущего вещества. При $\alpha \in [1,5; 1,10]$ соотношение D/d изменяется в широком диапазоне $D/d \in [60; 120]$.

После сопоставления расходов компонентов, полученных в работе [109] и рассчитанных по предлагаемой методике, отметим хорошую сходимость результатов проектирования состава (табл. 2.5), которая повышается, если учитывать отличие от сферической формы зёрен дисперсной фазы, так как число Ньютона для фигур неправильной формы ($12 < K_N < 26$ [111]) больше, чем для сферических ($K_N = 12$).

Результаты расчёта в соответствии с описанной моделью (2.14)...(2.30) и данные согласно [109] представлены в табл. 2.6.

Представленный алгоритм расчёта имеет универсальный характер. Выделение только трёх фракций дисперсной фазы с характерными размерами частиц D , d_m и d имеет частный характер, который реализован при оптимизации по прочности матричного материала высокопрочного лёгкого бетона. Так, в качестве базового состава определено соотношение компонентов, рассчитанное по предлагаемой методике:

- вяжущее вещество (портландцемент) – 723 кг/м³;
- жидкая фаза (вода с добавками) – 219 кг/м³;
- дисперсная фаза:
 - диаметр зёрен D – 1024 кг/м³;
 - диаметр зёрен d_m – 378 кг/м³;
 - диаметр зёрен d – 51 кг/м³.

Таблица 2.6

Расчётный расход компонентов

Наименование компонента		Расход компонентов (кг) на 1 м ³			
		по методике (2.14)...(2.30)		по данным [109]	
Дисперсная среда	Вязущее вещество (портландцемент)	942	723	940	720
	Жидкая фаза (вода с добавками)		219		220
Дисперсионная фаза	Зёрна размером D	1453	1024	1482	1050
	Зёрна размером d_m		378		360
	Зёрна размером d		51		72

Приняв в качестве вязущего портландцемент СЕМ I 42,5, дисперсной фазы – кварцевый песок (D), кварцевую муку (d_m) и микрокремнезём (d), после проведения испытания образцов установили, что матричный материал рассчитанного базового состава обладает пределом прочности при сжатии до 130 МПа. Необходимо отметить, что полученные значения прочности при сжатии несколько превосходят значения прочности, рассчитанные по уравнению Боломея–Скрамтаева [105]. При указанных соотношениях и при установлении коэффициента качества заполнителя 0,65 прочность материала должна составить 105 МПа. Это различие указывает на активное участие дисперсных фаз в структурообразовании искусственного камня.

Важно отметить, что объёмное содержание частиц с диаметром D превышает величину второго порога протекания теории перколяции [11, 12, 104, 112], равного $v_{II} = 0,34$ и соответствующего контакту частиц через слои матричного материала.

В лёгких бетонах частицами с диаметром D может быть функциональный наполнитель, обеспечивающий получение материала с заданной средней плотностью. При объёмном содержании функционального наполнителя, равном объёмной доле частиц с диаметром D , то есть при $v_{lf} = v_f(D)$ (здесь v_{lf} – объёмная доля функционального наполнителя; $v_f(D)$ – объёмная доля частиц с диаметром D), средняя плотность бетона будет зависеть от плотностей матричного материала и функционального наполнителя (табл. 2.7). Данные табл. 2.7 демонстрируют, что при плотности функционального наполнителя 300...750 кг/м³ и плотности матричного материала 1800...2200 кг/м³ средняя плотность лёгкого бетона будет находиться в диапазоне от 1200 до 1500 кг/м³.

Таблица 2.7

Средняя плотность лёгкого бетона, полученного на различных матричном материале и функциональном наполнителе

Средняя плотность функционального наполнителя, кг/м ³	Средняя плотность матричного материала, кг/м ³						
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200
50	634	756	879	1002	1125	1247	1370
100	653	775	898	1021	1144	1267	1389
200	692	814	937	1060	1182	1305	1428
300	730	853	975	1098	1221	1344	1467
500	807	930	1053	1175	1298	1421	1544
750	904	1026	1149	1272	1395	1518	1640
1000	1000	1123	1246	1368	1491	1614	1737
1250	1097	1219	1342	1465	1588	1711	1833

2.2.1. Модель дисперсно-армированного композита

Эффективным способом повышения эксплуатационных свойств строительных материалов, включая усадку, является применение дисперсного армирования [113–127]. Для проектирования таких материалов разработаны различные способы [128–131]. В данной работе предлагается способ, основанный на общих результатах теории протекания (перколяции).

В теории перколяции [11, 12, 112] установлено, что протекание (в терминах материаловедения – создание фазы, представленной в различных частях объёма композита) возникает при концентрации пересекающихся сфер в количестве (рис. 2.8)

$$\frac{\pi}{6} D_s^3 n_V = B_{c,V}, \quad (2.31)$$

где $B_{c,V}$ – среднее количество пересекающихся сфер ($B_{c,V} = 2,7 \pm 0,1$ [132]);

n_V – количество сфер с диаметром L_0 ;

D_s – диаметр сферы, равный сегменту волокна

$$D_s = \frac{L_0}{k_s}. \quad (2.32)$$

Здесь k_s – количество сегментов волокна.

Константа $B_{c,V}$ может быть охарактеризована числом центров других сфер, пересекающих выбранную сферу. Из численного значения $B_{c,V}$ следует, что количество центров сфер внутри сферы с диаметром L_0 , должно быть более двух. Здесь также важно определить понятие перколяции для условий рассматриваемой задачи. Очевидно, что зона контакта «матричный материал – волокно» оказывает влияние на физические

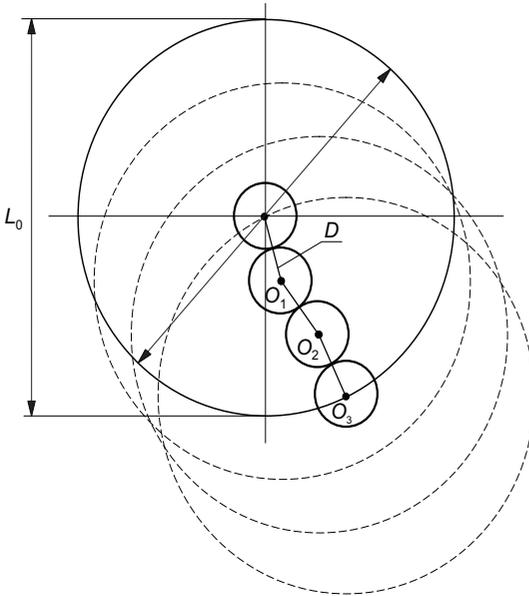


Рис. 2.8. Модель структуры хаотично армированного материала

свойства матричного материала (искусственного камня). Как правило, формируется слой матричного материала, обладающего более высокими физико-механическими свойствами по сравнению с матричным материалом в объёме (вдали от зоны контакта). Матричный материал в зоне контакта получил наименование плёночной фазы [11, 12]. Контакт плёночных фаз близко расположенных структурных элементов (волокон по условию данной задачи) приводит к возникновению *синергетических эффектов*, которые дополнительно

повышают качество разрабатываемого материала. При отсутствии как плёночной фазы, так и при контакте поверхностей структурных элементов будет наблюдаться снижение качества разрабатываемого материала. Причём в последнем случае непосредственный контакт поверхностей структурных элементов приводит к формированию дефекта структуры – агрегатов, состоящих из несмоченных частиц дисперсной фазы [11, 12]. Таким образом, для решения задачи будем считать, что протекание между двумя волокнами происходит при условии их расположения с одним из сегментов другого волокна на расстоянии, обеспечивающем пересечение (объединение) плёночных фаз контактирующих волокон.

Концентрация n_V определяет объёмный коэффициент армирования материала μ :

$$n_V = \frac{N_l}{V_0} = \frac{\mu}{\frac{\pi}{4} d_f^2 L_0}, \quad (2.33)$$

где N_l – количество волокон;

V_0 – объём композита;

d_f, L_0 – диаметр и длина волокна.

С учётом формул (2.32) и (2.33) формула (2.31) примет вид

$$B_{c,V} = \frac{2}{3} \frac{\mu}{k_s^3} \left(\frac{L_0}{d_l} \right). \quad (2.34)$$

В композите вследствие осуществления технологических операций фактическая длина волокна L может изменяться (изгиб, дробление волокна). В этой связи введём коэффициент гибкости волокна ξ :

$$\xi = \frac{L_0}{L}. \quad (2.35)$$

С учётом формулы (2.35) после преобразования получим

$$B_{c,V} = \frac{2}{3} \mu \frac{\xi^2}{k_s^3} \left(\frac{L_0}{d_l} \right)^2 \quad (2.36)$$

и, решая относительно μ , окончательно получим

$$\mu = \frac{3}{2} B_{c,V} \frac{k_s^3}{\xi^2} \left(\frac{d_l}{L_0} \right)^2. \quad (2.37)$$

В формуле (2.37) установлена взаимосвязь между коэффициентами k_s и ξ . Она заключается в следующем: изгиб волокна, который описывается ξ , можно охарактеризовать как возникновение дополнительного сегмента, повышающего вероятность появления контакта между другими волокнами. Увеличение такой возможности закономерно проявляется в уменьшении количества волокон. В первом приближении взаимосвязь между коэффициентами k_s и ξ можно представить в виде

$$k_s = \frac{C}{2\xi}, \quad (2.38)$$

где C – константа.

Значения μ , рассчитываемые по формуле (2.37), являются минимальными и достаточными для обеспечения формирования в композитном материале бесконечного кластера (модели Шкловского–Де Жена). Для реальных объектов важно учитывать механические и физико-механические свойства вещества, из которого изготовлено волокно.

Для расчёта диапазона изменения коэффициента армирования в формуле (2.38) значение константы принято $C = 25$. Было рассмотрено три возможных варианта:

- волокна в материале не изменяют длину $\xi = 1$. При этом значение коэффициента в соответствии с формулой (2.38) $k_s = 12,5$, то есть на волокне выделяются 12,5 сегментов, в которых может быть контакт с другими волокнами;

- волокна в материале сокращают длину в 1,5 раза, то есть $\xi = 1,5$, а количество сегментов $k_s = 8,58$;
- волокна в материале сокращают длину в два раза $\xi = 2$, а количество сегментов $k_s = 6,3$.

Результаты моделирования представлены в табл. 2.8, из которой следует, что при использовании жёстких негнущихся волокон при приемлемом коэффициенте армирования μ бесконечный армирующий кластер формируется при $L_0/d_l > 600$. Для гибких волокон соотношение геометрических характеристик волокон L_0/d_l может быть существенно уменьшено. Важно также отметить, что представленная градация волокон по их гибкости является условной. Очевидно, что даже волокна из материалов, имеющих высокий модуль упругости (например, металлические, стеклянные или другие), при больших соотношениях геометрических характеристик L_0/d_l будут изгибаться, что должно приводить к снижению величина армирования.

Из представленных данных следует, что на объёмный коэффициент армирования значительное влияние оказывают геометрические характеристики волокон. Для диапазона варьирования волокон $L_0/d_l \in I(400,600)$ и при предположении об умеренной гибкости волокон $\xi = 1,5$ их оптимальная концентрация должна находиться в диапазоне $0,54 \pm 0,19$ %. Приведённые в табл. 2.8 значения μ хорошо согласуются с оценками, выполненными в работах [129, 130, 133].

Для случая формирования армирующего кластера через слой плёночной фазы матричного материала соотношение геометрических характеристик $L_0/(d_l+h_l)$ смещается в область меньших величин, что в соответствии с формулой (2.37) будет приводить к увеличению коэффициента армиро-

Таблица 2.8

Зависимость коэффициента армирования от соотношения геометрических характеристик волокон $\mu = f(L_0/d_l)$

ξ	Соотношение геометрических характеристик волокон L_0/d_l						
	50	100	200	300	400	500	600
Волокна, не изменяющие длину (жёсткие волокна)							
1,0	-	79,1±2,9	19,8±0,7	8,8±0,3	4,9±0,2	3,2±0,1	2,2±0,1
Волокна с умеренной гибкостью							
1,5	49,7±1,9	12,4±0,5	3,1±0,1	1,37±0,03	0,78±0,03	0,50±0,02	0,35±0,01
Волокна, значительно изменяющие длину (гибкие волокна)							
2,0	9,9±0,4	2,5±0,1	0,62±0,02	0,27±0,01	0,15±0,01	0,10±0,0	0,07±0,0

вания. В этом случае расчёт коэффициента армирования должен проводиться с учётом толщины слоя плёночной фазы матричного материала h_t :

$$\mu = \frac{3}{2} \frac{B_{c,V}}{\left(1 + \frac{2h_t}{d_l}\right)^2} \left(\frac{d_l + h_t}{L_0}\right)^2 \frac{k_s^3}{\xi^2}. \quad (2.39)$$

2.3. Многокритериальная оптимизация

Этот этап разработки нового материала реализуется после проведения экспериментального этапа, по результатам которого получены экспериментально-статистические модели влияния управляющих факторов на интенсивные свойства материала. Целью этого этапа является определение диапазонов варьирования рецептурных и технологических факторов (состава материала и режима его изготовления), обеспечивающих получение материала с показателями качества, соответствующими техническому заданию или превышающими показатели качества аналогов.

При решении оптимизационных задач строительного материаловедения качество нового материала можно описать только множеством свойств (скалярных, или индивидуальных показателей качества; критериальных функций)

$$q_j \cdot j = \overline{1, m}, \quad (2.40)$$

(где m – размерность критериального пространства), которые в зависимости от выбранного метода скаляризации могут включать значения контрольных показателей.

Критериальные функции составляют векторный критерий качества

$$q = (q_1, q_2, \dots, q_m). \quad (2.41)$$

Методика оценки критерия (2.41) выбирается исходя из целей оптимизационной задачи. В простейшем случае аналитическое выражение для скалярного критерия качества F_i (целевой функции) представляет собой линейную комбинацию критериальных функций:

$$F_i = \sum_{j=1}^m \alpha_j q_j, \quad \alpha_j > 0, q_j > 0, \quad (2.42)$$

возрастание каждой из которых соответствует повышению качества (где α_j – весовые коэффициенты). Могут использоваться также более сложные математические функции. На значения коэффициентов весоности обычно накладывают условие нормировки:

$$\sum_{j=1}^m \alpha_j = 1. \quad (2.43)$$

В целом качество высокопрочных лёгких бетонов (в соответствии с декомпозицией системы критериев качества) оценивается по следующим свойствам:

- подвижность бетонной смеси,
- средняя плотность,
- прочность при сжатии и изгибе (удельная прочность),
- модуль упругости,
- коэффициент интенсивности напряжений (трещиностойкость),
- водопоглощение,
- коэффициент стойкости в воде,
- коэффициенты тепло- и температуропроводности,
- удельная теплоёмкость,
- морозостойкость,
- стойкость к циклическому увлажнению – высушиванию.

Для указанных свойств ВПЛБ сформулированы следующие критериальные функции.

Критерий подвижности

$$q_{\text{пс}} = \frac{D_{\text{р}}}{D_{\text{р},0}}, \quad (2.44)$$

где $D_{\text{р}}$ – диаметр расплыва конуса;

$D_{\text{р},0}$ – минимальное требование к диаметру расплыва конуса ($D_{\text{р},0} = 150$ мм).

Критерий прочности

$$q_{\text{R}} = \frac{R_{\text{сж}}(1 - \Pi)}{R_{\text{max}}}, \quad (2.45)$$

где $R_{\text{сж}}$ – прочность при сжатии;

R_{max} – максимальная прочность бетона;

Π – пористость бетона.

Критерий удельной прочности

$$q_{\text{уд}} = \frac{R_{\text{уд}}}{R_{\text{уд},0}}, \quad (2.46)$$

где $R_{\text{уд}}$ – удельная прочность ВПЛБ;

$R_{\text{уд},0}$ – удельная прочность тяжёлого бетона.

Критерий трещиностойкости

$$q_{\text{тр}} = \frac{R''}{R'}, \quad (2.47)$$

где R' – предел прочности при сжатии (изгибе) образцов в водонасыщенном состоянии;

R'' – предел прочности при сжатии (изгибе) образцов в воздушно-сухом состоянии.

Критерий упругости

$$q_E = \frac{E_{\text{упр}}}{E_{\text{упр},0}}, \quad (2.48)$$

где $E_{\text{упр}}$ – модуль упругости ВПЛБ;

$E_{\text{упр},0}$ – модуль упругости тяжёлого бетона по ГОСТ 25246–82 ($E_{\text{упр},0} = 20$ ГПа).

Критерий водопоглощения

$$q_W = \frac{W_0 - W}{W_0}, \quad (2.49)$$

где W – водопоглощение ВПЛБ;

W_0 – водопоглощение тяжёлого бетона по ГОСТ 25246–82 (не более 6 %).

Критерий водостойкости

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{k_{\text{H}_2\text{O}}}{k_{\text{H}_2\text{O},0}}, \quad (2.50)$$

где $k_{\text{H}_2\text{O}}$ – коэффициент водостойкости ВПЛБ;

$k_{\text{H}_2\text{O},0}$ – коэффициент водостойкости тяжёлого бетона по ГОСТ 25246–93 ($k_{\text{H}_2\text{O},0} \geq 0,8$ для высокостойких бетонов).

Критерий теплопроводности

$$q_\lambda = \frac{k_{\lambda,0}}{k_\lambda}, \quad (2.51)$$

где k_λ – коэффициент теплопроводности ВПЛБ;

$k_{\lambda,0}$ – коэффициент теплопроводности тяжёлого бетона ($k_{\lambda,0} = 1,25$ Вт/(м·К)).

Критерий температуропроводности

$$q_\alpha = \frac{k_{\alpha,0}}{k_\alpha}, \quad (2.52)$$

где k_α – коэффициент температуропроводности ВПЛБ;

$k_{\alpha,0}$ – коэффициент температуропроводности тяжёлого бетона ($k_{\alpha,0} = 1,40 \cdot 10^{-7}$ м²/с).

Критерий удельной теплоёмкости

$$q_c = \frac{k_c}{k_{c,0}}, \quad (2.53)$$

где k_c – удельная теплоёмкость ВПЛБ;

$k_{c,0}$ – удельная теплоёмкость тяжёлого бетона ($k_{c,0} = 0,85$ кДж/кг·К).

Критерий морозостойкости

$$q_F = \frac{F}{F_0}, \quad (2.54)$$

где F – марка по морозостойкости ВПЛБ;

F_0 – марка по морозостойкости лёгкого бетона по ГОСТ 25246–82 (не менее 80 циклов).

Скаляризация векторного критерия качества

$$q = (q_{пс} \cdot q_R \cdot q_{уд} \cdot q_{тр} \cdot q_E \cdot q_W \cdot q_{H_2O} \cdot q_\lambda \cdot q_\alpha \cdot q_c \cdot q_F) \quad (2.55)$$

включала две стадии.

На первой стадии, исходя из области применения разрабатываемого материала, были найдены значения критериальных функций второго уровня (2.56)...(2.58), характеризующих технологические, физико-механические (пористость, прочность при сжатии и изгибе, удельную прочность, коэффициент трещиностойкости, модуль упругости) и эксплуатационные (коэффициенты теплопроводности, температуропроводности, удельную теплоёмкость, водопоглощение, коэффициент водостойкости и морозостойкость) свойства:

$$K_T = q_{пс}, \quad (2.56)$$

$$K_{фм} = \sqrt[4]{q_R q_{уд} q_{тр} q_E}, \quad (2.57)$$

$$K_{эк} = \sqrt[6]{q_W q_{H_2O} q_\lambda q_\alpha q_c q_F}. \quad (2.58)$$

Далее выполняется линейная свёртка критериальных функций второго уровня:

$$F_i = \alpha_1 K_T + \alpha_2 K_{фм} + \alpha_3 K_{эк}, \quad (2.59)$$

где индекс i означает n – новый или b – базовый материал.

Величины весовых коэффициентов $\alpha_1 \dots \alpha_3$ выбираются в широком диапазоне для подтверждения эффективности разработанного технологического решения по получению нового строительного материала.

После вычисления F_n и F_b , а также стоимости C_n (считается, что C_b известно) и k_t по формуле (2.2) проводится расчёт критерия технико-экономической эффективности k_{ef} разработанного материала. Величина коэффициента возможности реализации технологического решения k_t вычисляется по формуле (2.12). Для значений критерия $k_{ef} > 1$ определяются диапазоны варьирования рецептурных и технологических факторов. Для факторов, при которых $k_{ef} = \max$, проводится контрольное изготовление материала. Для этого материала оцениваются показатели

качества и сопоставляются с величинами свойств, полученными расчётным путём. При расхождении экспериментально установленных и расчётных величин свойств контрольного состава более 5 % проводится корректировка диапазона варьирования факторов и выбирается другое k_{ef} . Корректировка продолжается до минимального расхождения экспериментально установленных и расчётных величин свойств контрольного состава. Этот этап разработки материала является заключительным и называется *экспериментальная проверка результата оптимизации и уточнение рецептуры и режима изготовления материала*.

ГЛАВА 3. СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И ВЫСОКОПРОЧНОГО ЛЁГКОГО БЕТОНА

Параметры структуры высокопрочных лёгких бетонов, как и тяжёлых бетонов, на микроуровне определяются в основном структурообразованием вяжущего вещества – гидратацией портландцемента и кристаллизацией продуктов гидратации. При этом достижение максимальной прочности материала как показателя качества структуры материала [134, 135] обеспечивается при формировании твёрдого тела с наибольшей плотностью связей¹ и прочностью единичного контакта, которая зависит как от вида соединения, образующегося при гидратации портландцемента, так и от концентрации этих продуктов в единице объёма (плотности упаковки и удельной площади контакта отдельных структурных элементов, например кристаллов или рентгеноаморфного вещества).

Существенное влияние на процесс формирования структуры цементного камня оказывают дисперсные фазы. Наличие активных центров на их поверхности, связанное с активным кремнезёмом, приводит к образованию на границе контакта дополнительного количества продуктов гидратации, способствуя уплотнению структуры материала и повышению его эксплуатационных свойств.

Особенности химического состава дисперсных фаз формируют условия для протекания конкурирующих процессов структурообразования, оказывающих влияние на прочность материала:

1. Конструктивный процесс – увеличение количества продуктов гидратации, приводящее к уплотнению структуры (увеличению количе-

¹ В данном случае понимается концентрацией связей в единице объёма/поверхности.

ства связей N , что при прочих равных условиях увеличивает прочность композита);

2. Деструктивный процесс – разупрочнение материала вследствие образования дефектов и трещин: формирование развитой пористо-капиллярной структуры при наличии избыточного количества воды; возникновение внутренних напряжений, приводящих к образованию трещин вследствие усадки, разности модулей упругости и коэффициентов термического расширения компонентов и т. д.

На интенсивность указанных процессов структурообразования влияют свойства дисперсной фазы:

- химический состав,
 - смачиваемость, сорбционные свойства как по отношению к воде, так и к поверхностно-активным веществам,
 - дисперсность и шероховатость поверхности,
 - коэффициент линейного температурного расширения,
 - прочность и модуль упругости,
 - средняя плотность (средняя плотность материала заполнителя)
- и т. д.

Анализ структурообразования материала содержит два взаимосвязанных и дополняющих аспекта, содержащих количественную оценку:

1) влияние условий структурообразования на качество структуры, оцениваемое по прочности (экстенсивная оценка);

2) то же, на скорость набора прочности (кинетическая оценка).

Экстенсивная оценка структурообразования может проводиться как по уравнению прочности материала, так и сопоставлением экспериментальных данных по прочности, демонстрирующих влияние исследуемого фактора. Последний способ проведения экстенсивной оценки наиболее часто применяется в научно-исследовательских работах. Большой интерес представляет анализ по уравнению прочности. Можно выделить два вида уравнений прочности:

1) уравнения, устанавливающие влияние параметров структуры на величину прочности;

2) уравнения, устанавливающие влияние на прочность характеристик и содержания компонентов.

Первая группа уравнений выделяет параметры, характеризующие структурообразование материала в эксплуатационный период. Для этого периода характерным элементом структурообразования является

трещина. Совокупность трещин (система трещин) оценивается соответствующим интегральным показателем – фрактальная размерность системы трещин [136–143]. Примером уравнения первой группы является [144–146]

$$R = R_0(1 - v_p)^{2/(3 - D_m)}, \quad (3.1)$$

где R_0 – константа, характеризующая прочность бездефектного материала;

v_p – объёмная доля дефектов;

D_m – фрактальная размерность системы трещин.

Параметр D_m является характеристикой структурообразования, демонстрирующей развитость системы трещин. Значение фрактальной размерности системы трещин находится в узком диапазоне значений $2 > D_m > 3$, с ростом параметров R_0 и D_m возрастают прочность материала и удельная поверхностная энергия трещин:

$$E_{cr,V} = R_0 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{(3 - D_m)/2}. \quad (3.2)$$

Вторая группа уравнений прочности более многочисленна. Как правило, эти уравнения базируются на правиле абсолютных объёмов. Для учёта нелинейного влияния контактного взаимодействия компонентов вводятся различные коэффициенты, определяемые апостериорно [141, 147]. Эти уравнения прочности характеризуют только величину прочности и не содержат сведения о параметре структурообразования. Однако такие уравнения прочности соответствуют задаче проектирования материала с заданными свойствами. При должном уровне детализации на основе таких уравнений прочности могут быть разработаны соответствующие методики проектирования составов, а также оценено влияние на прочность характеристик и содержание основных компонентов. Важно отметить, что в таких уравнениях прочности влияние различных рецептурных и/или технологических факторов может быть оценено косвенно, посредством изменения характеристик компонента материала, учтённых в этом уравнении.

Для лёгкого бетона прочность на первом этапе оценивается по модернизированной формуле [148], в которой прочность R_{lb} пропорционально зависит от содержания и прочности основных компонентов – цементного камня и лёгкого заполнителя:

$$R_{lb} = (1 - v_f) R_c + 2\sigma_v f \frac{t/R_f}{1 - t/R_f}, \quad (3.3)$$

где t/R_f – соотношение приведённой толщины стенки t и радиуса R_f лёгкого заполнителя;

σ – прочность вещества стенки лёгкого заполнителя;

v_f – объёмное содержание лёгкого заполнителя;

R_c – прочность цементного камня.

Прочность лёгкого заполнителя определена из модели, представляющей зерно заполнителя сферической формы радиусом R_p , состоящего из плотного слоя (с нулевой пористостью) вещества заполнителя толщиной t и плотностью ρ_p , а также воздушного ядра радиусом $R_0 = R_f - t$. Важно отметить, что такое представление справедливо для многих искусственных лёгких заполнителей, получаемых вспучиванием сырьевой смеси.

Формула (3.4) демонстрирует, что прочность лёгкого бетона зависит от соотношения характерных размеров зерна лёгкого заполнителя – t/R_f . От этого соотношения зависит также средняя плотность зерна лёгкого заполнителя:

$$\rho_f = \rho_t \left(1 - \left(1 - \frac{t}{R_f} \right)^3 \right). \quad (3.4)$$

Отсюда возникает задача поиска компромисса, так как для получения лёгкого бетона необходимо снизить его среднюю плотность и сохранить прочность, что в отношении лёгкого заполнителя означает

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{R_b - (1 - v_f) R_c}{2\sigma v_f} = \frac{t/R_f}{1 - t/R_f} = \max \\ \frac{\rho_f}{\rho_t} = 1 - \left(1 - \frac{t}{R_f} \right)^3 = \min \end{array} \right. . \quad (3.5)$$

Представленные уравнения показывают, что при отсутствии плотной оболочки ($t = 0$) относительные значения прочности и средней плотности заполнителя равны, то есть

$$\frac{R_b - (1 - v_f) R_c}{2\sigma v_f} = \frac{\rho_f}{\rho_t} = 0. \quad (3.6)$$

При этом значении лёгкий бетон будет иметь ячеистую структуру, соответствующую пенобетону или газобетону. При $t \cong R_f$ бетон будет иметь строение тяжёлого бетона. В первом случае прочность бетона определяется исключительно содержанием и прочностью цементного

камня, а во втором основное влияние оказывает заполнитель. Отсюда следует, что для управления эксплуатационными свойствами лёгких бетонов на пористых заполнителях необходимо одновременно уделять внимание свойствам как цементного камня, так и лёгкого заполнителя.

Кинетическая оценка структурообразования должна быть предметом тщательного изучения. Выявлено, что скорость структурообразования существенно влияет на параметры структуры: для одного и того же вещества может быть получен материал с кристаллической, аморфно-кристаллической или аморфной структурой.

Для минеральных вяжущих веществ значительное влияние на структурообразование искусственного камня оказывает гидратация. Для таких вяжущих разработано несколько теорий их гидратации [149]. Для минеральных вяжущих, для которых лимитирующим является процесс образования продукта в зоне контакта взаимодействующих компонентов, можно применить уравнение, предложенное Г. Таммном:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{c}{t}, \quad (3.7)$$

а для определения степени превращения веществ – уравнение, предложенное В. Яндером:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{3}{2} \left(1 - \sqrt{kDt}\right)^2 \sqrt{\frac{kD}{t}}, \quad (3.8)$$

где h – толщина слоя продуктов взаимодействия;

α – степень превращения исходного реагента в продукт реакции;

k – константа скорости химической реакции;

D – коэффициент диффузии;

c – эмпирическая константа;

t – время.

Из уравнения (3.8) следует, что для процесса гидратации минеральных вяжущих основными параметрами являются коэффициент диффузии и константа скорости химической реакции.

Зависимость прочности искусственного камня от содержания компонента, способного к преобразованиям (гидратации), предложена в [150]:

$$R(t) = \frac{1 - Ce^{-at} - (1 - C)e^{-bt}}{1 - Ce^{-28a} - (1 - C)e^{-28b}}, \quad (3.9)$$

где C – расчётное содержание трёхкальциевого силиката в портландцементе;

a, b – эмпирические коэффициенты;

t – время (28 – стандартизированный период формирования прочности цементного камня), сутки.

Образование продуктов гидратации является необходимым, но недостаточным условием для формирования прочного искусственного камня. В этой связи часто применяют общее уравнение набора прочности

$$R(t) = a + b \ln(t), \quad (3.10)$$

где a , b – эмпирические коэффициенты.

Для оценки влияния различных факторов на структурообразование строительных материалов Ш. М. Рахимбаевым и Е. А. Поспеловой предложена система уравнений для определения кинетики процесса структурообразования [150]:

$$\begin{cases} \frac{t}{R} = \left(\frac{t}{R}\right)_0 + k_1 R \\ \frac{t}{R} = \left(\frac{t}{R}\right)_0 + k_2 t \end{cases}, \quad (3.11)$$

где k_1 , k_2 – эмпирические коэффициенты торможения процесса структурообразования строительного материала;

$(t/R)_0$ – обратная начальная скорость структурообразования.

В этом случае под структурообразованием понимаются любые процессы, приводящие к изменению прочности материала. Естественно, что к процессам структурообразования могут быть отнесены как процессы на этапе формирования структуры материала (начальное структурообразование), так и процессы деструкции, наиболее интенсивно протекающие в эксплуатационный период (структурообразование в эксплуатационный период).

Начальный период структурообразования также рассматривается как период, включающий несколько этапов. В частности, в [150] приводится уравнение, в котором набор прочности искусственного камня рассматривается как двухстадийный процесс:

$$R(t) = R(0)(1 - e^{-bt^a}) + qd \ln\left(\frac{t}{t_{fs}}\right), \quad (3.12)$$

где $R(0)$ – начальная прочность;

t_{fs} – время начала упрочнения первичной структуры;

a , b , d , q – эмпирические коэффициенты, зависящие от различных факторов:

q – коэффициент относительного влияния температуры на интенсивность твердения цементного камня в поздние сроки твердения;
 d – коэффициент, характеризующий интенсивность нарастания прочности цементного камня в поздние сроки твердения;
 a – коэффициент, характеризующий кинетику нарастания прочности цементного камня в начальные сроки;
 b – масштабный множитель.

Общее кинетическое уравнение (3.12), как было указано, характеризует наличие двух этапов формирования прочности цементного камня. Отсюда оно имеет очевидную структуру, а именно: первое слагаемое описывает набор прочности в период времени $t \leq t_{fs}$, а второе – в последующий период при $t > t_{fs}$. Важно отметить некоторые особенности этого уравнения:

- в первый период времени $t \leq t_{fs}$ второе слагаемое уравнения (3.12) имеет отрицательные значения, что должно компенсироваться масштабным множителем, который в такой постановке не имеет физического смысла. При этом из анализа первого слагаемого коэффициент b должен иметь единицу измерения – ед. времени- a (здесь a – коэффициент уравнения (3.12));

- коэффициент d во втором слагаемом должен иметь единицу измерения прочности, а не скорости изменения прочности в единицу времени, так как в этом слагаемом уравнения используется относительное время – t/t_{fs} ;

- при исследовании формулы (3.12) очевидно, что при $t \rightarrow \infty$ первое слагаемое будет равно $R(0)$ – прочности после завершения первого этапа структурообразования, а второе слагаемое будет демонстрировать постоянный неограниченный рост прочности, что естественно является ошибочным. В этой связи должны быть установлены максимальное значение прочности R_{\max} и период структурообразования t_s , который в этом случае может быть вычислен по формуле

$$t_s = t_0 \exp\left(\frac{R_{\max} - R(0)}{qd}\right). \quad (3.13)$$

Фундаментальное обоснование коэффициентов a , b в формуле (3.12) дано в работах А. Н. Бобрышева и др. [151–154]. Для описания различных кинетических процессов структурообразования указанные авторы использовали только первое слагаемое формулы (3.12), представив, что кинетические процессы подчиняются следующему уравнению:

$$y(t) = y_m(1 - e^{-\alpha t^n}), \quad (3.14)$$

где y_m – предельная величина свойства, характеризующего процесс структурообразования;

α, n – коэффициенты

В данном описании кинетического процесса коэффициент α характеризует скорость процесса, а коэффициент n – геометрические свойства формирующейся структуры.

Формально коэффициент n равен показателю Херста H , который изменяется в диапазоне $0 < H < 1$. При этом [155]:

- при $H > 0,5$ процесс является персистентным – вероятность сохранения наблюдающейся тенденции имеет высокие значения;
- при $H < 0,5$ процесс является антиперсистентным – высока вероятность изменения наблюдающейся тенденции в последующий период (в будущем);
- при $H = 0,5$ процесс не имеет выраженной тенденции.

Показатель Херста связан с размерностью Хаусдорфа – Безиковича D , которая используется для оценки геометрических характеристик формирующейся структуры [151]:

$$D_i = 2n + 1. \quad (3.15)$$

Здесь индексом « i » отмечается «внутренняя» («internal») размерность формирующейся структуры.

Альтернативой модели (3.14) является общее уравнение развития системы, имеющее вид [156]

$$\dot{x} = \left(\frac{k}{t^q} \right) x, \quad (3.16)$$

где k – коэффициент, характеризующий скорость развития системы во времени t ;

q – константа;

x – величина, характеризующая свойство системы.

Уравнение (3.16) демонстрирует:

- скорость изменения «размера» системы зависит от её размера;
- коэффициент, характеризующий скорость увеличения размера системы k/t^q уменьшается во времени.

Для строительных материалов под размером системы в контексте структурообразования можно понимать количество образующихся связей, определяющих свойства материала; указанное следует из определения структуры [157–159]. Очевидно, что скорость образования связей будет снижаться по мере сокращения компонентов, обеспечивающих их

образование. Отсюда можно заключить, что формула (3.16) применима для анализа структурообразования строительных материалов на разных этапах их жизненного цикла. При анализе структурообразования в эксплуатационный период x в уравнении (3.16) будет характеризовать количество разрушенных (деструктурированных) связей.

Решение дифференциального уравнения (3.16) имеет вид:

$$\ln(N) = \left(\frac{k}{1-q} \right) t^{1-q} + c_0, \quad (3.17)$$

где N – количество связей.

Константу c_0 определим из условия $N(t_0) = N_{\max}$, то есть после завершения рассматриваемого периода структурообразования при $t = t_{fs}$ количество образовавшихся связей максимально:

$$c_0 = \ln(N_{\max}) - \left(\frac{k}{1-q} \right) t_{fs}^{1-q}. \quad (3.18)$$

После преобразования (3.17) с учётом формулы (3.18) и замены $\varphi = \frac{k}{1-q}$ и $\beta = 1 - q$, получим

$$N(t) = N_{\max} \exp\left(-\varphi\left(t_{fs}^{\beta} - t^{\beta}\right)\right). \quad (3.19)$$

Сопоставление формул (3.19) и (3.14) указывает на очевидное отличие: уравнение (3.14) описывает развитие системы, индикаторное свойство которой достигает максимального значения y_m и в дальнейшем не изменяется, то есть

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = y_m, \quad (3.20)$$

а по формуле (3.19) при $t \leq t_{fs}$ и при $\beta > 0$, $\varphi > 0$ развитие системы протекает по классическому экспоненциальному закону, а при $t > t_{fs}$ оно ускоряется. Однако это ускорение не имеет физического обоснования. Экспоненциальный характер увеличения количества связей указывает на их образование без наличия препятствующих факторов. При $\beta < 0$ и $\varphi < 0$ характер изменения количества связей аналогичен уравнению (3.14). Однако при $t > t_{fs}$ развитие системы продолжается, что также не имеет физического обоснования.

Отсюда можно заключить, что для анализа систем, в которых не сформированы условия, препятствующие образованию новых связей, целесообразно применять формулу (3.19). Как правило, это начальный период формирования структуры, завершение которого совпадает с возникновением пространственных и ресурсных ограничений, влияю-

щих на структурообразование. В этом случае для описания структурообразования целесообразно использовать формулу (3.14).

Важно отметить, что формула (3.14) позволяет описать весь период структурообразования. Однако при этом значение $n > 1$, что находится за пределами естественного диапазона варьирования показателя Херста. В [160] отмечается, что показатель Херста $H > 1$ в случае наличия скачков амплитуды, распределённых по статистике Леви за время, определённое величиной скачка. Очевидно, что этот случай ($H > 1$) требует отдельного исследования, связанного с определением закона распределения случайной величины.

Естественно, что формирование структуры, определяющей свойства материала, из смеси совмещённых в определённых пропорциях компонентов развивается постепенно. Первоначально образуются точечные очаги продуктов физических и химических процессов, которые, развиваясь, образуют начальную «сеть» продуктов превращения компонентов. На этом этапе не возникают затруднения и развитие структуры характеризуется экспоненциальным ростом. Постепенно плотность начальной «сети» возрастает как за счёт увеличения количества «ветвей», так и вследствие повышения объёма ранее сформированных «ветвей». Естественно, на этом этапе возникают как пространственные, так и ресурсные (постепенное сокращение количества продуктов превращения компонентов) ограничения, замедляющие процесс структурообразования. После полного превращения активных компонентов материала в продукты и завершения формирования «сети» её вещество может претерпевать преобразования, обеспечивающие минимум свободной энергии Гиббса (минимум изобарно-изотермического потенциала). Указанный процесс является завершающим этапом начального (доэксплуатационного) структурообразования материала.

Применение такого подхода обеспечивает привлечение концепции Шкловского – Де Жена для описания структурообразования материала. Указанное было использовано в [151], коэффициент n формулы (3.14) соотнесён с показателем Херста. Для начального этапа формирования сети для вычисления её внутренней размерности требуется привлечение другого способа определения показателя Херста. Для этого рационально привлечь классическую методику, предложенную Г. Херстом, – R/S -анализ временных рядов [161–163]. При этом коэффициент β также

равен показателю Херста. Вычисление внутренней размерности начальной сети проводится по формуле

$$D_{i,0} = 2\beta + 1. \quad (3.21)$$

Образование продуктов физических и/или химических превращений компонентов (гидратации для портландцемента) не является достаточным условием для формирования прочности искусственного камня. Недостаточным условием также будет формирование плотной структуры камня. Должны быть выполнены все три условия:

- 1) наличие продуктов физических и/или химических превращений компонентов;
- 2) формирование плотной структуры;
- 3) достаточная прочность полученных продуктов превращений компонентов.

Параметры φ и β или α и n , определяемые по кинетическим зависимостям (3.14) и (3.19), характеризуют только два условия: образование продуктов превращений (параметры φ и α) и плотность структуры – параметры β и n (или $D_{i,0}$ и D_i). Прочность продуктов является неизвестной величиной, определение которой возможно только при решении обратной задачи, то есть по известным параметрам структуры и прочности искусственного камня (материала) можно вычислить величины прочности элемента структуры.

В кинетическом уравнении (3.12) начальный период структурообразования (первое слагаемое) определяется произвольно, в соответствии с предположениями исследователя, который устанавливает границу параметрами $R(0)$ и t_{fs} . При условиях

$$R_{\max}/R(0) \gg 1 \text{ и } t_s/t_{fs} \gg 1 \quad (3.22)$$

первое слагаемое можно исключить из формулы (3.12), что фактически приведёт к получению разновидности формулы (3.11). В этом случае из анализа будет исключена важная информация о структурообразовании материала: φ и β . При этом для материалов (или искусственных камней) естественным является выделение двух стадий начального структурообразования (период эксплуатации является отдельной стадией, которую в сущности можно рассматривать как третью стадию процесса структурообразования материала):

- стадия схватывания – характеризуется продолжительностью t_{fs} и механическим свойством, определяющим сопротивление формирующейся структуры внешнему механическому воздействию;

• стадия твердения – характеризуется продолжительностью t_s и прочностью материала к этому моменту времени $R(t_s)$.

Стадию схватывания удобно оценить по кинетике изменения глубины погружения индикатора (например, иглы прибора Вика) в смесь, которую можно описать функцией вида

$$H(t) = \alpha \exp(\varphi t^\beta), \quad (3.23)$$

где α – эмпирическая константа.

Типичные кинетические зависимости структурообразования цементных материалов на стадии схватывания и на стадии твердения представлены на рис. 3.1. S-образный характер кинетики изменения глубины погружения индикатора связан исключительно с достижением в определённый момент времени максимальной прочности для данного метода. На стадии твердения график кинетики набора прочности имеет классический вид, для описания которого используется функция (3.23).

Из общей теории композиционных материалов и анализа формулы (3.5) следует, что для формирования прочного композита необходимо обеспечить как высокие физико-механические свойства каркасообразующей части (цементного камня, цементно-минеральной матрицы и т. д.), так и прочность дисперсной фазы (заполнитель, функциональный наполнитель). Дополнительным фактором, который не учтён в формуле (3.6), но обеспечивает возникновение нелинейного изменения прочности композита, является адгезия в зоне контакта каркасообразующей части композита и дисперсных фаз. Если прочность этих составляющих

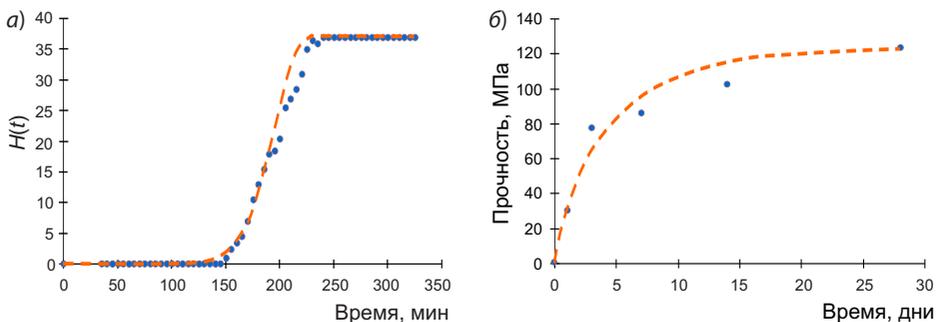


Рис. 3.1. Экспериментальные кинетические зависимости структурообразования цементных материалов в присутствии пластификатора С-3: стадия схватывания (а) и стадия твердения (б)

композита неудовлетворительна, то обеспечение высокой прочности композита невозможно.

Получение прочного цементного камня является предметом постоянного исследования и поиска новых сочетаний компонентов, при которых будут выполнены следующие общие условия:

$$\begin{cases} \frac{B}{Ц} \rightarrow \min \\ [Ca(OH)_2] \rightarrow \min \end{cases}, \quad (3.24)$$

где $[Ca(OH)_2]$ – концентрация портландита в цементном камне.

Первое условие (3.24) может быть выполнено при расчётном значении B/C :

$$\frac{B}{C} = \frac{\rho_B(1 + \alpha B_x)}{\rho_{c,0}(1 - \Pi_c)} - \frac{\rho_B}{\rho_C}, \quad (3.25)$$

где ρ_C и ρ_B – плотность портландцемента и воды соответственно;

$\rho_{c,0}$ – истинная плотность цементного камня;

Π_c – пористость цементного камня;

B_x – доля воды, химически связанной портландцементом;

α – степень гидратации.

Из формулы (3.25) следует, что только при $B/C < 0,27$ пористость цементного камня будет менее 20 % (рис. 3.2). Отсюда первое из условий (3.24) может быть выполнено только посредством использования пластифицирующих добавок, основной задачей применения которых является снижение расхода воды и обеспечение требуемой подвижности (удобоукладываемости) бетонной смеси при заданных параметрах технологического оборудования.

