

Садовская Е. А.
Леонович С. Н.

**ПРОЧНОСТЬ, ДЕФОРМАТИВНОСТЬ
И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ФИБРОБЕТОНА С МАТРИЦЕЙ,
МОДИФИЦИРОВАННОЙ УГЛЕРОДНЫМИ
НАНОТРУБКАМИ**

*105-летнему юбилею Белорусского национального технического
университета эту работу посвящают авторы*

Минск
БНТУ
2024

УДК 693.546
ББК 38.33,38.6
С14

С14 Садовская, Е. А. Прочность, деформативность и трещиностойкость фибробетона с матрицей, модифицированной углеродными нанотрубками / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович. – Минск : БНТУ, 2024. – 174 с. ISBN 978-985-31-0040-2

В монографии развиты научно-практические основы и усовершенствованы технологии монолитного строительства с применением фибробетона многоуровневого армирования за счет комплексного применения нано-, микроармирующих цементный камень углеродных нанотрубок (УНТ) в сочетании с макроармирующим эффектом от введенной в бетон стальной фибры. Разработана и экспериментально обоснована методика многопараметрической оценки в лабораторных условиях свойств фибробетона многоуровневого армирования с определением механических (прочность на сжатие, изгиб, осевое растяжение), деформативных, энергетических (W , G) и силовых (K_{IC} , K_{IIC}) параметров для обеспечения высокой степени достоверности характеристик фибробетона как в устраиваемых (возводимых) строительных конструкциях, так и в процессе их эксплуатации.

Издание предназначено для научных и инженерно-технических работников вузов, научно-исследовательских и проектных организаций.

Табл. 27. Ил. 70. Формул 23. Библ. назв. 165.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Белорусского национального технического университета
(протокол № 5 от 19.02.2024)

Рецензенты:

профессор кафедры «Технология строительного производства»
УО «Брестский государственный технический университет»,

канд. техн. наук, профессор *В. Н. Черноиван*;

зав. каф. «Мосты и тоннели»

Белорусского национального технического университета,

канд. техн. наук, доцент *В. А. Гречухин*;

зав. каф. «Промышленное и гражданское строительство»

Белорусско-Российского университета,

канд. техн. наук, доцент *С. В. Данилов*

ISBN 978-985-31-0040-2

© Садовская Е. А., Леонович С. Н., 2024

© Белорусский национальный
технический университет, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Термины и определения.....	5
Перечень сокращений и определений	7
Введение.....