Второе условие (3.24) может быть выполнено только при введении химически активных по отношению к $Ca(OH)_2$ соединений², способных образовывать продукты, повышающие эксплуатационные свойства цементного камня, например, низкоосновные

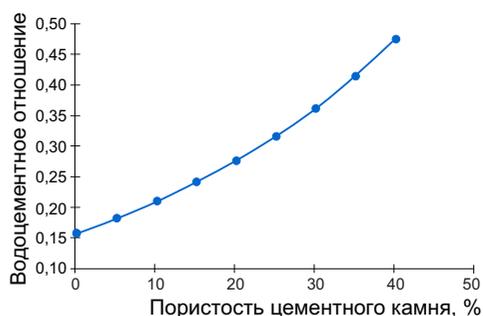


Рис. 3.2. Зависимость расчётного B/C от пористости цементного камня

² Безусловно, при исключении случая, когда гидроксид кальция не образуется, то есть при отсутствии гидратации портландцемента.

гидросиликаты кальция с общей брутто-формулой: $x\text{CaO} \cdot y\text{SiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$, где $x < 1$. Очевидно, что вследствие ограниченности растворимости SiO_2 [164–165] его взаимодействие с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ происходит в основном на границе раздела фаз. В этой связи целесообразно использовать порошки с высокой удельной поверхностью и содержащие химически активный SiO_2 .

Минеральные добавки. Подбор минеральной добавки при современном уровне развития строительного материаловедения выполняется только эмпирически.

Анализ влияния минеральной добавки должен осуществляться как по реологическим свойствам смеси, так и по прочности. При заданных временных и физических параметрах (условиях твердения: температуре, влажности воздуха) анализ должен проводиться по скорости структурообразования. В качестве такого критерия можно применять скорость набора прочности – dR/dt [МПа/сут], при заданной продолжительности – по R_{max} (максимальной прочности искусственного камня).

Реологические свойства смесей во многом предопределяют параметры структуры и эксплуатационные свойства композита. Данные³ рис. 3.3 и 3.4 демонстрируют как общую экстремальную зависимость подвижности смеси / прочности от содержания минеральной добавки, так и частные зависимости, характеризующие влияние её вида.

Естественно, что на формирование прочности цементного камня в присутствии минеральных добавок будут оказывать влияние химический и физический факторы. Химический фактор зависит от количества химически активного кремнезёма, способного взаимодействовать с портландитом, а физический фактор – от физических свойств слоя, образующегося в зоне контакта с частицами минеральной добавки, а также от площади границы контакта. Необходимо отметить, что толщина слоя контакта, как правило, имеющая свойства, отличные от свойств цементного камня в объёме, и площадь границы контакта характеризуют объём цементного камня с изменёнными свойствами.

Оценка вклада каждого фактора представляет достаточно трудную задачу, для решения которой необходимо привлечение корреляционного анализа. Для этого по характеристикам минеральной добавки проводится расчёт содержания активного кремнезёма:

$$Q_{\text{Si}} = S_f h_a \rho_f [\text{SiO}_2], \quad (3.26)$$

³ В качестве пластификатора использован поликарбоксилатный пластификатор Melflux 1641F.

где S_f – площадь границы контакта;
 h_a – толщина слоя минеральной добавки, вступившей во взаимодействие с портландитом;
 ρ_f – плотность минеральной добавки;
 $[SiO_2]$ – концентрация SiO_2 в минеральной добавке.

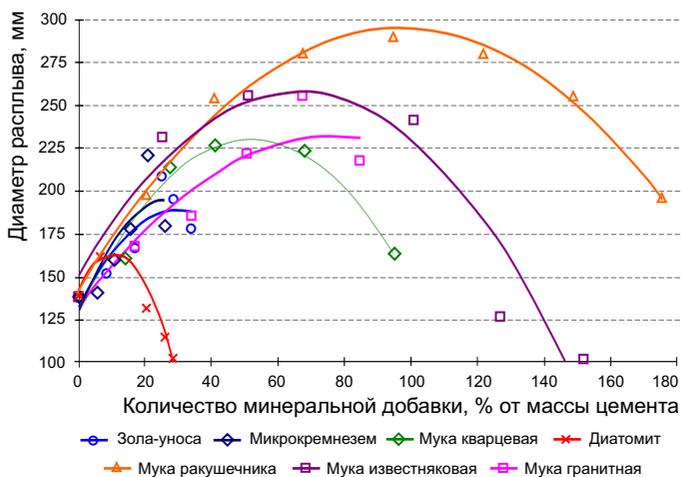


Рис. 3.3. Зависимость диаметра расплыва растворной смеси от содержания минеральной добавки

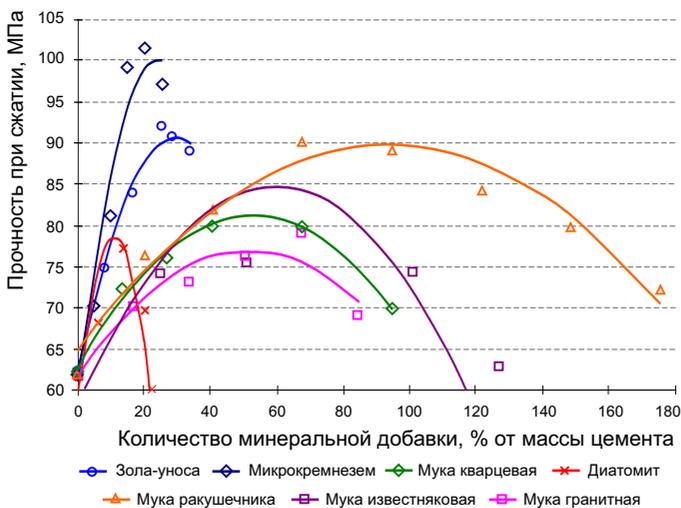


Рис. 3.4. Зависимость предела прочности при сжатии от содержания минеральной добавки

Далее необходимо вычислить коэффициент линейной корреляции между прочностью искусственного камня⁴ и величиной химического фактора $Q_{Si} - r(R|Q)$. Сильная корреляционная связь $r(R|Q) > 0,95$ указывает на доминирующее влияние химического фактора. При других значениях коэффициента корреляции $r(R|Q)$ вводится новая переменная, включающая как химический, так и физический фактор,

$$X = Q_{Si}Q_{St}, \quad (3.27)$$

где Q_{St} – коэффициент, характеризующий физическое влияние минеральной добавки на прочность искусственного камня.

Подбор величин Q_{St} проводится таким образом, чтобы коэффициент линейной корреляции между прочностью и переменной $X - r(R|X)$ имел величину более 0,95, то есть

$$r_{(R|X)} > 0,95. \quad (3.28)$$

После определения Q_{St} проводится расчёт соотношения Q_{Si}/Q_{St} , по величине которого оценивается вклад каждого фактора: $Q_{Si}/Q_{St} > 1$ свидетельствует о доминирующем влиянии химического фактора, $Q_{Si}/Q_{St} < 1$ – о преобладающем влиянии физического фактора.

Реализация представленного алгоритма установления влияния химического и физического факторов на структурообразование искусственного камня в присутствии исследованных минеральных добавок приведена в табл. 3.1, а распределение прочности искусственного камня от переменных Q_{Si} и X представлено на рис. 3.5. Значения коэффициентов линейной корреляции: $r(R|Q) > 0,46$ и $r(R|X) > 0,99$.

Данные табл. 3.1 демонстрируют, что по удельной⁵ величине $(Q_{Si}/Q_{St})_{отн}$ только при влиянии муки известняковой преобладает физический фактор, для других минеральных добавок – химический фактор. Максимальное влияние химического фактора установлено для кварцевой муки. Следующие по активности влияния химического фактора – микрокремнезём и измельчённый диатомит. Наименьшее влияние химического фактора на структурообразование характерно для золы-уноса.

Основной критерий для выбора комплекса «пластификатор – минеральная добавка» должен учитывать удельный эффект, который они производят при введении в исследуемую цементную систему. В данном случае

⁴ При использовании концентрационных зависимостей прочности искусственного камня $R = f(C)$ (рис. 3.4) необходимо использовать восходящие ветви таких зависимостей прочности от концентрации минеральной добавки.

⁵ Удельную величину соотношения Q_{Si}/Q_{St} целесообразно применять при использовании для анализа вклада химического и физического факторов в структурообразование искусственного камня концентрационных зависимостей $R = f(C)$.

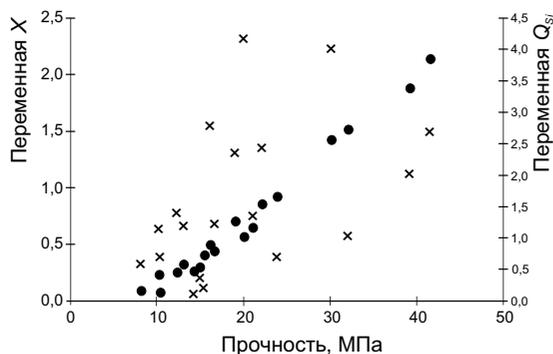


Рис. 3.5. Распределение прочности в зависимости от переменных Q_{Sf} и X : $\times - R = f(Q_{Sf})$; $\bullet - R = f(X)$

под «удельным эффектом» понимается не отношение dI/dC , имеющее максимальную величину (здесь I – величина исследуемого свойства; C – концентрация минеральной добавки), а соотношение, характеризующее относительное изменение свойства при замене части портландцемента комплексом «пластификатор – минеральная добавка», то есть по $I(C)/I_0$ (здесь индексом «0» обозначена величина прочности до введения комплекса «пластификатор – минеральная добавка»).

Таблица 3.1

Результаты корреляционного анализа влияния минеральных добавок на прочность искусственного камня

Обозначение минеральной добавки	C, %	R, МПа	Q_{Sf}	X	Q_{St}	Q_{Sf}/Q_{St}	$(Q_{Sf}/Q_{St})_{отн}$
М-1,5	5,1	70,3	0,66	0,07	0,10	6,44	46,17
М-3,0	10,1	81,1	1,33	0,64	0,48	2,76	
М-4,5	15,2	99,1	1,99	1,87	0,94	2,12	
М-6,0	20,3	101,5	2,66	2,13	0,80	3,32	
З-2,5	8,4	74,9	0,33	0,29	0,87	0,38	3,33
З-5,0	16,9	83,8	0,66	0,91	1,37	0,48	
З-7,5	25,3	92,0	1,00	1,51	1,52	0,66	
Р-6	20,3	76,6	1,20	0,44	0,37	3,26	16,43
Р-12	40,6	82,1	2,39	0,85	0,35	6,74	
Р-20	67,6	90,1	3,98	1,41	0,35	11,22	
П-4	13,5	72,3	1,38	0,25	0,18	7,65	63,05
П-8	27,0	76,1	2,75	0,49	0,18	15,56	
П-12	40,6	80,0	4,13	0,56	0,14	30,38	
Д-2	6,8	68,1	0,56	0,08	0,15	3,72	47,70
Д-4	13,5	70,2	1,12	0,23	0,20	5,49	
Г-5	16,9	73,0	1,16	0,32	0,27	4,22	23,92
Г-10	33,8	79,0	2,32	0,69	0,30	7,74	
И-7,5	25,0	74,2	0,08	0,26	3,05	0,03	0,12
И-15,0	51,0	75,4	0,17	0,39	2,35	0,07	

Примечания: М – микрокремнезём; З – зола-уноса; Р – мука ракушечника; П – мука кварцевая; Д – диатомит; Г – мука гранитная; И – мука известняковая; С – концентрация минеральной добавки, % от массы портландцемента.

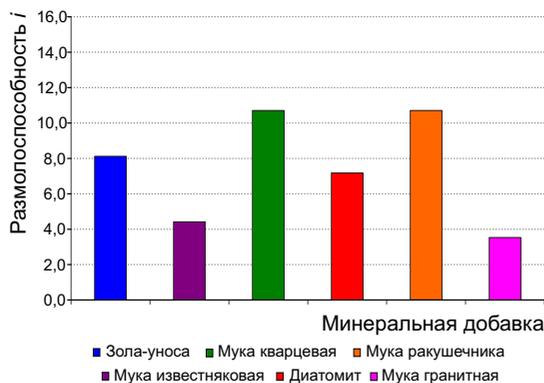


Рис. 3.7. Размолоспособность минеральных добавок (после помола в шаровой мельнице в течение 2 часов)

Величины обобщённого критерия k_m для исследуемых комплексов представлены на рис. 3.8, на основе которого исследуемые минеральные добавки можно расположить в ряд:

Зола-уноса > Мука ракушечника >
> Микрокремнезём >
> Мука кварцевая >
> Мука известняковая > Мука гранитная > Диатомит.

Причём необходимо отметить, что для исследованных комплексов величины обобщённого критерия k_m значительно отличаются. Минимальные значения k_m имеют комплексы, содержащие пластификатор и муку известняковую, диатомит или муку гранитную.

Отсюда по обобщённому критерию k_m эффективными минеральными добавками являются

Зола-уноса > Мука ракушечника >
> Микрокремнезём > Мука кварцевая.

Полученные экспериментальные данные показали, что при постоянном расходе портландцемента увеличение до определённого содержания высокодисперсных компонентов в растворной смеси за счёт уменьшения количества крупной фракции (мелкого заполнителя) приводит к повышению подвижности смесей (табл. 3.2).

Увеличение толщины прослойки цементно-минеральной матрицы в растворах до определённой величины способствует повышению подвижности смесей и повышению прочности композита (рис. 3.9). Важно отметить, что увеличение площади границы раздела фаз, которое происходит при исполь-

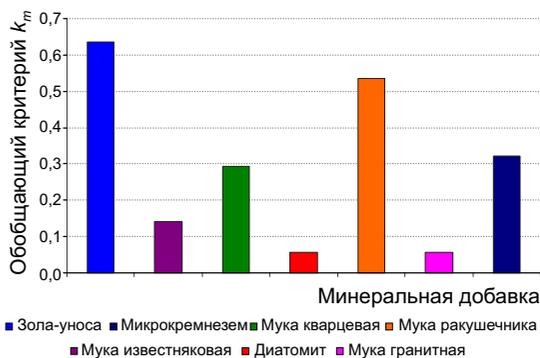


Рис. 3.8. Значение критерия k_m для комплексов «Melfux 1641 F – минеральная добавка»

Таблица 3.2
Рецептурные особенности, структурные параметры и физико-механические свойства пластифицированных цементно-минеральных смесей

№	Обозначение состава	Д/П, %	Д/Ц, %	$v_{\text{ЦДМР}}, \%$	$v_{\text{ЦДМР}}, \%$	$h_{\text{ЦДМР}}, \text{ммкМ}$	$S_p, \text{м}^2$	$H_p, \text{ммкМ}$	$D_p, \text{мм}$	$\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$	$R_{\text{нар}}, \text{МПа}$	$R_{\text{сж}}, \text{МПа}$
0	К	–	–	29,3	86,2	20,2	9,88	138,3	2,20	4,97	62,2	
Контрольный состав												
1. Составы с микрокремнезёмом												
1.1	М-1,5	1,5	5,1	30,3	89,8	22,3	8,97	140,8	2,21	6,31	70,3	
1.2	М-3,0	3,0	10,1	31,4	93,5	24,4	8,21	159,3	2,26	8,35	81,1	
1.3	М-4,5	4,5	15,2	32,5	97,4	26,4	7,57	177,0	2,28	9,33	97,1	
1.4	М-6,0	6,0	20,3	33,5	101,3	28,5	7,02	220,8	2,29	8,62	101,5	
1.5	М-7,5	7,5	25,3	34,6	105,4	30,5	6,55	178,8	2,28	7,44	99,1	
2. Составы с кварцевой мукой												
2.1	П-4	4,0	13,5	32,1	96,1	21,0	9,51	159,5	2,25	6,37	72,3	
2.2	П-8	8,0	27,0	34,9	106,8	21,8	9,17	213,0	2,27	6,91	76,1	
2.3	П-12	12,0	40,6	37,8	118,6	22,6	8,86	225,8	2,28	7,50	80,0	
2.4	П-20	20,0	67,6	43,4	145,6	24,1	8,29	223,5	2,24	6,92	79,8	
2.5	П-28	28,0	94,6	49,1	178,7	25,7	7,78	163,3	2,24	5,89	69,9	
3. Составы с золой-уноса												
3.1	3-2,5	2,5	8,4	31,1	92,3	21,0	9,51	151,3	2,23	6,54	74,9	
3.2	3-5,0	5,0	16,9	32,8	98,7	21,8	9,17	165,8	2,24	7,09	83,8	
3.3	3-7,5	7,5	25,3	34,6	105,4	22,6	8,86	207,8	2,27	7,20	92,0	
3.4	3-8,5	8,5	28,7	35,3	108,3	22,9	8,74	194,3	2,26	6,64	90,7	
3.5	3-10,0	10,0	33,8	36,4	112,6	23,4	8,56	177,1	2,19	5,22	89,0	
4. Составы с мукой ракушечника												
4.1	Р-6	6,0	20,3	33,5	101,3	21,7	9,22	198,0	2,35	6,38	76,6	
4.2	Р-12	12,0	40,6	37,8	118,6	23,1	8,64	254,4	2,33	7,05	82,1	
4.3	Р-20	20,0	67,6	43,4	145,6	25,1	7,98	284,7	2,31	7,90	90,1	
4.4	Р-28	28,0	94,6	49,1	178,7	27,0	7,40	295,0	2,30	8,69	89,3	
4.5	Р-36	36,0	121,7	54,7	219,9	28,9	6,91	281,4	2,29	8,21	84,4	
4.6	Р-44	44,0	148,7	60,4	273,0	30,9	6,48	255,3	2,27	6,97	80,0	
4.7	Р-52	52,0	175,6	66,1	343,8	32,8	6,10	196,3	2,24	6,52	72,4	

Примечания: Д/П – количество минеральной добавки от массы кварцевого песка в контрольном составе; Д/Ц – количество добавки от массы цемента; $v_{\text{ЦДМР}}$ – массовая доля цементно-минеральной матрицы; $h_{\text{ЦДМР}}$ – толщина прослойки цементно-минеральной матрицы, обволакивающей частицы заполнителя; S_p – суммарная площадь поверхности сухих компонентов; H_p – расчетная толщина водной пленки равномерно распределенной по поверхности сухих компонентов; D_p – диаметр распыляемого раствора при сжатии; ρ – средняя плотность раствора; $R_{\text{нар}}$ – предел прочности при изгибе; $R_{\text{сж}}$ – предел прочности при сжатии.

зовании более дисперсного компонента, должно приводить к снижению подвижности.

Современные цементно-минеральные матрицы являются композитными, состоят из частиц портландцемента, минеральной добавки, воды и пластификатора. Вязкость такой композитной системы нелинейно зависит от количества воды, пластификатора и минеральной добавки. Потому для строительных дисперсных систем, в которых цементно-минеральные матрицы являются дисперсионной средой, а зёрна заполнителя – дисперсной фазой, расход энергии на перемещение слоя можно представить в виде [168]

$$E = f\left(\frac{h_{\text{ЦММ}}}{d_{\text{п}}}\right) \left(1 + \frac{h_{\text{ЦММ}}}{d_{\text{п}}}\right)^{-1}, \quad (3.32)$$

где $h_{\text{ЦММ}}$ – толщина цементно-минеральной матрицы;

$d_{\text{п}}$ – диаметр частиц мелкого заполнителя (кварцевого песка);

$f(h_{\text{ЦММ}}/d_{\text{п}})$ – зависимость, характеризующая нелинейное изменение вязкости цементно-минеральной дисперсионной среды (матрицы).

Необходимые данные для оценки равномерности объёмного распределения компонентов в смеси, а также для оценки способности смеси к транспортировке (перекачке) и укладке содержатся в результатах исследования реологических свойств смесей в зависимости от скорости сдвига.

Минеральные добавки оказывают различное влияние на течение цементно-минеральных матриц. Наблюдается сложное течение – кривые течения характеризуются наличием участков со снижением напряжения сдвига при увеличении скорости сдвига (рис. 3.10).

Традиционно для описания реологических кривых течения используется модель Оствальда – Вейля [169]:

$$\tau = k\gamma^n, \quad (3.33)$$

где τ – напряжение сдвига;

γ – скорость сдвига;

k – показатель консистенции;

n – показатель, характеризующий тип течения.

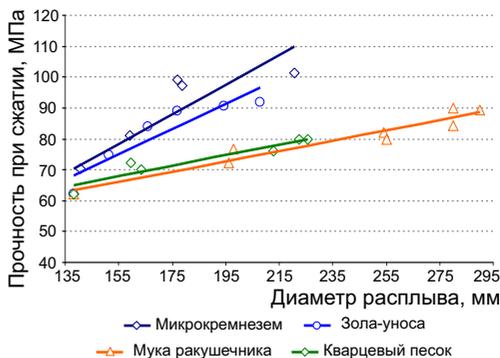


Рис. 3.9. Зависимость между подвижностью растворной смеси и прочностью раствора

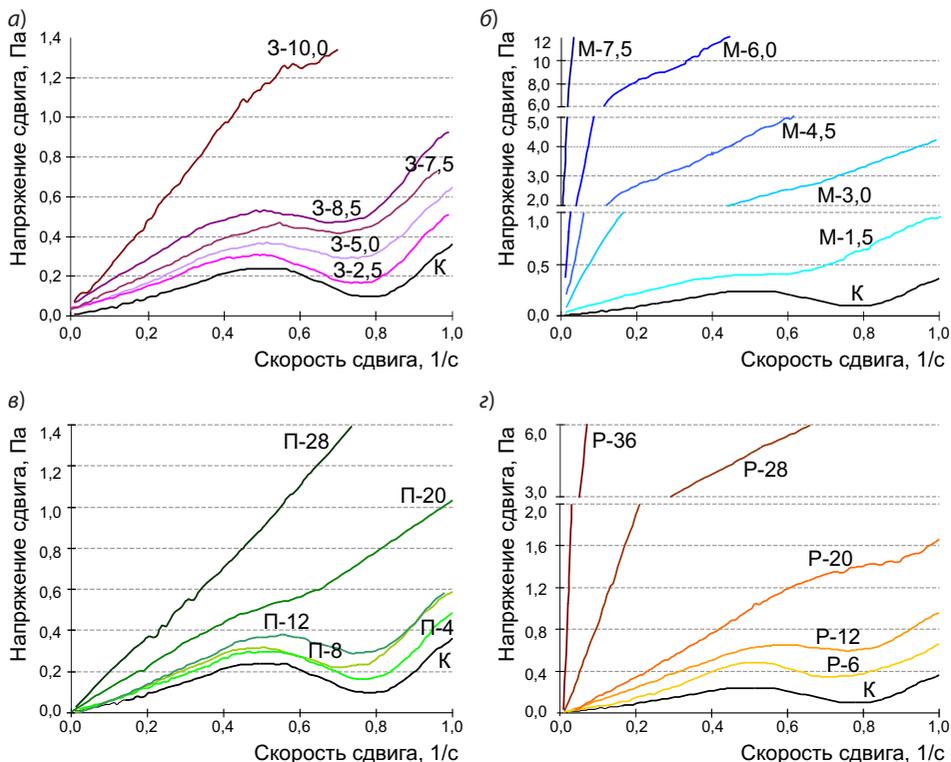


Рис. 3.10. Кривые течения $\tau(\dot{\gamma})$ пластифицированных цементно-минеральных смесей: а – на золе-уноса; б – с микрокремнезёмом; в – на муке из кварцевого песка; з – на муке из ракушечника

Представленные данные демонстрируют, что на зависимостях $\tau(\dot{\gamma})$ при некоторых соотношениях минеральной добавки и портландцемента наблюдаются участки $\tau(\dot{\gamma})$, отличающиеся как по интенсивности изменения, так и по направлению (нисходящий участок на кривой течения) в диапазоне $0,5 < \dot{\gamma} < 0,8 \text{ с}^{-1}$ (далее – реологическая аномалия). Отметим, что участки снижения напряжения сдвига при увеличении скорости сдвига на зависимостях $\tau(\dot{\gamma})$ наблюдаются как у пластифицированных цементных смесей контрольного состава (без минеральной добавки), так и у цементно-минеральных матриц (с минеральной добавкой).

Изменения напряжения сдвига от скорости сдвига наблюдаются для смесей с каждой из исследуемых минеральных добавок и зависят от степени наполнения. Так, в составах с микрокремнезёмом реологическая

аномалия на кривой течения наблюдается лишь при соотношении минеральная добавка : портландцемент $D/C = 0,06$. Для остальных видов минеральных добавок отсутствие реологической аномалии наблюдается только при больших соотношениях D/C : для золы-уноса при $D/C \geq 0,3$, для муки ракушечника и кварцевой муки – при $D/C \geq 0,41$.

Важным условием появления реологической аномалии является наличие пластификатора (рис. 3.11, а); для составов без пластификатора реологическая аномалия не наблюдается как в широком диапазоне изменения V/C -отношения, так и при введении минеральной добавки (рис. 3.11, б).

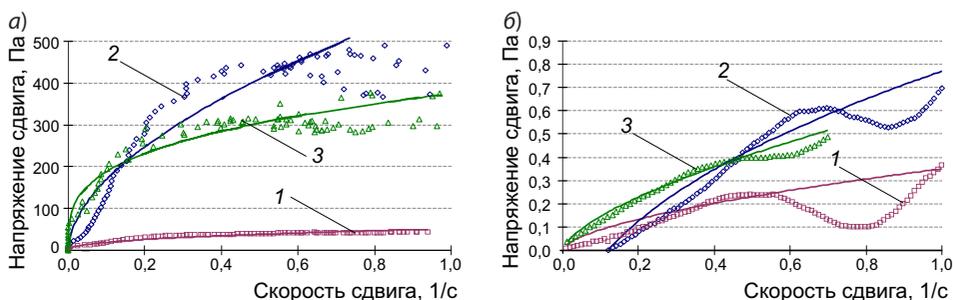


Рис. 3.11. Зависимость предельного напряжения сдвига от скорости сдвига для составов без пластификатора (а) и с пластификатором (б): 1 – цементная смесь с $V/C = 0,4$; 2 – цементная смесь с $V/C = 0,3$; 3 – цементно-минеральная смесь с микрокремнезёмом при $D/C=0,6$ и $V/C=0,4$

Сложный характер течения пластифицированных поликарбоксилатами цементно-минеральных матриц отмечался для тиксотропных смесей [169, 170]. Характерной особенностью является нелинейность зависимости $\tau(\dot{\gamma})$ в областях напряжения сдвига, где не наблюдается разрушение структуры. Это связано с хрупкостью структурного каркаса и называется сверханомалией. Для дисперсных систем II типа (твёрдая фаза – жидкость) проявление реологической аномалии объясняется возникновением «локального разрыва сплошности». При этом сдвиг распространяется в тонких слоях при сохранении неразрушенной структуры в объёме. Однако общей структурной модели, позволяющей описывать особенности течения систем с реологической аномалией, не существует.

Сложный характер кривой течения пластифицированных цементно-минеральных матриц можно представить в общем виде (рис. 3.12), где

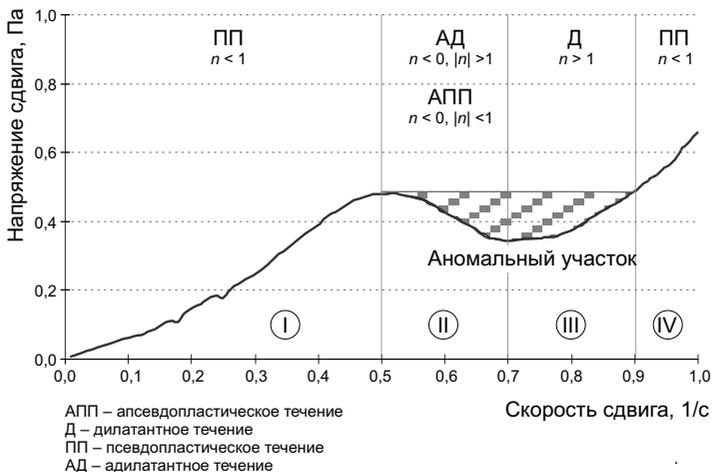


Рис. 3.12. Общее описание кривой течения с реологической аномалией

выделяются четыре участка, описание которых с помощью модели Оствальда – Вейля выполнено следующим образом:

- участок I характеризуется псевдопластическим ($n < 1$) течением;
- участок II в зависимости от степени наполнения дисперсной фазой описывается адилатантным или апсевдопластическим⁶ течением, где коэффициент $n < 0$ и $|n| > 1$ или $n < 0$ и $|n| < 1$ соответственно;
- участок III аппроксимируется уравнением с $n > 1$, что присуще дилатантному характеру течения;
- на участке IV характер течения сменяется на псевдопластический ($n < 1$).

Смена характера течения (участок I – участок II – участок III) происходит через переходную зону, когда кривая течения имеет плато, потому границы каждого из участков могут быть определены с погрешностью: начало участка II – при $\dot{\gamma} = 0,45 \dots 0,55 \text{ с}^{-1}$; начало участка III – при $\dot{\gamma} = 0,70 \dots 0,85 \text{ с}^{-1}$.

Важно отметить, что проявление реологической аномалии не может быть описано в рамках концентрационных моделей изменения вязкости. Для рассматриваемого случая содержание дисперсной фазы является по-

⁶ Под адилатантным течением понимается течение дисперсной системы, для описания которого с помощью уравнению Оствальда – Вейля используется модель с $n < 0$ и $|n| > 1$, а под апсевдопластическим течением – с $n < 0$ и $|n| < 1$.

стоянным. Однако характер изменения напряжения сдвига на участке II реологической кривой указывает на структурные изменения, характерные для случая уменьшения концентрации дисперсной фазы. Такой вариант структурных изменений (при постоянстве концентрации дисперсной фазы) возможен только при условии возникновения структурной неоднородности в смеси. Модель такой смеси можно представить как дисперсную систему, в которой дисперсная фаза представлена не отдельными частицами, разделёнными прослойками жидкости толщиной $2h_0$, а кластерами, состоящими из группы частиц, разделённых прослойками жидкости толщиной $2h_k$. Причём верно условие: $h_0 > 2h_k$ (рис. 3.13). Формирование такой структуры при постоянстве объёма жидкости приводит к её перераспределению, которое заключается в утолщении прослоек жидкости между кластерами частиц, что эквивалентно снижению содержания дисперсной фазы, а следовательно, вязкости смеси.

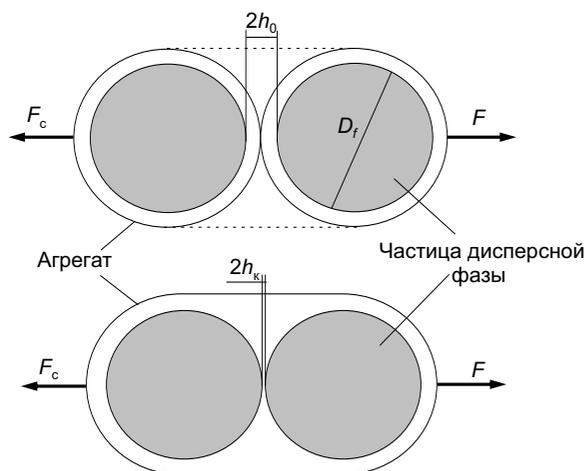


Рис. 3.13. Модель кластера частиц

Естественно ожидать, что при $h_0 \gg 2h_k$ однородность дисперсной системы с увеличением количества частиц, входящих в кластер, будет снижаться. При этом размер кластера будет увеличиваться (рис. 3.14), причём наиболее интенсивно для кластеров малых размеров.

Для смесей, содержащих пластификатор, по сравнению со смесями без пластификатора расход

воды закономерно уменьшен, что приводит к снижению толщины прослойки воды между минеральными частицами:

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{\Delta v_f}{v_f - v_f(v_f - \Delta v_f)}, \quad (3.34)$$

где Δv_f – изменение объёмной доли дисперсной фазы в смеси вследствие введения пластификатора:

$$\Delta v_f = \frac{\Delta W}{V_0 \rho_w}. \quad (3.35)$$

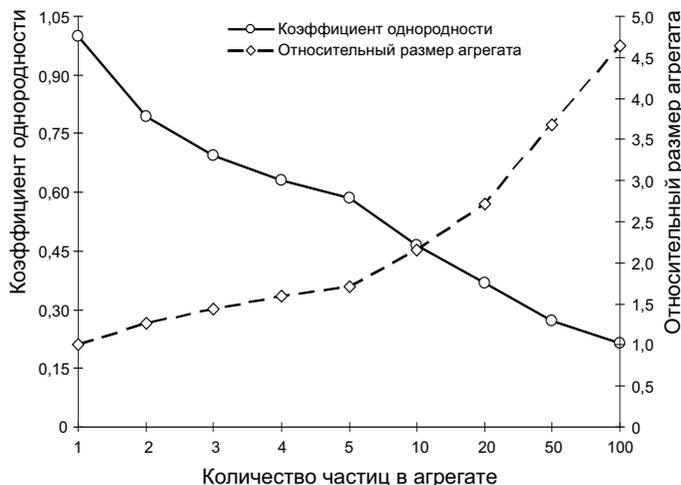


Рис. 3.14. Зависимость коэффициента однородности дисперсной системы и линейного размера агрегата от количества частиц в агрегате

Здесь ΔW – изменение расхода воды при использовании пластификатора;

ρ_w – плотность воды;

v_f – объёмная доля дисперсной фазы в смеси с пластификатором:

$$v_f = \frac{1}{V_0} \left(\frac{C}{\rho_c} + \frac{D}{\rho_d} \right), \quad (3.36)$$

где C и D – расход портландцемента и минеральной добавки на объём смеси $V_0 = 1 \text{ м}^3$ соответственно;

ρ_c и ρ_d – плотности портландцемента и минеральной добавки соответственно.

Уменьшение толщины прослойки воды при введении пластификатора повышает однородность распределения дисперсной фазы в объёме материала. Предположим, что существует прослойка жидкости, которая при заданных физических условиях обеспечивает однородное распределение дисперсной фазы (далее – равновесная толщина), например, при адсорбции ПАВ на поверхности частиц и формировании электростатического и стерического эффектов (рис. 3.15, а). В этом случае реализуется решетчатое приближение расположения частиц (рис. 3.15, б).

Наличие жидкости, объём которой превышает необходимый для однородного распределения частиц, приводит к возникновению кластеров частиц и, следовательно, образованию локальных объёмов дисперсной

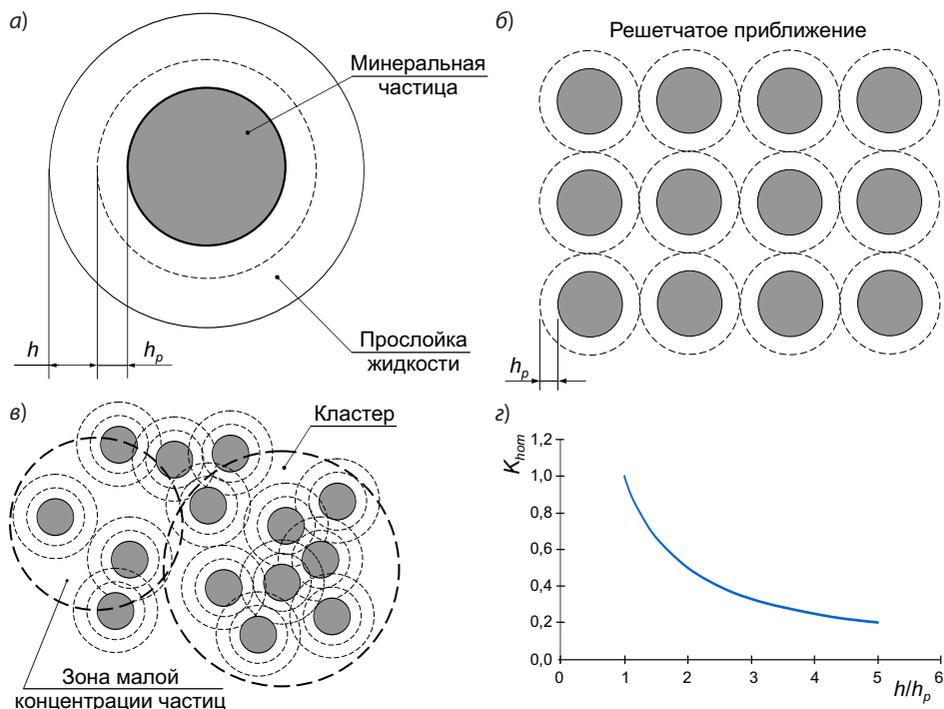


Рис. 3.15. Модель формирования структурной неоднородности

системы с низким содержанием дисперсной фазы (рис. 3.15, в). Структурная однородность дисперсной системы естественно будет снижаться. Это можно оценить по критерию

$$K_{hom} = \frac{h_p}{h}, \quad (3.37)$$

где h_p и h – равновесная и фактическая толщина прослойки жидкости (толщину слоя h_p на начальном этапе можно определить по величине нормальной густоты цементно-минеральной смеси).

Такие локальные объёмы закономерно нивелируют наличие реологических эффектов, возникающих вследствие нарушения однородности распределения фаз. Поэтому для непластифицированных смесей установление таких эффектов практически недостижимо.

Для смеси с пластификатором структурная однородность выше по сравнению с непластифицированной смесью (рис. 3.15, з). Отсюда очевидно, что возникновение структурной неоднородности для смесей, структура которых близка к решетчатому приближению при прочих

равных условиях (наличия ПАВ и механизма его действия, температуры и др.), является базовым условием формирования реологической аномалии на кривых течения.

Физическая модель процесса формирования неоднородности структуры при механическом воздействии на смесь описывается дифференциальным уравнением, учитывающим силу, инициирующую движение частицы, и силу сопротивления движению в вязкой среде (сила Стокса):

$$m \frac{d\vartheta}{dt} - 12\pi\mu_0 R\vartheta = 0, \quad (3.38)$$

где m , ϑ – масса и скорость частицы / кластера;

R – радиус частицы / кластера;

μ_0 – вязкость жидкости.

Получив первоначальный импульс, частица будет двигаться до контакта с другой частицей, и при достаточном импульсе образовавшийся двухчастичный кластер продолжит движение. Такой кластер продолжит движение до контакта со следующей частицей, увеличивая размер кластера за счёт увеличения числа частиц. Процесс будет продолжаться до достижения агрегатом уровня кинетической энергии, равной уровню тепловой энергии частиц в дисперсной системе.

Решение представленного дифференциального уравнения для кластера, состоящего из N_f частиц, имеет вид:

$$\vartheta_i = \vartheta_0 \prod_{i=1}^{N_f} \exp \left(\ln \left(1 - \frac{H_0}{\vartheta_{0,i}} \frac{9\mu_0}{2iR^2\rho_f} \right) \right), \quad (3.39)$$

где ϑ_0 – начальная скорость частицы;

ρ_f – плотность частицы;

i – порядковый номер столкновения «частица – кластер»;

$H_0 = 2(h_0 - h_k)$ – расстояние, прошедшее частицей до контакта.

При этом уровень кинетической энергии кластера будет снижаться до уровня тепловой энергии:

$$E_{cl} = \frac{mN_f}{2} \vartheta_i^2 \cong Q_w, \quad (3.40)$$

где Q_w – тепловая энергия движения кластера, рассчитанная по коэффициенту диффузии А. Эйнштейна.

После достижения Q_w движение кластера будет соответствовать фоновому движению дисперсной фазы.

Реологические кривые, на которых выявлены реологические аномалии, получены при проведении исследования на ротационном вискозиметре с измерительной системой «шар». Направление и скорость движения частиц возникают в результате передачи импульса от рабочего органа измерительной системы, движущегося с линейно изменяющейся скоростью сдвига от 0 до 1 с^{-1} . Вследствие симметричности шара проекции вектора скорости частицы будут описываться системой уравнений:

$$\begin{aligned} \vartheta_{\text{отд},x} &= \vartheta_0 \exp\left(-\frac{9\mu_0}{2R^2\rho_f}t\right) \cos\alpha \cos\beta; \\ \vartheta_{\text{отд},y} &= \vartheta_0 \exp\left(-\frac{9\mu_0}{2R^2\rho_f}t\right) \cos\alpha \sin\beta; \\ \vartheta_{\text{отд},z} &= \vartheta_0 \exp\left(-\frac{9\mu_0}{2R^2\rho_f}t\right) \sin\alpha, \end{aligned} \quad (3.41)$$

где α и β – углы приложения контакта рабочего органа вискозиметра с частицей (рис. 3.16).

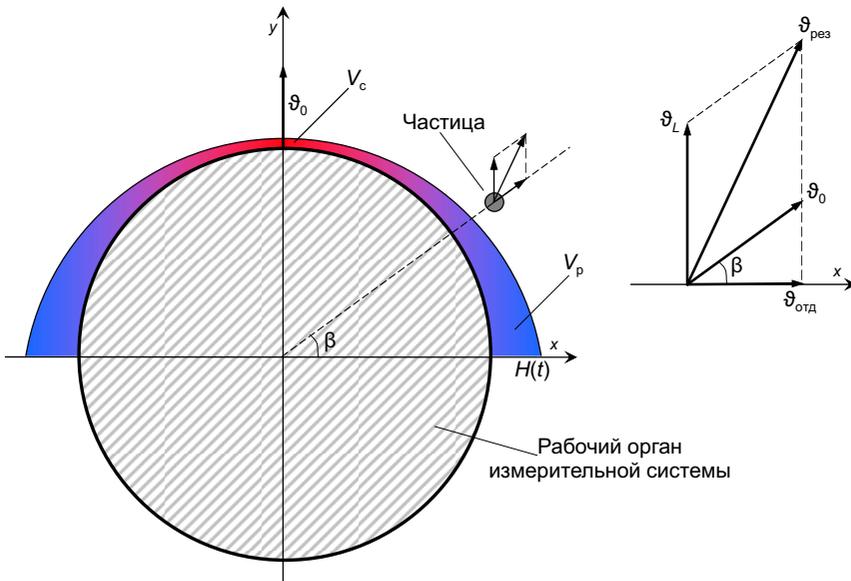


Рис. 3.16. Модель локального расслоения дисперсной системы

При этом за единицу времени частица преодолевает расстояние H , а рабочий орган измерительной системы – расстояние L (рис. 3.17).

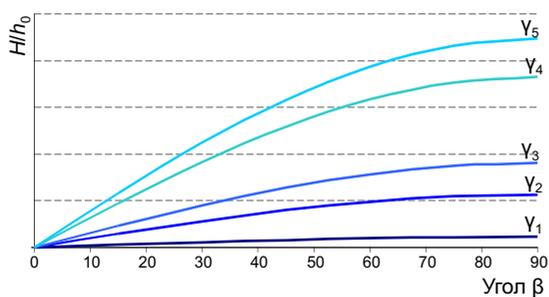


Рис. 3.17. Зависимость приведенного расстояния отдаления от угла движения частицы (γ_i – скорость сдвига: $\gamma_5 > \dots > \gamma_1$)

В лобовой зоне шара в объёме V_c смесь будет уплотняться вследствие совпадения векторов движения рабочего органа и частиц, взаимодействующих с ним. В периферийной зоне шара будет формироваться разуплотнённый слой объёмом V_p , так как движение частиц направлено от поверхности рабочего органа (рис. 3.18).

Очевидно, что в зоне уплотнения вязкость возрастает, а в зоне разуплотнения – снижается. Причём эти изменения имеют непропорциональный характер [171]:

$$\tau = a \left(\sqrt[3]{\frac{\eta_{\max}}{v_f}} - 1 \right)^{-b}, \quad (3.42)$$

где τ – предельное напряжение сдвига смеси;

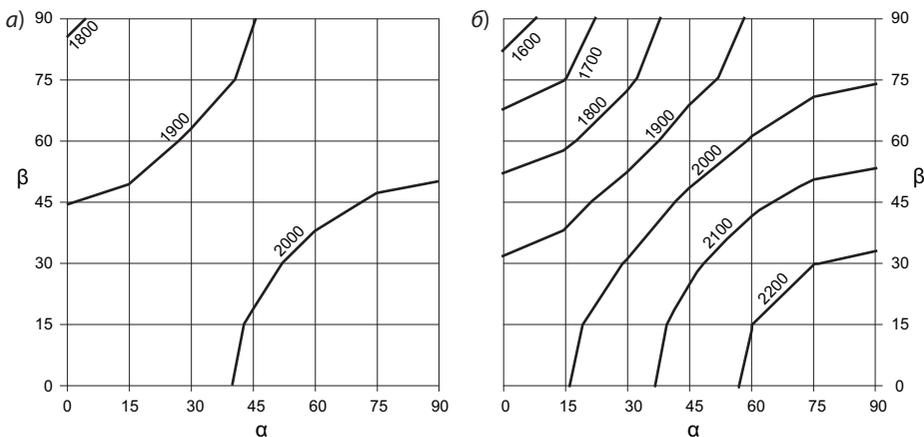


Рис. 3.18. Пример распределения расчётной плотности цементной смеси при сдвиговой нагрузке (γ), соответствующей началу (а) и концу (б) аномалии течения, в зависимости от угла ее приложения*

* α – угол отклонения от горизонтальной плоскости; β – угол отклонения от вектора движения измерительной системы реометра в горизонтальной плоскости (рис. 3.16).

η_{\max} – максимальная степень наполнения (для монодисперсных частиц $\eta_{\max} = 0,74$);

a, b – коэффициенты, характеризующие интенсивность убывающей зависимости (рис. 3.19).

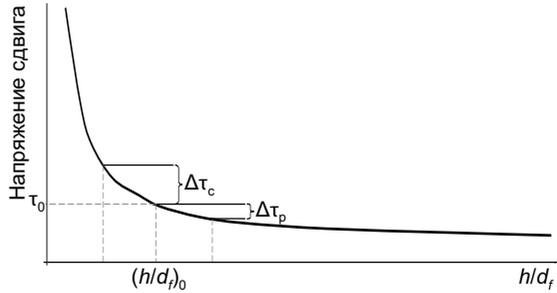


Рис. 3.19. Зависимость $\tau = f(h/d_f)$: $\Delta\tau_c, \Delta\tau_p$ – изменение предельного напряжения сдвига в лобовой зоне и периферийной зоне соответственно

Наличие зон уплотнения и разуплотнения смеси при взаимодействии её частиц с рабочим органом вискозиметра характеризует возникновение структурной неоднородности, идентификация которой на реологической кривой зависит от скорости сдвига (рис. 3.20).

Реологическая аномалия появляется при $\Delta\tau_p > \Delta\tau_c$. При достижении определённой скорости сдвига силы сопротивления в лобовой части полностью нивелируют эффект разуплотнения смеси в периферийной зоне (в этом случае $\Delta\tau_c > \Delta\tau_p$).

Скорости формирования лобовой и периферийной зон закономерно сопряжены расстояниями, которые проходят рабочий орган вискозиметра L и частица H :

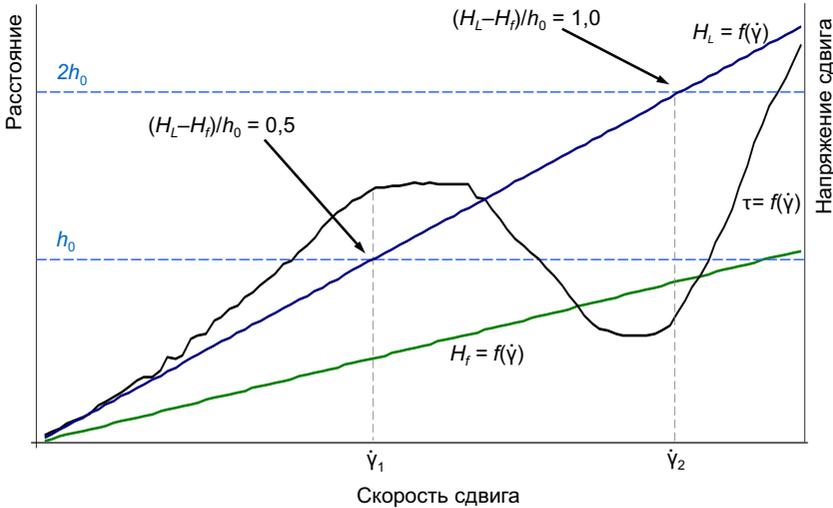


Рис. 3.20. Общий вид зависимости $L = f(\dot{\gamma})$ и $H = f(\dot{\gamma})$

$$\frac{L}{H} = 1 + A_{\text{кр}} \frac{h_0}{H}, \quad (3.43)$$

где $A_{\text{кр}}$ – константы (константа начала реологической аномалии $A_{\text{кр}} = 0,5$, завершения – $A_{\text{кр}} = 1,0$).

Относительное увеличение расстояния, пройденного рабочим органом вискозиметра L , по сравнению с расстоянием, проходящим частицами H , указывает на доминирующее влияние лобовой зоны. Представленная геометрическая аналогия возникновения реологической аномалии является универсальной и предполагает близость величин скорости сдвига начала реологической аномалии γ_1 и её завершения γ_2 (табл. 3.3).

На границы реологической аномалии γ_1 и γ_2 оказывает влияние адсорбционная способность минеральной добавки:

- микрокремнезём – 1,10 мкмоль/м²;
- зола-уноса – 1,18 мкмоль/м²;
- мука ракушечника – 0,45 мкмоль/м²;
- мука кварцевого песка – 0,25 мкмоль/м².

Увеличение адсорбционной активности минеральных добавок приводит к смещению γ_1 и γ_2 в область больших величин.

Таким образом, реологическая аномалия на кривой течения исследуемых пластифицированных цементных матриц возникает вследствие

Таблица 3.3

Границы реологической аномалии пластифицированных цементно-минеральных смесей

№ п/п	Цементно-минеральный комплекс	Скорость сдвига, соответствующая началу/концу реологической аномалии, γ_1/γ_2 , с ⁻¹					
		Номера составов из табл. 3.2					
		К	1	2	3	4	5
1	Ц+П	0,404 0,818	0,434 0,859	0,424 0,838	0,424 0,828	–	–
2	Ц+Р		0,463 0,791	0,495 0,545	–	–	–
3	Ц+З		0,394 0,798	0,394 0,798	0,384 0,788	0,374 0,758	–
4	Ц+МКМ		0,510 0,916	–	–	–	–

Примечание. В числителе – начальная граница γ_1 реологической аномалии, в знаменателе – граница γ_2 реологической аномалии; «К» – контрольный состав.

формирования структурной неоднородности. Важным условием возникновения реологической аномалии является приближение структурных параметров дисперсных систем к решетчатому типу строения. По мере роста скорости сдвига в системе формируются области с разной плотностью, различия которых возрастают с увеличением скорости сдвига. Это приводит к утолщению водной прослойки и снижению сопротивления течению. Интенсивность реологической аномалии определяется балансом величин изменения напряжения сдвига в «лобовой» и «периферийной» зонах смеси, контактирующей с рабочим органом измерительной системы реометра, и, соответственно, приводящим к уменьшению и увеличению соотношения h/d_f относительно начального значения. Границы реологической аномалии, независимо от применяемой минеральной добавки, можно описать обобщённым геометрическим критерием, учитывающим параметры структуры смеси (толщину водной прослойки), а также перемещения рабочего органа реометра и частиц дисперсной фазы. Восстановление типичного характера течения наступает за счёт более интенсивного формирования плотной «лобовой» зоны и большего её влияния на сопротивление течению, чем «периферийной» зоны, оказывающей противоположное влияние.

Пластификаторы. Современные композиты на минеральных вяжущих веществах обязательно содержат пластификаторы. Влияние этих веществ очевидно с позиции практического результата – повышение плотности структуры (снижение пористости за счёт уменьшения количества воды) и, как следствие, повышение прочности и других эксплуатационных свойств. При этом в ряде исследований отмечается также отрицательное влияние пластификаторов на прочность, которое чётко проявляется при сохранении водоцементного соотношения или при высоких концентрациях пластификатора. Это явление получило наименование «отравление цемента пластификатором». Отсюда очевидно, что пластификатор влияет как на строение (величину пористости и распределение пор по размерам), так и на параметры кристаллоаморфной структуры искусственного камня (степень кристалличности, параметры кристаллов и т. д.). При определённой концентрации пластификатора положительное влияние от уменьшения пористости превышает негативное влияние отравления искусственного камня, что характеризуется повышением его прочности. Затем баланс смещается: повышение плотности структуры не компенсирует отравление це-

ментного камня, что приводит к снижению прочности искусственного камня.

Такое влияние пластификатора закономерно прослеживается на всех стадиях структурообразования цементного камня (табл. 3.4 и 3.5).

Полученные S-образные зависимости (табл. 3.4) показывают, что интенсивность и продолжительность этапов структурообразования закономерно снижаются с формированием структуры материала. Это связано с пространственными и ресурсными ограничениями, влияние которых усиливается во времени.

Таблица 3.4

Результаты обработки экспериментальных данных, полученных на этапе схватывания цементных матриц

№ п/п	C_n , %	Эмпирические коэффициенты $H(t) = ae^{bt}$		$t_{0,51}$, мин	Параметры уравнения* $H(t) = ae^{\varphi t^\beta}$		$D_{i,0}$	R_{28} , МПа
		a	b		φ	β		
1	Контр.	$2,00 \cdot 10^{-4}$	0,065	185	0,132	0,862	2,72	124,5
Пластификатор – Melflux 2651F								
2	0,10	$2,00 \cdot 10^{-4}$	0,054	230	0,112	0,865	2,73	121,2
3	0,25	$2,64 \cdot 10^{-2}$	0,022	320	0,034	0,924	2,85	128,0
4	0,40	$1,00 \cdot 10^{-5}$	0,889	17	1,433	0,835	2,67	110,6
5	0,50	$1,00 \cdot 10^{-6}$	0,815	20	1,396	0,821	2,64	118,0
6	1,00	$2,33 \cdot 10^{-1}$	0,024	215	0,030	0,963	2,93	112,3
Пластификатор – С3								
7	0,25	$5,40 \cdot 10^{-3}$	0,041	225	0,069	0,902	2,80	98,6
8	0,50	$6,00 \cdot 10^{-4}$	0,045	245	0,088	0,875	2,75	102,5
9	0,75	$6,00 \cdot 10^{-4}$	0,038	295	0,075	0,873	2,75	106,9
10	1,00	$4,68 \cdot 10^{-2}$	0,018	340	0,026	0,936	2,87	109,9
11	2,00	$3,58 \cdot 10^{-1}$	0,013	375	0,016	0,968	2,94	108,7
Пластификатор – Melment F15G								
12	0,50	$1,00 \cdot 10^{-4}$	0,744	17	1,116	0,855	2,71	123,7
13	0,75	$5,00 \cdot 10^{-7}$	0,670	27	1,255	0,809	2,62	118,0
14	1,00	$1,00 \cdot 10^{-6}$	0,596	29	1,124	0,812	2,62	105,5
15	1,25	$8,00 \cdot 10^{-8}$	0,919	22	1,730	0,795	2,59	103,2
16	1,50	$1,00 \cdot 10^{-7}$	0,738	27	1,429	0,799	2,60	100,0

Примечание. «Контр.» – контрольный состав; «MF» – пластификатор Melflux 2651F; «С3» – пластификатор С3; «MM» – пластификатор Melment F15G; C_n – концентрация, % от массы портландцемента; $t_{0,51}$ – время завершения первого этапа структурообразования по формуле (37); $D_{i,0}$ – внутренняя размерность на первом этапе структурообразования; R_{28} – прочность цементного камня после 28 суток нормального твердения; * аналог формулы (3.17).

Таблица 3.5

**Результаты обработки экспериментальных данных, полученных на этапе
твердения цементных матриц**

№ п/п	C _д , %	Параметры уравнения $R(t) = R_{\max} \left(1 - e^{-\alpha t^n} \right)$			D _i	r ₁ , МПа
		R _{max}	α	n		
1	Контр.	124,5	0,565	0,740	2,48	168,3
Пластификатор – Melflux 2651F						
2	0,10	121,2	0,535	0,736	2,47	164,6
3	0,25	128,0	0,543	0,753	2,51	169,9
4	0,40	110,6	0,614	0,742	2,48	149,1
5	0,50	118,0	0,579	0,757	2,51	155,9
6	1,00	121,2	0,535	0,736	2,47	164,6
Пластификатор – С3						
7	0,25	98,6	0,835	0,799	2,60	123,4
8	0,50	102,5	0,720	0,760	2,52	134,8
9	0,75	106,9	0,690	0,759	2,52	140,8
10	1,00	109,9	0,635	0,853	2,71	128,9
11	2,00	108,7	0,720	0,728	2,46	149,2
Пластификатор – Melment F15G						
12	0,50	124,6	0,285	0,837	2,67	164,6
13	0,75	118,7	0,365	0,816	2,63	169,9
14	1,00	107,0	0,295	0,830	2,66	149,1
15	1,25	103,9	0,335	0,838	2,68	155,9
16	1,50	100,5	0,325	0,865	2,73	119,4

Примечание. r₁ – прочность единичного элемента структуры.

Значения параметра $\beta > 0,5$ (см. табл. 3.4) указывает на персистентный характер структурообразования, то есть имеющий устойчивый тренд развития. Такое влияние пластификатора чётко отображается в динамике изменения параметров φ и β (рис. 3.21). Для всех пластификаторов наблюдается периодический характер изменения параметров φ и β с изменением их концентрации, для пластификатора Melment F15G наблюдается положительный тренд изменения параметра φ , то есть скорость структурообразования возрастает, но отрицательный тренд для параметра β , указывающий на формирование менее плотной структуры. Противоположное влияние для параметров φ и β наблюдается для пластификатора С3. При этом важно отметить, что значения φ для С3 в среднем наименьшие. Для пластификатора Melflux 2651F выделить тренд

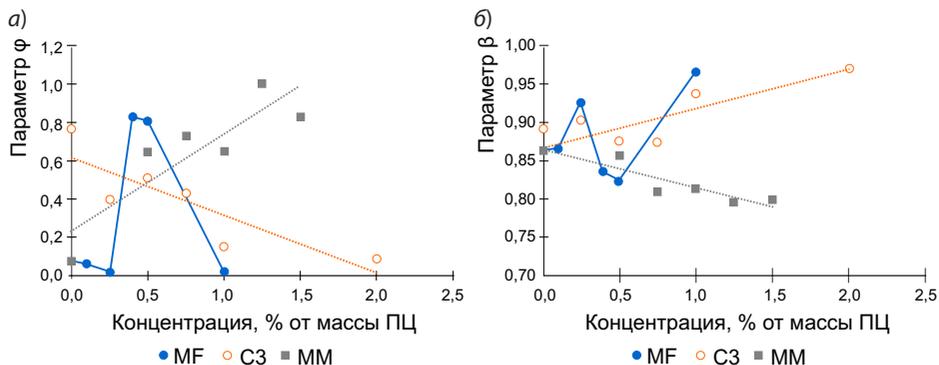


Рис. 3.21. Влияние вида и концентрации пластификаторов на параметры структурообразования: а – параметр φ (для наглядности относительные значения параметра φ увеличены на порядок); б – параметр β

затруднительно, однако значения φ для него имеют высокие значения, особенно для концентраций 0,4 и 0,5 % от массы портландцемента.

Взаимозависимости рассматриваемых факторов представлены в корреляционной (табл. 3.6), из которой следует, что в соответствии со шкалой Чеддока [172] для большинства анализируемых факторов их связь отсутствует ($r < 0,1$) или связь умеренная ($r < 0,5$).

Значимая величина коэффициента корреляции наблюдается для параметров φ и β уравнения $H(t) = a \exp(\varphi t^\beta)$. Знак коэффициента корреляции указывает, что с увеличением скорости структурообразования (увеличение коэффициента φ) плотность структуры материала снижается (снижение коэффициента β). Кроме того, между периодом начального структурообразования $t_{0,s1}$ и прочностью материала R_{28} наблюдается заметная по Чеддоку связь ($0,5 < r < 0,7$). Причём положительный знак коэффициента корреляции указывает, что увеличение периода $t_{0,s1}$ приводит к повышению прочности R_{28} .

Стадия твердения начального структурообразования характеризуется классической асимптотической зависимостью (рис. 3.21, б). Значения коэффициентов корреляции (табл. 3.7) демонстрируют наличие

Таблица 3.6

Корреляционная таблица

Значения коэффициентов корреляции r (для данных табл. 3.4)					
$\varphi \beta$	φR_{28}	βR_{28}	$t_{0,s1} R_{28}$	$\varphi t_{0,s1}$	$\beta t_{0,s1}$
-0,781	-0,40	0,30	0,637	-0,458	0,184

высокой корреляционной связи между параметрами α и n уравнения кинетики структурообразования (3.14), демонстрирующей те же тенденции, выявленные на стадии схватывания, а именно: увеличение скорости структурообразования приводит к формированию менее плотной структуры искусственного камня. Кроме того, между параметрами α и n имеется только слабая корреляционная связь с максимальной прочностью материала. Использование комплексной переменной α/n несущественно увеличивает коэффициент корреляции.

Таблица 3.7

Корреляционная таблица

Значения коэффициентов корреляции r (для данных табл. 3.5)			
αn	αR_{\max}	$n R_{\max}$	$(\alpha/n) R_{\max}$
-0,813	0,249	-0,248	0,263

Отсутствие значимой корреляционной связи между параметрами α и n и прочностью материала указывает на наличие дополнительных параметров, характеризующих структурные элементы материала. Очевидно, что качественную среднюю оценку элементов структуры можно получить, используя R_{\max} (характеризует максимальную прочность материала) и параметр n (характеризует плотность структуры материала):

$$r_1 = \frac{R_{\max}}{n}, \quad (3.44)$$

где r_1 – прочность элемента структуры.

Естественно предположить, что таким дополнительным фактором для рассматриваемого материала должен быть минералогический состав продуктов гидратации портландцемента. Для указанного анализа используем данные дифференциального термического анализа, обработка которых представлена в табл. 3.8. Первая аномалия с минимумами при 100...180 °С характеризует содержание свободной воды в цементном камне и степень гидратации портландцемента, указывая на содержание CSH (II) и гидросульфалоюмоферрита кальция [172]. Вторая аномалия с минимумом при 450...500 °С характеризует содержание портландита, а третья аномалия с минимумами при 750...780 °С – содержание гидросиликатов и карбоната кальция.

Таблица 3.8

Результаты ДТА цементного камня и результаты анализа данных

№ п/п	Энтальпия аномалий H_i , Дж/г			$\left \sum_i H_i \right $, Дж/г	Приведённая энтальпия аномалий			δD_p , %
	№1	№2	№3		№2	№3	№2+№3	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-22,3	-54,7	-29,3	106,3	261,0	140,0	400,98	8,85
Пластификатор – Melflux 2651F								
2	-16,7	-51,7	-52,1	120,5	371,9	375,2	747,12	9,41
3	-27,9	-50,2	-47,9	126,0	227,2	216,6	443,78	11,97
4	-16,9	-54,9	-35,5	107,3	348,3	225,0	573,23	6,97
5	-16,9	-55,6	-26,6	99,1	325,4	156,0	481,38	4,90
6	-23,2	-43,0	-45,9	112,1	208,1	222,4	430,44	5,12
Пластификатор – С3								
7	-32,2	-48,9	-48,0	129,0	195,8	192,2	387,96	7,36
8	-29,9	-51,7	-44,9	126,4	218,7	190,1	408,79	8,30
9	-40,3	-47,3	-51,5	139,1	163,3	177,8	341,09	8,30
10	-95,2	-49,0	-48,7	192,8	99,2	98,6	197,81	5,80
11	-160,6	-49,8	-58,3	268,7	83,3	97,5	180,87	16,34
Пластификатор – Melment F15G								
12	-22,2	-45,5	-48,8	116,5	239,1	256,7	495,75	1,33
13	-31,3	-40,5	-55,7	127,5	165,2	227,0	392,21	-0,49
14	-45,6	-42,9	-46,9	135,4	127,2	139,1	266,27	-1,36
15	-45,6	-39,1	-13,4	98,1	84,1	28,9	113,02	-3,31
16	-10,6	-3,7	-10,6	25,0	8,7	24,9	33,65	-5,09

Примечание. Номер состава аналогичен номеру состава в табл. 3.4.

Для анализа были использованы следующие качественные характеристики:

- приведённое значение аномалии №2:

$$Q_2 = \frac{H_2}{H_1} \left| \sum_i H_i \right|, \quad (3.45)$$

- приведённое значение аномалии №3:

$$Q_3 = \frac{H_3}{H_1} \left| \sum_i H_i \right|, \quad (3.46)$$

- приведённое значение аномалий №2 и №3:

$$Q_{2,3} = \frac{H_2 + H_3}{H_1} \left| \sum_i H_i \right|, \quad (3.47)$$

где $\left| \sum_i H_i \right|$ – абсолютная суммарная энтальпия аномалий;
 H_i – энтальпия i -й аномалии.

Кроме того, особый интерес представляет коэффициент, характеризующий изменение внутренней размерности при переходе со стадии схватывания на стадию твердения:

$$\delta D_i = \frac{D_{i,0} - D_i}{D_{i,0}}, \quad (3.48)$$

где δD_i – относительное изменение внутренней размерности системы.

В соответствии с определением фрактальной размерности [173] знак δD_i будет указывать траекторию, по которой развивалась система:

- $\delta D_i > 0$ указывает на увеличение диапазона характерных размеров элементов структуры, то есть происходит последовательное увеличение размеров элементов структуры в процессе её эволюции (перехода от стадии схватывания к стадии твердения);

- $\delta D_i < 0$ указывает не на изменение характерных размеров элементов системы, а на увеличение относительного количества элементов с малыми размерами, то есть в системе реализуются условия, которые блокируют процесс укрупнения элементов.

Представленные данные демонстрируют ограниченное влияние общих фундаментальных закономерностей параметров структуры материала на его прочность, то есть для достижения максимальной прочности искусственного камня необходимо обеспечить не только высокую плотность структуры, но и наличие элементов структуры, имеющих высокую прочность. Так, данные табл. 3.9 демонстрируют несущественную корреляционную связь ($r < 0,3$) между суммарной энтальпией и прочностью материала. Причём между абсолютной суммарной энтальпией аномалий $\left| \sum_i H_i \right|$ и максимальной прочностью R_{\max} корреляционная связь отсутствует. Заметная положительная корреляционная связь наблюдается только между приведёнными значениями аномалии $Q_2 / Q_{2,3}$ и прочностью искусственного камня, выраженной прочностью структурного элемента r_1 или максимальной прочностью R_{\max} . Важно отметить, что корреляционная связь $r_{(Q_i|r_1)}$ заметно выше, чем для $r_{(Q_i|R_{\max})}$.

Таблица 3.9

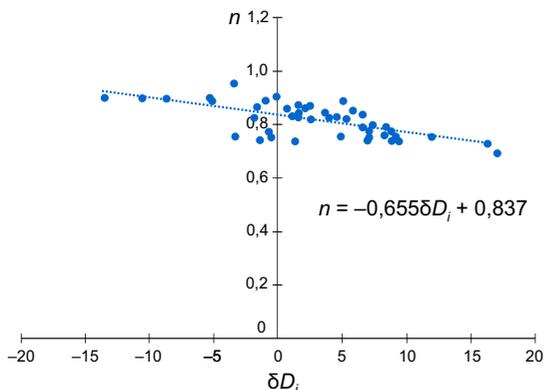
Корреляционная таблица

$\left \sum_i H_i \right r_1$	$\left \sum_i H_i \right R_{\max}$	$Q_2 r_1$	$Q_{2,3} r_1$	$Q_{23} r_1$	$Q_2 R_{\max}$	$Q_{2,3} R_{\max}$
0,165	0,023	0,654	0,501	0,617	0,540	0,550

Анализ зависимости $n = f(\delta D_i)$ показывает, что маршрут развития системы зависит от вида вводимого компонента (рис. 3.22). Значения $\delta D_i < 0$ характерны для цементных систем, структурообразование которых протекает в присутствии пластификатора Melment F15G, для других систем структурообразование протекает с укрупнением элементов структуры ($\delta D_i > 0$). Представленные данные также демонстрируют, что системы, для которых характерно $\delta D_i < 0$, в общем имеют более высокую плотность структуры, которая характеризуется параметром n (внутренней размерность системы D_i).

Таким образом, в структурообразовании цементных композитов целесообразно выделять два этапа: этап схватывания цементного теста и этап твердения. Выделение этапа схватывания определяется естественными законами развития природных систем, а именно начальным образованием структурной сетки продуктов гидратации, формирование которой подчиняется экспоненциальному закону. Момент времени, при котором наблюдается отклонение от этого закона, является временем возникновения пространственных и/или рецептурных затруднений, тормозящих экспоненциальное развитие системы. При этом ускорение процессов структурообразования на этапе схватывания нецелесообразно, что выражается в сильной отрицательной связи между параметрами φ и β уравнения $H(t) = a \exp(\varphi t^\beta)$, которые характеризуют скорость структурообразования на этапе схватывания (параметр φ) и плотность структуры (параметр β или сопряжённая с ним внутренняя размерность $D_{i,0}$). Указанное подкрепляется сильной положительной связью между периодом начального структурообразования $t_{0,s1}$ и прочностью искусственного камня R_{28} .

На этапе твердения также подтверждена сильная отрицательная связь между параметрами α и n уравнения $R(t) = R_{\max}(1 - e^{-\alpha t^n})$, демонстрирующая те же тенденции, выявленные на стадии схватывания, а именно увеличение скорости структурообразования приводит к формированию менее плотной структуры. При этом выявлено, что на этапе твердения на прочность должен оказывать влияние третий фактор (кроме скорости структурообразования и плотности структуры), зависящий от минералогического состава цементного камня. Анализ данных, полученных при исследовании минералогического состава цементного камня методом дифференциального термического анализа, показывает, что эффект влияния третьего фактора зависит от вида вводимого вещества.

Рис. 3.22. Зависимость $n = f(\delta D_i)$

Изменение величины внутренней размерности системы при переходе от стадии схватывания к стадии твердения свидетельствует о возможности реализации двух траекторий развития системы – как с увеличением характерных размеров элементов структуры, которые могут появляться только посредством объединения элементов структуры (траекто-

рия № 1), так и с сохранением характерных размеров структурных элементов, но с увеличением доли элементов с малыми размерами (траектория № 2). Последнее возможно при реализации условий, препятствующих объединению элементов структуры. Траектория № 2 характерна для цементного камня, структурообразование которого протекает в присутствии пластификатора Melment F15G, для других исследованных составов структурообразование цементного камня протекает с укрупнением элементов структуры.

Суперабсорбирующий полимер. Для дисперсных систем на основе минеральных вяжущих веществ усадочные явления, приводящие к возникновению высоких внутренних напряжений, являются преобладающими, особенно для систем, имеющих избыток физически свободной воды. В этой связи управление водным балансом в цементной матрице является инструментом для повышения интенсивности конструктивных и уменьшения интенсивности деструктивных процессов.

Обеспечиваемая силами Ван-дер-Ваальса (энергия связи не превышает 20 кДж/моль [174]) адсорбция воды на границе раздела фаз представляет собой физический процесс, а гидратация портландцемента – химический процесс, при этом энергия химической связи достигает 550 кДж/моль [175]. Отсюда очевидно, что энергетически выгоден химический процесс, а физической адсорбции подвергается свободная (физическая) вода. При этом физически адсорбированная вода будет являться своеобразным источником для обеспечения гидратации портландцемента, что особенно важно для обеспечения качества бетонных

изделий с высоким модулем открытой поверхности, в том числе для строительных конструкций, изготовленных по технологии 3D-печати. Отсюда следует, что для управления водным балансом в цементной матрице, содержащей фазы с активными центрами и обладающей требуемыми реологическими свойствами, помимо уменьшения количества физической воды посредством введения пластификаторов, целесообразно применять специальные добавки, обеспечивающие сохранение необходимого количества физически связанной воды для протекания гидратации портландцемента в неблагоприятных условиях твердения. Такие добавки получили название суперабсорбирующих полимеров (далее – САП), а их влияние на структурообразование цементного камня – внутреннего ухода при гидратации. Использование САП требует установления «паритетных» концентраций полиакрилатного раствора, при которых сорбционная способность проявляется без снижения степени гидратации.

Интегральные термограммы суммарного тепловыделения цементного камня демонстрируют, что концентрация САП, равная 1,5 % от массы портландцемента (рис. 3.23), обеспечивает количество теплоты гидратации, равное тепловыделению цементного камня без САП. Исключением является состав цементной композиции с ускорителем твердения, что указывает на создание добавкой затруднений процессам структурообразования. В отличие от состава без ускорителя твердения, ускорен-

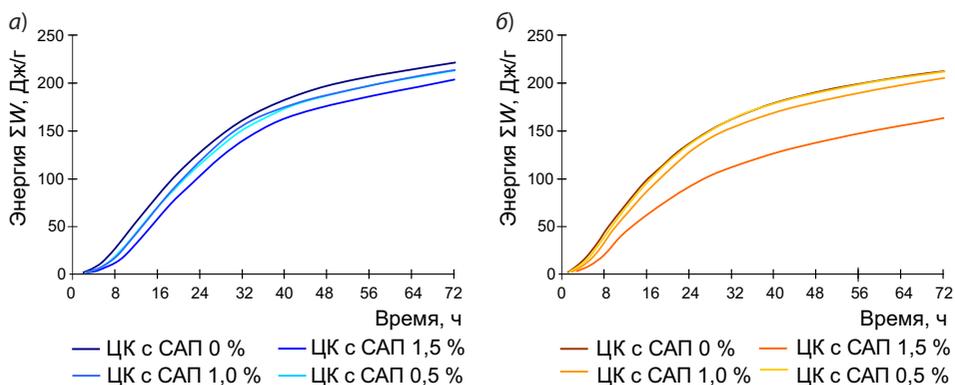


Рис. 3.23. Кинетика тепловыделения при гидратации портландцемента с САП (а) и с САП вместе с ускорителем твердения (б)*

* Цементная матрица с В/Ц = 0,5 и содержанием САП (раствор «Реновир гидрогель») 0,5...1,5 % от массы портландцемента; в качестве ускорителя твердения использован формиат кальция.

ная гидратация портландцемента, сопровождаясь большей экзотермией, приводит к ранней полимеризации САП. При этом процесс абсорбции воды таким полимером создаёт конкуренцию вяжущему веществу.

Присутствие суперабсорбирующего полимера оказывает влияние на параметры структуры цементного камня (рис. 3.24). Для цементного камня (рис. 3.24, а) характерны типичные дифракционные отражения основных фаз: низко- и высокоосновные гидросиликаты кальция (CSH) с межплоскостным расстояниями $d = 4,92; 3,03; 2,74; 2,61; 2,18; 1,93$ и $1,80 \text{ \AA}$, портландит (Ca(OH)_2) с $d = 4,92; 2,63; 1,93$ и $1,80 \text{ \AA}$, тоберморит (ТБ) с $d = 2,76$ и $2,18 \text{ \AA}$, кальцит (CaCO_3) с $d = 3,03 \text{ \AA}$. При этом необходимо отметить, что аналогичные межплоскостные расстояния имеют и минералы цементного клинкера. Этим фактом затруднена идентификация фаз и их количества.

Цементный камень с 0,5 % САП от массы портландцемента (рис. 3.24, б) характеризуется повышением интенсивности следующих дифракционных максимумов с $d = 3,87; 2,32; 2,28; 1,76; 1,63$ и $1,49 \text{ \AA}$,

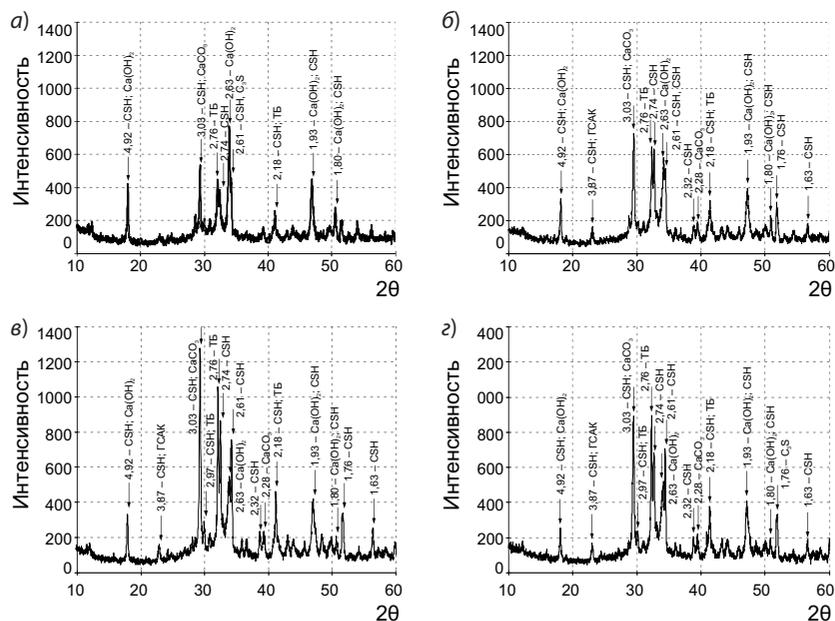


Рис. 3.24. Рентгенограмма цементного камня: а – без САП; б – с раствором САП с концентрацией полимерной части 0,5 % от массы портландцемента; в – то же, 1,0 % от массы портландцемента; г – то же, 1,5 % от массы портландцемента

которые относятся к продуктам гидратации: гидросиликатам кальция, тобермориту, кальциту и гидросульфоалюминатам кальция (ГСАК). Естественно, указанный факт можно объяснить формированием более совершенных кристаллов продуктов гидратации. Такое положительное влияние суперабсорбирующего полимера на процессы структурообразования наблюдается и для цементного камня с САП в количестве 1,0 % от массы портландцемента (рис. 3.24, в). Можно выделить почти двойное отличие максимумов при $d = 3,03; 2,76; 2,74; 2,61$ и $2,18 \text{ \AA}$, характерных для продуктов гидратации портландцемента (CSH и ТБ).

Очевидно, что увеличение количества САП может оказать негативное влияние на структурообразование цементного камня вследствие создания физического барьера для формирования кристаллов продуктов гидратации. Указанное предположение подтверждает рентгенограмма цементного камня (рис. 3.24, з).

Отсюда можно заключить, что применение САП до 1,5 % от массы портландцемента оказывает положительное влияние на процессы структурообразования цементного камня, заключающееся в формировании более совершенной кристаллической структуры цементного камня. При количестве САП более 1,5 % от массы портландцемента наблюдается снижение интенсивности максимумов, соответствующих продуктам гидратации портландцемента, которое указывает на формирование физических барьеров, препятствующих структурообразованию цементного камня.

Одним из недостатков технологического решения по использованию гранулированных САП в составах цементных композитов является ухудшение реологических свойств таких смесей. Применение же растворов таких полимеров с отложенным процессом полимеризации («Реновир гидрогель»⁷) позволяет решить эту проблему при сохранении физико-механических свойств композита (табл. 3.10).

Модифицирование зоны контакта «цементная матрица – микросфера». Другим структурообразующим компонентом высокопрочных лёгких бетонов являются микросферы – функциональный наполнитель, имеющий высокую дисперсность и формирующий большую площадь зоны контакта «цементный камень – микросфера». Это требует специальных подходов для обеспечения равномерного покрытия всей

⁷ «Реновир гидрогель» – акрилатная композиция, применяемая для инъекционного осушения конструкций, которая состоит из четырёх компонентов: A_1 – водная дисперсия акрилового полимера; A_2 и A_3 – инициаторы; В – катализатор (кристаллический порошок).

Таблица 3.10

Свойства смеси и цементного камня

Свойство	Состав			
	Ц	Ц + САП	Ц + У	Ц + САП + У
Подвижность цементных смесей, мм	225±5	195±20	163±5	130±15
Средняя плотность, кг/м ³	1350±5	1340±10	1360±15	1355±10
Предел прочности при изгибе, МПа	5,48±0,12	6,30±0,80	5,10±0,48	5,71±1,09
Предел прочности при сжатии, МПа	45,3±2,1	46,5±1,6	49,2±2,2	45,0±4,3

Примечание. Ц – портландцемент; САП – суперабсорбирующий полимер; У – ускоритель твердения (формиат кальция); диапазон варьирования САП – 0,2...2,0 % от массы портландцемента.

поверхности этого наполнителя продуктами гидратации портландцемента и их сплошного контакта для распределения напряжений, возникающих при эксплуатации. Указанное возможно реализовать за счёт применения комплексного наноразмерного модификатора, содержащего золь гидроксида железа и золь кремниевой кислоты [176–178]. Его использование позволяет сформировать активную оболочку кремнезёма, способную к взаимодействию с продуктами гидратации портландцемента.

Многокомпонентный состав наноразмерного модификатора оказывает комплексное воздействие на структурообразование цементного камня. Так, золь гидроксида железа $Fe(OH)_3$ способствует увеличению гидратационной активности портландцемента, что позволяет увеличить количества продуктов гидратации (рис. 3.25):

- для базового состава и наномодифицированного состава на термограммах выделяется три типичных пика:

I – в диапазоне температур 130...150 °С наблюдается эндоэффект, вызванный дегидратацией геля C–S–H, этtringита и гипса [179];

II – характерен для разложения портландита [179, 180] при температуре 470...500 °С;

III – в диапазоне температур от 745 до 770 °С, соотносящийся с процессами разложения кальцита и арагонита [180, 181];

- для наномодифицированного состава наблюдается смещение значений температур и удельных энтальпий для характерных аномалий на 16,2; 104 и 304 % соответственно для I, II и III пиков по сравнению с базовым составом цементного камня. Указанное объясняется увеличением доли связанной воды и образованием большего количества продуктов гидратации при добавлении наномодификатора.

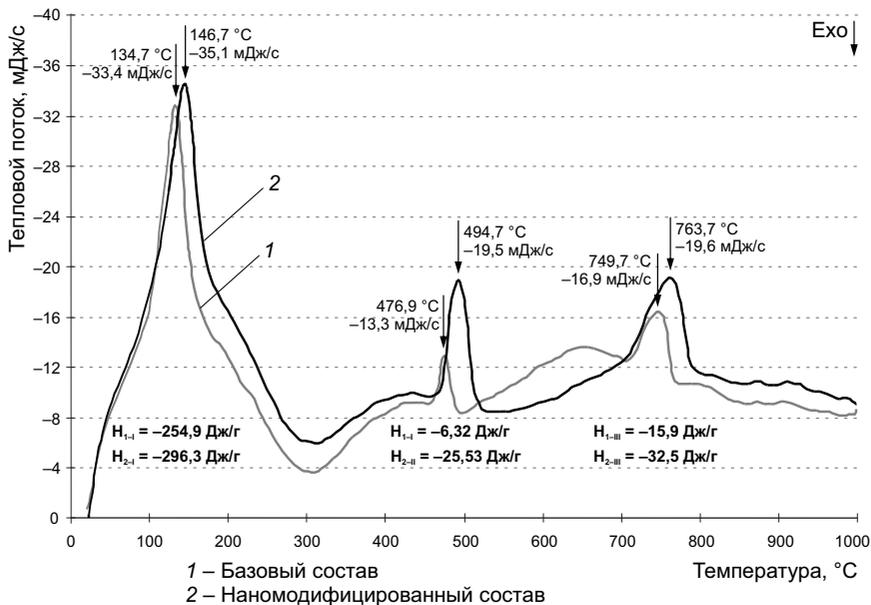


Рис. 3.25. Термограмма дифференциально-термического анализа цементного камня базового состава (1) и наномодифицированного состава (2)*

* Испытания проводились на образцах цементного камня, полученных из цементных паст с В/Ц = 0,3 (базовый состав), и то же, но с добавлением золя гидроксида железа (III) (концентрация золя – 1,0 %, количество золя – 0,25 % от массы портландцемента) – наномодифицированный состав.

Реакционноспособный кремнезём, который присутствует в составе наноразмерного модификатора, за счёт связывания портландита приводит к образованию гидросиликатных структур CSH (II). Анализ спектров поглощения ИК-излучения (рис. 3.26) показывает, что наномодифицированный состав характеризуется повышенной интенсивностью пиков при $1100...750\text{ см}^{-1}$, которые идентифицируются согласно [182, 183] как симметричные и антисимметричные колебания кремний-кислородных связей Si–O–Si и Si–O (а также связей Si–O–Al) в структуре высоко- и среднеосновных кальциевых гидросиликатов. Также более интенсивны полосы поглощения при 1620 и $1150...1030\text{ см}^{-1}$, которые согласно [184, 185] характерны для низкоосновных гидросиликатов кальция тоберморитоподобной структуры.

Широкие полосы поглощения в диапазоне 3620 и 3450 см^{-1} подтверждают результаты дифференциального термического анализа (рис. 3.26) –

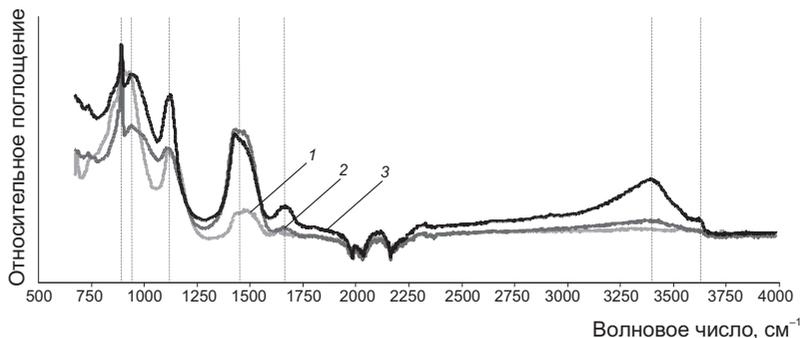


Рис. 3.26. Спектры поглощения инфракрасного излучения портландцемента (1), базового состава (2) и наномодифицированного состава (3)

появление дополнительных гидратных связей в соединениях гидроксида кальция. Кроме того, необходимо отметить снижение относительной интенсивности поглощения для пиков 870 и 1400 см^{-1} , характерных для карбонатных связей, в наномодифицированном составе.

Важным элементом технологии наномодифицирования микросфер является фиксирование наноразмерного модификатора на поверхности микросфер (рис. 3.27 и 3.28), которое достигается посредством сушки предварительно обработанного функционального наполнителя.

Из данных, представленных на рис. 3.28, видно, что КР-спектры исследуемых образцов отличаются как по относительной интенсивности пиков, так и по их количеству. На образцах цементного камня наблюдаются пики, идентифицируемые как полосы комбинационного рассеяния карбонатных связей (278 см^{-1}), радикала SO_4^{-2} , связей Si-O (1085 см^{-1}) и этtringита (989 см^{-1}) [186, 187] относительной интенсивностью 547, 806 и 365 имп. соответственно. Аналогичные максимумы (за исключе-



Рис. 3.27. Микрофотографии исследованных методом КР-спектроскопии областей (показано зелёным цветом) для цементного камня (а), границы раздела фаз в композите с микросферами (б) и наномодифицированными микросферами (в)

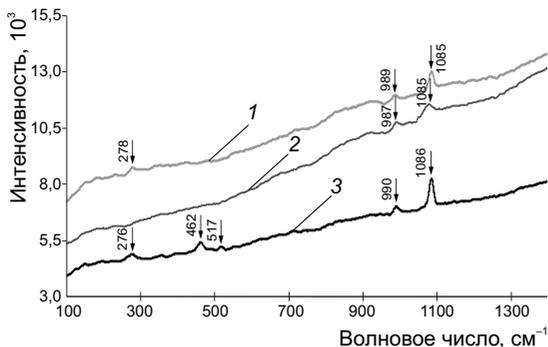


Рис. 3.28. Спектры комбинационного рассеяния цементного камня (1), границы раздела фаз «цементный камень – микросфера» (2) и «цементный камень – микросфера с наномодификатором» (3)

нием полосы, характеризующей наличие карбонатных связей) наблюдаются для границы раздела фаз «цементный камень – микросфера». Для границы раздела фаз «цементный камень – наномодифицированная микросфера» дополнительно выделяются пики при 462 и 517 см⁻¹, которые характеризуют внутренние деформации силикатов тетраэдрического типа ν_4 ($[\text{SiO}_4]$) [188].

Указанные пики могут быть интерпретированы как соответствующие деформационным колебаниям и антисимметричным изгибам связи O–Si–O. Силикатная фаза в рассматриваемом случае (на спектрах границы раздела фаз «цементный камень – микросфера» такие пики отсутствуют) может принадлежать только наноразмерному модификатору.

ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛЁГКИХ БЕТОНОВ

Как известно, обеспечение требуемых показателей качества (эксплуатационных свойств) композита осуществляется управлением рецептурными и технологическими факторами. Из множества таких факторов выделяют только управляющие (основные) факторы, значимость которых является преобладающей. Для оптимизации рецептуры композита и параметров режима его изготовления для каждого показателя качества (эксплуатационного свойства) устанавливают экспериментально-статистические модели влияния на него управляющих рецептурных и технологических факторов (см. главу 2).

В [189] показана рациональность применения метода главных компонент, обеспечивающего прогнозирование величин эксплуатационных свойств по значениям свойств, определение которых не требует значительных затрат. При этом должно быть проведено существенное количество предварительных экспериментов, устанавливающих статистически значимые соотношения между свойствами для разрабатываемого материала.

В бетоноведении также известны такие соотношения. Наиболее часто применяют качественные прогнозные модели: «высокая прочность → низкая пористость», «высокая пористость → низкая морозостойкость» и т. д. Эти и другие подобные качественные зависимости сформулированы И. А. Рыбьевым в законе створа, сущность которого заключается в установлении правила: «оптимальной структуре соответствует комплекс экстремальных значений свойств» [190].

Получение структуры с оптимальными параметрами (то есть параметрами структуры, при достижении которых разрабатываемый мате-

риал характеризуется максимально достижимыми показателями качества) неразрывно связано с реологическими свойствами смеси. В этом случае в определённом интервале реализуется правило «высокая подвижность бетонной смеси → высокая прочность бетона». Последнее отражено в зависимости Графа – Беляева [191]:

$$R_b = \frac{R_{\text{ц}}}{A(B/\text{Ц})^n}, \quad (4.1)$$

где R_b , $R_{\text{ц}}$ – прочность бетона и портландцемента соответственно;

A , n – эмпирические коэффициенты ($A = 3,5 \dots 8$; $n = 1,5 \dots 2$).

В [192] показано, что для технологии строительного материала характерен рецептурно-технологический дуализм, заключающийся во взаимном влиянии рецептуры и технологии получения материала, то есть улучшение качества материала часто сопровождается введением (применением) нового компонента, которое приводит к изменению технологического режима его изготовления, или наоборот – получение материала (в том числе с новым качеством) на имеющемся технологическом оборудовании возможно только посредством применения нового компонента.

Таким образом, при заданном режиме работы технологического оборудования при разработке состава материала необходимо обеспечить такое соотношение компонентов, в том числе введение новых компонентов, при котором смесь обладает высокой подвижностью, а показатели качества будут не ниже требуемых величин, то есть формируется структура материала с оптимальными параметрами.

Для технологии лёгких композитов, при изготовлении которых применяются лёгкие заполнители (полые микросферы), важно обеспечить их однородное распределение по объёму композита. Естественное различие плотности цементно-минеральной смеси и лёгкого заполнителя приводит к закономерному стремлению указанной дисперсной системы к расслоению [105]. Скорость всплытия частиц лёгкого заполнителя в смеси в соответствии с законом Стокса [193] равна

$$\vartheta_s = \frac{2 r^2 g \Delta \rho}{9 \mu}, \quad (4.2)$$

где ϑ_s – скорость всплытия частицы лёгкого заполнителя;

r – радиус частицы лёгкого заполнителя;

g – ускорение свободного падения;

$\Delta\rho$ – разность плотности цементно-минеральной смеси и частицы лёгкого заполнителя;

μ – динамическая вязкость цементно-минеральной смеси.

Из формулы следует, что при прочих равных условиях скорость всплытия частицы лёгкого заполнителя (предотвратить расслоение смеси) возможно регулировать:

– изменением размера частицы:

$$\frac{d\vartheta_s}{dr} = \frac{4}{9} \frac{g\Delta\rho}{\mu} r, \quad (4.3)$$

– изменением динамической вязкости цементно-минеральной смеси:

$$\frac{d\vartheta_s}{d\mu} = \frac{2}{9} \frac{r^2 g\Delta\rho}{\mu^2}. \quad (4.4)$$

Как видно из представленных формул, в первом варианте скорость изменения ϑ_s линейно зависит от r , и для снижения скорости всплытия необходимо уменьшать радиус частицы лёгкого заполнителя; для второго варианта скорость ϑ_s более чувствительна к изменению вязкости смеси, и для предотвращения всплытия частиц лёгкого заполнителя вязкость цементно-минеральной смеси должна возрастать.

Формула (4.5) также может быть использована для определения соотношения d^2/μ , которое может быть использовано при оценке величины диаметра частицы лёгкого заполнителя или вязкости цементно-минеральной смеси:

$$\frac{d^2}{\mu} = \frac{18}{g\Delta\rho} \frac{L_d}{t_{sf}}, \quad (4.5)$$

где d – диаметр частицы лёгкого заполнителя;

L_d – допустимое расстояние, которое проходит частица лёгкого заполнителя ($L_d = k_b d$, $k_b < 1$);

t_{sf} – продолжительность экспоненциального роста (см. главу 3).

Оценка соотношения d^2/μ даёт величину, равную $1,5 \cdot 10^{-12}$ [$\text{м}^2/(\text{Па} \cdot \text{с})$].

Таким образом, для получения лёгкого бетона на полых микросферах с однородным распределением фаз необходимо использовать лёгкий заполнитель с малым размером частиц, а также малоподвижные цементно-минеральные смеси.

4.1. Технологические свойства бетонных смесей

Подвижность бетонных смесей зависит от множества взаимосвязанных факторов: количества воды, вида и концентрации пластифицирующих добавок, удельной поверхности сухих компонентов, объёма

вовлечённого воздуха и т. д. Известно, что увеличение общей площади поверхности компонентов (с учётом шероховатости, микротрещин и других поверхностных дефектов) требует увеличения В/Ц-отношения из-за уменьшения водной прослойки, приводящего к ухудшению технологических свойств бетонной смеси.

Однако для лёгких бетонов на полых микросферах наблюдается нарушение указанной закономерности (табл. 4.1). Этот эффект возникает вследствие замены полыми микросферами частиц минеральной добавки (кварцевая мука, кварцевый песок), обладающей более высокой дисперсностью. Увеличение содержания микросфер, несмотря на уменьшение площади поверхности всех сухих компонентов, приводит к снижению подвижности смеси, что, очевидно, связано с более высокой их водопотребностью.

Последнее подтверждается результатами исследования по определению смачиваемости полых микросфер методом Вашбурна, представленными на рис. 4.1. Видно, что полые стеклянные и алюмосиликатные микросферы хуже смачиваются водой, в отличие от традиционного для бетона компонента – кварцевого песка. Краевой угол смачивания рассчитывается по уравнению Вашбурна:

$$\cos(\theta) = \frac{m^2}{t} \frac{2\eta}{\sigma k_k}, \quad (4.6)$$

где m^2/t – кинетика набора массы воды в столбе с порошком;

η – вязкость воды;

σ – поверхностное натяжение воды;

Таблица 4.1

Технологические свойства бетонной смеси и физико-механические свойства лёгкого бетона на полых микросферах

№ п/п	v_f	$S_p, 10^3 \text{ м}^2$	$h_b, \text{ мкм}$	$D_p, \text{ мм}$	$\rho_{cp}, 10^3 \text{ кг/м}^3$	$R_{сж}, \text{ МПа}$
1	0,00	768	0,286	>> 255	2,35	106,7
2	0,13	741	0,300	> 255	2,15	85,4
3	0,20	718	0,313	255,0	2,00	69,3
4	0,31	690	0,329	208,7	1,75	57,8
5	0,41	669	0,344	157,0	1,56	50,8
6	0,48	656	0,353	107,7	1,40	37,2

Примечание. v_f – объёмная доля микросфер; S_p – общая площадь поверхности частиц в 1 м³ бетона по методу БЭТ; h_b – расчётная толщина водной прослойки; D_p – диаметр расплыва бетонной смеси; ρ_{cp} – средняя плотность бетона; $R_{сж}$ – предел прочности при сжатии.

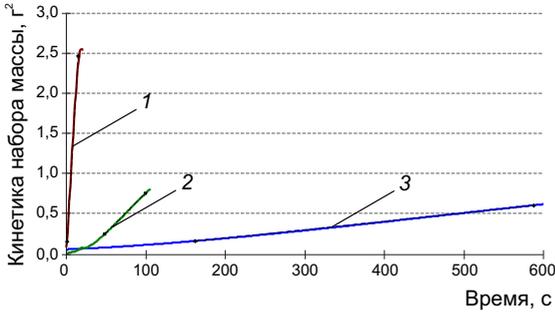


Рис. 4.1. Кинетика подъёма воды по капилляру с фракционированным кварцевым песком (1), полыми стеклянными микросферами (2), полыми алюмосиликатными микросферами (3)

k_k – капиллярная постоянная исследуемого порошка.

Как природные, так и искусственные минеральные компоненты, формирующие дисперсную фазу в бетоне, обладают естественной шероховатостью поверхности, что закономерно влияет на характеристики поверхностных явлений. Увеличение выраженности рельефа или шероховатости поверх-

ности усиливает её смачиваемость или несмачиваемость (табл. 4.2), что следует из уравнения Венцеля – Дерягина:

$$\cos(\theta_{ш}) = k_{ш} \cos(\theta_0), \quad (4.7)$$

где $\theta_{ш}$ и θ_0 – краевой угол для шероховатой и гладкой поверхности соответственно;

$k_{ш}$ – коэффициент рельефа (шероховатости).

Очевидно, что наличие рельефа на поверхности приводит к повышению фактической площади смачивания и способствует повышению расхода воды V_B :

$$\frac{V_B}{h_B} = S_{\phi} = k_{ш} \pi d_0^2, \quad (4.8)$$

где h_B – толщина водной плёнки;

d_0 – диаметр частицы.

Исследование поровой структуры полых микросфер методом сорбции азота (рис. 4.2) свидетельствует о наличии редкой по форме вогну-

Таблица 4.2

Краевой угол смачивания порошков водой

№ п/п	Наименование порошка	$k_{ш}$	При $\sigma = 72,8$ мН/м (вода)			
			$\cos(\theta_{ш})$	$\theta_{ш}$	$\cos(\theta_0)$	θ_0
1	Кварцевый песок	1,15	0,87	28,2	0,99	2,1
2	Полые алюмосиликатные микросферы	6,66	0,01	89,3	0,08	85,5
3	Полые стеклянные микросферы	4,52	0,20	78,3	0,92	23,4

Примечание. Коэффициент рельефа из отношения $k_{ш} = S_{уд,1}/S_{уд,2}$, здесь $S_{уд,1}$ – удельная поверхность частиц с учётом шероховатости; $S_{уд,2}$ – удельная поверхность гладких частиц.

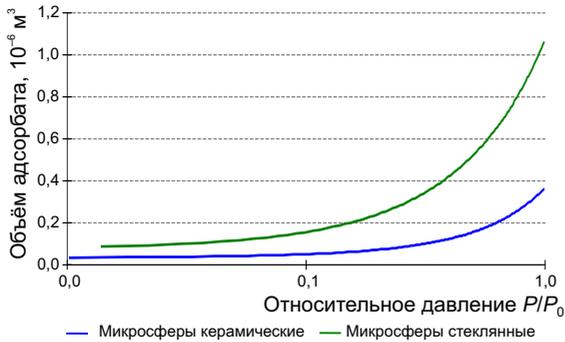


Рис. 4.2. Изменение объёма адсорбата в процессе анализа полых микросфер

той относительно оси P/P_0 изотермы десорбции, что по классификации Брунаэра, Деминга и Тэллера [194] соответствует типу III. Этот тип изотермы характеризует малую энергию взаимодействия адсорбированного газа с поверхностью вещества, что характерно для непористых материалов. Такой вывод не согласуется

с работой [195], в которой высокая водопоглощающая способность полых микросфер связывается с диффузией жидкости вследствие наличия пор в стенках этого функционального наполнителя.

Объём и размер пор в алюмосиликатных микросферах, определённые по методу Баррета – Джойнера – Халенды, равны $3,84 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$ и 40,9 нм соответственно. Это указывает на отсутствие развитой поровой структуры в стенке, которая могла бы способствовать капиллярному подсосу воды внутрь микросферы. На рис. 4.3 видно, что полые алюмосиликатные микросферы имеют дефекты в виде полусферических объектов, образование которых связано с процессами производства самих микросфер, а также с процессами, протекающими при получении и эксплуатации бетона.

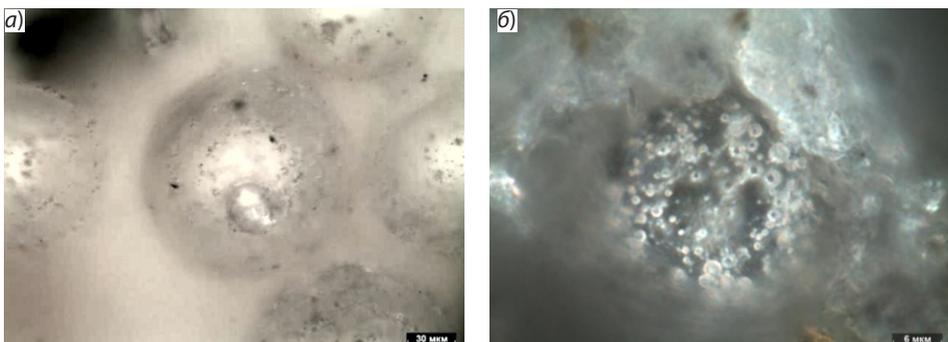


Рис. 4.3. Оптические фотографии поверхности полых алюмосиликатных микросфер в исходном состоянии (а) и в структуре лёгкого композита (б)

Отсюда можно однозначно заключить, что керамические и стеклянные полые микросферы не обладают развитой поровой структурой, а их отрицательное влияние на подвижность бетонной смеси, в том числе нарушение естественной закономерности влияния общей поверхности минеральных компонентов на реологические свойства смесей, связано с развитой шероховатостью поверхности функционального наполнителя.

Резервы повышения эффективности применения микросфер заключены в управлении поверхностными явлениями, для которого целесообразно применять как традиционные способы – применение ПАВ, так и новые подходы – например использование наноразмерных модификаторов.

Оценка эффективности применения пластификатора должна осуществляться по комплексу характеристик, учитывающих, помимо реологических, изменение физико-механических свойств, а также экономическую эффективность. В качестве критериального значения подвижности смесей на полых микросферах, оцениваемой по диаметру расплыва стандартного конуса, использовалось значение $D_p = 150$ мм. Исследования проводились на составе со средней плотностью 1500 кг/м^3 с объёмным содержанием алюмосиликатных полых микросфер 0,438 при постоянном В/Ц = 0,375. В качестве пластификаторов были выбраны добавки разных производителей и марок, среди которых суперпластификатор С-3, поликарбоксилат «Одолит-Т», «Melment F10», «Melflux 1641F», «Melflux 2651F», а также «Sika Viscocrete T100», «Sika Viscocrete 5 New», концентрация которых варьировалась в диапазоне, рекомендуемом производителем пластификатора.

Полученные результаты (рис. 4.4) показывают, что широко распространённый пластификатор С-3 в рекомендуемом производителем диапазоне концентраций не позволяет получить подвижность смеси более 130 мм; в соответствии с расчётами, проведёнными по экспериментально-статистической модели (табл. 4.3), для получения смеси с требуемой подвижностью (150 мм) необходимо использовать до 2 % от пластификатора С-3 массы портландцемента.

При использовании пластификатора на поликарбоксилатной основе «Одолит-Т» и интенсивном перемешивании наблюдается образование пены, что может стать причиной вовлечения дополнительного количества воздуха при приготовлении смесей и снизить среднюю плотность бетона. Формированием дополнительного количества открытых пор подтверждается изменение средней плотности бетона от концентрации

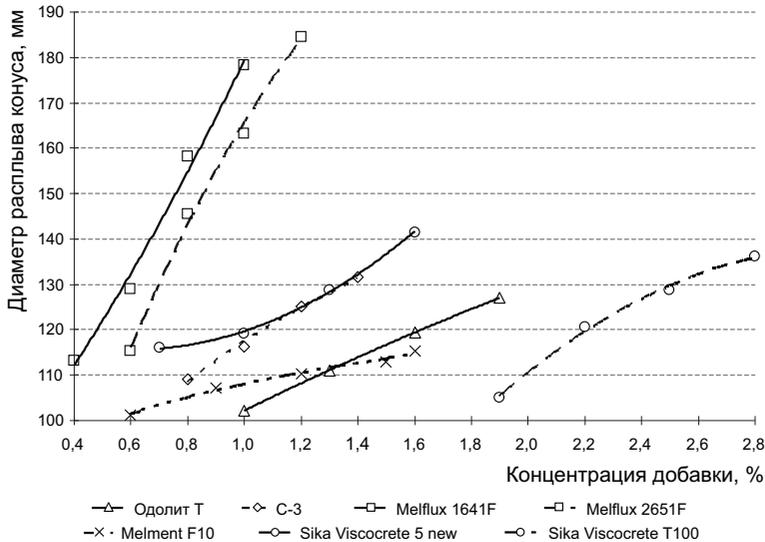


Рис. 4.4. Зависимость диаметра расплыва бетонной смеси от вида и концентрации пластификатора

пластификатора. Однако достичь требуемой подвижности бетонной смеси в рекомендуемом диапазоне концентраций применения указанного пластификатора не представляется возможным: требуемый результат по подвижности в соответствии с расчётами, произведёнными по полученной экспериментально-статистической модели, достигается при 3 % от массы портландцемента.

Для пластификатора «Melment F10» при приготовлении водного раствора характерно образование вязких агломератов, плохо растворимых в воде. Необходимо также отметить, что в рекомендуемом диапазоне концентраций применение этого пластификатора не позволяет получить диаметр расплыва бетонной смеси более 150 мм: анализ экспериментально-статистической модели показывает, что максимальная величина диаметра расплыва смеси будет при концентрации пластификатора $C_d = 1,74$ % от массы портландцемента. При этом максимальный диаметр расплыва смеси составит 113,2 мм, то есть достичь требуемого расплыва смеси, применяя пластификатор «Melment F10», не представляется возможным.

Добавки на поликарбоксилатной основе серии «Melflux» оказывают наивысший из исследуемых пластификаторов эффект. Так, увеличение

Таблица 4.3

Экспериментально-статистические модели $D_p = f(C_d)$

№ п/п	Вид пластификатора		Диапазон концентрации, % от массы портландцемента	Коэффициенты ЭС-модели $D_p = a + bC_d + cC_d^2$		
	Марка	Модель		a	b	c
1	Одолит	T	1,0...1,9	68,4	37,2	-3,33
2	C-3	-	0,8...1,4	70,5	53,4	-6,88
3	Melment	F10	0,6...1,5	85,5	31,9	-9,17
4	Melflux	1641F	0,6...1,2	7,97	213,9	-56,2
5		2651F	0,4...1,0	78,0	74,53	26,88
6	Sika Viscocrete	5 new	0,7...1,6	125,0	31,39	26,11
7		T100	1,9...2,8	-77,6	138,4	-22,2

количества пластификатора «Melflux 1641F» на 0,2 % приводит к повышению подвижности смесей на полых микросферах на 15...25 %, а при концентрации в верхнем рекомендуемом диапазоне (до 1,2 %) подвижность смеси по диаметру расплыва достигает 185 мм. Такая высокоподвижная смесь за счёт лучшей удобоукладываемости обладает более плотной структурой цементно-минеральной матрицы, что подтверждается изменением средней плотности бетона от концентрации пластификатора. Схожей зависимостью характеризуется влияние пластификатора «Melflux 2651F» на подвижность смеси и плотность бетона. Отличием является возможность обеспечения равной подвижности при использовании меньшего на 10...15 % количества добавки.

Расчёты, проведённые по экспериментально-статистическим моделям, показывают, что концентрации пластификаторов «Melflux 1641F» и «Melflux 2651F» для достижения требуемой подвижности смеси равны 0,86 и 0,76 % от массы портландцемента соответственно.

Применение водных растворов модифицированных поликарбоксилатных эфиров, представляющих собой пластификаторы «Sika», в верхних границах рабочих концентраций, рекомендованных производителем, обеспечивают диаметр расплыва смеси не более 136 мм. При этом данные показывают, что повышение концентрации более 1,3 % от массы портландцемента приводит к возмущению и уменьшению средней плотности бетона. Анализ экспериментально-статистической модели для пластификатора «Sika Viscocrete T100» (табл. 4.3) показывает, что максимальный диаметр расплыва смеси (138,1 мм) будет наблюдаться при концентрации пластификатора, равной 3,12 % от массы портланд-

цемента, то есть применение «Sika Viscocrete T100» не обеспечит достижения требуемой подвижности смеси. По полученным данным концентрацию пластификатора «Sika Viscocrete 5 new» для получения смеси требуемой подвижности также необходимо увеличить до 1,75 % от массы портландцемента.

Таким образом, на основе проведённых исследований можно сделать вывод о высокой эффективности пластификаторов на поликарбоксилатной основе для бетонных смесей на полых микросферах. Наибольший диаметр расплыва смеси обеспечивают добавки серии «Melflux», позволяющие увеличить диаметр расплыва конуса до 180 мм (рис. 4.5).

Для разработки высокопрочных лёгких бетонов, имеющих среднюю плотность не более 1600 кг/м^3 и предел прочности при сжатии не менее 40 МПа, необходимо создать цементно-минеральную матрицу с высокой прочностью, а также получить высокую прочность зоны контакта «искусственный камень – функциональный наполнитель». Компонентом, обеспечивающим достижение заданной средней плотности материала, является функциональный наполнитель.

Как показано ранее, эффективными минеральными добавками в комплексах «пластификатор – минеральная добавка» являются микрокремнезём, зола-уноса, мука кварцевая и мука ракушечника. Инте-

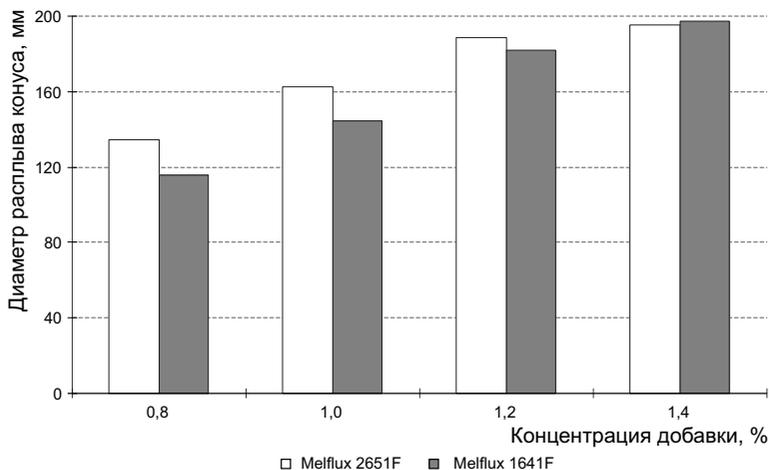


Рис. 4.5. Влияние вида и концентрации пластификатора на подвижность бетонной смеси на полых алюмосиликатных микросферах

рес представляет определение соотношений различных минеральных добавок, так как для каждой из них характерно доминирование химического или физического фактора (глава 3). Указанные минеральные добавки были сгруппированы в пары, основные характеристики составов приведены в табл. 4.4.

Полученные экспериментальные данные демонстрируют экстремальный характер изменения подвижности смесей от соотношения минеральных добавок для всех выбранных групп (рис. 4.6). При этом установлено, что в каждой из групп минеральных добавок комбинирование с мукой ракушечника и кварцевым песком обеспечивает наилучшую подвижность при соотношении $D_1/D_2 = 0,25...1,5$. Диаметр расплыва таких смесей превышает 200 мм. Важно отметить, что комплексы добавок группы 1, 2, 4 и 5 имеют близкие зависимости диаметра расплыва от содержания минеральных добавок. Однако такие комплексы с золой-уноса имеют равную подвижность при скорректированном В/Ц-отношении. Сочетание микрокремнезёма с золой-уноса характеризуется недостаточной подвижностью $D_p < 150$ мм, что может быть связано с увеличением суммарной площади удельной поверхности минеральной части, содержащей аморфный кремнезём, активно сорбирующий воду. Это приводит к недостатку воды для смачивания сухих компонентов и обеспечения требуемой подвижности смеси.

Оценка влияния наномодификатора. В составе наноразмерного модификатора находится золь кремниевой кислоты, который активно поглощает и удерживает воду. Влияние количества наноразмерного модификатора на подвижности бетонной смеси на полых наномодифицированных микросферах представлено на рис. 4.7. Данные показывают, что увеличение количества наноразмерного модификатора на поверхности полых стеклянных или керамических (алюмосиликат-

Таблица 4.4

Соотношение минеральных добавок в составе высокопрочного лёгкого бетона средней плотностью 1400 кг/м³

№ п/п	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4	Группа 5
	МКМ + П _м	МКМ + Р	МКМ + З	З + Р	З + П _м
v_f	0,067	0,067	0,045	0,064	0,064
В/Ц	0,37	0,37	0,37	0,42	0,42

Примечание. МКМ – микрокремнезём; П_м – мука кварцевого песка; Р – мука ракушечника; З – зола-уноса; v_f – объёмная доля минеральных добавок в составе бетона.

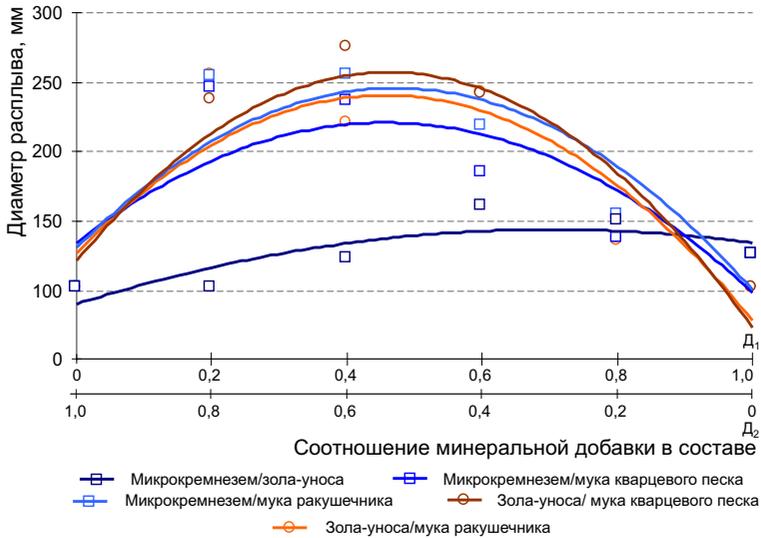


Рис. 4.6. Зависимость подвижности цементно-минеральных смесей от вида и содержания минеральной добавки

ных) микросфер приводит к снижению подвижности бетонной смеси на 15...30 %.

В этой связи очевидным является необходимость решения оптимизационной задачи по определению соотношения наноразмерный модификатор / пластификатор (рис. 4.8).

Анализ результатов экспериментов, представленных на рис. 4.7 и 4.8, показывает, что бетонные смеси, содержащие наномодифицированные микросферы, обладают меньшей подвижностью. Однако введение пластификатора серии «Melflux» в количестве не менее 1,2 % от массы портландцемента позволяет обеспечить диаметр расплыва не менее 160 мм и соответствующую плотность на границе раздела фаз. Сопоставление данных для бетонных смесей на полых наномодифицированных и немодифицированных микросферах показывает, что для получения равноподвижных бетонных смесей ($D_p = 160$ мм) на модифицированных микросферах необходимо увеличивать расход пластификатора «Melflux 1641 F» на 26,3 %, а пластификатора «Melflux 2651 F» – на 42,8 % по сравнению с расходом указанных пластификаторов для бетонных смесей на немодифицированных микросферах.

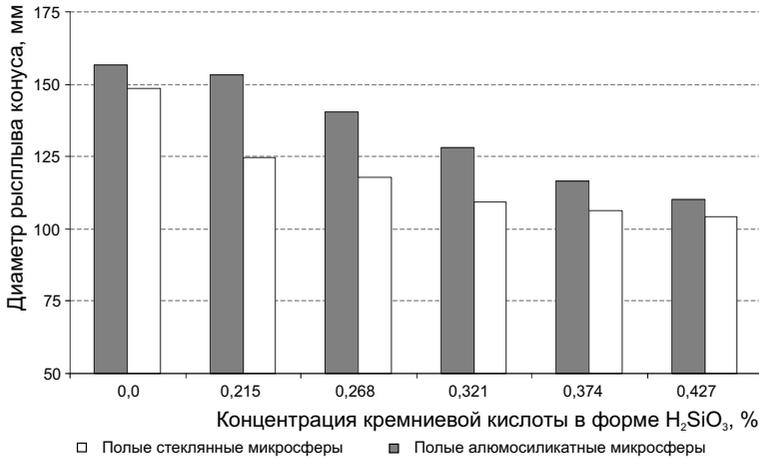


Рис. 4.7. Влияние концентрации золя кремниевой кислоты наноразмерного модификатора на подвижность бетонной смеси на полых наномодифицированных микросферах

Оценка влияния суперабсорбирующего полимера. Для разработки материалов для 3D-печати важным является обеспечение одновременно подвижности смеси и её пластической прочности после экструдирования. Использование растворов САП с управляемой полимеризацией

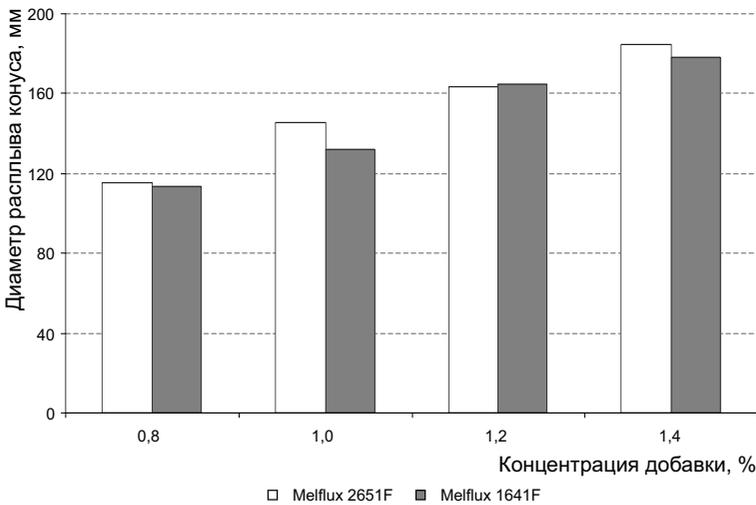


Рис. 4.8. Влияние вида и концентрации пластификатора на подвижность бетонной смеси на полых наномодифицированных алюмосиликатных микросферах

призвано, в отличие от гранулированных суперабсорбирующих полимеров, сохранять реологические свойства смеси. Как показано выше, исследованные растворы САП не оказывают существенного влияния на подвижность цементных смесей, то есть могут быть использованы в составах, к которым предъявляются такие требования. Однако установлено, что, в отличие от цементных смесей, подвижность бетонных смесей высокопрочного лёгкого бетона при введении САП уменьшается (рис. 4.9). Увеличение содержания полиакрилатов до 2,3 % от массы портландцемента приводит к снижению подвижности смеси на 20 %. Использование ускорителя твердения приводит к раннему структурированию смеси и снижению подвижности. При этом САП не оказывает влияние на структурообразование. На это указывает примерное равенство скорости изменения подвижности бетонной смеси от концентрации суперабсорбирующего полимера:

- для бетонной смеси без ускорителя твердения:

$$\frac{dD_p}{dC_{\text{САП}}} = -12,8e^{0,016C_{\text{САП}}}, \quad (4.9)$$

- для бетонной смеси с ускорителем твердения:

$$\frac{dD_p}{dC_{\text{САП}}} = -11,0e^{0,015C_{\text{САП}}}. \quad (4.10)$$

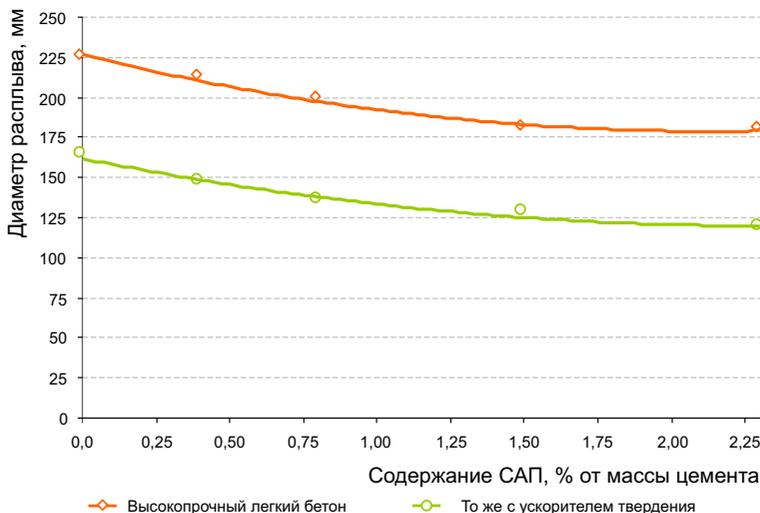


Рис. 4.9. Зависимость подвижности бетонной смеси от содержания САП

Одной из возможных причин снижения подвижности бетонной смеси может быть неудовлетворительная совместимость раствора пластификатора и компонентов САП. Однако оценка совместимости раствора пластификатора и компонентов суперабсорбирующего полимера, проведённая по изменению поверхностного натяжения 0,04 %-ного раствора пластификатора Melflux 1641F при введении акрилатного компонента, указывает на несостоятельность данного предположения.

Оценка влияния волокон. Использование дисперсных армирующих добавок является эффективным рецептурным решением, обеспечивающим повышение прочности бетона. Однако введение волокон сопряжено с ограничениями, вызванными ухудшением подвижности смесей. Такая общая закономерность характерна и для бетонных смесей высокопрочного лёгкого бетона (рис. 4.10). Увеличение содержания дисперсно-армирующей добавки независимо от вида волокна приводит к снижению диаметра расплыва с 230 до 170 мм (на 35 %). При этом наименьшее влияние оказывает стекловолокно: при равной концентрации диаметр расплыва смеси снижается до 210 мм (на 9,5 %) против 200 мм (на 15 %) и 190 мм (на 21 %) для базальтового и полипропиленового волокна.

Важно отметить характер концентрационных зависимостей, представленных на рис. 4.10. В исследованном диапазоне концентраций для

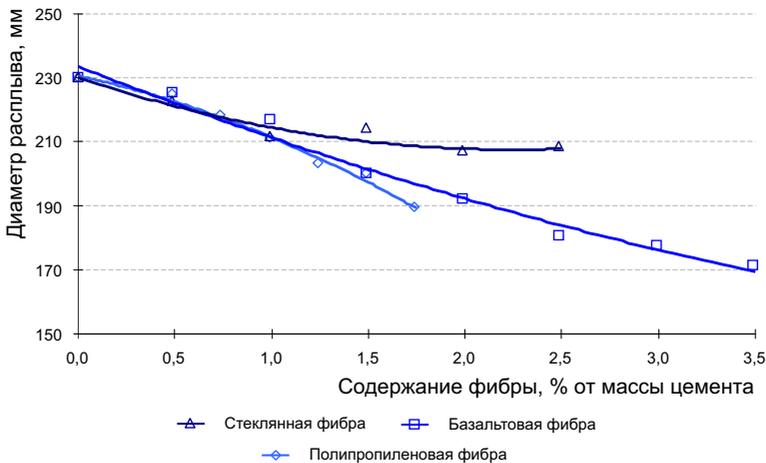


Рис. 4.10. Зависимость подвижности бетонной смеси от вида и содержания волокон

стекловолокна наблюдается замедление влияния волокна на подвижность бетонной смеси по зависимости, имеющей вид

$$D_p = \frac{204,7}{1 - 0,11e^{0,9C_{\text{ф}}}}, \quad (4.11)$$

для базальтового волокна наблюдается прямо пропорциональное снижение подвижности с увеличением армирования:

$$D_p = 230,9 - 18,3C_{\text{ф}}, \quad (4.12)$$

а для полипропиленового волокна – ускорение снижения подвижности бетонной смеси с увеличением концентрации волокна:

$$D_p = \frac{1}{0,0043 + 0,00039C_{\text{ф}}^{1,53}}. \quad (4.13)$$

4.2. Физико-механические свойства высокопрочных лёгких бетонов

Определяющим фактором, влияющим на среднюю плотность высокопрочных лёгких бетонов, является количество полых микросфер и их свойства. Формирование закрытой поровой структуры в исследуемых составах осуществляется преимущественно за счёт газовой фазы микросфер; открытая пористость формируется вследствие удаления из цементно-минеральной матрицы избыточной воды. Увеличение объёмного содержания микросфер приводит к закономерному снижению средней плотности бетона (рис. 4.11).

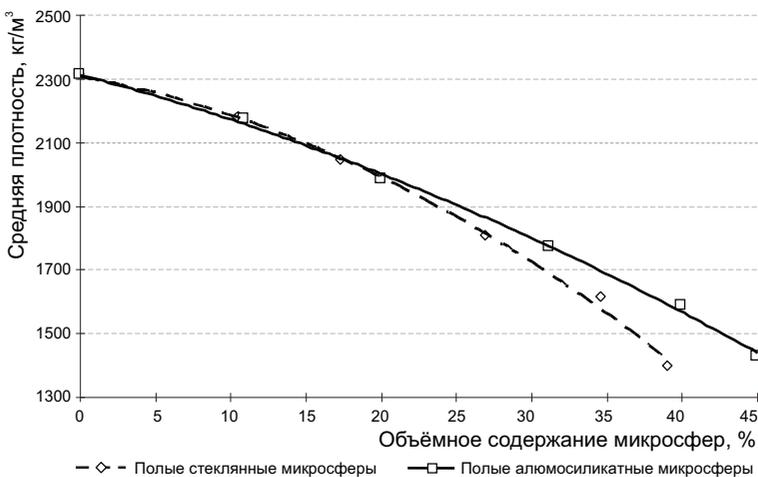


Рис. 4.11. Средняя плотность лёгких бетонов на полых микросферах

Эмпирические коэффициенты экспериментально-статистических моделей $\rho_{\text{ср}} = f(v_f)$ представлены в табл. 4.5. Сравнительный анализ экспериментальных данных свидетельствует, что при увеличении объёмного содержания микросфер средняя плотность лёгких бетонов на стеклянных микросферах снижается более интенсивно по сравнению со средней плотностью бетона на керамических микросферах. Скорость изменения $\rho_{\text{ср}} = f(v_f)$ равна

$$\frac{d\rho_{\text{ср}}}{dv_f} = b + 2cv_f. \quad (4.14)$$

Отсюда с учётом данных табл. 4.11 скорость снижения средней плотности лёгкого бетона на стеклянных микросферах на 13,5...24,6 % выше, чем для лёгкого бетона на керамических микросферах.

Применение композитного цементного вяжущего приводит к закономерному повышению средней плотности искусственного камня и бетона на его основе (рис. 4.12).

Таблица 4.5
Экспериментально-статистические модели $\rho_{\text{ср}} = f(v_f)$
для исследованного диапазона содержания микросфер

№ п/п	Вид микросфер	Коэффициенты ЭС-модели $\rho_{\text{ср}} = a + bv_f + cv_f^2$		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1	Стеклянные	2319,0	-1188,9	-2211,6
2	Керамические	2319,6	-887,7	-2158,9

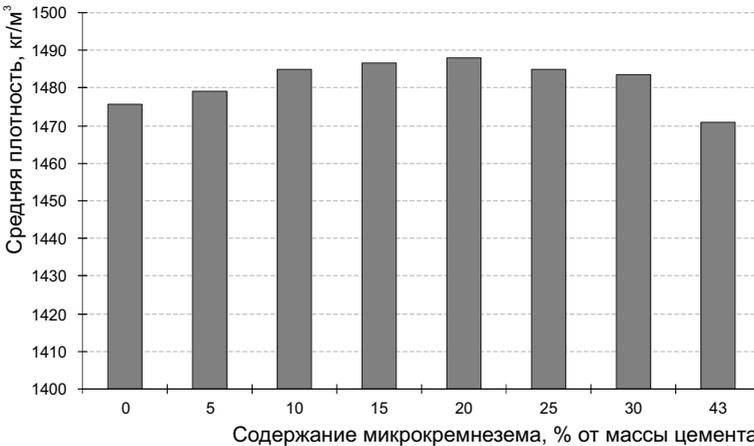


Рис. 4.12. Изменение средней плотности лёгких бетонов на полах микросферах от содержания микрокремнезёма

Анализ представленных данных показывает, что заполнение пустот между частицами портландцемента приводит к уплотнению цементно-минеральной матрицы лёгкого бетона. В то же время увеличение количества микрокремнезёма сверх 25 % от массы портландцемента приводит к снижению средней плотности лёгкого бетона, что объясняется закономерным уменьшением доли (замещением) более тяжёлого компонента – портландцемента (плотность 3100 кг/м³).

Данные рис. 4.12 показывают, что рациональное содержание микрокремнезёма, обеспечивающее максимальное уплотнение искусственного камня, составляет 10...20 % от массы портландцемента. При таком содержании средняя плотность лёгкого бетона составляет около 1485 ± 5 кг/м³.

Пластификаторы, как правило, реализуют несколько механизмов снижения вязкости минеральных дисперсных систем: высвобождение иммобилизированной воды и вовлечение воздуха. Согласно [196] содержание воздуха $v_{\text{п}}$ оказывает пропорциональное уменьшение вязкости системы, в которую он включён в виде пор:

$$\eta = \eta_0 (1 - v_{\text{п}}), \quad (4.15)$$

где η – вязкость системы;

η_0 – начальная вязкость;

$v_{\text{п}}$ – объёмное содержание воздуха.

Исследуемые пластификаторы оказывают влияние на среднюю плотность лёгкого бетона (рис. 4.13).

Экспериментальные данные и результаты регрессионного анализа (рис. 4.13 и табл. 4.6) свидетельствуют, что применение пластификаторов серии «Sika» и С-3 приводит к снижению средней плотности лёгкого бетона. Это обусловлено пенообразованием в процессе смешивания с водой и дальнейшего приготовления бетонной смеси. Аналогичный эффект наблюдается при высоких концентрациях добавок «Melment» и «Одолит-Т», для которых зависимость изменения подвижности от концентрации пластификатора имеет экстремальный характер.

Применение пластификаторов позволяет сочетать как умеренную подвижность бетонной смеси, так и плотную структуру цементного камня с низкой пористостью (рис. 4.14).

Анализ микрофотографий (рис. 4.14) структуры лёгкого бетона, полученных на оптическом микроскопе с увеличением в 500^х, показывает, что микросферы равномерно распределяются по объёму бетона (табл. 4.7).

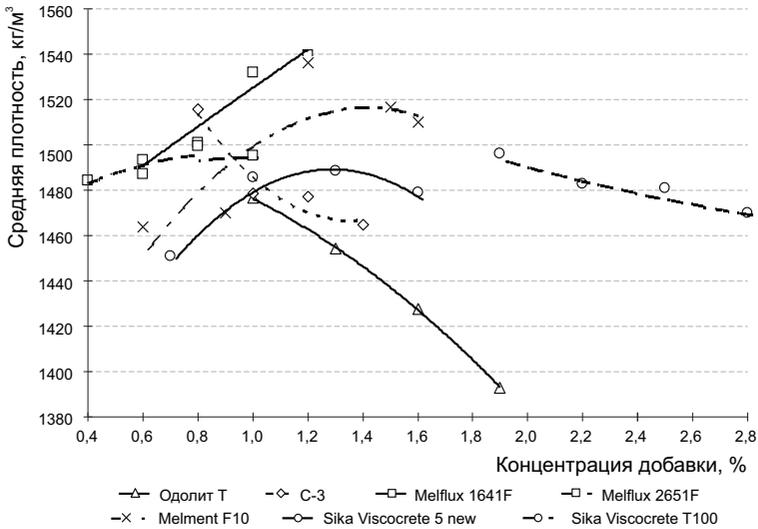


Рис. 4.13. Изменение средней плотности лёгкого бетона на полах микросферах от вида и концентрации пластификатора

Результаты расчётов, представленные в табл. 4.7, свидетельствуют о высокой однородности распределения функционального наполнителя в высокопрочных лёгких бетонах, которая незначительно уменьшается с повышением средней плотности материала. Указанное также подтверждается результатами, полученными с применением рентгеновского томографа (рис. 4.15).

Микрофотография структуры в градиенте «тёплых» и «холодных» цветов (рис. 4.15) демонстрирует, что полые микросферы, стенки ко-

Таблица 4.6

Экспериментально-статистические модели $\rho_{cp} = f(C_d)$

№ п/п	Вид пластификатора		Диапазон концентрации, % от массы портландцемента	Коэффициенты ЭС-модели $\rho_{cp} = a + bC_d + cC_d^2$		
	Модель	Марка		a	b	c
1	Одолит	Т	1,0...1,9	1532	-15,3	-30
2	С-3	-	0,8...1,4	1785	-465,4	171,2
3	Melment	F10	0,6...1,5	1344	272,7	-106,9
4	Melflux	1641F	0,6...1,2	1439	90,9	-4,38
5		2651F	0,4...1,0	1446	124,1	-65,6
6	Sika Viscocrete	5 new	0,7...1,6	1713	-156,5	25,2
7		T100	1,9...2,8	1584	-61,4	7,44

Таблица 4.7

Показатели структуры и средней плотности лёгкого бетона

№ п/п	Средняя плотность бетона, кг/м ³	Слой образца	$\rho_{\text{ср}}$, кг/м ³	σ	s	$h_{\text{цмм}}$, мкм	k
1	1300	1	1295	2,9	3,5	13,5±0,5	0,008
		2	1305	2,1	2,5	12,9±0,3	
2	1400	1	1398	3,1	3,8	14,9±0,3	0,006
		2	1406	2,0	2,4	15,6±0,3	
3	1500	1	1496	3,9	4,8	17,2±0,4	0,008
		2	1508	4,9	6,0	16,7±0,2	

Примечание. 1 – верхний слой; 2 – нижний слой; $k = 1 - \rho_{\text{ср}}(1)/\rho_{\text{ср}}(2)$ – коэффициент расслоения, где $\rho_{\text{ср}}$ – средняя плотность 1-го или 2-го слоя; σ – среднеквадратическое отклонение; s – стандартное отклонение; $h_{\text{цмм}}$ – расчётная прослойка искусственного камня.

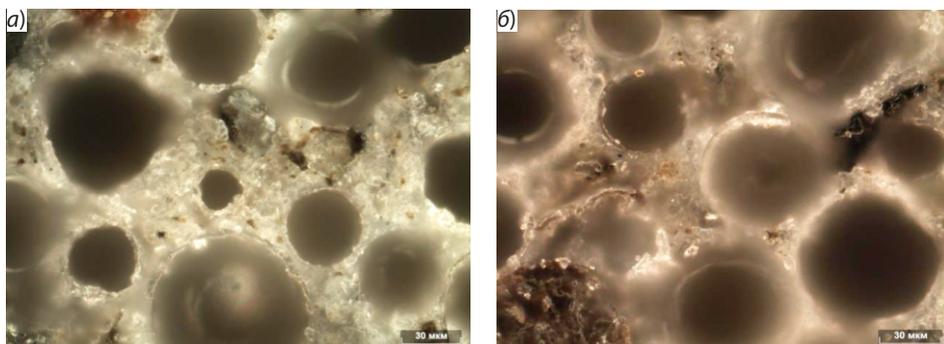


Рис. 4.14. Микрофотографии структуры высокопрочного лёгкого бетона средней плотностью 1300 кг/м³ (а) и 1500 кг/м³ (б)

торых (красно-фиолетовые сферы на рис. 4.15, а) являются наименее плотной дисперсной фазой, разряжены более плотными включениями кварцевого песка большего размера (жёлто-оранжевые объекты на рис. 4.15, а) и продуктами гидратации портландцемента (жёлто-красные включения на рис. 4.15, б). Кроме того, на рис. 4.15, б видно, что лёгкий бетон обладает высоконасыщенной газовой фазой (белый цвет).

В табл. 4.8 представлены данные, которые указывают, что в объёме лёгкого бетона содержится более 1 % пор, образовавшихся за счёт вовлечения воздуха при перемешивании. Это способствует формированию такого строения бетона, которое позволяет получать композитный материал с комплексным набором свойств, сочетающим низкую среднюю плотность и высокую прочность.

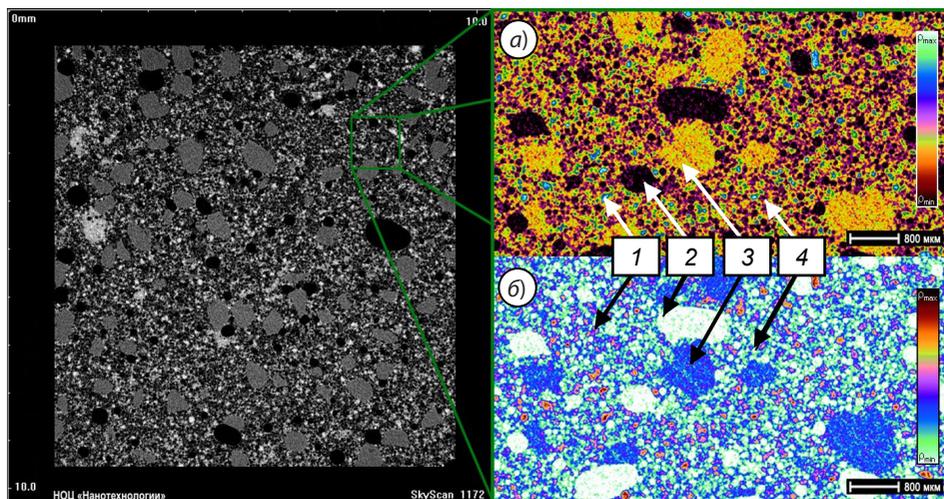


Рис. 4.15. Рентгеновские фотографии микроструктуры лёгкого бетона: а – градиент «тёплых» цветов; б – градиент «холодных» цветов; 1 – искусственный камень, 2 – пустоты и поры, 3 – кварцевый песок, 4 – микросферы

Образование дополнительного количества пор будет оказывать влияние на способность жидкости диффундировать в тело бетона и способствовать развитию деструктивных процессов в эксплуатационных условиях. Важной прогностической характеристикой, позволяющей проводить оценку качества структуры и долговечности материала, является вид и количество пор. Для алюмосиликатных микросфер толщина стенки составляет 5...10 % от диаметра частицы, что соответствует объёму газовой фазы 51,2...72,9 % от общего объёма микросфер. Расчёты свидетельствуют, что для достижения средней плотности бетона менее 1600 кг/м³ объёмная доля микросфер должна составлять не менее 43,8 %. Объём газо-

Таблица 4.8

Параметры пористости лёгких бетонов на микросферах

№ п/п	Диаметр пор, мм	Средний диаметр пор, мм	Доля, %	Объём одной поры, мм ³	Относительный объём пор, %	Общий относительный объём пор, %
1	≤ 0,2	0,30	54,6	0,038	0,21	2,34
2	0,2...0,3		27,3	0,113	0,31	
3	0,3...0,4		10,9	0,523	0,57	
4	0,5...0,9		5,5	0,904	0,49	
5	≥ 1,0		1,7	4,187	0,76	

вой фазы при этом составит более 22,4 %. Отсюда очевидно, что объём закрытых пор в лёгких бетонах с учётом вовлечённого воздуха может составлять до 40 % в зависимости от средней плотности лёгкого бетона.

Как было показано в главе 3 (формула (3.3)), прочность лёгких бетонов зависит от прочности и содержания искусственного камня и функционального наполнителя – полых микросфер (рис. 4.16).

Как видно из рис. 4.16, зависимость $R = f(v_f)$ близка к линейной. Однако при $v_f = 0,2$ наблюдается уменьшение скорости изменения прочности. Такой характер изменения прочности высокопрочного лёгкого бетона от содержания полых микросфер объясняется изменением энергозатрат на рост трещин при реализации различных параметров структуры материала.

Микросферы, имея низкую плотность, в низковязких водонасыщенных системах поднимаются в верхние слои, что недопустимо. Применение эффективных пластификаторов, обладающих высоким пластифицирующим действием, позволяет получить стабильную и однородную бетонную смесь умеренной подвижности без расслоения независимо от объёмной степени наполнения микросфер.

Подвижность бетонной смеси – один из параметров, тесно коррелирующих с прочностью бетонов. Способность материала уплотняться

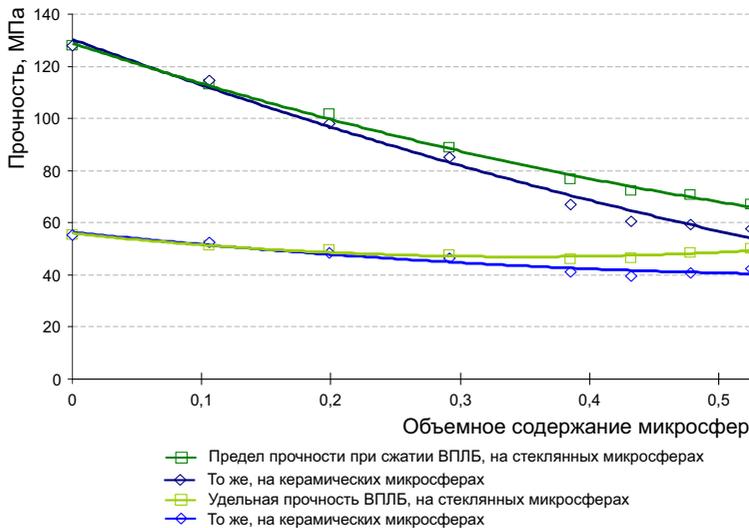


Рис. 4.16. Зависимость прочности высокопрочных лёгких бетонов от объёмного содержания микросфер

под действием гравитационных сил или после приложения внешнего воздействия – пререквизит плотной упаковки дисперсных фаз и высокой прочности композита. Увеличение подвижности бетонной смеси приводит к повышению равномерности распределения цементно-минеральной компоненты по поверхности частиц наполнителя. Это способствует формированию плотно упакованной структуры, увеличению средней плотности и прочности бетона.

В то же время для априорного предположения о линейности взаимосвязи подвижности бетонной смеси (оцениваемой по диаметру расплыва) с прочностью высокопрочных лёгких бетонов нет оснований. По этой причине коэффициент корреляции как параметр, характеризующий линейную взаимосвязь выборочных значений, может оказаться недостаточным для описания связи подвижности с прочностью. Как следствие, на первом этапе представляется целесообразной аппроксимация указанной взаимосвязи полиномом не ниже второй степени (рис. 4.17).

Абсолютная величина параметра ЭС-модели при первой степени в аппроксимирующей зависимости (рис. 4.17) более чем на два порядка превосходит параметр при второй степени. По этой причине можно считать, что взаимосвязь подвижности с прочностью практически линейная, предметом анализа становятся знаки параметров при первых степенях.

Очевидно, что подвижность бетонных смесей будет оказывать влияние на структуру и свойства бетонов. Изменение средней плотности



Рис. 4.17. Зависимость предела прочности при сжатии высокопрочного лёгкого бетона от подвижности смеси на полах микросферах (при средней плотности бетонов 1500 кг/м^3)

от соотношения минеральных добавок в составах высокопрочного лёгкого бетона представлены на рис. 4.18.

Установлено, что существенное изменение средней плотности в исследуемых составах наблюдается при максимальном содержании золы-уноса, что связано с природой такого сырья. Получаемая в процессе сжигания угля зола обладает развитой поверхностью и поровой структурой, что приводит к высокой водопотребности и снижению подвижности смесей при постоянном В/Ц-отношении. Худшая удобоукладываемость препятствует достаточному уплотнению с учётом дополнительного количества воздуха в порах, снижает среднюю плотность бетона с 1450 до 1250 кг/м³ (на 16 %). Соответственно, варьирование содержание золы-уноса приводит к изменению плотности бетона в указанном диапазоне. Комплексы минеральных добавок с микрокремнезёмом обладают слабоизменчивой средней плотностью, величина которой варьируется в пределах 25 кг/м³.

Как показано ранее, формирование прочного каркаса является одним из условий получения высокопрочных лёгких бетонов (глава 3).

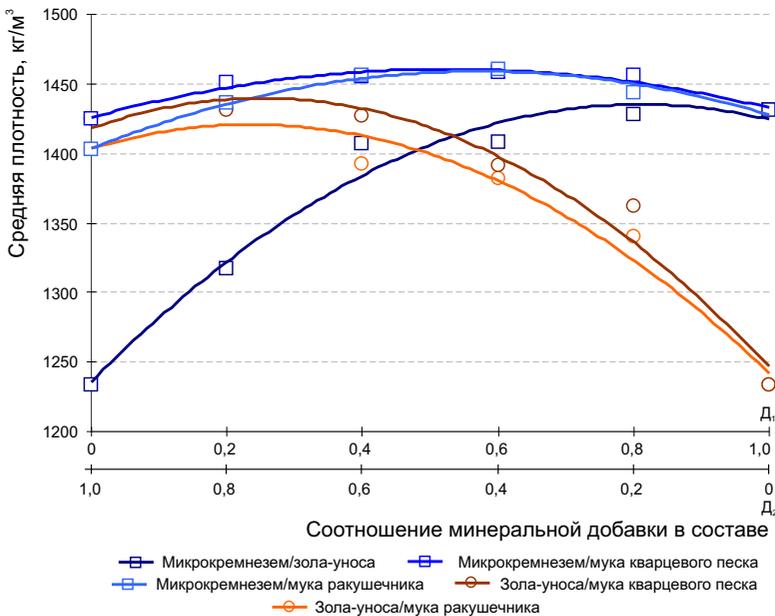


Рис. 4.18. Зависимость средней плотности высокопрочного лёгкого бетона от вида и содержания минеральной добавки

Использование минеральных добавок обосновано необходимостью оптимизации компонентного состава матрицы для выполнения этого условия по физико-химическим критериям. Минеральные добавки, обладая малыми размерами (от 0,1 мкм), уплотняют структуру искусственного камня за счёт увеличения плотности упаковки частиц или взаимодействия с продуктами гидратации (рис. 4.19). Ожидается, что максимальной прочностью обладают составы, в которых одним из компонентов минеральной добавки является микрокремнезём. Сочетание золы-уноса с мукой ракушечника и кварцевой мукой позволяет получить бетон с прочностью при изгибе не более 4 МПа и при сжатии не более 30 МПа.

Использование же микрокремнезёма в количестве более 0,6 от общего объёма минеральной добавки (от 17,5 % от массы портландцемента) обеспечивает повышение прочности при изгибе до 5 МПа и при сжатии до 57 МПа. При этом максимальную прочность имеют составы, в которых в качестве второй добавки используется мука кварцевого песка и зола-уноса.

Отсюда можно заключить, что для получения искусственного камня с максимальной прочностью целесообразно использовать минеральные добавки, которые характеризуются соотношением химического и физического факторов более 4 (глава 3, табл. 3.1).

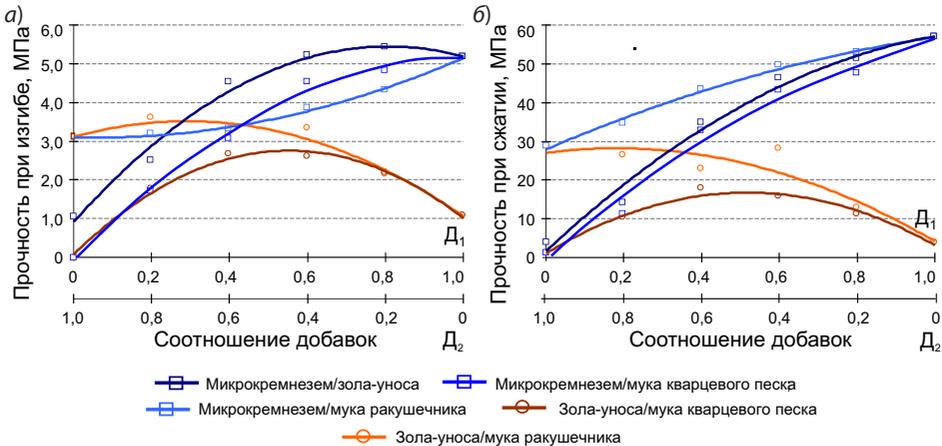


Рис. 4.19. Зависимость предела прочности при изгибе (а) и при сжатии (б) высокопрочного лёгкого бетона от вида и содержания минеральной добавки (объёмная доля минеральных добавок – 0,08, В/Ц = 0,36)

Оценка влияния наномодификатора. Очевидно, что введение микросфер приводит к изменению параметров структуры бетона. Исследователями [105, 197, 198] предложены структурные критерии прочности:

$$L = \frac{C}{\Pi}, \quad (4.16)$$

$$\Psi_p = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_0} = 1 - |\varphi_r| = 1 - \left| \frac{v_t - v_p}{v_m} \right|, \quad (4.17)$$

$$K_{\text{hom}} = \frac{1 + 3\varphi}{(1 - \varphi)^3} \frac{v_m - v_{\Pi}}{v_m}, \quad (4.18)$$

где C – содержание вяжущего;

Π – пористость материала;

$\Delta\sigma$ – упрочнение при текущем значении структурного критерия Ψ_p ;

$\Delta\sigma_0$ – максимальное упрочнение композита при $\Psi_p = 1$;

φ_r – коэффициент разделения фаз;

v_t, v_p – доли плёночной матрицы и матрицы в блоке соответственно;

v_m – объёмная доля матрицы;

v_{Π} – объёмная доля пор.

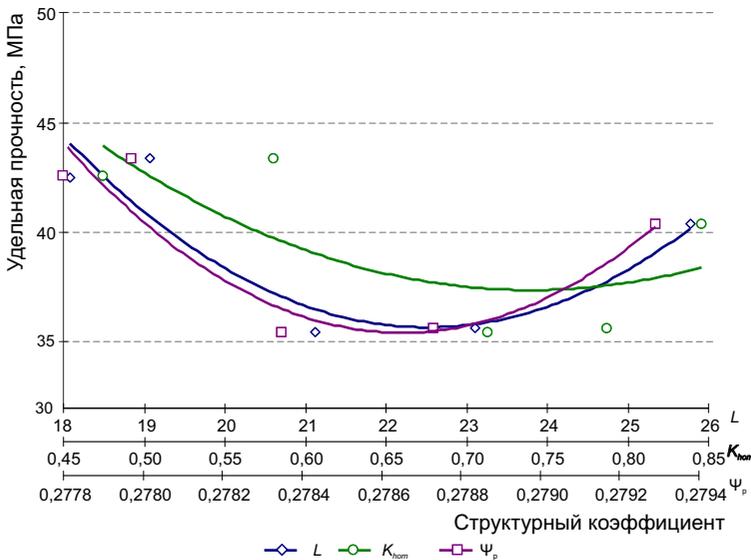


Рис. 4.20. Зависимости удельной прочности наномодифицированных высокопрочных лёгких бетонов от структурных критериев

Зависимости удельной прочности наномодифицированных высокопрочных лёгких бетонов от критериев L , Ψ_p и K_{hom} представлены на рис. 4.20. Анализ этих данных совместно с формулами (4.19)... (4.21) показывает, что независимо от вида структурного критерия изменение удельной прочности от содержания наполнителя имеет экстремальный характер.

$$R_{\text{уд}} = 0,43L^2 - 19,2L + 252, \quad (4.19)$$

$$R_{\text{уд}} = 93,3K_{\text{hom}}^2 - 138,1K_{\text{hom}} + 88,4, \quad (4.20)$$

$$R_{\text{уд}} = 10^7\Psi_p^2 - 7 \cdot 10^6\Psi_p + 926\,750. \quad (4.21)$$

Это объясняется следующим образом. Микросферы, вводимые в высокопрочную цементно-минеральную матрицу, являются естественными дефектами структуры. Очевидно, что увеличение концентрации дефектов приводит к снижению прочности материала (см. рис. 4.16). Из теории перколяции [198] известны две пороговые концентрации содержания дисперсной фазы – $v_I = 0,16$ и $v_{II} = 0,34$ – так называемые пороги перколяции. При достижении первого порога перколяции v_I формируется каркас из частиц наполнителя (микросфер), который обеспечивает непрерывность дисперсной фазы и, следовательно, дефектов структуры. Это приводит к снижению прочности материала на $\sim 26\%$. Дальнейшее увеличение объёмной доли микросфер до значения, близкого ко второму порогу перколяции v_{II} , приводит к формированию каркаса с достаточно плотным расположением частиц наполнителя. Формирование такого каркаса приводит к интенсивному ветвлению трещин, что увеличивает энергетические затраты на разрушение и снижает скорость изменения прочности dR/dv_f (здесь v_f – объёмная доля микросфер). При этом скорость снижения средней плотности dp/dv_f не изменяется. Близкая к сферической форма частиц микросферы дополнительно способствует высокой трещиностойкости бетона. Развитие трещин происходит при большей нагрузке за счёт равномерного распределения напряжений, действующих на частицы правильной формы. Таким образом, формирование структуры при $v_f > v_{II}$ приводит к увеличению удельной прочности. Твёрдая оболочка микросфер обеспечивает закрытую пористость и сохранение высоких эксплуатационных свойства бетона.

На физико-механические свойства высокопрочных лёгких бетонов влияние будет оказывать состав наномодификатора, наносимого на поверхность микросфер (табл. 4.9). Анализ данных таблицы показывает, что введение комплексного наноразмерного модификатора способствует повышению предела прочности при сжатии. Наибольшее значение

Таблица 4.9

Влияние наноразмерного модификатора на свойства наномодифицированного высокопрочного лёгкого бетона

Состав	Соотношение компонентов		D_p , мм	ρ_{cp} , кг/м ³	$R_{сж}$, МПа	$R_{уд}$, МПа
	Концентрация золя гидроксида железа (III), C_{Fe} , %	Содержание прекурсора, α				
Контрольный	–	–	134,1	1485	46,1	31,0
C-1/1,00	1,0	1,00	120,8	1480	48,0	32,4
C-1/1,25		1,25	115,1	1480	53,1	35,8
C-1/1,50		1,50	111,3	1480	53,5	36,2
C-1/1,75		1,75	106,7	1470	49,4	33,5
C-1/2,00		2,00	103,8	1465	40,7	27,8

Примечание. В маркировке состава наномодификатора указаны: первая цифра – концентрация золя гидроксида железа (III), вторая цифра – расход прекурсора [199].

удельной прочности наблюдается при количественном соотношении ионов хлора в адсорбционном и диффузионном слое мицеллы золя гидроксида железа к ионам Na^+ , равном 1/1,25...1/1,5. Это объясняется увеличением количества активного кремнезёма на поверхности микросфер, взаимодействующего с гидроксидом кальция на границе раздела фаз, что увеличивает содержание гидросиликатов кальция в зоне контакта и повышает адгезию заполнителя к цементно-минеральной матрице. Дальнейшее увеличение концентрации прекурсора приводит к значительному снижению прочности бетона в связи с существенным снижением подвижности бетонной смеси и, как следствие, к затруднению её уплотнения и вовлечению дополнительного количества воздушных пор.

Действие, оказываемое наноразмерным модификатором на границе раздела фаз «наномодифицированная микросфера – искусственный камень», закономерно влияет на среднюю плотность лёгкого бетона (рис. 4.21).

Из представленных данных следует, что до определённой концентрации золя кремниевой кислоты в наноразмерном модификаторе средняя плотность лёгкого бетона возрастает на 1...3 %. Причём величина эффекта закономерно зависит от содержания микросфер:

$$\frac{S_f}{V_0} = \frac{6\nu_f}{d_s}, \quad (4.22)$$

где S_f – площадь границы раздела фаз «наномодифицированная микросфера – искусственный камень»;

V_0 – объём композита;

v_f – объёмная доля наномодифицированных микросфер;

d_s – диаметр наномодифицированной микросферы.

Проведём оценку относительного увеличения плотности лёгкого бетона при образовании на границе раздела фаз «наномодифицированная микросфера – искусственный камень» слоя цементного камня с плотностью, превышающей плотность искусственного камня в объёме. Соотношение плотностей цементного камня в прилегающей области ρ_t и в объёме ρ_m равно

$$k_p = \frac{\rho_t}{\rho_m} \geq 1. \quad (4.23)$$

Относительное изменение плотности лёгкого бетона будем оценивать величиной

$$\delta\rho_b = \frac{\rho_{b,t} - \rho_{b,0}}{\rho_{b,0}}, \quad (4.24)$$

где $\rho_{b,t}$ – средняя плотность лёгкого бетона с наличием на границе раздела фаз уплотнённого слоя искусственного камня с ρ_i :

$$\rho_{b,t} = (1 - v_f - v_t)\rho_m + v_f\rho_f + v_t\rho_i; \quad (4.25)$$

$\rho_{b,0}$ – средняя плотность лёгкого бетона без уплотнённого слоя искусственного камня:

$$\rho_{b,0} = (1 - v_f)\rho_m + v_f\rho_f, \quad (4.26)$$

v_i – объёмная доля соответствующей фазы;

ρ_i – плотность соответствующей фазы;

индексы m , f и t означают искусственный камень, полые микросферы, уплотнённый слой искусственного камня на границе раздела фаз «наномодифицированная микросфера – искусственный камень» соответственно.

Объёмная доля уплотнённого слоя искусственного камня равна

$$v_t = \frac{S_f}{V_0} h_t = \frac{6v_f}{d_s} h_t \text{ или } v_t = 6v_f k_r, \quad (4.27)$$

где h_t – толщина уплотнённого слоя искусственного камня; $k_r = h_t/d_s < 1$.

Используя полученные формулы, окончательно получим

$$\delta\rho_b = \frac{6v_f k_r \rho_m (k_p - 1)}{\rho_m - v_f (\rho_m - \rho_f)}. \quad (4.28)$$

Результаты расчёты величины $\delta\rho_b$ представлены в табл. 4.10.

Результаты табл. 4.10 демонстрируют, что полученные экспериментальные данные (рис. 4.21) очень хорошо согласуются с предложенной

Таблица 4.10

Результаты оценочных расчётов dr_b

Соотношение k_p/k_r	Объёмная доля наномодифицированных микросфер			
	0,40	0,45	0,50	0,55
1,10 / 0,05	1,62	1,90	2,21	2,55
1,15 / 0,05	2,42	2,85	3,32	3,83

Примечание. $\rho_m = 1400 \text{ кг/м}^3$; $\rho_f = 500 \text{ кг/м}^3$.

моделью формирования на границе раздела фаз «наномодифицированная микросфера – искусственный камень» уплотнённого слоя искусственного камня. Так, достаточно повысить плотность искусственного камня на 10...15 %, а толщину слоя уплотнённого искусственного камня на 5 %, чтобы обеспечить экспериментально установленное увеличение плотности лёгкого бетона, изготовленного на наномодифицированных микросферах.

Открытые поры отличаются способностью поглощать воду (или другие жидкости), и, следовательно, их общий объём (открытая пористость) может быть определён по величине объёмного водопоглощения, что подтверждают многочисленные исследования [200–202].

Зависимость водопоглощения от продолжительности экспозиции может быть аппроксимирована показательной функцией

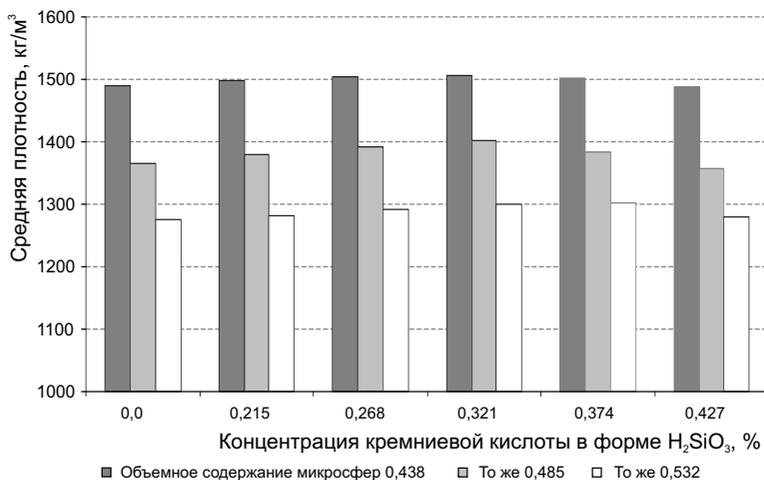


Рис. 4.21. Влияние концентрации золя кремниевой кислоты наноразмерного модификатора на среднюю плотность лёгких бетонов на наномодифицированных полых микросферах

$$W_{\tau} = W_{\max} \left(1 - e^{-\bar{\lambda}\tau^{\alpha}} \right), \quad (4.29)$$

где W_{τ} – водопоглощение материала на период времени τ ;

W_{\max} – максимальная величина водопоглощения, численно равная величине открытой пористости;

$\bar{\lambda}$ – константа скорости, характеризующая средний размер капилляров модельного поликапиллярного материала;

$0 \leq \alpha \leq 1$ – однородность размеров капилляров (для монокапиллярного материала $\alpha = 1$).

Определение величины водопоглощения проводили по следующей методике. Образцы лёгкого бетона на микросферах (как наномодифицированных, так и не модифицированных) со средней плотностью 1500 кг/м^3 высушивали до постоянной массы при температуре $105 \dots 110 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 48 часов, что позволяет удалить физически связанную воду. Температура воды насыщения составляла $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Определение массы образцов при исследовании водопоглощения проводили в течение 48 часов, длительность интервалов между замерами значений водопоглощения подчинялась представленной в табл. 4.11 зависимости (приведены значения массового водопоглощения). Выбранный режим позволяет снизить погрешность определения параметра $\bar{\lambda}$ в формуле (4.29).

Результаты, представленные в таблице 4.11, позволяют сделать следующие выводы:

- высокий разброс значений параметра α для образцов лёгкого бетона на микросферах (более 10 %) свидетельствует о неоднородности открытого порового пространства исследуемых образцов, которая может быть обусловлена расслоением бетонной смеси вследствие высокой подвижности или технологическими особенностями формования;

- однородность порового пространства лёгкого бетона на наномодифицированных микросферах значительно выше (в 1,7 раза) – разброс данных не превышает 5 %. Сопоставление величин $\bar{\lambda}$ свидетельствует о том, что размер капилляров в структуре такого лёгкого бетона также меньше (в 1,63 раза).

Таким образом, открытая пористость (водопоглощение по объёму) лёгкого бетона на наномодифицированных микросферах не превышает 1,5 %. Сопоставление параметров порового пространства $\bar{\lambda}$ и α свидетельствует, что поровая структура лёгкого бетона на наномодифици-

Таблица 4.11

Результаты исследования поровой структуры методом Шейки

№ п/п	Водопоглощение после экспозиции t (час), %						$\bar{\lambda}$	α
	0	0,5	1	2	24	48		
Лёгкий бетон на микросферах								
1	0	0,52	0,57	0,63	0,87	0,89	1,14	0,356
	0	0,56	0,59	0,67	0,87	0,92	1,15	0,289
	0	0,55	0,57	0,65	0,87	0,90	1,18	0,329
Среднее квадратичное отклонение, %							1,8	10,4
Лёгкий бетон на наномодифицированных микросферах								
2	0	0,386	0,407	0,537	0,920	0,942	0,75	0,510
	0	0,384	0,545	0,571	0,974	1,006	0,68	0,509
	0	0,383	0,410	0,583	0,955	0,987	0,70	0,502
Среднее квадратичное отклонение, %							0,80	5,0

рованных микросферах по сравнению со структурой лёгкого бетона на немодифицированных микросферах имеет повышенную однородность.

Важно отметить, что пористость лёгкого бетона на микросферах представлена в основном закрытой пористостью (до 53 %), открытая пористость не превышает 1,5 %. Распределение закрытых пор подчиняется закону распределения микросфер. Причём однородность закрытых пор по размерам также подчинено закону распределения микросфер по размеру. Приведённая толщина прослойки искусственного камня h_{cs} , разделяющей микросферы, равна

$$h_{cs} = d_s \left(\sqrt[3]{\frac{\eta_{f,\max}}{v_f} - 1} \right), \quad (4.30)$$

где $\eta_{f,\max}$ – максимальная степень наполнения (для микросфер можно принять $\eta_{f,\max} = 0,74$).

Значения h_{cs} , рассчитанные для стеклянных и керамических микросфер, представлены в табл. 4.12.

Таблица 4.12

**Толщины прослойки цементного камня, разделяющего микросферы
(закрытые поры)**

Вид микросфер	d_s , мкм	Толщина слоя искусственного камня, мкм, при v_f			
		0,40	0,45	0,50	0,55
Стеклянные	30	6,8	5,4	4,2	3,1
Керамические	70	16,0	12,6	9,8	7,3

Из данных табл. 4.12 видно, что при определённых условиях уплотнённые слои искусственного камня могут объединяться (см. оценочные параметры, полученные по модели уплотнённого слоя; табл. 4.11). В этом случае на зависимостях прочности должен наблюдаться синергетический эффект от применения наномодифицированных микросфер.

Оценка влияния суперабсорбирующего полимера. Использование гранулированных САП приводит к снижению прочности цементных композитов, что связано с формированием дополнительной пористости в структуре материала после десорбции воды из полимерной добавки. Поэтому для устранения негативного влияния целесообразно использование САП в виде раствора. Применение САП «Реновир-гидрогель» в количестве 0,50...1,0 % от массы портландцемента в составах высокопрочного лёгкого бетона приводит к наименьшему снижению прочности бетона (рис. 4.22). В возрасте 28 суток твердения в неблагоприятных условиях (температура 25...27 °С и влажность 50...60 %) прочность при изгибе таких бетонов изменяется в диапазоне 5,5...5,8 МПа, а прочность при сжатии – 45,3...47,8 МПа. Увеличение содержания акрилатной части до 2,3 % в растворе САП от массы портландцемента способствует росту предела прочности при изгибе до 17 % за счёт формирования полимерных плёнок и волокон, выполняющих после десорбции воды функцию армирующей добавки. При этом увеличение её содержания более 1,5 % от массы портландцемента характеризуется снижением предела прочности при сжатии до 8,5 %, что хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными при исследовании влияния САП на прочность цементного камня.

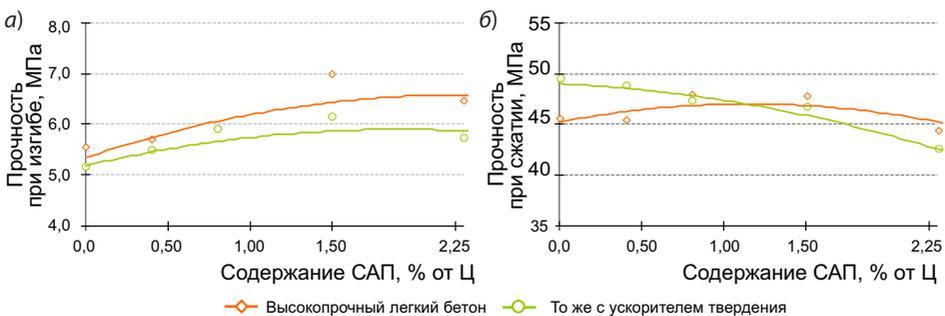


Рис. 4.22. Зависимость предела прочности при изгибе (а) и при сжатии (б) высокопрочного лёгкого бетона от содержания САП

Допустимое количество САП в составе высокопрочного лёгкого бетона ограничивается диапазоном 1,0...1,5 % от массы портландцемента, обеспечивающего сохранение прочности.

Оценка влияния микроармирования. Уменьшение подвижности бетонной смеси приводит к её некачественному уплотнению, что закономерно снижает прочность бетона. Подобная закономерность также проявляется и для высокопрочных лёгких бетонов (рис. 4.23). В исследованном диапазоне содержания волокон средняя плотность бетона снижается в пределах 15...25 кг/м³, что пропорционально изменению подвижности бетонной смеси (см. рис. 4.10).

Наибольшее изменение прочности при изгибе и сжатии имеют составы высокопрочного лёгкого бетона с полипропиленовыми волокнами (рис. 4.24). Увеличение их содержания до 2 % от массы портландцемента позволяет повысить прочность на 60 % при изгибе и на 15,5 % при сжатии. Использование стекло- и базальтовых волокон в количестве до 2,5 и 3,5 % от массы портландцемента соответственно обеспечивает прирост прочности при изгибе до 6,5 МПа при величине 5 МПа для составов без волокон, а прочности при сжатии до 47 МПа. При этом использование базальтового волокна не приводит к увеличению прочности при сжатии бетона.

Эффективным армирующим компонентом для управления прочностью высокопрочных лёгких бетонов является полипропиленовое во-

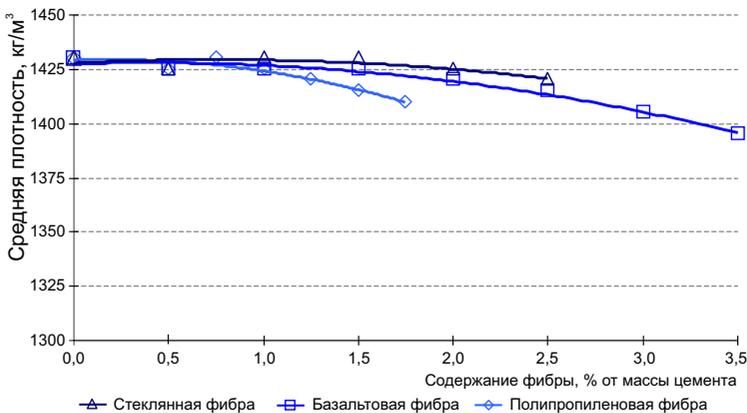


Рис. 4.23. Зависимость средней плотности высокопрочного лёгкого бетона от вида и содержания волокон

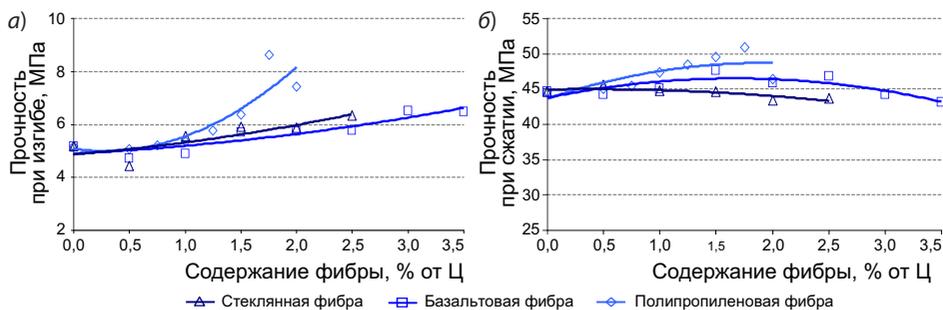


Рис. 4.24. Зависимость предела прочности при изгибе (а) и при сжатии (б) высокопрочного лёгкого бетона от вида и содержания волокон

локно, которое обеспечивает увеличение предела прочности при изгибе и сжатии бетона при содержании волокна 1,25...1,75 %.

4.3. Эксплуатационные свойства высокопрочных лёгких бетонов

Модуль упругости является важнейшей характеристикой материала, по которой можно оценить его деформативные свойства и внутренний энергетический потенциал. Значение модуля упругости позволяет сделать вывод о возникающих при приложении нагрузки напряжениях и на этой основе прогнозировать процессы образования и развития трещин. Диаграммы деформирования высокопрочных лёгких бетонов на полых микросферах средней плотностью 1300...1500 кг/м³ приведены на рис. 4.25, величины деформативных свойств представлены в табл. 4.13.

Диаграммы деформирования демонстрируют закономерное снижение модуля упругости при снижении средней плотности бетона, связанного с увеличением закрытой пористости, формируемой микросферами. Использование наномодифицированных микросфер приводит к снижению относительной деформации и, как следствие, к увеличению модуля упругости на 13...36 % в зависимости от средней плотности бетона, что дополнительно подтверждает модель формирования плотного искусственного камня, а также указывает на формирование пространственного бесконечного кластера¹ из оболочек уплотнённого искусственного камня, сформированных вокруг наномодифицированных микросфер. Коэффициент Пуассона также увеличивается с повышени-

¹ Понятие, используемое в теории протекания и указывающее на формирование системы контактирующих узлов, концентрация которых обеспечивает протекания по сетке.

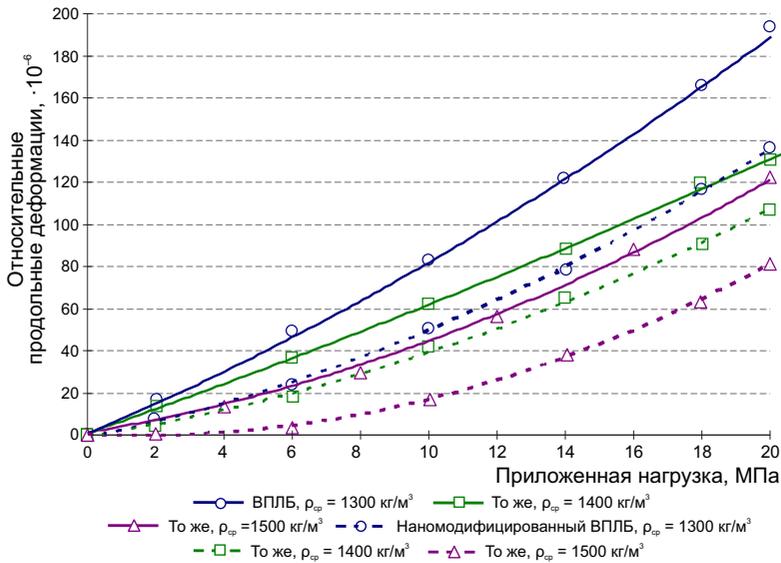


Рис. 4.25. Диаграммы деформирования высокопрочного лёгкого бетона

ем средней плотности лёгкого бетона и применением наномодифицированных микросфер.

В процессе эксплуатации материал испытывает воздействие различных эксплуатационных факторов, которые приводят к образованию трещин и разрушению материала. Поэтому важным для новых материа-

Таблица 4.13

Деформативные свойства высокопрочных лёгких бетонов

№ п/п	ρ _{ср} , кг/м ³	R _{сж} , МПа	R _{уд} , МПа	R _{пр} , МПа	E, ГПа	μ
Мелкозернистый тяжёлый бетон						
1	2390	125,1	52,3	95,9	18,8	0,09
Высокопрочный лёгкий бетон						
2	1490	55,7	37,5	46,8	11,1	0,09
3	1380	49,3	35,1	43,9	10,3	0,10
4	1290	45,6	35,4	41,6	7,5	0,12
Наномодифицированный высокопрочный лёгкий бетон						
5	1485	66,1	44,5	56,6	15,2	0,13
6	1380	55,5	40,2	50,8	11,7	0,15
7	1290	52,1	40,4	47,2	9,5	0,17

Примечание. ρ_{ср} – средняя плотность; R_{сж} – предел прочности при сжатии (кубиковая прочность); R_{уд} – удельная прочность; R_{пр} – призмная прочность; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона.

лов является показатель трещиностойкости, который можно оценить с помощью коэффициента трещиностойкости:

$$k_{\text{тр}} = \frac{R_{\text{изг}}}{R_{\text{сж}}}, \quad (4.31)$$

где $R_{\text{изг}}$ и $R_{\text{сж}}$ – пределы прочности при изгибе и сжатии соответственно.

Экспериментальные данные, представленные в табл. 4.14, свидетельствуют о том, что высокопрочные лёгкие бетоны обладают сопоставимыми с высокопрочным тяжёлым мелкозернистым бетоном соотношением прочности изгиба к прочности при сжатии. Составы высокопрочного лёгкого бетона на немодифицированных микросферах обладают большим на 6...20 % (в зависимости от средней плотности) коэффициентом трещиностойкости по сравнению с образцами, изготовленными с комплексным наноразмерным модификатором. Причина подобного снижения коэффициента трещиностойкости непосредственно следует из формулы (4.31), а именно наномодифицирование микросфер приводит к существенно более значительному повышению прочности при сжатии, чем при изгибе.

Образование различного рода локальных трещин, снижающих прочность, происходит под действием усадки и многих других факторов. Адекватной является оценка коэффициента трещиностойкости по методу МИИТ [203, 204] (табл. 4.15).

Возникновение внутренних напряжений (вследствие экстремального изменения эксплуатационных условий) и процессы образования и развития трещин в составах наномодифицированного высокопрочного

Таблица 4.14

Коэффициент трещиностойкости тяжёлых и лёгких бетонов

№ п/п	Наименование состава	$\rho_{\text{ср}}$, кг/м ³	$R_{\text{изг}}$, МПа	$R_{\text{сж}}$, МПа	$k_{\text{тр}}$
1	Высокопрочный тяжёлый бетон	2320	19,1	115,1	0,17
2	Высокопрочный лёгкий бетон	1460	7,9	54,0	0,15
3	Высокопрочный лёгкий бетон	1355	6,6	47,6	0,14
4	Высокопрочный лёгкий бетон	1250	4,9	45,3	0,11
5	Наномодифицированный высокопрочный лёгкий бетон	1485	7,3	62,1	0,12
6	Наномодифицированный высокопрочный лёгкий бетон	1380	5,7	51,4	0,11
7	Наномодифицированный высокопрочный лёгкий бетон	1290	5,0	49,7	0,10

Таблица 4.15

Коэффициент трещиностойкости по методу МИИТ

№ п/п	Наименование состава	$R'_{изг}$ МПа	$R'_{сж}$ МПа	$R''_{изг}$ МПа	$R''_{сж}$ МПа	$k_{тр}$ по $R_{сж}$	$k_{тр}$ по $R_{изг}$
1	Высокопрочный лёгкий бетон	6,75	54,9	1,80	49,9	0,91	0,27
2	Наномодифицированный высокопрочный лёгкий бетон	7,00	60,4	2,95	56,1	0,93	0,42

Примечания: $R'_{изг}$ и $R'_{сж}$ – пределы прочности при изгибе и сжатии в водонасыщенном состоянии; $R''_{изг}$ и $R''_{сж}$ – пределы прочности при изгибе и сжатии в воздушно-сухих условиях; $k_{тр}$ – коэффициент трещиностойкости.

лёгкого бетона протекают с меньшей интенсивностью. Использование предлагаемого наномодификатора способствует повышению трещиностойкости:

- при расчёте по изменению прочности при сжатии $\Delta k_{тр} = 2,1 \%$;
- при расчёте по изменению прочности при изгибе $\Delta k_{тр} = 56,9 \%$.

Одним из распространённых методов для анализа особенностей внутреннего напряжённого состояния и формирования дефектов при воздействии внешних нагрузок является метод акустической эмиссии (АЭ). Работы [205–210] свидетельствуют о различных подходах к использованию этого метода, методиках его анализа, интерпретации и области исследования. Авторами [211–216] показано, что метод акустической эмиссии может быть использован как для исследования характера разрушения исследуемого материала, так для прогнозирования его свойств, например трещиностойкости.

Для анализа параметров акустической эмиссии образцов высокопрочного лёгкого бетона при механическом испытании предела прочности при сжатии использовалось количество ультразвуковых импульсов акустической эмиссии N с амплитудой A . Общий вид получаемых первичных данных АЭ представлен на рис. 4.26.

Изменения количества сигналов АЭ и суммарной величины амплитуды для высокопрочных лёгких бетонов имеют схожий вид. На графике кинетики N и ΣA отчётливо выделяются три стадии, характеризующиеся различной скоростью изменения: I стадия – интенсивное приращение значений при небольшой продолжительности; II стадия – медленное (близкое к статическому) изменение значений в течение 80...85 % всего времени испытания; III стадия – увеличение значений контролируемых параметров имеет лавинный характер.

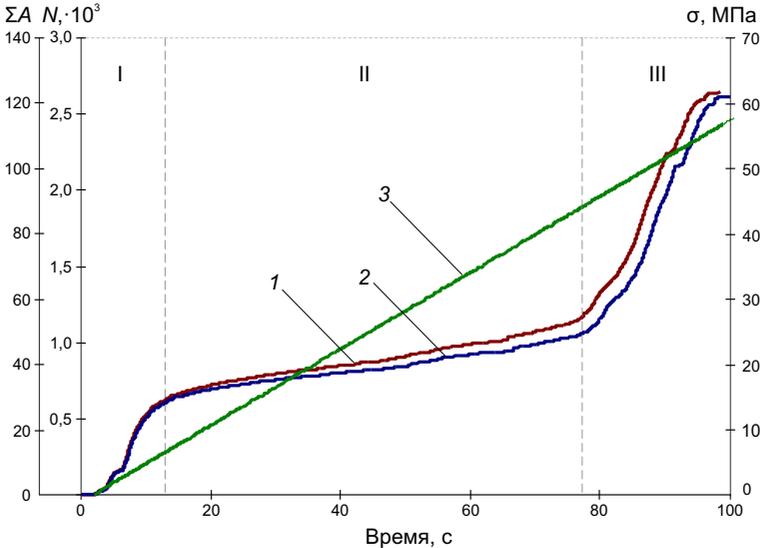


Рис. 4.26. Общий вид кинетики количества сигналов акустической эмиссии N (1), суммарной величины амплитуд ΣA (2) и нагрузки σ (3) образцов при испытании на сжатие

Вид кривой, представленный на рис. 4.26, как для N , так и ΣA отражает процессы формирования дефектов в структуре материала и характеризует особенности его разрушения при воздействии прикладываемых нагрузок. Для анализа этих особенностей и установления закономерностей их изменения можно использовать показатель, обобщающий описанные параметры и позволяющий оперировать как качественными, так и количественными данными. Таким показателем может быть суммарная энергия акустической эмиссии $E_{АЭ}$, расчёт которой осуществляется по формуле

$$E_{АЭ} = \sum N_i A_i^2, \quad (4.32)$$

где N_i – количество сигналов АЭ в i -й момент времени;

A_i – величина амплитуды в i -й момент времени.

Данные о кинетике энергии АЭ для образцов высокопрочного лёгкого бетона различной средней плотностью (рис. 4.27) показывают, что увеличение содержания полых микросфер в составе бетона, снижающее его среднюю плотность, приводит к смещению графика $E_{АЭ} = f(\sigma)$ в зону меньших значений: снижаются прочность бетона и суммарная энергия АЭ. При этом также наблюдается изменение вида этой кривой. Если содержание микросфер (массовая доля) в бетоне не превышает 13 %, то

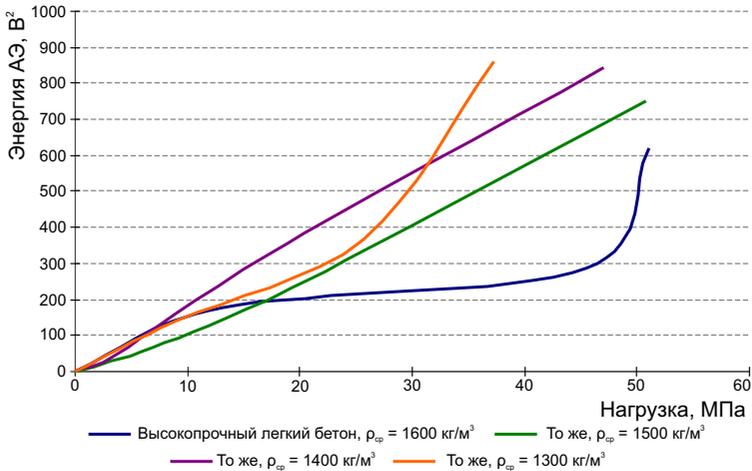


Рис. 4.27. Зависимость энергии АЭ исследуемых бетонов от величины приложенной нагрузки при испытании на сжатие

изменение энергии АЭ имеет описанный выше характер с ярко выраженными тремя участками. Наполнение материала микросферами до 22 % (средняя плотность бетона составляет 1300 кг/м^3) приводит к формированию близкой к линейной зависимости исследуемых параметров, причём суммарная энергия АЭ увеличивается при меньших значениях внешних нагрузок.

Описанная закономерность объясняется увеличением количества более слабых элементов структуры (полых микросфер), которые при достижении критического содержания в объёме материала формируют границу раздела фаз с цементно-минеральной матрицей, не способную сопротивляться воздействиям, аналогичным тем, которые не приводят к формированию трещин в составах с большей долей плотных компонентов. То есть керамические микросферы, являясь искусственно введёнными в состав бетона дефектами структуры, при содержании более 40 % по объёму, формируют перенасыщенную структуру и при приложении меньших нагрузок способствуют интенсивному образованию трещин и их развитию в теле бетона.

Учитывая характер изменения энергии АЭ, можно сделать следующие предположения:

- начальная стадия I характеризует первичные деформации материала, связанные с разрушением слабых связей в структуре. Это могут

быть как разрушения отдельных микросфер, так и нарушение сцепления искусственного камня в зоне контакта с ними. На этой стадии материал испытывает значительные деформации за короткий период времени, связанные со смещением элементов структуры в связи с образованием полостей (микропор) на месте разрушенных микросфер;

- стадия II характеризуется асимптотическим изменением энергии АЭ, так называемая «зона надёжности», когда при увеличении нагрузки материал деформируется незначительно. Наибольшая продолжительность этого периода будет наблюдаться у материала, где напряжения, накапливаемые вследствие приложения нагрузки, равномерно распределяются по объёму, что приводит к замедленному формированию дефектов и развитию трещин. К таким составам относятся высокопрочные лёгкие бетоны со средней плотностью 1600...2000 кг/м³. То есть составы такого бетона содержат достаточное количество микросфер как для формирования прочной оболочки искусственного камня вокруг функционального наполнителя, так и равномерного распределения напряжений по поверхности этого наполнителя. При уменьшении средней плотности полые микросферы образуют каркас с близкорасположенными частицами, что препятствует ветвлению трещин и уменьшает толщину прослойки камня;

- стадия III характеризуется резким изменением кинетики выделения АЭ. Интенсивное увеличение энергии АЭ связано с лавинообразным образованием дефектов и нарушением сплошности структуры. Для высокопрочных лёгких бетонов с содержанием микросфер не более 18 % по массе эта стадия начинается при приложении 73...89 % от разрушающей нагрузки или более 40 МПа. Такая закономерность объясняется собственной прочностью функционального наполнителя. Используемые в исследовании керамические микросферы способны выдерживать нагрузку более 35 МПа. То есть с учётом прочности цементно-минеральной матрицы при увеличении нагрузки более 40 МПа количество разрушающихся микросфер в составе бетона начинает резко увеличиваться. При этом скорость изменения зависимости (тангенс угла наклона) кривой на этой стадии является характеристикой для оценки хрупкости разрушения материала.

Значения энергии акустической эмиссии, учитывающие суммарную амплитуду и количество сигналов, имеют хорошую корреляцию с механическими свойствами материала (рис. 4.28).

Наномодифицирование поверхности функционального наполнителя закономерно изменяет характер эмиссии акустической энергии (рис. 4.29). В зависимости от средней плотности материала кривая энергии АЭ состава

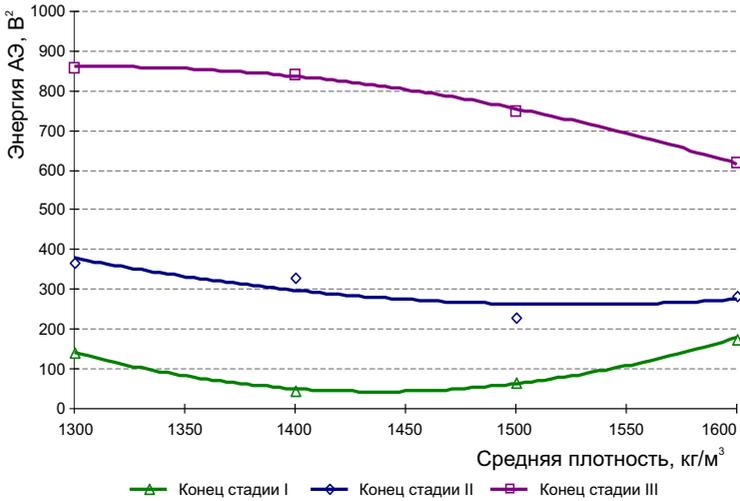


Рис. 4.28. Изменение энергии АЭ в зависимости от средней плотности высокопрочного лёгкого бетона

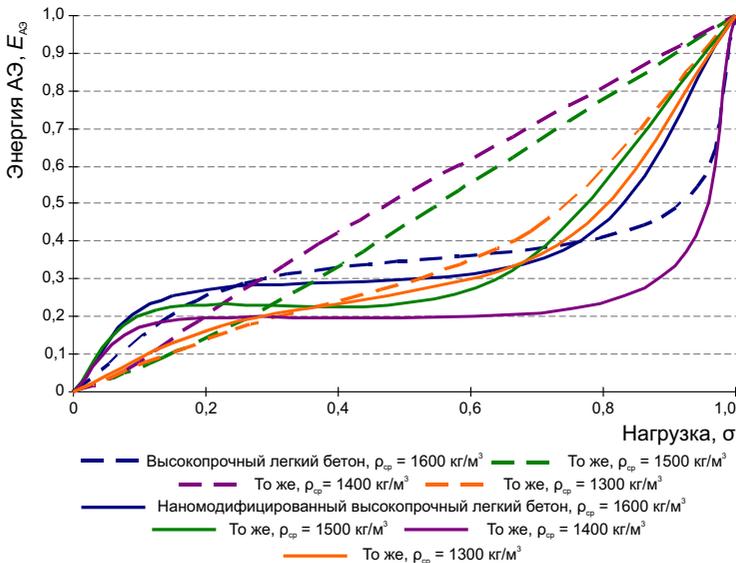


Рис. 4.29. Зависимость приведённой энергии АЭ высокопрочных лёгких бетонов от относительной нагрузки при испытании на сжатие

вов бетона на полых микросферах с наноразмерным модификатором изменяется не только по положению точек перегиба, но и по виду.

Высокопрочные лёгкие бетоны предназначены для изготовления железобетонных конструкций как по традиционной технологии (сборной или монолитной), так и методом 3D-печати. Стойкость таких конструкций к действию эксплуатационных факторов во многом будет зависеть от барьерных свойств материала, то есть его проницаемости к внешним флюидам, которые могут создавать дополнительные внутренние напряжения как при возникновении градиентов влажности по объёму материала, так и при протекании различных химических процессов.

Кинетические зависимости водопоглощения описываются функцией вида

$$W = W_{\max} (1 - e^{-bt}), \quad (4.33)$$

где W_{\max} – максимальное водопоглощение;

b – коэффициент, характеризующий скорость поглощения жидкости,
 t – время.

Скорость изменения водопоглощения

$$\frac{dW}{dt} = \frac{bW_{\max}}{e^{bt}}. \quad (4.34)$$

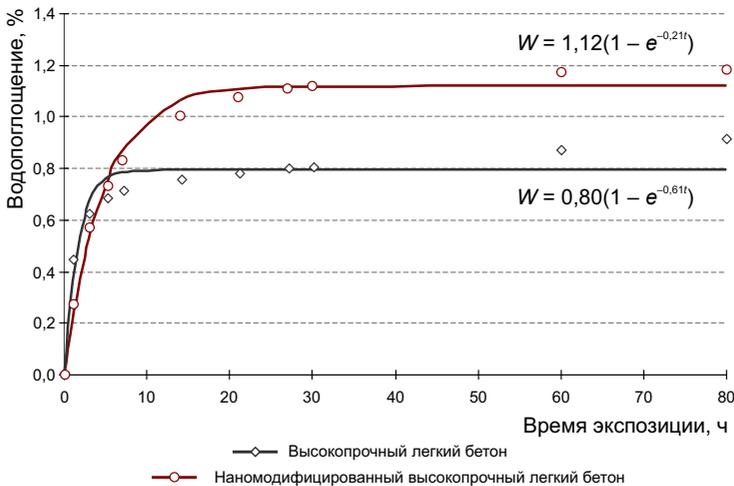


Рис. 4.30. Кинетика водопоглощения высокопрочных лёгких бетонов на полых керамических микросферах

Соотношения (4.33) и (4.34) определяют функции, асимптотически приближающиеся к W_{\max} и нулю, что соответствует приведённым на рис. 4.30 экспериментальным данным и аппроксимирующим их аналитическим выражениям. При прочих равных условиях более быстрое достижение асимптоты наблюдается при больших величинах коэффициента b .

Кинетика водопоглощения составов средней плотностью 1500 кг/м^3 на полых керамических микросферах представлена на рис. 4.30. Водопоглощение наномодифицированного ВПЛБ, а следовательно, объём открытых пор в 1,4 раза больше, чем у высокопрочного лёгкого бетона. Однако значение коэффициента b для наномодифицированного ВПЛБ в 2,9 раз меньше, чем для ВПЛБ.

Важно отметить, что водопоглощение высокопрочных лёгких бетонов на керамических микросферах не превышает 1,2 % по массе, что свидетельствует о формировании структуры, мало проницаемой для жидких сред.

Полученные зависимости кинетики водопоглощения ВПЛБ со средней плотностью 1400 кг/м^3 , изготовленного на полых стеклянных микросферах (рис. 4.31) и твердеющего в нормальных условиях, демонстрируют, что водопоглощение составов как с фиброй, так и с САП меньше, чем водопоглощение ВПЛБ на указанных микросферах. Максимальное водопоглощение составов с фиброй составляет 4,76 %, с САП – 4,14 %, что на 21,0

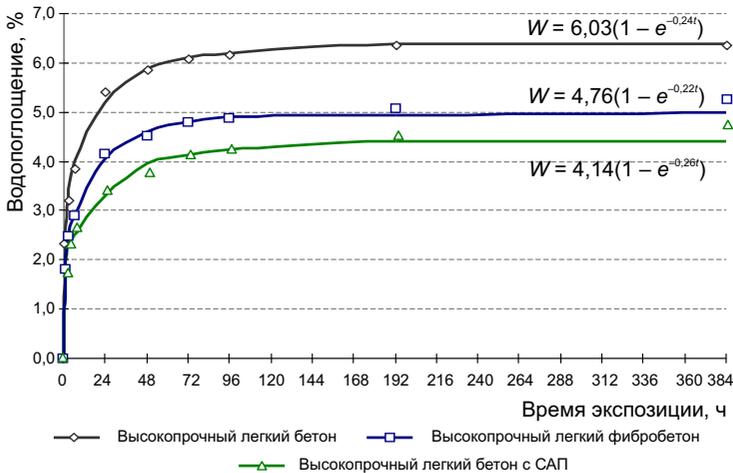


Рис. 4.31. Кинетика водопоглощения высокопрочных лёгких бетонов на полых стеклянных микросферах, твердеющих в нормальных условиях

и 31,3 % меньше, чем у контрольного состава соответственно. При этом можно отметить близкие величины коэффициента b формулы (4.33) для указанных составов, что свидетельствует о формировании порового пространства с примерно одинаковыми геометрическими характеристиками капилляров, но отличающегося по общему объёму открытых пор.

Использование САП обосновано необходимостью снижения усадочных деформаций материалов, используемых, например, для 3D-печати. Особенность такой технологии заключается в образовании открытой поверхности отформованных слоёв материала – «чернил», что способствует интенсивной потере влаги и соответствующей усадке. Эффективность применения растворов САП оценена по изменению деформаций усадки высокопрочного лёгкого бетона после экспозиции в течение 28 суток в условиях интенсивной потери влаги в вентилируемой климатической камере при температуре 30 ± 1 оС и влажности 5...10 %. Составы бетона содержали САП в количестве 0,4; 0,8; 1,5 и 2,30 % от массы портландцемента (рис. 4.32).

Полученная с помощью компаратора кинетика деформаций усадки высокопрочных лёгких бетонов показывает, что составы без САП характеризуются величиной деформаций более 12 мм/м. Увеличение количества полимерной части в составе приводит к снижению значений усадки на 25 % – до 9 мм/м.

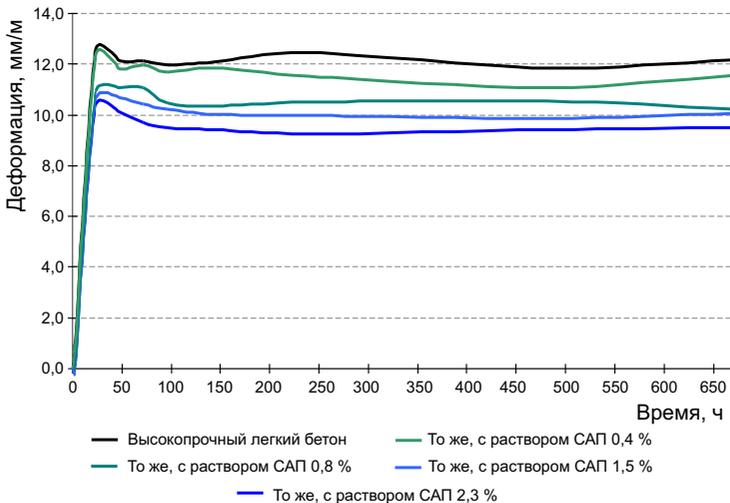


Рис. 4.32. Деформации усадки высокопрочного лёгкого бетона с САП

Использование ускорителей твердения портландцемента в технологии 3D-печати направлено на увеличение несущей способности экструдированных слоёв вследствие увеличения прочности бетона в ранние сроки. При этом закономерно наблюдается снижение величины усадки (рис. 4.33). Использование раствора САП даже в незначительных количествах (до 0,25 % от массы портландцемента) приводит к снижению деформации усадки на 26,9 %. Максимальное снижение усадки по сравнению с контрольным составом (13,7...16,6 мм/м) достигается при содержании САП в количестве 2,3 % – 8,8...10,6 мм/м, что меньше на 35,8...41,2 %.

Важной особенностью усадки бетонов, твердеющих в неблагоприятных условиях, является наличие на кинетических зависимостях явления «овершут», которое характеризует наличие «холма» в начальный период. Такое неклассическое поведение описано в работе [14]. С позиции математики явление «овершут» связано с переходом аргумента в область комплексных решений в связи с периодичностью функции $e^{i\pi}$. Это вызывает колебательно-асимптотический процесс. Для систем с низкой инерцией – это колебания с затухающей амплитудой около асимптоты, а для систем с высокой инерцией – это «холм» в начальный период (рис. 4.32 и 4.33).

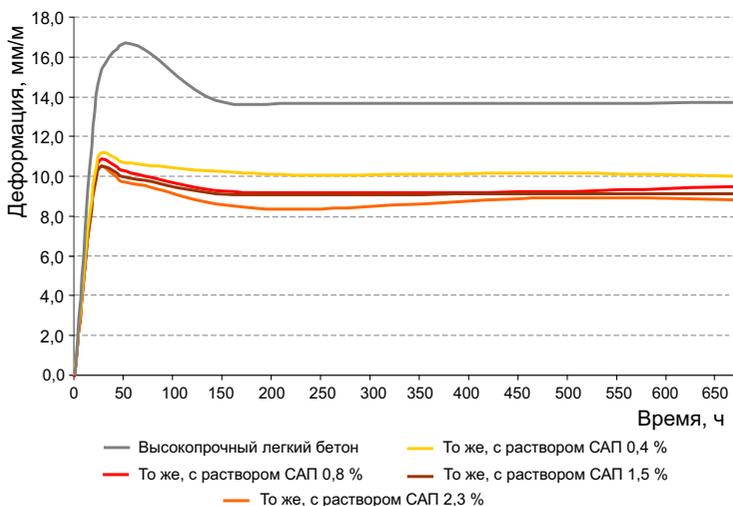


Рис. 4.33. Деформации усадки высокопрочного лёгкого бетона с САП и ускорителем твердения

С позиции физики явление «овершут» для усадки в неблагоприятных условиях можно представить следующим образом. В начальный период интенсивной потери влаги внешние слои по сравнению с внутренним объёмом высушиваются быстрее и больше, что приводит к значительной усадке. Далее влага между внутренним объёмом и внешними слоями перераспределяется, приводя к снижению влагосодержания внутреннего пространства образца и влагонасыщению внешних слоёв. Внешние слои увеличиваются в объёме, а усадка внутреннего объёма не компенсирует их набухание. По этой причине возникает «холм» на кинетической зависимости усадки. Ограниченность водосодержания образцов материала позволяет классифицировать его как систему с высокой инерцией. Это предопределяет наличие только одного «холма» на кинетических зависимостях усадки в неблагоприятных условиях, а не наличие колебательно-асимптотического процесса.

С учётом изменения реологических и физико-механических свойств варьирование содержания САП в диапазоне 0,8...1,5 % от массы портландцемента обеспечивает наилучшую величину усадки 10,1...10,2 % и 9,2...9,5 % соответственно без и с ускорителем твердения (рис. 4.34).

Использование растворов САП в качестве компонента для внутреннего ухода не приводит к существенному изменению механических свойств высокопрочного лёгкого бетона. Аналогичный вывод может быть сделан по результатам исследования энергии акустической эмиссии высокопрочного лёгкого бетона с САП при статическом нагружении (рис. 4.35).

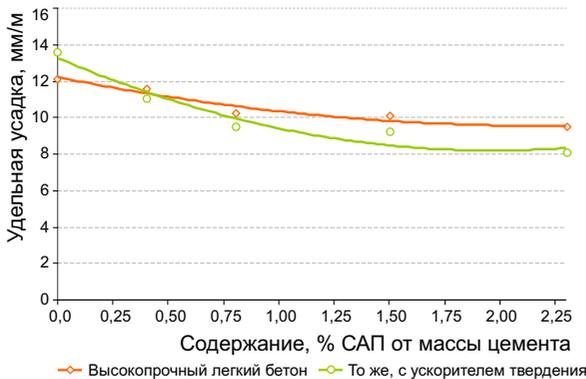


Рис. 4.34. Изменение усадки высокопрочного лёгкого бетона в возрасте 28 суток после экспозиции в условиях пониженной влажности

Кривые энергии акустической эмиссии для большинства составов с раствором САП имеют схожий вид (см. рис. 4.35). Границы каждой из выделяемых стадий находятся в близких пределах, а интенсивность приращения характеризуется идентичным наклоном кривой. Исключением является состав высокопрочного

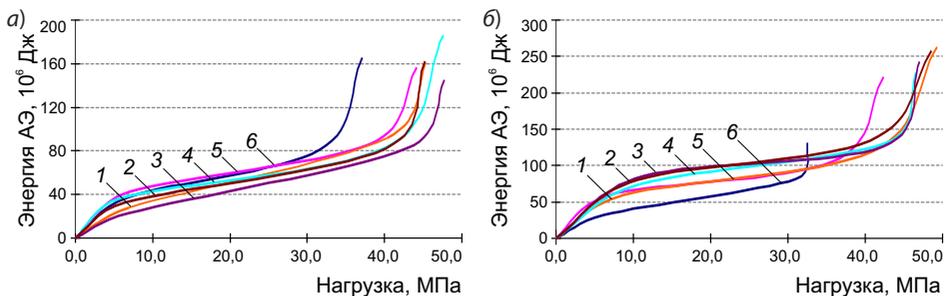


Рис. 4.35. Зависимость энергии АЭ высокопрочных лёгких бетонов от величины нагрузки при испытании на сжатие при варьировании содержания САП: а – без ускорителя твердения; б – с ускорителем твердения; 1 – концентрация раствора САП 0 %; 2 – то же, 0,4 %; 3 – то же, 0,8 %; 4 – то же, 1,5 %; 5 – то же, 2,3 %; 6 – то же, 3,9 %

лёгкого бетона с максимальным содержанием акрилатной части – 3,9 % от массы портландцемента. Стадия III, характеризующаяся интенсивным разрушением материала, наступает при меньшей внешней нагрузке, по сравнению с остальными составами. Это свидетельствует о негативном влиянии раствора САП в таком количестве, что связано с избытком акрилатного геля, сорбирующего жидкость из раствора и препятствующего гидратации и твердению портландцемента. Аналогичным образом описывается изменение энергии АЭ для составов с ускорителем твердения (см. рис. 4.35, б). Отличительной особенностью являются более высокие значения энергии АЭ и более слабое разрушение состава с 2,3 % раствора САП от массы портландцемента. В отличие от состава без ускорителя твердения, наблюдается смещение стадии III – раннее разрушение материала.

Изменение энергии акустической эмиссии от увеличения содержания раствора САП для каждого этапа (рис. 4.36) характеризуется незначительным снижением. При этом увеличение количества раствора САП в составе с ускорителем твердения приводит к отчётливому негативному эффекту. Энергия акустической эмиссии на стадиях I, II и III для таких составов имеет большее значение, чем без ускорителя твердения.

Таким образом, влияние растворов САП на дефектность высокопрочных лёгких бетонов незначительно. Предельными концентрациями для растворов САП, при которых наблюдается смещение кривой энергии АЭ, характеризующее раннее разрушение материала, является 3,9 %, а при использовании ускорителя твердения концентрация САП уменьшается до 2,3 % от массы портландцемента.

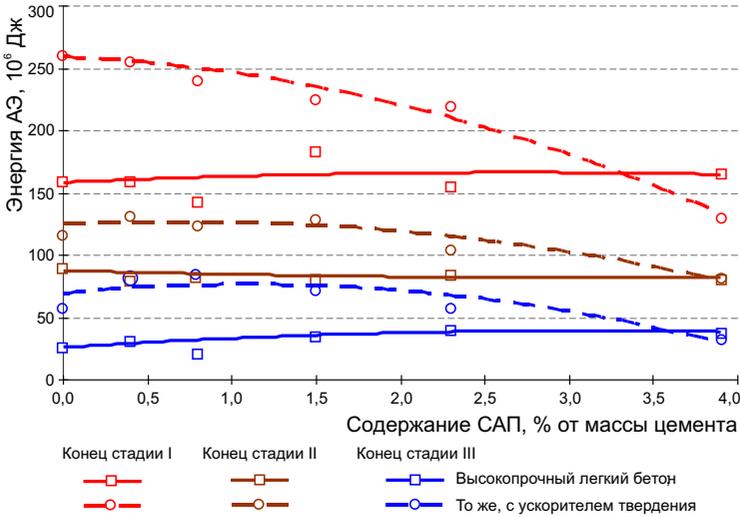


Рис. 4.36. Зависимость энергии АЭ от содержания САП

Водонепроницаемость является дополнительным свойством структуры материала, показывающим его способность сопротивляться проникновению воды. Марка по водонепроницаемости бетона может привлекаться для оценки долговечности или как требование к проницаемости материала для гарантии срока службы строительной конструкции (например, для бетонных конструкций дорожной инфраструктуры).

Высокопрочный лёгкий бетон на полых микросферах (средняя плотность 1400 кг/м^3) обладает низкими параметрами воздухопроницаемости независимо от вида модификатора (САП или фибра), соответствующими высокой марке по водонепроницаемости W20 (табл. 4.16). Это свидетельствует о формировании структуры, способной сопротивляться массообменным процессам, несмотря на высокую наполненность газовой фазой, представленной закрытыми порами из микросфер. При этом величина сопротивления проникновению воздуха высокопрочного лёгкого бетона с САП более чем в 2 и 6 раз больше, чем у контрольного состава ВПЛБ и состава с фиброй соответственно. Это подтверждает описанные ранее результаты, характеризующие плотность структуры такого бетона и положительный вклад САП в формирование его структуры.

В зависимости от расположения эксплуатируемого объекта материалы, из которых изготовлены строительные изделия, должны сопро-

Таблица 4.16

Проницаемость высокопрочного лёгкого бетона

№ п/п	Материал	Параметр воздухопроницаемости, см ³ /с	Сопrotивление проникновению воздуха, с/см ³	Марка по водонепроницаемости
1	ВПЛБ	0,0005	2050	W20
2	ВПЛБ с САП	0,0002	4840	W20
3	ВПЛФБ	0,0014	730	W20

тивляться разному типу воздействий. Стойкость к такому воздействию будет определять долговечность материала и конструкции из него, а значит, и самого здания. Исходя из этого при проектировании железобетонных конструкций необходимо учитывать воздействие на бетон различных агрессивных сред, вызывающих коррозию бетона. Традиционно [217] выделяют три основных вида коррозии:

- коррозия I вида характеризуется растворением и вымыванием продуктов гидратации портландцемента под действием мягких вод;
- коррозия II вида приводит к растворению и вымыванию продуктов взаимодействия продуктов гидратации цементного камня с химическими веществами (кислот и магниальных солей), растворенными в воде;
- коррозия III вида протекает при кристаллизации малорастворимых солей в порах и капиллярах цементного камня бетона, вызывающей значительные напряжения и разрушение структуры.

Стойкость к протеканию деструктивных процессов под действием эксплуатационной среды оценивается по изменению параметра структуры или показателя качества структуры – прочности. При этом способность материала сопротивляться внешним воздействиям можно рассчитать через величину энергии процесса деструкции U , отнесённой к работе $|\Delta ST|$, затраченной на преобразование его структуры [218]:

$$k_E = \frac{U}{|\Delta ST|}, \quad (4.35)$$

где T – температура среды;

ΔS – удельное количество энергии, поглощённое материалом:

$$\Delta S = RT \ln \left(\frac{b}{c} F_0^{-2c-1} \right), \quad (4.36)$$

R – универсальная газовая постоянная;

F_0 – начальное значение параметра, характеризующего изменение структуры, а коэффициенты a , b и c – эмпирические коэффициенты ма-

тематической модели, описывающей изменение параметра структуры после экспозиции в эксплуатационной среде за время t ,

$$k_{ст} = (a + bx)^{-1/c}, \quad (4.37)$$

которые также связаны с кинетическими константами процесса деструкции

$$n = 1 + c, k_d = \frac{b}{c} F_0^{-c} \quad (4.38)$$

и энергетического показателя

$$B_E = RT \ln \left(\frac{b}{c} F_0^{-2c-1} \right). \quad (4.39)$$

Как показано в табл. 4.17, высокопрочные лёгкие бетоны в нормальной эксплуатационной среде имеют высокую прочность при сжатии 62,9...69,2 МПа. Под действием исследуемых эксплуатационных модельных сред диапазон величин прочности снижается до 53,7...60,3 МПа при экспозиции в дистиллированной воде, 55,7...64,4 МПа – в 4 %-ном растворе $MgCl_2$ и 41,1...60,9 МПа – в 4 %-ном растворе $MgSO_4$.

Кинетические и энергетические параметры процесса деструкции приведены в табл. 4.18, из которой следует, что коэффициент химической стойкости $k_{ст}$ исследованных составов ВПЛБ и ВПЛФБ изменяется в диапазоне 0,68...0,92.

Преобразование структуры материала под действием рассмотренных эксплуатационных сред является энергетически выгодным ($\Delta S < 0$), то есть происходит переход его структуры в более устойчивое энергетическое состояние. Сочетание максимального значения k_E и минимального $|\Delta S|$ характеризует материал как наиболее стойкий к эксплуатационной среде. К таким материалам из исследуемых бетонов можно

Таблица 4.17

Прочность при сжатии составов высокопрочного лёгкого бетона, твердеющего в нормальных условиях

Состав	Прочность до экспозиции, МПа	Прочность после экспозиции в модельной среде, МПа		
		В дистиллированной воде	В 4 %-ном растворе $MgCl_2$	В 4 %-ном растворе $MgSO_4$
Базовый	60,3	53,4	57,2	44,4
	62,9	53,7	55,7	41,1
С полипропиленовой фиброй	69,0	61,2	65,5	65,5
	69,2	60,3	64,4	60,9

Примечание. В числителе – после экспозиции в течение 45 дней, в знаменателе – после экспозиции в течение 90 дней.

Таблица 4.18

Значение кинетических и энергетических параметров процесса деструкции высокопрочного лёгкого бетона, твердеющего в нормальных условиях

Состав	Среда	$k_d, \text{сут}^{-1}$	$B_E^E, \text{кДж/моль}$	$\Delta S, \text{Дж/(моль}\cdot\text{К)}$	$U, \text{кДж/моль}$	k_E	k_{ct}
Базовый	H ₂ O	$1,7 \cdot 10^{-47}$	-524	-892	262	1,004	0,89
	MgCl ₂	$3,0 \cdot 10^{-29}$	-315	-527	160	1,036	0,92
	MgSO ₄	$2,1 \cdot 10^{-12}$	-131	-223	66	1,022	0,68
С фиброй	H ₂ O	$2,0 \cdot 10^{-48}$	-538	-922	267	0,991	0,84
	MgCl ₂	$5,9 \cdot 10^{-62}$	-686	-1169	343	1,003	0,90
	MgSO ₄	$1,3 \cdot 10^{-16}$	-175	-292	89	1,041	0,85

отнести составы с наноразмерными гидросиликатами меди. При этом важно отметить, что полученные кинетические и энергетические параметры процессов деструкции разработанных бетонов не позволяют сделать однозначный вывод о недостаточной коррозионной стойкости для применения в условиях постоянного действия эксплуатационной среды.

Частотный анализ коэффициентов стойкости (рис. 4.37) показывает, что наибольшее количество значений коэффициента стойкости равно 0,85.

Одной из причин разрушения бетонов в условиях повышенной температуры и влажности окружающей среды является протекание щелочесиликатных реакций, приводящих к щелочной коррозии. Условиями протекания этих реакций, кроме высокой влажности, является наличие щелочерастворимого кремнезёма, в качестве

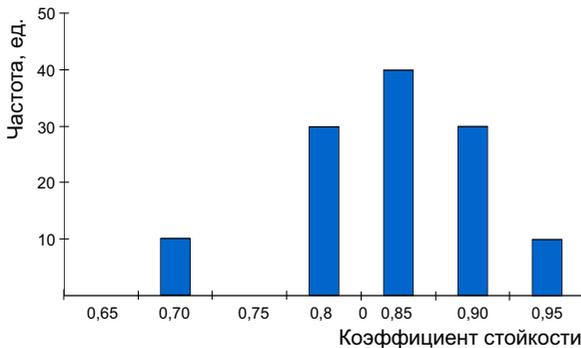


Рис. 4.37. Частотное распределение значений коэффициента стойкости

которого в разрабатываемых высокопрочных лёгких бетонах выступают микрокремнезём и алюмосиликатные микросферы, а также соединения, при диссоциации дающие ионы натрия и калия (соли, которые часто используются в качестве

добавок, регулирующих свойства бетонных смесей). В настоящее время согласно ГОСТ 8269.0–97 испытания дисперсных фаз предполагают использование различных методик. Однако в работе [219] отмечается, что химический метод (п. 4.22.2 ГОСТ 8269.0–97) оценки активности дисперсной фазы путём определения содержания щелочерастворимого кремнезёма не всегда позволяет с достаточной достоверностью прогнозировать долговечность получаемых материалов. Кроме того, существуют методики блокирования щелочесиликатных реакций в композитах на основе щелочерастворимых дисперсных фаз. Таким образом, целесообразно определение стойкости бетонов к щелочной коррозии, а не дисперсных фаз.

При нахождении бетона в водных растворах наблюдаются как его расширение, так и влажностная усадка. При изотермическом воздействии раствора щелочи происходит как расширение бетона, связанное с разбуханием кремниевой кислоты, образованной из щелочерастворимого кремнезёма, так и высвобождение кремниевой кислоты из тела бетона и иных процессов. Величина максимального расширения, регламентированная ГОСТ 8269.0–97 п. 4.22.3, составляет не более 0,1 %. Максимальная величина расширения высокопрочных лёгких бетонов приведена в табл. 4.19.

Составы высокопрочного лёгкого бетона отличаются по величине линейных деформаций в результате протекания щелочной коррозии: для бетонов, твердеющих в неблагоприятных условиях, она выше в $\approx 3,5$ раза, чем для бетонов, твердеющих в нормальных условиях. Использование всех исследованных модификаторов позволяет снизить величину линейных деформаций. Так, введение САП при $\Sigma A/C = 1,5$ % позволяет снизить

Таблица 4.19

**Среднее значение величины максимальных деформаций
высокопрочных лёгких бетонов**

№ п/п	Наименование состава	Среднее значение величины максимальных деформаций, %
При нормальных условиях твердения		
1	Базовый	0,099
2	С полипропиленовой фиброй	0,052
При неблагоприятных условиях твердения		
3	Базовый	0,345
4	С САП 1,5 %	0,185
5	С САП 2,3 %	0,368

расширение бетона в 1,86 раза, а увеличение $\Sigma A/\Pi$ до 2,3 % является неэффективным. Из рассмотренных способов модифицирования эффективно использование фибры: её применение позволяет уменьшить расширение бетона в 1,93 раза по сравнению с контрольным составом, твердевшим в аналогичных условиях.

В период эксплуатации незащищённые железобетонные изделия в условиях переменного климата воспринимают циклические воздействия, связанные с миграцией жидкости в поровом пространстве. Под действием температуры, изменение которой в естественной атмосфере в течение дня может достигать 20 °С, а на поверхности более 40 °С, изменяется влажность материала. Это способствует возникновению внутренних напряжений вследствие наличия градиента влажности по объёму строительной конструкции, что закономерно приводит к деградации структурных связей и потере прочности.

Важным для конструкционных материалов является *стойкость к различным циклическим воздействиям*, особенно к переменному увлажнению и высушиванию. При оценке сопротивляемости высокопрочных лёгких бетонов выполнены исследования двух групп образцов:

- бетонов, твердевших в нормальных условиях (базовый состав высокопрочного лёгкого бетона), с полипропиленовой фиброй ($C_{\text{ф}} = 1,25 \%$) и с суперабсорбирующим полимером при $\Sigma A/\Pi = 1,5 \%$;
- бетонов, твердеющих в неблагоприятных условиях (базовый состав с суперабсорбирующим полимером при $\Sigma A/\Pi = 1,5 \%$ и $\Sigma A/\Pi = 2,3 \%$).

За один цикл увлажнения – высушивания принято насыщение образцов водой и их обезвоживание до постоянной массы. Результаты испытаний представлены в табл. 4.20 и 4.21.

Результаты испытания высокопрочных лёгких бетонов, твердевших в нормальных условиях, показывают, что циклическое воздействие увлажнения – высушивания приводит к закономерному снижению прочности. Циклическое насыщение водой и обезвоживание образцов приводят к возникновению градиента влажности и связанных с ним внутренних напряжений, которые в свою очередь приводят к трещинообразованию и закономерному снижению прочности материала. Так, после 10 циклов увлажнения – высушивания для базового состава ВПЛБ наблюдается максимальное снижение прочности материала: среднее геометрическое снижение прочности $k'_R = \sqrt{|\delta R_{\text{изг}}| |\delta R_{\text{сж}}|}$ составляет 31,02 %. Применение различных технологических приёмов, приводящих к моди-

Таблица 4.20

Стойкость высокопрочного лёгкого бетона, твердевшего в нормальных условиях, после циклического воздействия увлажнения – высушивания

№ п/п	Наименование состава	$R_{изг}$, МПа	$\delta(R_{изг})$, %	$R_{сж}$, МПа	$\delta(R_{сж})$, %	$R_{изг}/R_{сж}$	$\delta(R_{изг}/R_{сж})$, %
1	Базовый состав	3,0	-45,4	49,6	-21,2	0,06	-30,7
2	С полипропиленовой фиброй ($C_{\phi} = 1,25$ %)	5,3	-6,5	54,1	-21,8	0,10	+19,6
3	С САП $\Sigma A/\Sigma \text{Ц} = 1,5$ %	4,6	-32,3	58,5	-19,1	0,08	-16,3

Примечания: $R_{изг}$ – прочность при изгибе; $R_{сж}$ – прочность при сжатии; δ – коэффициент, характеризующий изменение показателя относительно начального его значения; знак «-» – уменьшение, «+» – увеличение.

Таблица 4.21

Стойкость высокопрочного лёгкого бетона, твердевшего в неблагоприятных условиях, после циклического воздействия увлажнения – высушивания

№ п/п	Наименование состава	$R_{изг}$, МПа	$\delta(R_{изг})$, %	$R_{сж}$, МПа	$\delta(R_{сж})$, %	$R_{изг}/R_{сж}$	$\delta(R_{изг}/R_{сж})$, %
1	Базовый состав	2,9	-42,4	46,5	+80,1	0,06	-68,0
2	С САП $\Sigma A/\Sigma \text{Ц} = 1,5$ %	2,7	-53,2	49,5	+57,1	0,05	-70,2
3	С САП $\Sigma A/\Sigma \text{Ц} = 2,3$ %	2,8	-47,4	47,7	+47,8	0,06	-64,4

фицированию структуры материала, повышает её устойчивость к указанным циклическим воздействиям.

Для составов, твердевших в неблагоприятных условиях, видно, что наблюдается положительная динамика для прочности при сжатии (+42,7...+80,1 %) при снижении прочности при изгибе (-42,4...-53,2 %). При этом базовый состав высокопрочного лёгкого бетона, твердевший в неблагоприятных условиях, по сравнению с базовым составом ВПЛБ, твердевшим в нормальных условиях, демонстрирует максимальную величину коэффициента влияния:

$$k''_R = \sqrt{\left| \frac{\delta R_{изг, \max}}{\delta R_{изг}} \right| \left| \frac{\delta R_{сж}}{\delta R_{сж, \max}} \right|}, \quad (4.40)$$

который учитывает направление изменения прочности: для прочности при сжатии потенциальный рост по сравнению с максимальным значением $\delta R_{сж, \max}$ и минимизацию снижения прочности при изгибе. Для базового состава ВПЛБ значение коэффициента влияния $k''_R = 1,00$, для ВПЛБ, содержащего САП $\Sigma A/\Sigma \text{Ц} = 1,5$ %, $k''_R = 0,75$, а для ВПЛБ, содержащего САП $\Sigma A/\Sigma \text{Ц} = 2,3$ %, $k''_R = 0,73$.

Морозостойкость является важнейшим свойством, применяемым для оценки долговечности строительного материала. При прочих равных условиях морозостойкость взаимосвязана с открытой пористостью материала. Поэтому закономерно стремятся к уменьшению её величины как физическими способами (создание барьеров из других более плотных материалов или разработка технологических приёмов уменьшения количества воды в бетонной смеси: вакуумирование, водопоглощающие перегородки и т. д.), так и физико-химическими (нанесение соединений, повышающих гидрофобные свойства, применение пластификаторов для снижения количества воды в бетонной смеси и др.).

В соответствии с целями и задачами настоящего исследования влияние предложенных технологических решений на морозостойкость целесообразно рассмотреть для следующих условий изготовления:

- твердение в нормальных условиях;
- тепловлажностная обработка (ТВО) при заводском изготовлении сборных изделий;
- твердение в неблагоприятных условиях при послойной экструзии методом 3D-печати.

В работе [133] было показано, что использование в технологии высокопрочных лёгких бетонов комплексного наномодификатора обеспечивает уплотнение границы раздела фаз, использование САП приводит к снижению пористости за счёт увеличения степени гидратации, а фибра способствует повышению механических свойств композита. Это закономерно должно оказывать влияние на морозостойкость бетона, для модифицирования которого использованы указанные технологические приёмы.

Определение марки по морозостойкости составов на полых алюмосиликатных микросферах осуществлялось для серии образцов, твердевших в нормальных условиях (табл. 4.22).

На основе полученных результатов испытания исследуемых бетонов на морозостойкость (табл. 4.23) можно сделать следующие выводы:

- оптимальный состав высокопрочного лёгкого бетона имеет марку по морозостойкости F_{1300} ;
- наноразмерный модификатор не оказывает существенного влияния на марку по морозостойкости высокопрочного лёгкого бетона;
- хаотическое армирование высокопрочного лёгкого бетона обеспечивает повышение его сопротивления к циклическому замораживанию и оттаиванию: марка по морозостойкости увеличивается с F_{1300} до F_{1800} ;

Таблица 4.22

Результаты испытания бетона на полых алюмосиликатных микросферах

№ п/п	Показатель	Твердение в нормальных условиях	
		Высокопрочный лёгкий бетон	Наномодифицированный высокопрочный лёгкий бетон
1	q	8	8
2	$\Delta m/m, \%$	0,53	0,47
3	$X_{cp}^I, \text{МПа}$	55,7	66,1
4	$\sigma^I, \text{МПа}$	2,8	2,5
5	$X_{cp}^{II}, \text{МПа}$	53,2	61,4
6	$\sigma^{II}, \text{МПа}$	1,7	3,1
7	$V_m, \%$	0,1	0,1
8	$0,9 \cdot X_{min}^I, \text{МПа}$	55,5	66,0
9	$X_{min}^{II}, \text{МПа}$	50,0	59,4
10	Марка	F ₁ 300	F ₁ 300

Примечания: q – количество циклов замораживания/оттаивания; $\Delta m/m$ – относительное изменение массы; X_{cp}^I, X_{cp}^{II} – средняя прочность образцов контрольной и основной серии; σ^I, σ^{II} – среднеквадратическое отклонение для контрольной и основной серии образцов; V_m – коэффициент вариации; X_{min}^I, X_{min}^{II} – минимальная прочность образцов контрольной и основной серии.

Таблица 4.23

Результаты испытания бетона на полых стеклянных микросферах

№ п/п	Показатель	Твердение при ТВО	Твердение в неблагоприятных условиях	
		Высокопрочный лёгкий фибробетон	Высокопрочный лёгкий бетон с САП	Высокопрочный лёгкий фибробетон с САП
1	q	27	8	12
2	$\Delta m/m, \%$	0,62	-0,12	0,67
3	$X_{cp}^I, \text{МПа}$	48,8	47,1	58,8
4	$\sigma^I, \text{МПа}$	4,0	3,7	2,3
5	$X_{cp}^{II}, \text{МПа}$	48,4	47,4	55,7
6	$\sigma^{II}, \text{МПа}$	3,0	5,4	2,6
7	$V_m, \%$	0,1	0,1	0,1
8	$0,9 \cdot X_{min}^I, \text{МПа}$	43,8	42,1	52,8
9	$X_{min}^{II}, \text{МПа}$	48,3	47,1	55,6
10	Марка	F ₁ 800	F ₁ 300	F ₁ 400

- применение суперабсорбирующего полимера позволяет компенсировать твердение материала в неблагоприятных условиях и обеспечить получение высокопрочного лёгкого бетона с маркой по морозостойко-

сти $F_1 300$; при дополнительном армировании такого бетона можно увеличить марку по морозостойкости – $F_1 400$.

Таким образом, высокопрочный лёгкий бетон, адаптированный для соответствующих условий эксплуатации, имеет высокую стойкость к циклическим воздействиям эксплуатационных факторов.

ГЛАВА 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛЁГКИХ БЕТОНОВ

5.1. Техничко-экономическое обоснование

5.1.1. Применение для жилищного строительства

Строительство жилья является одним из важных источников для развития отрасли, требующим разработки новых технологических решений. Часто исключительно экономические критерии являются основными показателями для развития технологий вне лаборатории [220, 221]. Основанные на стоимости ресурсов и производительности оборудования такие критерии не обеспечивают объективной оценки перспективности реализации научных разработок на практике. Обоснование необходимо выполнять с учётом функциональных особенностей материалов.

Разработанные высокопрочные лёгкие бетоны обладают универсальным набором свойств, формирующих особенности их эксплуатационной применимости (табл. 5.1 и 5.2). Так, высокопрочный лёгкий бетон на порых микросферах имеет более низкую среднюю плотность по сравнению с тяжёлым бетоном, что в сочетании с высокой прочностью позволяет увеличить полезную несущую способность конструкций. Кроме того, обладая меньшей теплопроводностью, конструкции зданий и сооружений могут быть обеспечены дополнительными теплоизоляционными качествами.

Исходя из этого, в качестве основных показателей для обеспечения экономической эффективности внедрения таких материалов используем низкую среднюю плотность, высокую прочность и низкую теплопроводность.

Таким образом, алгоритм оценки экономической эффективности можно описать для зданий и сооружений, учитывая снижение общей

Таблица 5.1

Особенности конструкционных и теплоизоляционных бетонов

Характеристики	Тяжёлый бетон	Лёгкий бетон	Высокопрочный лёгкий бетон
Высокая подвижность	Да	Нет	Да
Низкая средняя плотность / Высокая пористость	Нет	Да	Да
Высокая прочность при сжатии	Да	Нет	Да
Высокая удельная прочность	Да	Нет	Да
Закрытая пористость	Да	Нет	Да
Низкая хрупкость	Нет	Да	Да
Низкая поглощающая способность	Да	Нет	Да
Высокие теплоизоляционные свойства	Нет	Да	Да
Высокая стойкость к замораживанию и оттаиванию	Да	Нет	Да

массы изделий и конструкций, позволяющее уменьшить нагрузки на основания и фундаменты и увеличить этажность здания, а следовательно, и полезную площадь.

Предположим, что планируется строительство здания высотой N_6 этажей из тяжёлого бетона средней плотностью $\rho_{\text{ср}}^6$ на участке площадью S . Масса всех конструкций из бетона составит

$$M_{\text{эт}}^6 = m_{\text{эт}}^6 N_6, \quad (5.1)$$

где $m_{\text{эт}}^6$ – базовая масса одного этажа в здании при плотности бетона $\rho_{\text{ср}}^6$; индекс «6» означает базовый бетон – тяжёлый бетон.

Таблица 5.2

Значения некоторых эксплуатационных свойств бетонов

Характеристика	Значение		
	Тяжёлый бетон	Лёгкий бетон*	Высокопрочный лёгкий бетон
Средняя плотность, кг/м ³	2300...2500	1100...2000	1300...1500
Предел прочности при изгибе, МПа	4,0...8,0	–	4,5...7,5
Предел прочности при сжатии, МПа	30,0...40,0	12,5...30,0	40,0...70,0
Удельная прочность, МПа	13,0...18,0	11,0...15,0	30,0...50,0
Водопоглощение, %	5...10	15...40	Менее 1,5
Морозостойкость, марка F, не менее	F100	F100	F300
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	1,45...1,55	0,30...1,20	Менее 0,60
Коэффициент температуропроводности, $\times 10^{-7}$ м ² /с	–	–	Менее 5,00
Удельная теплоёмкость (при $T = 25$ °С), кДж/(кг·К)	–	–	0,80...1,15

Примечание. *Лёгкий ячеистый бетон конструкционного назначения.

При этом масса этажа $m_{\text{эт}}^{\text{б}}$ при известной плотности будет зависеть от геометрических характеристик:

$$m_{\text{эт}}^{\text{б}} = S \bar{\delta} \rho_{\text{ср}}^{\text{б}}, \quad (5.2)$$

где S – площадь этажа, выполненного из бетона, рассчитанная как

$$S = 2ah + 2bh + ab, \quad (5.3)$$

где a, b, h – геометрические характеристики этажа, соответственно длина, ширина и высота;

$$\bar{\delta} = \sum_{i=1}^z \alpha_i \delta_i, \quad (5.4)$$

где $\bar{\delta}$ – приведённая толщина каркаса; δ_i – толщина i -го изделия из бетона, используемого при строительстве здания; α_i – коэффициент значимости для i -й толщины.

Масса одного этажа из бетона новой плотности

$$m_{\text{эт}}^{\text{н}} = S \bar{\delta} \rho_{\text{ср}}^{\text{н}}, \quad (5.5)$$

где индекс «н» означает новый бетон – наномодифицированный высокопрочный лёгкий бетон.

Изменение теплопроводности материала позволяет дополнительно сократить толщину ограждающих конструкций, например трёхслойной панели, обеспечивающей необходимое значение сопротивления теплопередаче $R_T = 4,5 \text{ м}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$ (для Москвы). Тогда уменьшенная толщина δ_i стеновой панели приведёт к сокращению общей массы конструкций для одного этажа:

$$\delta_{\text{сп}} = \delta_{\text{сп}0} \frac{\lambda_{\text{б}}}{\lambda_{\text{н}}}, \quad (5.6)$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности.

В соответствии с действующим нормативно-техническим документом сокращение толщины бетона в конструкции ограничено минимальным величиной k :

$$\delta'_{\text{сп}} = k \delta_{\text{сп}0}, \quad k < 1. \quad (5.7)$$

Расчёт экономической эффективности применения наномодифицированного высокопрочного лёгкого бетона, выполненного с применением предложенного метода, для строительства в Москве в ценах 2022 года представлен в табл. 5.3.

Как показывают результаты расчёта, использование наномодифицированного высокопрочного лёгкого бетона для строительства многоэтажного здания, несмотря на большую стоимость бетона, обеспечивает общий экономический эффект 23,6 % за счёт увеличения доступной площади почти на 30 %. При этом выполненный расчёт

Таблица 5.3

Результаты модельного расчёта экономической эффективности использования наномодифицированного высокопрочного лёгкого бетона в качестве конструкционного и ограждающего материала

№ п/п	Характеристика	Значение	
		Тяжёлый бетон	НМВПЛБ
1	Тип здания	Каркасно-панельный	
2	Площадь основания, кв. м	1000	
3	Базовая этажность здания	9	13
4	Класс прочности бетона	В30	
5	Средняя плотность бетона, кг/м ³	2350	1400
6	Стоимость 1 м ³ бетона, руб.	5 000,00	40 000,00'
7	Масса конструкций из бетона, млн т	3,57	
8	Коэффициент изменения плотности	1,69	
9	Объём бетона, тыс. м ³	2,28	3,06
10	Затраты на материалы, млн руб.	11,38	122,3
11	Затраты на теплоизоляционные работы, млн руб.	1,80	1,23
12	Общие затраты на 1 м ² , тыс. руб.	37,1	45,3
13	Стоимость 1 м ² возведённого объекта, тыс. руб.	150,0	
14	Общая доступна площадь этажей, м ²	9000	12000
15	Совокупные затраты на строительство**, млн руб.	334,2	543,8
16	Совокупная выручка от продажи доступных площадей, млн руб.	1 350,0	1 800,0
17	Совокупная прибыль, млн руб.	1 015,8	1 794,6
18	Экономический эффект, %	23,65	

Примечание. * Стоимость 1 м³ высокопрочного лёгкого бетона при стоимости алюмосиликатных микросфер 80,0 руб./кг; ** стоимость общестроительных работ принята за 200 % от стоимости материалов, стоимость 100 м² земли – 200 тыс. руб.

не учитывает уменьшение накладных расходов, связанных с сокращением удельного веса конструкций и соответствующих затрат на транспортные и монтажные работы. Ключевым условием для эффективного применения разработанных материалов является стоимость исходных компонентов. Наибольший вклад в формирование цены высокопрочного лёгкого бетона вносят полые микросферы, поэтому развитие промышленности по производству сопоставимых по свойствам лёгких заполнителей позволит обеспечить рынок сырьевых ресурсов доступными компонентами для получения высококачественных конструкционных строительных материалов.

5.1.2. Применение для дорожного строительства

Развитие транспортной инфраструктуры, особенно в странах и регионах с высокой плотностью населения, обуславливает высокую потребность в строительстве автомобильных и железнодорожных мостов, развязок или эстакад. Реализация этой задачи может быть достигнута за счёт применения полифункциональных материалов, к которым относятся высокопрочные лёгкие бетоны с высокой прочностью и низкой средней плотностью, позволяющих снижать материалоемкость бетонных конструкций.

Рассмотрим технико-экономическую эффективность применения высокопрочного лёгкого бетона при устройстве типовых мостовых конструкций и путепроводов в сравнении с тяжёлым бетоном. При этом прочие условия (материал основания и дорожного покрытия, опоры, дорожные балки) для рассматриваемых вариантов неизменны, а отличительными являются механические свойства рассматриваемых материалов для изготовления пролётных конструкций.

Для расчёта приняты элементы с размерами согласно табл. 5.4 для типовых мостовых сооружений с большепролётными конструкциями (рис. 5.1).

В расчёте учитываются постоянные вертикальные нагрузки от элементов мостовых конструкций, величины эксплуатационных нагрузок также приняты постоянными.

Собственный вес опоры рассчитывается с учётом плотности и объёма элемента конструкции

$$G_i = V\gamma, \quad (5.8)$$

где $\gamma = 2500 \text{ кг/м}^3$ с учётом армирования для тяжёлого бетона.

Схема распределения сил в рассматриваемой конструкции представлена на рис. 5.2.

Таблица 5.4

Характеристики элементов мостовых сооружений для устройства опорных конструкций, принятых для расчёта технико-экономической эффективности

Наименование	Габариты, см	Объём, м ³	Количество, шт.	Общий вес, т
С1-3 ^с	35×35×500	0,61	6	1,7
Н2 ^с	380×180×89	4,6	1	11,5
Ф1 ^{1с}	260×110×110	2,4	3	6,0
ФП4	418×54×14	2,8	2	7,0
Пролётный блок	1150×418×900	10,0	–	25,0

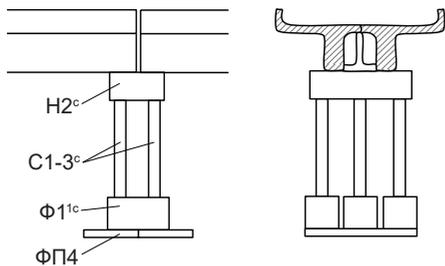


Рис. 5.1. Пример типовых элементов для устройства мостовых конструкций

В соответствии со схемой на каждую промежуточную опору действует нагрузка двух пролётных блоков, которая также определяется исходя из собственного веса. Так, нагрузка мостовой балки на промежуточную опору будет рассчитываться как

$$G_{\Pi} = V\gamma. \quad (5.9)$$

Статическая нагрузка, действующая на опору мостовых конструкций

и основание, является исходной для расчёта эффективности применения ВПЛБ для производства большепролётных конструкций, балок. При производстве наномодифицированного высокопрочного лёгкого бетона достижение прочности бетона, применяемого для изготовления сборных железобетонных конструкций, обеспечивается при средней плотности бетона 1400 кг/м³. При сохранении схемы армирования мостовых балок для расчётов принимается средняя плотность бетона 1500 кг/м³.

При этом нагрузка на основание, исходя из типового проекта конструкций, будет рассчитываться как сумма нагрузок от элементов:

$$F = G_{\Pi} + 6G_C + G_{\Pi}/2, \quad (5.10)$$

где G_{Π} – нагрузка от воздействия пролётного блока; G_{Π} – нагрузка от блока H2^c; G_C – нагрузка от блоков C1-3^c.

Результаты расчёта нагрузок для промежуточных опор, мостовых сооружений из обычного тяжёлого бетона представлены в табл. 5.5.

Таким образом, на основания под опорами (Ф1^с) при использовании тяжёлого бетона для изготовления пролётных блоков и опор действует суммарная нагрузка 914 кН. При изготовлении указанных элементов мостовых конструкций из ВПЛБ на основание действует суммарная нагрузка в 1,66 раза меньше и составляет 548 кН, что свидетельствует о высоком потенциале технико-экономической эффективности

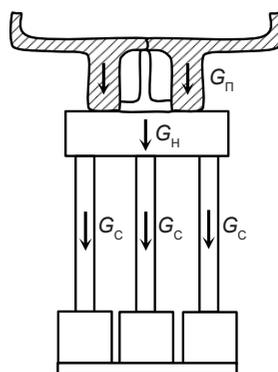


Рис. 5.2. Схема действия нагрузок элементов мостовой конструкции

Таблица 5.5

Расчёт нагрузок для мостовых конструкций для различных материалов

Материал	Элемент	Объём, м ³	Количество, шт.	G, кН	F, кН
Тяжёлый бетон, $\gamma = 2500 \text{ кг/м}^3$	C1-3 ^c	0,61	6	91,5	914
	H2 ^c	4,6	1	115,0	
	Пролётный блок	10,0	1	250,0	
НМВПЛБ, $\gamma = 1500 \text{ кг/м}^3$	C1-3 ^c	0,61	6	54,9	548
	H2 ^c	4,6	1	69	
	Пролётный блок	10,0	1	150,0	

использования высокопрочного лёгкого бетона, расчёт которого необходимо производить с учётом всех преимуществ.

Снижение нагрузки пролётного блока на опоры и основания за счёт снижения средней плотности бетона можно использовать для увеличения длины пролёта с последующей корректировкой типового проекта мостового сооружения по числу опорных конструкций. Так, нагрузка одного пролётного блока из тяжёлого бетона на опорные конструкции с типовыми размерами (см. табл. 5.4) составляет 250 кН, а изготовленного из ВПЛБ – 150 кН.

Для устройства переправы длиной 115 метров потребуется типовая мостовая конструкция с десятью пролётными блоками и девятью опорными конструкциями. Учитывая, что каждая опорная конструкция способна выдерживать нагрузку до 250 кН, при использовании наномодифицированного высокопрочного лёгкого бетона пролётный блок может быть изготовлен длиной 19,2 метра. В этом случае для строительства моста длиной 115 метров потребуется шесть пролётных блоков и пять опорных конструкций.

Техничко-экономическая эффективность применения наномодифицированного высокопрочного лёгкого бетона для дорожного строительства на примере мостовых сооружений или развязок будет зависеть от величины снижения материалоемкости конструкций для устройства рассматриваемых объектов и трудоемкости при строительстве.

Расчёт себестоимости мостовых конструкций осуществлялся с условием идентичности технологии производства бетонных элементов, необходимых для строительства сооружения, в соответствии с рассматриваемым примером. Результаты расчёта стоимости элементов мостовых конструкций из тяжёлого бетона типовых размеров и из наномодифи-

цированного высокопрочного лёгкого бетона с увеличенным пролётом представлены в табл. 5.6.

Таким образом, применение ВПЛБ позволяет снизить материалоемкость строительства мостовых сооружений на 29 % (объём бетона уменьшается с 289,5 до 205,5 м³) за счёт увеличения длины пролёта, при этом себестоимость всей конструкции изменяется на 2,9 %.

С учетом того, что снижение удельного веса бетона позволяет увеличить пролёт конструкций при сохранении несущей способности, закономерным конструкционным эффектом является уменьшение количества элементов, используемых для устройства опор мостового сооружения. Снижение количества возводимых опорных конструкций при строительстве закономерно снижает трудоемкость и стоимость работ. Результаты расчёта стоимости основных монтажных работ по строительству в соответствии с Федеральными единичными расценками на строительные работы (ФЕР-2001) представлены в табл. 5.7.

В соответствии с рассматриваемым примером мостового сооружения значительное сокращение количества опорных конструкций за счёт

Таблица 5.6

Расчёт себестоимости мостовых конструкций

Материал	Элемент	Кол-во, шт.	Объём, м ³	Стоимость, млн руб.
Пример 1				
Тяжёлый бетон	С1-3 ^с	54	32,9	0,263
	Н2 ^с	9	41,4	0,331
	Ф1 ^{1с}	27	64,8	0,518
	ФП4	18	50,4	0,403
	Пролётный блок	10	100	0,800
ВСЕГО:			289,5	2,316
Пример 2				
Тяжёлый бетон	С1-3 ^с	30	18,3	0,146
	Н2 ^с	5	23	0,184
	Ф1 ^{1с}	15	36	0,288
	ФП4	10	28	0,224
ВПЛБ	Пролётный блок	6	100,2	4,008
ВСЕГО:			205,5	4,850

Примечание. Для расчётов принята цена тяжёлого бетона В45 – 8000,00 руб./м³; для высокопрочного лёгкого бетона В45 – 40 000,00 руб./м³.

Таблица 5.7

**Расчёт стоимости работ по строительству мостовых конструкций
в ценах 2001 года**

№ п/п	Наименование вида работ	Ед. из.	Цена, тыс. руб.	Кол-во, ед.	Стоимость, млн руб.
Пример 1					
1	Устройство подушек под фундаменты опор мостов	100 м ³	17,69	50	0,891
2	Устройство бетонных подушек под фундаменты опор мостов	100 м ³	40,21	50,4	2,027
3	Устройство сборных фундаментов труб и опор мостов	100 м ³	18,34	64,8	1,189
4	Сооружение сборных железобетонных опор мостов	100 м ³	41,98	32,94	1,383
5	Установка сборных железобетонных конструкций подферменников и ригелей на мостах под автомобильные и железные дороги	100 м ³	30,15	41,4	1,248
6	Устройство железобетонных элементов пролётных строений и плит сталежелезобетонных пролётных строений мостов и путепроводов	м ³	2,00	100	0,200
ИТОГО					6,938
Пример 2					
1	Устройство подушек под фундаменты опор мостов	100 м ³	17,69	28	0,495
2	Устройство бетонных подушек под фундаменты опор мостов	100 м ³	40,21	28	1,126
3	Устройство сборных фундаментов труб и опор мостов	100 м ³	18,34	36	0,660
4	Сооружение сборных железобетонных опор мостов	100 м ³	41,98	18,3	0,768
5	Установка сборных железобетонных конструкций подферменников и ригелей на мостах под автомобильные и железные дороги	100 м ³	30,15	23	0,693
6	Устройство железобетонных элементов пролётных строений и плит сталежелезобетонных пролётных строений мостов и путепроводов	м ³	2,00	100,2	0,201
ИТОГО					3,944

удлинения пролёта позволяет уменьшить расходы на строительные работы по монтажу. Затраты на работы по строительству конструкций с использованием пролётных балок из высокопрочного лёгкого бетона по сравнению с типовыми конструкциями из тяжёлого бетона снижаются на 43,2 % (табл. 5.8).

Таблица 5.8

Затраты на работы по строительству конструкций с использованием пролётных балок

Материал	Объём бетона, м ³	Стоимость материалов, млн руб.	Стоимость работ, млн руб.	Общие затраты, млн руб.
ТБ	289,5	2,316	6,938	9,254
ВПЛБ	205,5	4,850	3,944	8,794
Изменение	84,0	2,534	2,994	0,460
Экономия, %	29,0	-109,4	43,2	5,0

Таким образом, совокупная технико-экономическая эффективность применения высокопрочного лёгкого бетона в дорожном строительстве складывается из общей себестоимости элементов конструкций и затрат на их строительство и монтаж. Результаты расчёта свидетельствуют о том, что использование высокопрочного лёгкого бетона при замене равнопрочного материала позволяет снизить стоимость строительства в пределах 5,0 %.

5.1.3. Применение для технологии 3D-печати

Для оценки эффективности применения высокопрочного лёгкого фибробетона в технологии 3D-печати рассмотрим несколько вариантов конструкций стен для возведения условного жилого объекта площадью 100 м² с планировкой согласно рис. 5.3.

Предположим, что для возведения здания используется условный 3D-принтер со следующими усредненными техническими возможностями (табл. 5.9).

Сравнительный анализ выполним при следующих особенностях конструкции и используемых материалах:

- тип 1 – конструкция из четырёх печатных слоёв опалубки из тяжёлого бетона и одного слоя пенополиуретановой засыпки в полости (рис. 5.4, а);
- тип 2 – конструкция из четырёх печатных слоёв опалубки из тяжёлого бетона, одного конструкционного слоя из бетона той же марки и одного слоя пенополиуретановой засыпки в полостях (рис. 5.4, б);
- тип 3 – конструкция из четырёх печатных слоёв несущей опалубки из высокопрочного лёгкого фибробетона и одного слоя пенополиуретановой засыпки в полости (рис. 5.4, в);
- тип 4 – конструкция из двух печатных слоёв (несущий из высокопрочного лёгкого фибробетона и защитный из тяжёлого бетона) и одного слоя пенополиуретановой засыпки в полости (рис. 5.4, г).

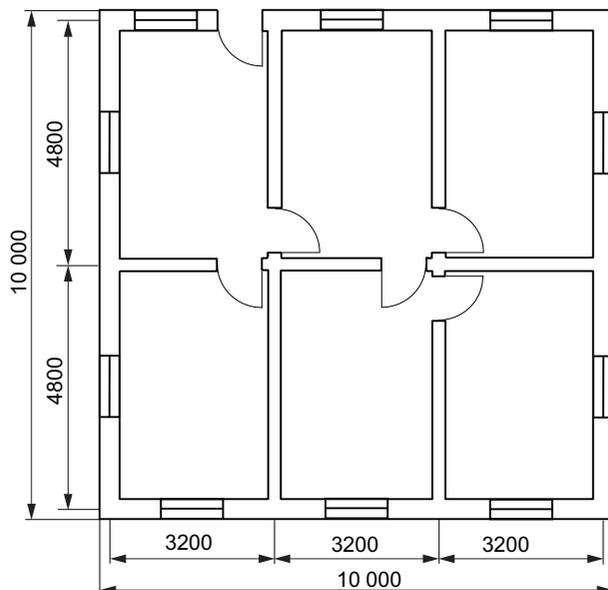


Рис. 5.3. Модельный план первого этажа условного здания, возводимого по технологии 3D-печати

Для каждого типа конструкций примем общую толщину теплоизоляционного слоя 0,1 м, выполняемого с помощью пенополиуретановой засыпки марки D50, с коэффициентом теплопроводности 0,03 Вт/м·К. Материалом для печати для типа 1 и 2, а также заливки полости является тяжёлый бетон средней плотностью 2250 кг/м³ и прочностью 25 МПа. Для типа 3 и 4 применяется высокопрочный лёгкий фибробетон средней плотностью 1400 кг/м³ и прочностью 60 МПа, за исключением защитного слоя из тяжёлого бетона (тип 4).

Таблица 5.9

Технические характеристики 3D-принтера

Учитывая прочностные свойства материалов, используемых для каждого из типов конструкций, толщина каждого из слоёв выбирается в соответствии с максимальной нагрузкой, которую способно воспринимать суммарное сечение

№ п/п	Характеристика	Значение
1	Максимальное расстояние печати, м	8,5
2	Предельная площадь печати, м ²	130
3	Скорость печати, м/мин	5-10
4	Объём подачи, л/мин	30
5	Среднее потребление энергии, кВт/час	8
6	Сечение экструзионной головки:	
	ширина, м	0,05
	высота, м	0,03

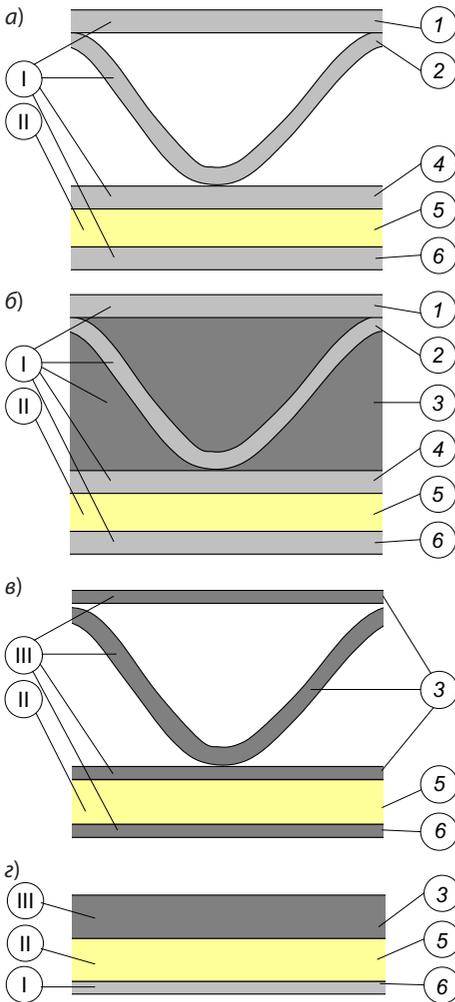


Рис. 5.4. Типы конструкционной стены для технологии 3D-печати: 1 и 6 – внешний и защитный слой; 2 и 4 – внутренний слой; 3 – несущий слой; 5 – теплоизоляционный слой; I – тяжёлый бетон; II – пенополиуретан; III – высокопрочный лёгкий фибробетон

всех несущих стен. Согласно принятому периметру здания в соответствии с рис. 5.3 и сечением экструзионной головки (см. табл. 5.9) максимальную площадь опирания имеет конструкция по типу 2 – 13,4 м², что при прочности бетона 25 МПа обеспечивает несущую способность контура стен около 33,5 тонн. Исходя из этого с учётом большей прочности ВПЛФБ толщину стен следует принять достаточной для обеспечения идентичной несущей способности (табл. 5.10). Так, для типа 3 и 4 толщина напечатанных слоёв, выполняющих несущую функцию, составит 0,1 м, то есть для каждого из слоёв для типа 3 потребуется уменьшение сечения печатающей головки по ширине до 0,025 м, для типа 4 – увеличение до 0,1 м.

Исходя из этого меняется не только конфигурация стен, но и ее суммарная толщина, что на идентичной строительной площади (рис. 5.3) формирует большую полезную площадь (табл. 5.11). При этом применение более прочных материалов в опалубке позволяет сократить расход бетона как по сравнению с типом 1, так и типом 2 почти на 30 и 55 % соответственно за счёт придания им функциональных свойств.

Преимуществом конструкции типа 3 является использование одного вида материала для «чернил» 3D-принтера, что обеспечивает большую технологичность процесса и снижение материальных затрат как при подготовке, так и во время строительства. Видно, что кон-

Таблица 5.10

Характеристика конструкции стен, возводимых методом 3D-печати

№ п/п	Назначение слоя	Толщина слоя для конструкции, м			
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4
1	Внешний-защитный	0,05	0,05	0,025	–
2	Внутренний	0,05	0,05	0,025	–
3	Несущий	–	0,15	–	0,10
4	Внутренний	0,05	0,05	0,025	–
5	Теплоизоляционный	0,10			
6	Внешний-защитный	0,05	0,05	0,025	0,025
	Общая	0,40	0,40	0,33	0,225

Таблица 5.11

**Технические особенности строительного объекта 3D-печати
при использовании различных типов конструкций стен и материалов**

№ п/п	Характеристика	Значение для конструкции			
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4
1	Длина, м	9,3		9,35	9,55
2	Ширина, м	9,3		9,35	9,55
3	Периметр внешних стен, м	37,2		37,4	38,2
4	Периметр внутренних стен, м	27,4		27,7	28,3
5	Полезная площадь, м ²	86,5		87,4	91,2
5.1	Увеличение, %	–		1,1	5,4
6	Расход материалов, м ³				
6.1	Тяжёлый бетон 25 МПа	30,62	47,7	–	2,37
6.2	Пенополиуретан D50	9,5			
6.3	ВПЛФБ 60 МПа	–	–	21,6	17,4
	Суммарное изменение, %	–	+55,6	–29,6	–37,4

Примечание. С учётом объёма окон и дверей.

струкция типа 4 позволяет увеличить полезную площадь здания почти на 5 м² (5,4 %).

Технические преимущества решений с применением высокопрочного лёгкого фибробетона (тип 3 и 4) являются предпосылкой для экономической эффективности, которая определяется разницей в стоимости материалов (табл. 5.12). Так, снижение расхода бетона при возведении более тонких конструкций при большей стоимости ВПЛФБ по сравнению с базовой технологией 3D-печати обеспечивает экономический эффект 19,1 % на 100 м² площади.

Таблица 5.12

Экономические особенности строительного объекта по технологии 3D-печати при использовании различных типов конструкций стен и материалов

№ п/п	Характеристика	Значение для конструкции			
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4
1	Стоимость материалов, тыс. руб.				
1.1	Тяжёлый бетон (25 МПа)	229,7	296,0	–	17,8
1.2	ВППЛФБ (60 МПа)	–	–	215,7	168,1
1.3	Всего	229,7	296,0	215,7	185,8
2	Разница, тыс. руб.	–	66,3	14,0	43,9
3	Экономия, %	–	-28,9	+6,1	+19,1

Примечание. Цена тяжёлого бетона для опалубки принята 7500 руб., тяжёлого бетона для заливки в полости – 3800 руб., высокопрочного лёгкого фибробетона – 10 000 руб.

Снижение расхода используемых материалов позволяет, с одной стороны, экономить на их общей стоимости, а с другой – сократить продолжительность выполнения работ с этими материалами. Расчёты показывают, что использование ВППЛФБ как в типовом варианте конструкций (тип 3), так и при сокращении количества слоёв (тип 4) обеспечивает сокращение продолжительности выполнения бетонных работ (табл. 5.13). Применение прочного материала позволяет сократить продолжительность возведения стен здания до 37,4 %.

Таким образом, использование более прочных материалов позволяет рациональнее использовать напечатанные с помощью 3D-принтера элементы, обеспечивая при этом конструкционные преимущества возводимого объекта. Очевидно, что для достижения описанного экономического эффекта в качестве строительных «чернил» могут использоваться тяжёлые высокопрочные мелкозернистые бетоны. Однако высокая средняя плотность бетона с одной стороны, затрудняет решение проблемы сохранения объёма слоёв под собствен-

Таблица 5.13

Продолжительность укладки бетонной смеси

№ п/п	Характеристика	Значение для конструкции			
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4
1	Продолжительность печати, час.		17,0	12,0	10,7
2	Стоимость работы принтера, тыс. руб.		85,0	60,0	53,3
3	Разница, тыс. руб.		–	25,2	31,8
4	Экономия, %		–	+29,6	+37,4

Примечание. Удельная стоимость одного часа работы принтера принята 5000 руб.

ным весом в процессе печати, а с другой – требует большего задела по прочности при строительстве зданий более одного этажа. В табл. 5.14 приведены отличия строительных конструкций, достигнутые за счёт применения для печати материала с более функциональными свойствами. Так, использование высокопрочного лёгкого бетона, помимо упрощения технологической задачи ровных ekstrudированных слоёв, позволяет снизить вес одного этажа более чем на 70 % при меньшей толщине стен, но идентичной несущей способности. Это не только формирует условия для более экономически обоснованного строительства многоэтажных зданий методом 3D-печати (по сравнению с высокопрочным тяжёлым бетоном), но и будет способствовать ускорению этого процесса. Кроме того, использование плотных высокомарочных бетонов вместо ВПЛФБ требует корректировки толщины теплоизоляционных слоёв. В рассмотренных вариантах, несмотря на различную толщину стен, обеспечиваются их равные несущие и теплоизоляционные характеристики.

Таким образом, очевидные конструкционные преимущества формируют общую экономическую целесообразность применения полифункциональных материалов, например высокопрочных лёгких фибробетонов, в технологии 3D-печати. В табл. 5.15 приведены экономические показатели, свидетельствующие об эффективности применения предлагаемых технологических решений.

В табл. 5.15 показано, что возведение объекта в соответствии с характеристиками согласно табл. 5.14, учитывая дополнительные накладные расходы, для типа 3 и 4 сопоставимо по стоимости с типом 1, но существенно экономически выгоднее по сравнению с типом 2. При этом, исходя из первоначального принципа, заложенного в технологию контурного строительства, – строительство доступного жилья – при стоимости 1 м² 10 тыс. руб. описанные решения имеют больший экономи-

Таблица 5.14

Свойства конструкций, зависящих от свойств материала для 3D-печати

№ п/п	Характеристика	Значение для конструкции			
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4
1	Удельный вес одного этажа, т	69,4	107,7	30,7	29,3
2	Толщины стен, м	0,40	0,40	0,33	0,225
3	Сопrotивление теплопередаче внешней стены, м ² ·°C/Вт	3,49	3,57	3,52	3,54

Таблица 5.15

Экономическая эффективность применения полифункциональных материалов в 3D-печати

№ п/п	Характеристика	Значение для конструкции			
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4
1	Стоимость строительства одного этажа*, тыс. руб.	344,5	444,1	323,5	278,7
2	Полезная площадь одного этажа, м ²	86,5		87,4	91,2
3	Стоимость одного этажа**, тыс. руб.	864,9		874,2	912,0
4	Выручка, тыс. руб.	520,4	420,8	550,7	633,3
5	Экономический эффект, тыс. руб.	-	-	129,9	212,5
6	Экономический эффект, %			30,9	50,5

Примечания: * с учётом накладных расходов 50 % от стоимости материалов и работ; ** цена одного м² принята 10 тыс. руб.

ческий потенциал, чем распространенные сегодня технологии. Суммарный экономический эффект для рассматриваемого условного объекта площадью 100 м² составляет более 50 %.

Тем не менее, несмотря на технико-экономическую обоснованность использования рассмотренных материалов, необходимо отметить, что нерешенные вопросы обеспечения монолитности (связности слоёв) и реализации армирования в технологии 3D-печати формулируют задачи по поиску комплексных рецептурно-технологических решений для строительства многоэтажных зданий.

5.2. Опыт применения

В 2012 году на заводе ООО «Бетиар-22» в рамках производственных испытаний разработанные составы высокопрочных лёгких бетонов были использованы для изготовления ригелей размером 1980×370×200 мм с проектной средней плотностью 1500 кг/м³.

Приготовление бетона производили на действующем оборудовании без дополнительной модификации или усовершенствования узлов агрегатов. Для изготовления трех ригелей использовался состав со следующим расходом компонентов на 0,60 м³: портландцемент – 372 кг, микрокремнезём – 62 кг, молотый кварцевый песок – 43 кг, песок фракционированный – 104,85 кг, алюмосиликатные микросферы – 146,7 кг, пластификатор «Melflux 1641F» – 3,53 кг, вода – 139 кг.

Перемешивание компонентов осуществлялось на бетоносмесителе отечественного производства «СБ-138Б» мощностью 37 кВт и часто-

той вращения вала 22,7 об./мин. Укладка бетонной смеси проводилась с помощью бетоноукладчика в формы из опалубочной фанеры. Приготовленная бетонная смесь имела высокую подвижность, что исключило необходимость применения принудительного уплотнения.

Отформованные изделия подвергались тепловлажностной обработке в соответствии с производственным режимом при температуре выдержки 80 °С. Испытания образцов-кубов 100×100×100 мм из смеси основной формовки показали, что приготовленный бетон обладает пределом прочности при сжатии 40...42 МПа в возрасте 1 сутки после ТВО. Средняя плотность бетона составила 1518±43 кг/м³, предел прочности при сжатии – 55±2 МПа, что соответствует марке М550 (В40). Фотография готовых изделий приведена на рис. 5.5.



Рис. 5.5. Распалубка готовых изделий из высокопрочного лёгкого бетона

Результаты промышленной апробации высокопрочного лёгкого бетона в технологии производства изделий из железобетона показали, что разработанные составы могут быть адаптированы под промышленное производство на существующем оборудовании. Для этого потребуется увеличение количества складов, промежуточных бункеров и дозирующих узлов для новых компонентов бетона. Для создания вы-

сокоподвижных смесей необходимо усовершенствование смесительного оборудования для увеличения скорости перемешивания.

Составы высокопрочных лёгких фибробетонов были использованы при опытном внедрении на предприятии в г. Тамкуан (Тамдао) провинции Виньфук Социалистической Республики Вьетнам. В компании «Minh Tien» изготовлены три железобетонные балки размером 2000×300×300 мм из составов с проектной средней плотностью 1400 кг/м³.

Для производства изделий использовался портландцемент СЕМ I 42,5 N «Бут Шон», микрокремнезём «АС Micro SF 90» (Китай), фракционированный и молотый речной песок реки «Ло» (Вьетнам), полые стеклянные микросферы компании «Shanxi Hainuo Technology» (Китай), пластификатор «Polycarboxylate GLENIUM SP8S» (Япония), полипропиленовая фибра «Grace MicroFiber» (США). Указанные полые стеклянные

микросферы и пластификатор являются техническими аналогами применяемым в работе компонентам.

Использован состав со следующим соотношением компонентов, мас. %:

- Портландцемент – 44,0;
- Полые стеклянные микросферы – 18,3;
- Фракционированный кварцевый песок – 9,3;
- Микрокремнезем – 7,7;
- Песок молотый – 4,0;
- Полипропиленовая фибра – 0,6;
- Пластификатор – 0,5;
- Вода – остальное.

Требования к используемым сырьевым материалам соответствовали требованиям действующих нормативов и технических стандартов Социалистической Республики Вьетнам. Подвижность бетонной смеси по диаметру расплыва усечённого конуса на встряхивающем столике составила 170 мм. Пределы прочности при изгибе и сжатии образцов-балочек 40×40×160 мм, отформованных из смеси от общего объёма, в возрасте 28 суток твердения в нормальных условия составили $6,0 \pm 0,2$ МПа и $61,3 \pm 2,4$ МПа соответственно. Средняя плотность бетона 1420 ± 15 кг/м³.

По результатам совместного международного научного проекта НИУ МГСУ и ВИСМ (VIBM, г. Ханой, Вьетнам) коллективом ученых Вьетнамского института строительных материалов получены высокопрочные лёгкие бетоны на основе местных сырьевых материалов (средняя плотность 1300...1600 кг/м³, прочность 40...70 МПа) [222]. Для приготовления ВПЛБ использовались: местный портландцемент ПЦ40 (675 кг), речной фракционный песок, ценосферы, отобранные из золы-уноса ТЭС «Фалай», измельчённый гранулированный доменный шлак, микро- и нанокремнезём, пластификатор, армирующие волокна и вода с водовязущим отношением В/ВВ = 0,35.

В рамках проекта для производственных испытаний ВПЛБ на технологической линии завода «Суан Май» (г. Ханой) изготавливались напрягаемые железобетонные изделия:

- Т-образная балка с пролётом 12 000 мм (рис. 5.6);
- плита перекрытия с площадью 12 000×1000 мм (рис. 5.7);
- плита перекрытия с площадью 3300×800 мм (рис. 5.8).



Рис. 5.6. Т-образная балка из ВПЛБ с пролётом 12 000 мм

Изготовленные изделия с проектной средней плотностью 1400 кг/м^3 и прочностью 40 МПа подвергались оценке технических характеристик и сравнительному анализу с обычным бетоном. При испытании определялись нагрузка полного разрушения конструкции, нагрузка при допустимой величине раскрытия трещин и величина прогиба (табл. 5.16).

Изделия из ВПЛБ планируется использовать в 2022 году при строительстве новых лабораторных корпусов ВИСМ в городе Ханой.



Рис. 5.7. Плита перекрытия из ВПЛБ размером 12 000x1000 мм



Рис. 5.8. Испытания плиты перекрытия из ВПЛБ (3280x800x140 мм)

Таблица 5.16

Результаты производственных испытаний ВПЛБ во Вьетнаме

Состав	Марка по плотности	F_1 , кН	F_2 , кН	F_p , кН	L_p , мм
Тяжёлый бетон	D2400	54,6	72,7	82,4	54,1
Высокопрочный лёгкий бетон	D1400	25,1	53,7	62,4	28,6

Примечания: F_1 – нагрузка, при которой образуется первая трещина; F_2 – нагрузка, при достижении предела допустимого прогиба; F_p – разрушающая нагрузка; L_p – прогиб при разрушении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие технологии строительных материалов требует совершенствования подходов к получению заданных свойств. Становление современной технологии бетонов многие годы складывается с учетом новейших достижений в использовании новых компонентов и технологических приёмов. Переход к применению полифункциональных бетонов представляется следующим этапом эволюции бетоноведения и технологий производства бетонных и железобетонных изделий.

В монографии изложены методологические подходы к разработке высокопрочных лёгких бетонов, которые применимы не только к строительным материалам на легких заполнителях (включая специальные заполнители, такие как стеклянные или алюмосиликатные микросферы), но и к другим строительным материалам на портландцементе. Выявленные закономерности структурообразования цементно-минеральных систем, технологических свойств бетонной смеси и эксплуатационных свойств высокопрочных лёгких бетонов могут быть также установлены и при исследовании других материалов.

Результаты, представленные в работе, имеют не только научный интерес, но и практическую значимость, которая в том числе заключается в необходимости корректировки нормативной технической документации. В качестве примеров обоснования эффективности использования высокопрочных лёгких бетонов с высокой удельной прочностью приводятся технико-экономические оценки для различных областей применения в строительстве. Демонстрируются результаты промышленной апробация разработанной технологии на основе минерально-сырьевой базы России и Вьетнама.

Авторы выражают благодарность рецензентам за обсуждения отдельных разделов, методик анализа структурообразования и ценные замечания, которые значительно улучшили монографию.

Библиографический список

1. *Bogas J. A., Real S., Ferrer B.* Biphasic carbonation behaviour of structural lightweight aggregate concrete produced with different types of binder // *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 71. P. 110–121.
2. *Real S., Bogas J. A., Pontes J.* Chloride migration in structural lightweight aggregate concrete produced with different binders // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 98. P. 425–436.
3. *Wasserman R., Bentur A.* Effect of lightweight fly ash aggregate microstructure on the strength of concretes // *Cement and Concrete Research*. 1997. Vol. 27. Iss. 4. P. 525–537.
4. *Баженов Ю. М., Гарькина И. А., Данилов А. М., Королев Е. В.* Системный анализ в строительном материаловедении. М.: МГСУ, 2012. 152 с.
5. *Лесовик В. С.* Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении. Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2016. 287 с.
6. *Лесовик В. С., Фомина Е. В., Айзенштадт А. М.* Некоторые аспекты техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // *Строительные материалы*. 2019. № 1-2. С. 100–106.
7. *Лесовик В. С., Володченко А. А.* К проблеме техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2015. № 4. С. 38–41.
8. *Королев Е. В.* Техничко-экономическая эффективность новых технологических решений. Анализ и совершенствование // *Строительные материалы*. 2017. № 3. С. 85–89.
9. *Королев Е. В., Гришина А. Н., Айзенштадт А. М., Данилов А. М.* Big data и параметры структуры материалов // *Региональная архитектура и строительство*. 2021. № 3 (48). С. 5–15.
10. *Бобрышев А. Н., Козомазов В. Н., Бабин Л. О., Соломатов В. И.* Синергетика композиционных материалов / под ред. В. И. Соломатова. Липецк.: НПО «Ориус», 1994. 153 с.
11. *Бобрышев А. Н., Ерофеев В. Т., Козомазов В. Н.* Физика и синергетика дисперсно-неупорядоченных конденсированных композитных систем. СПб: Наука, 2012. 476 с.
12. *Бобрышев А. Н., Козомазов В. Н., Козомазов Р. В., Лахно А. В., Тучков В. В.* Прочность и долговечность полимерных композиционных материалов. Липецк: РПГФ «Юлис», 2006. 170 с.

13. Бобрышев А. Н., Козомазов В. Н., Авдеев Р. И., Туманова Н. Н. Топологические особенности кинетических процессов // Конденсированные среды и межфазные границы. 2003. Т. 5. № 2. С. 120–125.

14. Туманова Н. Н. Анализ кинетических процессов для оценки структуры и свойств композитных строительных материалов: дис. ... канд. техн. наук. Пенза.: ПГУАС, 2004. 130 с.

15. Королев Е. В. Техничко-экономическая эффективность и перспективные строительные материалы // Региональная архитектура и строительство. 2013. № 3 (17). С. 9–15.

16. Kenneth S., Harmon P. E. Engineering properties of structural lightweight concrete. United States: Carolinastalite company, 2006. 100 p.

17. Thomason J. C. Developmen of high performace structural lightweight portland cement concrete, 2008. 150 p.

18. Holm T. A., Bremner T. W. State-of-the-Art Report on High-Strength, High-Durability Structural Low-Density Concrete for Applications in Severe Marine Environments, 2000. 160 p.

19. Zareef M. A. M. E. Dissertation. Conceptual And Structural Design Of Buildings Made Of Lightweight And Infra-Lightweight Concrete. Berlin, 2010. 119 p.

20. Clarke J. L. Structural Lightweight Aggregate Concrete. Taylor & Francis ELibrary, 2005. 110 p.

21. Звездов А. И., Фаликман В. Р. Высокопрочные лёгкие бетоны в строительстве и архитектуре // Жилищное строительство. 2008. № 5. С. 2–6.

22. Document BE96 - 3942/R14. Structural LWAC: Specification and guideline for materials and production, 2000. 69 p.

23. Горин В. М., Шиянов Л. П. Керамзит и керамзитобетон в жилищном строительстве и коммунальном хозяйстве // Строительные материалы. 2007. №10. С. 98–100.

24. Rossignolo J. A., Agnesini M. V. C., Morais J. A. Properties of highperformance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates // Cement and Concrete Composites. 2003. Vol. 25. P. 77–82.

25. Патент РФ 2355656. Бетонная смесь / Пономарев А. Н., Юдович М. И. Опубл. 20.05.2009. 3 с. Бюл. № 14.

26. Фиговский О. Л., Бейлин Д. А., Пономарев А. Н. Успехи применения нанотехнологий в строительстве // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. М.: ЦНТ «НаноСтроительство». 2012. № 3. С. 6–22.

27. Chandra S., Berntsson L. Lightweight Aggregate Concrete Science, Technology and Applications. Noyes Publications/William Andrew Publishing, Norwich, UK, USA. 2002. 100 p.

28. Technical Report Ishikawajimahirima // Evaluation of fatigue durability precast PC slab lightweight high-strength. 2004. Vol. 44. Iss. 2. P. 83–90.

29. Kim M. O., Qian X., Lee M. K., Park W.-S., Jeong S. T., Oh N. S. Determination of Structural Lightweight Concrete Mix Proportion for Floating Concrete Structures // Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers. 2017. Vol. 29. Iss. 6. P. 315–325.

30. *Jiang D., Tan K. H., Ong K. C. G., Heng S., Dai J., Lim B. K., Ang K. K.* Behavior of prestressed concrete self-stabilizing floating fuel storage tanks // Proc. of CIGOS. Ho Chi Minh City. 2017.
31. *Chia K. S., Zhang M. H.* Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete // Cement and Concrete Composites. 2002. Vol. 32. Iss. 4. P. 639–645.
32. *Wee T. H.* Recent developments in high strength lightweight concrete with and without aggregates. in: N. Banthia, T. Uomoto, A. Bentur, S.P. Shah (Eds.), Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications and Mindess Symposium, Proceedings of 3rd International Conference, Vancouver, British Columbia, Canada. 2005. 97 p.
33. *Zhang M. H., Gjorv O. E.* Permeability of high-strength lightweight concrete // CI Materials Journal. 1991. Vol. 88. № 5. P. 463–469.
34. *Фаликман В. Р., Сорокин Ю. В., Горячев О. М.* Высокопрочный лёгкий бетон: технология и свойства // Бетон и железобетон. 2005. № 2. С. 8–11.
35. *Nadesan Manu S., Dinakar P.* Mechanical properties of sintered fly ash light weight aggregate concrete // 14th NCB International Seminar on Cement and Building Materials. 2015. P. 1–5.
36. *Nadesan M.S., Dinakar P.* Structural concrete using sintered flyash lightweight aggregate: A review // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 154. P. 928–944.
37. *Cerny V., Kocianova M., Drochytka R.* Possibilities of Lightweight High Strength Concrete Production from Sintered Fly Ash Aggregate // Procedia Engineering. 2017. Vol. 195. P. 9–16.
38. *Mehta P. K., Monteiro P. J. M.* Concrete: microstructure, properties, and materials (3rd ed.). McGraw-Hill. New York. 2006. P. 1–7.
39. Functional classification of lightweight concrete. Recommendations LC2, second ed., RILEM. CEV.1978.
40. *Иванов И. А.* Лёгкие бетоны на искусственных заполнителях. М.: Стройиздат, 1993. 182 с.
41. *Ицкович С. М., Чумаков Л. Д., Баженов Ю. М.* Технология заполнителей бетона. М.: Высшая школа, 1991. 272 с.
42. *Макридин Н. И., Максимова И. Н.* Искусственные пористые заполнители и лёгкие бетоны. Пенза: ПГУАС, 2013. 324 с.
43. *Wasserman R., Bentur A.* Interfacial interactions in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength // Cement and Concrete Composites. 1996. Vol. 18. P. 67–76.
44. *Guneyisi E., Gesoglu M., Pursunlu O., Mermerdas K.* Durability aspect of concretes composed of cold bonded and sintered flyash lightweight aggregates // Composites Part B. 2013. Vol. 53. P. 258–266.
45. *Holm T. A., Bremner T. W.* State-of-the-art Report on High-strength, High-durability Structural Low-density Concrete for Applications in Severe Marine Environments, US Army Corps of Engineers. Report No. ERDC/SL TR-00-3 // Engineer Research and Development Center. 2000.

46. Zhang M. H., Gjorv E. Pozzolanic reactivity of lightweight aggregates // *Cement and Concrete Research*. 1990. Vol. 20. P. 884–890.
47. Kong L., Hou L., Du Y. Chemical reactivity of lightweight aggregate in cement paste // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 64. P. 22–27.
48. Haque M. N., Al-Khaiat H., Kayali O. Strength and durability of lightweight concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2004. Vol. 26. P. 307–314.
49. Давидюк А. Н. Лёгкие бетоны на стеклогранулятах – будущее ограждающих конструкций // *Технологии бетонов*. 2015. № 9–10. С. 17–20.
50. Давидюк А. Н., Давидюк А. А. Прочностные свойства лёгких бетонов на стекловидных заполнителях для многослойных ограждающих конструкций // *Бетон и железобетон*. 2008. № 6. С. 9–13.
51. Gesoğlu M., Guneyisi E., Ozturan T., Oznur O. H., Asaad D. S. Permeation characteristics of self compacting concrete made with partially substitution of natural aggregates with rounded lightweight aggregates // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 59. P. 1–9.
52. Real S., Bogas J. A. Oxygen permeability of structural lightweight aggregate concrete // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 137. P. 21–34.
53. Фиговский О. Л., Бейлин Д. А., Пономарев А. Н. Успехи применения нанотехнологий в строительстве // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. М.: ЦНТ «НаноСтроительство». 2012. № 3. С. 6–22.
54. Wang J.-Y., Zhang M.-H., Li W., Chia K.-S., Liew R. J. Y. Stability of cenospheres in lightweight cement composites in terms of alkali-silica reaction // *Cement and Concrete Research*. 2012. Vol. 42. Iss. 5. P. 721–727.
55. ASTM C1260–14, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
56. Zhang M. H., Gjorv O. E. Characteristics of lightweight aggregates for high strength concrete // *ACI Materials Journal*. 1991. Vol. 88. Iss. 2. P. 150–158.
57. Teo D. C. L., Mannan M. A., Kurian V. J. Structural concrete using oil palm shell (OPS) as lightweight aggregate // *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 2006. Vol. 30. P. 251–257.
58. Mannan M. A., Ganapathy C. Concrete from an agricultural waste-oil palm shell (OPS) // *Building and Environment*. 2004. Vol. 39. P. 441–448.
59. Okpala D. C. Palm kernel shell as a lightweight aggregate in concrete // *Building and Environment*. 1990. Iss. 25. P. 291–296.
60. Basri H. B., Mannan M. A., Zain M. F. M. Concrete using waste oil palm shells as aggregate // *Cement and Concrete Research*. 1999. Iss. 29. P. 619–622.
61. Mannan M. A., Basri H. B., Zain M. F. M., Islam M. N. Effect of curing conditions on the properties of OPS-concrete // *Building and Environment*. 2002. Vol. 37. P. 1167–1171.
62. Teo D. C. L., Mannan M. A., Kurian V. J. Durability of lightweight OPS concrete under different curing conditions // *ACI RILEM*. 2009. Vol. 234. P. 737–746.
63. Mannan M. A., Ganapathy C. Engineering properties of concrete with oil palm shell as coarse aggregate // *Construction and Building Materials*. 2002. Vol. 16. P. 29–34.

64. *Okafor F. O.* Palm kernel shell as a lightweight aggregate for concrete // *Cement and Concrete Research*. 1988. Vol. 18. P. 901–910.
65. *Shafiqh P., Jumaat M. Z., Mahmud H.* Oil palm shell as a lightweight aggregate for production high strength lightweight concrete // *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25. Iss. 4. P. 1848–1853.
66. *Holm T. A.* Performance of structural lightweight concrete in a marine environment // *American Concrete Institute*. 1980. Vol. 65. P. 589–608.
67. *Seabrook P. I., Wilson H. S.* High strength lightweight concrete for use in offshore structures: utilisation of fly ash and silica fume // *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1988. Vol. 10. № 3. P. 183–192.
68. *Mays G. C., Barnes R. A.* The performance of lightweight aggregate concrete structures in service // *The Structural Engineer*. 1991. Vol. 69. № 20. P. 351–361.
69. ESCSI - Lightweight Concrete: History, Application & Economics, Expanded Shale Clay and Slate Institute. Salt Lake City, Utah ESCSI Publications, USA. 1971. 44 p.
70. *Wu Y., Wang J. Y., Monteiro P. J., Zhang M. H.* Development of ultra-lightweight cement composites with low thermal conductivity and high specific strength for energy efficient buildings // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 87. P. 100–112.
71. Патент РФ 2700997. Теплоизоляционный конструкционный бетон / Гочачко А. П. Опубл. 24.09.2019. 3 с.
72. Патент РФ 2618819. Композиция для изготовления облегченных архитектурных изделий / Шангина Н. Н., Харитонов А. М., Тучинский С. Г., Рябова А. А. Опубл. 05.05.2009. 2 с.
73. Патент РФ 2515450. Высокопрочный лёгкий бетон / Королев Е. В., Иноземцев А. С. Опубл. 10.05.2014. 5 с.
74. Патент РФ 2660705. Сырьевая смесь для получения легкого бетон / Фролова М. А., Данилов В. Е., Айзенштадт А. М., Сухоешкин В. Е. Опубл. 09.07.2018. 5 с.
75. Патент РФ 2553685. Состав для изготовления легкого бетона, способ приготовления состава для изготовления легкого бетона и способ изготовления легкого бетона (варианты) / Пикулин И. В., Дрожжин В. С., Ховрин А. Н., Куликов С. А. 20.06.2015. 10 с.
76. Патент РФ 2473518. Сырьевая смесь для изготовления изделий из легкого бетона / Васильовская Н. Г., Енджиевская И. Г. Опубл. 27.01.2013. 5 с.
77. Патент РФ 2616307. Легкий бетон на основе отходов минерального сырья / Закревская Л. В., Журавлев А. В., Дворников Р. М., Исмаилов А. Н., Гавриленко А. А. Опубл. 11.04.2017. 1 с.
78. Патент РФ 2738072. Сырьевая смесь для производства легкого золобетона / Смирнов Ю. Д., Сучкова М. В., Сверчков И. П., Матвеева В. А. Опубл. 07.12.2020. 8 с.
79. Патент РФ 2548303. Высокопрочный легкий фибробетон / Иноземцев А. С., Королев Е. В. Опубл. 20.04.2015. 6 с.
80. Патент РФ 2734485. Сырьевая смесь для легкого фибробетона / Пухаренко Ю. В., Пантелеев Д. А., Пухаренко О. Ю., Фролов Н. В. Опубл. 19.10.2020. 10 с.

81. Патент РФ 2198861. Легкий мелкозернистый поризованный бетон / Галиакбаров Р. Г., Антонов В. Г., Соцкая И. М. Оpubл. 20.02.2003. 6 с.
82. Патент РФ 2277076. Легкий бетон / Котляр В. Д., Мальцев Е. В., Бондарюк А. Г., Белодедов А. А., Колдомасова И. В., Козлов Г. А. Иванюта Г. Н., Козлов А. В., Лапунова К. А. Оpubл. 27.05.2006. 5 с.
83. Патент РФ 2289557. Легкий бетон / Бондарюк А. Г., Иванюта Г. Н., Козлов А. В., Котляр В. Д., Лапунова К. А., Лотошникова Е. О., Щеголькова Е. Н. Оpubл. 20.12.2006. 3 с.
84. Патент РФ 2154619. Легкий бетон / Котляр В. Д., Шуйский А. И., Козлов А. В., Мальцев Е. В. Оpubл. 20.08.2000. 5 с.
85. Патент РФ 2718443. Наномодифицированный высокопрочный легкий бетон / Иноземцев А. С., Королев Е. В. Оpubл. 06.04.2000. 7 с.
86. Патент РФ 2515631. Теплоизоляционно-конструкционная кладочная смесь на основе легкого заполнителя / Строкова В. В., Клочков А. В., Павленко Н. В., Жерновский И. В., Нелюбова В. В. Оpubл. 20.05.2014. 5 с.
87. Патент РФ 2674484. Сырьевая смесь для жаростойкого теплоизоляционного торкрет-бетона / Богусевич Д. В., Ахмедьянов Р. М., Трофимов Б. Я. Оpubл. 11.12.2018. 7 с.
88. Патент РФ 2277071. Способ изготовления бетона или строительного раствора с растительным наполнителем / Хен Х. Оpubл. 27.05.2006. 8 с.
89. Патент РФ 2586354. Облегченная сухая кладочная смесь / Семёнов В. С., Розовская Т. А. Оpubл. 10.06.2016. 8 с.
90. Патент РФ 2708776. Звукопоглощающий бетон / Смирнова О. М., Черенько А. В., Шибанов М. Д. Оpubл. 11.12.2019. 11 с.
91. Патент РФ 2382015. Смесь для изготовления керамзитобетона / Лесовик В. С., Савин Д. В., Строкова В. В., Толыпина Н. М. Оpubл. 20.02.2010. 4 с.
92. Патент РФ 2528323. Способ приготовления облегченного кладочного раствора и композиция для облегченного кладочного раствора / Орешкин Д. В., Семёнов В. С., Розовская Т. А., Капцов П. В., Николаева М. В. Оpubл. 10.09.2014. 9 с.
93. *Wee T. H.* Recent developments in lightweight high strength concrete with and without aggregates // *The Third International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, University of British Columbia, Vancouver, Canada.* 2005. P. 22–24.
94. *Баженов Ю. М., Гарькина И. А., Данилов А. М., Королев Е. В.* Системный анализ в строительном материаловедении. М.: МГСУ, 2012. 152 с.
95. *Данилов А. М., Гарькина И. А., Королев Е. В., Соколова Ю. А.* Системный подход к разработке и управлению качеством строительных материалов. М.: Палеотип, 2006. 188 с.
96. *Данилов А. М., Гарькина И. А.* Теория систем: математические методы строительного материаловедения: монография. Пенза: ПГУАС, 2008. 239 с.
97. *Антонов А. В.* Системный анализ. М.: Высшая школа, 2004. 454 с.
98. *Попов К. Н., Каддо М. Б., Кульков О. В.* Оценка качества строительных материалов. М.: Высшая школа, 2004. 287 с.

99. ГОСТ ISO 9000–2011. Межгосударственный стандарт. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.
100. *Королев Е. В.* Техничко-экономическая эффективность новых технологических решений. Анализ и совершенствование // *Строительные материалы*. 2017. № 3. С. 85–89.
101. *Королев Е. В., Киселев Д. Г., Альбакасов А. И.* Оценка эффективности технологии наномодифицирования серных вяжущих веществ по показателям эксплуатационных свойств // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2013. Т. 5. № 3. С. 60–70.
102. *Королев Е. В.* Термодинамическое условие сохранности слоя вяжущего вещества // *Строительные материалы*. 2014. № 10. С. 40–43.
103. *Королев Е. В., Гришина А. Н., Айзенштадт А. М., Данилов А. М.* BIG data и параметры структуры материалов // *Региональная архитектура и строительство*. 2021. № 3 (48). С. 5–15.
104. *Королев Е. В., Баженов Ю. М., Альбакасов А. И.* Радиационно-защитные и химически стойкие серные строительные материалы. Пенза–Оренбург: ИПК ОГУ, 2010. 364 с.
105. *Баженов Ю. М.* Технология бетона. М., 2011. 524 с.
106. *Карнаков В. А., Ежова Я. В., Марчук С. Д., Донской В. И., Щербаченко Л. А.* Аномальные свойства адсорбированных пленок воды в слоистых минералах // *Физика твердого тела*. 2006. Т. 48. №. 11. С. 1946–1948.
107. *Макеева Т. Г.* Определение плотности связанной воды дисперсных грунтов прямыми и косвенными методами // *Естественные и технические науки*. 2010. №5. С. 149–167.
108. *Лисичкин Г. В., Фадеев А. Ю., Сердан А. А., Нестеренко П. Н., Мингалев П. Г., Фурман Д. Б.* Химия привитых поверхностных соединений. М.: Физматлит, 2003. 592 с.
109. *Ананьев С. В.* Состав, топологическая структура и реотехнологические свойства реологических матриц для производства бетонов нового поколения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пенза: ПГУАС, 2011. 18 с.
110. *Калашников В. И.* Терминология науки о бетоне нового поколения // *Строительные материалы*. 2011. № 3. С. 103–106.
111. *Яглом, И. М.* Проблема тринадцати шаров. Киев: Вища школа, 1975. 84 с.
112. *Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогов А. А.* Синергетика и фракталы в материаловедении М.: Наука, 1994. 383 с.
113. *Пухаренко Ю. В.* Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов // *Строительные материалы*. 2004. № 10. С. 47–50.
114. *Моргун Л. В., Моргун В. Н.* Влияние дисперсного армирования на агрегативную устойчивость пенобетонных смесей // *Строительные материалы*. 2003. № 1. С. 33–35.
115. *Федюк Р. С., Мочалов А. В., Лесовик В. С., Гридчин А. М., Фишер Х. Б.* Композиционные вяжущие и самоуплотняющиеся фибробетоны для защитных соору-

жений // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2018. № 7. С. 77–85.

116. Каприелов С. С., Чилин И. А. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций // Строительные материалы. 2013. № 7. С. 28–30.

117. Моргун В. Н., Курочка П. Н., Богатина А. Ю., Моргун Л. В., Кадомцева Е. Э. Вопросы сцепления стержневой арматуры с бетоном и фибробетоном // Строительные материалы. 2014. № 8. С. 56–59.

118. Klyuev S. V., Khezhev T. A., Pukhareno Yu. V., Klyuev A. V. The fiber-reinforced concrete constructions experimental research // Materials Science Forum. 2018. Vol. 931. P. 598–602.

119. Кудяков А. И., Стеишенко А. Б. Пенобетон дисперсно-армированный теплоизоляционный естественного твердения // Вестник ТГАСУ. 2014. №2. С. 127–133.

120. Пухаренко Ю. В. Реставрация и строительство: потенциал фиброармированных материалов и изделий // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. С. 359.

121. Morozov V. I., Pukhareno Yu. V., Yushin A. V. The numerical investigations of double-span concrete beams strengthened with fiber reinforced plastics across the oblique section // Materials Physics and Mechanics. 2017. Vol. 31. № 1–2. P. 40–43.

122. Карпенко Н. И., Травуш В. И., Каприелов С. С., Мишина А. В., Андрианов А. А., Безгодов И. М. Исследование физико-механических и реологических свойств высокопрочного сталефибробетона // Academia. Архитектура и строительство. 2013. № 1. С. 106–113.

123. Лесовик В. С., Урханова Л. А., Федюк Р. С. Вопросы повышения непроницаемости фибробетонов на композиционном вяжущем // Вестник ВСГУТУ. 2016. № 1 (58). С. 5–10.

124. Моргун В. Н., Богатина А. Ю., Моргун Л. В., Смирнова П. В. Конструкционные возможности фибропенобетона неавтоклавного твердения // Строительные материалы. 2012. № 4. С. 14–16.

125. Пухаренко Ю. В., Пантелеев Д. А., Морозов В. И., Магдеев У. Х. Прочность и деформативность полиармированного фибробетона с применением аморфной металлической фибры // Academia. Архитектура и строительство. 2016. № 1. С. 107–111.

126. Кадомцева Е. Э., Моргун Л. В. Учёт влияния отличия модулей упругости на сжатие и растяжение при расчёте на прочность армированных балок с заполнителем из фибропенобетона // Инженерный вестник Дона. 2013. № 2 (25). С. 80.

127. Хвастунов А. В. Порошково-активированный высокопрочный бетон и фибробетон с низким удельным расходом цемента на единицу прочности Пенза, 2011: дисс. канд. техн. наук, Пенза.: ПГУАС, 2011. 218 с.

128. Пухаренко Ю. В. Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов // Строительные материалы. 2004. № 10. С. 47–50.

129. Рабинович Ф. Н., Романов В. П. Расчёт геометрических параметров фибровой арматуры для сталефибробетонных конструкций // Инженерно-теоретические основы строительства: реферативная информация ВНИИС. М., 1985. 120 с.

130. Рабинович Ф. Н. Дисперсно армированные бетоны. М.: Стройиздат, 1989. 176 с.
131. Пухаренко Ю. В., Голубев В. Ю. О вязкости разрушения фибробетона // Вестник гражданских инженеров. 2008. № 3 (16). С. 80–83.
132. Эфрос А. Л. Физика и геометрия беспорядка. М.: Наука, 1982. 176 с.
133. Зыонг Т. К. Высокопрочные легкие фибробетоны конструкционного назначения: дис. ... канд. техн. наук. М.: Москва, 2021. 201 с.
134. Коровкин М. О., Калашиников В. И., Ерошкина Н. А. Эффективность суперпластификаторов и методология ее оценки: монография. Пенза : ПГУАС, 2012. 144 с.
135. Данилов А. М., Прошин А. П., Смирнов В. А. Двоичная декомпозиция изображения как средство оценки цифровой фильтрации в специальных задачах // Труды Международного форума по проблемам науки, техники и образования. М.: Академия наук о Земле, 2005. Т. 3. С. 30–31.
136. Filippini M., Lester C. H. Energy demand and energy efficiency in the OECD countries: a stochastic demand frontier approach // Energy Journal. 2011. Vol. 32. Iss. 2. P. 59–80.
137. Filippini M., Lester C. H. US residential energy demand and energy efficiency: A stochastic demand frontier approach // Energy Economics. 2012. Vol. 34. Iss. 5. P. 1484–1491.
138. Thomas W.-J., Boucinha J. M., Inacio C. F. Measuring electric energy efficiency in Portuguese households: a tool for energy policy // Management of Environmental Quality: An International Journal. 2015. Vol. 26. Iss. 3. P. 407–422.
139. Saunders H. Theoretical Foundations of the Rebound Effect // International Handbook on the Economics of Energy. Cheltenham, Edward Elgar, 2009. 3 p.
140. Sorrell S. The Rebound Effect: definition and estimation // International Handbook on the Economics of Energy. Cheltenham, Edward Elgar, 2009. 3 p.
141. Королев Е. В., Гришина А. Н. Фрактальная размерность как универсальная характеристика параметров структуры и прочности материала // Региональная архитектура и строительство. 2020. № 1 (42). С. 5–15.
142. Гришина А. Н., Королев Е. В. Эффективность модифицирования цементных композитов наноразмерными гидросиликатами бария // Строительные материалы. 2015. № 2. С. 72–76.
143. Гришина А. Н., Королев Е. В. Выбор технологии синтеза наноразмерных гидросиликатов бария // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2013. Т. 5, № 4. С. 111–119.
144. Gusev B., Grishina A., Korolev E., Ayzenshtadt A. Strength equation of composite materials and fractal dimension of cracks // Energy Reports. 2021. Vol. 7. № 5. P. 569–578.
145. Королев Е. В., Гришина А. Н. Фрактальная размерность как универсальная характеристика параметров структуры и прочности материала // Региональная архитектура и строительство. 2020. № 1 (42). С. 5–15.

146. Королев Е. В., Гришина А. Н., Айзеништадт А. М. Анализ структурообразования композитов с использованием фрактальной размерности // Строительные материалы. 2020. № 9. С. 54–61.

147. Королев Е. В., Баженов Ю. М., Альбакасов А. И. Радиационно-защитные и химически стойкие серые строительные материалы: монография. Оренбург: ОГУ, 2010. 364 с.

148. Иноземцев А. С., Королев Е. В. Полые микросферы эффективный наполнитель для высокопрочных лёгких бетонов // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 10. С. 80–83.

149. Волженский А. В., Буров Ю. С., Колокольников В. С. Минеральные вяжущие вещества. М.: Стройиздат, 1979. 476 с.

150. Поспелова Е. А., Рахимбаев Ш. М. Анализ процессов производства и применения строительных материалов на основе теории переноса. Белгород: Изд-во БГТУ, 2019. 163 с.

151. Бобрышев А. Н., Ерофеев В. Т., Козомазов В. Н. Физика и синергетика дисперсно-неупорядоченных конденсированных композитных систем. СПб.: Наука, 2012. 476 с.

152. Бобрышев А. Н., Козомазов В. Н., Лахно А. В., Тучков В. В. Прочность и долговечность полимерных композиционных материалов. Липецк: РПГФ "Юлис", 2006. 170 с.

153. Авдеев Р. И., Бобрышев А. Н., Туманова Н. Н. и др. Модели эволюционных процессов с линейным отображением // Известия Тульского государственного университета. Серия: «Технология, механика и долговечность строительных материалов, конструкций и сооружений». 2001. Вып. 2. С. 45–49.

154. Воронов П. В., Бобрышев А. Н., Лахно А. В. Оценка кинетики фазовых переходов в твердеющих гетерогенных материалах // Региональная архитектура и строительство. 2010. № 2. С. 58–66.

155. Калуш Ю. А., Логинов В. М. Показатель Хёрста и его скрытые свойства // Сибирский журнал индустриальной математики. 2002. Т. V. № 4(12). С. 29–37.

156. Жирмунский А. В., Кузьмин В. И. Критические уровни в развитии природных систем. Л.: Наука, 1990. 223 с.

157. Современный энциклопедический словарь. М.: Большая Российская энциклопедия, 1997. 576 с.

158. Новый иллюстрированный энциклопедический словарь. М.: Большая Российская энциклопедия, 2005. 912 с.

159. Евтушенко Е. И. Активационные процессы в технологии строительных материалов. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2003. 209 с.

160. Базуева С. А., Михайлов А. А. Анализ задачи идентификации закона распределения случайных процессов // Инженерный вестник Дона. 2015. №3 (37). С. 27.

161. Поршнев С. В., Соломаха Э. В., Пономарева О. А. Об особенностях оценок показателя Херста классического броуновского движения, вычисляемых с помощью

метода R/S-анализа // International Journal of Open Information Technologies. 2020. Т. 8. № 10. С. 45–50.

162. Александрович С. В. R/S анализ температурных временных рядов // Инновации и инвестиции. 2020. № 2. С. 119–122.

163. Овсянников В. Е., Некрасов Р. Ю., Теплоухов О. Ю., Кокорин И. Н. Применение фрактальных моделей для исследования циклической прочности металлических материалов // Инженерный вестник Дона. 2020. № 2 (62). С. 42.

164. Вернигорова В. Н. Физико-химические основы образования модифицированных гидросиликатов кальция в композиционных материалах на основе системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. Пенза: ПГУАС, 2001. 394 с.

165. Черкинский Ю. С. Химия полимерных неорганических вяжущих веществ. Л.: Химия, 1967. 224 с.

166. Демьянова В. С., Калашиников В. И., Вернигорова В. Н., Ильина И. Е. Высокодисперсные органоминеральные модификаторы цементного камня и бетона // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2003. № 3 (531). С. 49–53.

167. Соколова Ю. А., Вернигорова В. Н., Королев Е. В. Влияние модифицированных порошкообразных наноразмерных гидросиликатов кальция на распределение наночастиц в цементном камне // Интеграл. 2009. № 6. С. 22–23.

168. Урьев Н. Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. М.: Химия, 1988. 256 с.

169. Inozemtcev A. S., Korolev E. V., Duong T. Q. Study of mineral additives for cement materials for 3D-printing in construction // IOP conf. Series: materials science and engineering. 2018. Vol. 365. 032009.

170. Пивинский Ю. Е. Реология дилатантных и тиксотропных дисперсных систем. СПб.: РИО СПбГТИ (ТУ), 2001. 174 с.

171. Кирсанов Е. А., Матвеев В. Н. Неньютоновское течение дисперсных, полимерных и жидкокристаллических систем. Структурный подход. М.: Техносфера. 2016. 379 с.

172. Яковлев В. Б. Эконометрика в Excel и Statistica. Москва: КНОРУС, 2020. 382 с.

173. Гринченко В. Т., Мацытура В. Т., Снарский А. А., Вовк И. В. Дюжина лекций о фракталах: От объекта восхищения к инструменту познания. М.: ЛЕНАНД, 2020. 266 с.

174. Бараш Ю. С. Силы Ван-дер-Ваальса. М.: Наука, 1988. 344 с.

175. Хобза П., Заградник Р. Межмолекулярные комплексы: Роль вандерваальсовых систем в физической химии и биодисциплинах. М.: Мир, 1989. С. 376.

176. Королев Е. В., Гришина А. Н. Синтез и исследование наноразмерной добавки для повышения устойчивости пен на синтетических пенообразователях для пенобетонов // Строительные материалы. 2013. № 2. С. 30–33.

177. Гришина А. Н., Королев Е. В. Эффективная наноразмерная добавка, повышающая устойчивость пен для пенобетонов // Вестник МГСУ. 2012. № 10. С. 159–165.

178. Патент РФ 2507169. Комплексная наноразмерная добавка для пенобетонной смеси / Королев Е. В., Гришина А. Н. Опубл. 20.02.2014. 5 с.

179. *Тейлор Х.* Химия цемента. М.: Мир, 1996. 560 с.
180. *Уэндландт У.* Термические методы анализа. М.: Мир, 1978. 527 с.
181. *Lucia F.-C., Torrens-Martin D., Morales L. M., Sagrario M.-R.* Infrared Spectroscopy in the Analysis of Building and Construction Materials. 2012. 510 p.
182. *Плюснина И. И.* Инфракрасные спектры силикатов. М.: Изд-во Московского ун-та, 1967. 192 с.
183. *Лазарева А. Н.* Колебательные спектры и строение силикатов. Л.: Наука, 1968. 123 с.
184. *Коровкин М. В.* Инфракрасная спектроскопия карбонатных минералов: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2012. 80 с.
185. *Борзяк О. С.* Физико-химические исследования фазового состава цементного камня в бетоне, находившемся под воздействием пульсирующего однонаправленного электрического потенциала // Збірник наукових праць укрдазт. 2012. Вип. 130. С. 71–77.
186. *Sagrario M.-R., Lucia F.-C.* Raman Spectroscopy: Application to Cementitious // Construction and Building: Desigh, Materials, and Techniques. 2011. Chapter 10.
187. *Machovic V., Kolar F., Prochazka P. P., Peskova S., Kuklik P.* Raman Spectroscopy Study of Interfacial Transition Zone in Cement Composite Reinforced by PP/PE and Basalt Fibres // Acta Geodyn. Geomater. 2006. Vol. 3. №3. P. 63–67.
188. *Peskova S., Machovic V., Prochazka P. P.* Raman Spectroscopy Structural Study of Fired Concrete // Ceramics Silikaty. 2011. № 55. P. 410–417.
189. *Сулейманов А. М.* Экспериментально-теоретические основы прогнозирования и повышения долговечности материалов мягких оболочек строительного назначения: дис. ... д-ра техн. наук. Казань: КГАСУ, 2006. 352 с.
190. *Рыбьев И. А.* Строительное материаловедение: учеб. пособие для строит. спец. вузов. 2-е изд., испр. М.: Высшая школа, 2004. 701 с.
191. *Дворкин Л. И., Дворкин О. Л.* Основы бетоноведения. СПб.: Стройбетон, 2006. 689 с.
192. *Королев Е. В.* Принцип реализации нанотехнологии в строительном материаловедении // Строительные материалы. 2013. № 6. С. 60–64.
193. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа. 6-е изд. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
194. *Карнаухов А. П.* Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1999. 470 с.
195. *Barbare N., Shukla A., Bose A.* Uptake and loss of water in a cenosphere-concrete composite material // Cement and Concrete Research. 2003. Vol. 33. P. 1681–1686.
196. *Седов Л. И.* Механика сплошной среды. Т. 1. М.: Наука, 1970. 492 с.
197. Патент РФ 2433099. Высокопрочный бетон / Сватовская Л. Б., Соловьева В. Я., Степанова И. В., Коробов Н. В., Старчуков Д. С., Беляев П. В., Чертков М. В., Иванова А. Ю. Опубл. 10.11.2011 8 с.
198. *Бобрышев А. Н., Козомазов В. Н., Бабин Л. О., Соломатов В. И.* Синергетика композиционных материалов. Липецк: НПО ОРИУС, 1994. 152 с.

199. Шабанова Н. А., Саркисов П. Д. Золь-гель технологии. Нанодисперсный кремнезём. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 328 с.
200. Плаченев Т. Г., Колосенцев С. Д. Порометрия. М.: Химия, 1988. 176 с.
201. Шейкин А. Е., Добниц Л. М. Цементные бетоны высокой морозостойкости. Л.: Стройиздат, 1989. 128 с.
202. Шейкин А. Е., Чеховский Ю. В., Бруссер М. И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. 344 с.
203. Лещинский М. Ю. Испытание бетонов. М.: Стройиздат, 1980. 360 с.
204. Шейкин А. Е. О структуре и трещиностойкости бетонов // Бетон и железобетон. 1972. № 10. С. 18–20.
205. Shahidana S., Pulinb K., Bunnoric N. M., Holfordb K. M. Damage classification in reinforced concrete beam by acoustic emission signal analysis // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 45. P. 78–86.
206. Максимова И. Н., Макридин Н. И., Суров И. А. Методологические аспекты прогнозирования механического поведения цементных композитов // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 3. С. 37–41.
207. Селяев В. П., Данилов А. М., Круглова А. Н. Оценка свойств модифицированных эпоксидных композитов по параметрам акустической эмиссии // Региональная архитектура и строительство. 2013. № 1. С. 67–74.
208. Carpinteria A., Lacidognaa G., Accorneroa F., Mpalaskasb A. C., Matikasb T. E., Aggelisc D. G. Influence of damage in the acoustic emission parameters // Cement and Concrete Composites. 2013. Vol. 44. P. 9–16.
209. Guzman C., Torres D., Hucailuka C., Filipussia D. Analysis of the Acoustic Emission in a Reinforced Concrete Beam Using a Four Points Bending Test // Procedia Materials Science. 2015. Vol. 8. P. 148–154.
210. Макридин Н. И., Королев Е. В., Максимова И. Н. Метод акустической эмиссии в строительном материаловедении // Строительные материалы. 2007. № 3. С. 100–103.
211. Ушаков С. И. Микротрещинообразование в эпоксидном полимербетоне при сжатии // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. 2010. № 1 (17). С. 28–33.
212. Перфилов В. А. Контроль деформации и разрушения бетона методами механики разрушения и акустической эмиссии // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2014. № 38 (57). С. 75–84.
213. Aggelisa D. G., Mpalaskasb A. C., Matikasb T. E. Investigation of different fracture modes in cement-based materials by acoustic emission // Cement and Concrete Research. 2013. Vol. 48. P. 1–8.
214. Волков В. В., Белых А. Г., Бураков А. В. Морозостойкость бетона и связь параметров акустической эмиссии с процессами трещинообразования в нем // Технологии бетонов. 2012. № 5–6. С. 54–56.

215. *Макридин Н. И., Тараканов О. В., Максимова И. Н., Суков И. А.* Механика разрушения песчаного бетона и фибробетона // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 3. С. 122–126.

216. *Прошин А. П., Божьев Н. В., Фокин Г. А., Смирнов В. А.* Акустико-эмиссионное исследование разрушения радиационно-защитных композиционных материалов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2004. № 1. С. 20–23.

217. *Москвин В. М.* Коррозия бетона. М.: Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1952. 344 с.

218. *Королев Е. В., Баженов Ю. М., Альбакасов А. И.* Радиационно-защитные и химически стойкие серные строительные материалы. Пенза; Оренбург: ИПК ОГУ, 2010. 364 с.

219. *Розенталь Н. К., Любарская Г. В., Розенталь А. Н.* Реакционная способность заполнителей и коррозионная стойкость бетона // III Всероссийская (II Международная) конференция по бетону и железобетону «Бетон и железобетон взгляд в будущее». М.: ФГБОУ ВПО «МГСУ», 2014. Т. III. С. 377–387.

220. *Рибиндер П. А.* Новые материалы в технике и науке. М.: Наука, 1966. С. 17–37.

221. *Факторович Л. М.* Теплоизоляционные материалы и конструкции. Л., 1957. 451 с.

222. Исследование, проектирование и разработка конструкционных изделий (плиты перекрытия, балки) из высокопрочного лёгкого бетона. Проект NDT.71.RU/19. Исследование, проектирование и применение высокопрочных лёгких бетонов на основе микросфер для промышленных и гражданских сооружений: Отчет № 3.1.1 (Часть 3) / ВИВМ; Руководитель: Хонг Лыу Тхи; Хунг Ле Вьет, Зыонг Куи Тхань. Ханой, Вьетнам, 2022. 100 с.

Термины и определения

3D-печать – разновидность аддитивного производства, обычно относится к технологиям быстрого прототипирования. 3D-печать в строительстве отличается объектами производства, относящимися к строительной продукции.

3D-принтер – оборудование (устройство), предназначенное для послойного создания объёмной (3-мерной) детали (изделия).

Высокопрочный бетон – тяжёлый или мелкозернистый бетон классов по прочности на сжатие В60 и выше, приготовленный с применением вяжущего на основе портландцементного клинкера.

Высокопрочный лёгкий бетон – лёгкий бетон, характеризующийся величиной удельной прочности (соотношение предела прочности при сжатии к относительной плотности) более 33 МПа, изготовленный на основе портландцемента и специального заполнителя (полых микросфер).

Гидрофильность – способность вещества смачиваться водой.

Каменная мука – профессиональное наименование тонкоизмельченных горных пород или техногенных твердых отходов требуемого химического состава и дисперсности.

Полиструктурная теория композита – теория строительного материаловедения, в соответствии с которой композит может быть представлен как совокупность взаимопроникающих разномасштабных структур, имеющих характерные как структурные элементы, так и доминирующие взаимодействия. Предполагается, что для проектирования составов композитов с заданными свойствами достаточно выделить и произвести расчёт состава на двух масштабных уровнях: микро- и макроструктуре.

Порог перколяции (протекания) – критическое содержание частиц дисперсной фазы, обеспечивающее возникновение качественного или количественного изменения свойств дисперсной системы (например, переход «диэлектрик – проводник»).

Удельная прочность – отношение предела прочности при сжатии к относительной плотности материала. Относительная плотность – отношение средней плотности материала к плотности вещества, применяемого для сравнения (в строительном материаловедении принято в качестве такого вещества использовать воду).

Перечень сокращений и обозначений

- 3D – 3-dimensional – 3-мерное
АЭ – акустическая эмиссия
ВПЛБ – высокопрочный лёгкий бетон
ВПЛФБ – высокопрочный лёгкий фибробетон
МВПБ – мелкозернистый высокопрочный бетон
НМВПЛБ – наномодифицированный высокопрочный лёгкий бетон
БПЦ – быстротвердеющий портландцемент
БЭТ – метод Брунауэра–Эммета–Теллера
ГЭС – гидроэлектростанция
ДСК – дифференциальная сканирующая калориметрия
КНР – Китайская Народная Республика
КР – комбинационное рассеяние
НИР – научно-исследовательская работа
НИОКР – научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа
ПАВ – поверхностно-активное вещество
ПЦ – портландцемент
СА – субарктический климат
СТ – субтропический климат
СЭ – субэкваториальный климат
ТВО – тепловлажностная обработка
ТЭЦ – теплоэлектроцентраль
ТЦЗ – Теплоозерский цементный завод
У – умеренный климат
ФЦП – федеральная целевая программа
ШПЦ – шлакопортландцемент
Э – экваториальный климат
ЯМР – ядерный магнитный резонанс
ВЈН – метод Barret–Joynер–Halenda (Баррета–Джойнера–Халенды)

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЛЁГКИЕ БЕТОНЫ. ТРЕНДЫ РАЗВИТИЯ	7
1.1. Опыт применения	7
1.2. Существующие технологии	13
ГЛАВА 2. ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ	19
2.1. Системный подход к разработке материала	19
2.1.1. Декомпозиция системы качества материала	24
2.1.2. Классификация свойств материала	26
2.1.3. Выделение управляющих рецептурных и технологических факторов	27
2.1.4. Обоснование выбора компонентов и/или параметров структуры	29
2.2. Модель цементно-минеральной матрицы и ВПЛБ	31
2.2.1. Модель дисперсно-армированного композита	38
2.3. Многокритериальная оптимизация	42
ГЛАВА 3. СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И ВЫСОКОПРОЧНОГО ЛЁГКОГО БЕТОНА	47
ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛЁГКИХ БЕТОНОВ	95
4.1. Технологические свойства бетонных смесей	97
4.2. Физико-механические свойства высокопрочных лёгких бетонов	110
4.3. Эксплуатационные свойства высокопрочных лёгких бетонов	129
ГЛАВА 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛЁГКИХ БЕТОНОВ	153
5.1. Технико-экономическое обоснование	153
5.1.1. Применение для жилищного строительства	153
5.1.2. Применение для дорожного строительства	157
5.1.3. Применение для технологии 3D-печати	162
5.2. Опыт применения	168
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	172
Библиографический список	173
Термины и определения	187
Перечень сокращений и обозначений	189

Сведения об авторах



ИНОЗЕМЦЕВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, научный сотрудник научно-образовательного центра «Наноматериалы и нанотехнологии» НИУ МГСУ.

Область научных интересов – технология полифункциональных бетонов, 3D-печать в строительстве.



Стипендиат Президента РФ (2012 г.), победитель конкурсов грантов Президента РФ для поддержки молодых ученых – кандидатов наук (2015, 2020 гг.), лауреат премий и наград конкурсов и выставок за научные разработки и исследования. Автор и соавтор более 100 научных трудов, включая 3 учебно-методических издания, 5 патентов на изобретение.



КОРОЛЕВ ЕВГЕНИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

Доктор технических наук, профессор, Почетный строитель России, действительный член Российской инженерной академии, проректор по научной работе, профессор кафедры технологии строительных материалов и метрологии СПбГАСУ.

Область научных интересов – системный анализ в строительном материаловедении, физико-химические основы структурообразования материалов, технологии композиционных материалов общестроительного и специального назначения, нанотехнология в строительстве.

Эксперт в научно-технической сфере, эксперт РАН, победитель конкурсов грантов Президента РФ для поддержки молодых ученых – кандидатов и докторов наук, лауреат премии Правительства РФ в области образования, лауреат премий и наград конкурсов и выставок за научные разработки и исследования, награжден почетной грамотой Минобрнауки России, почетным знаком Спецстроя России «За заслуги в области специального строительства» и медалью «За вклад в развитие атомной отрасли». Автор и соавтор более 600 научных публикаций, включая 25 монографий, 35 учебно-методических изданий, 60 патентов.



Научное издание

**Иноземцев Александр Сергеевич,
Королев Евгений Валерьевич**

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЛЁГКИЕ БЕТОНЫ

Монография

ISBN 978-5-9227-1265-1



Редактор *В. И. Гришук*
Компьютерная верстка *Е. В. Жолобовой*

Подписано к печати 25.11.2022. Формат 70×100¹/₁₆.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 15,6. Тираж 500 экз. Заказ 158. «С» 82.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.
Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.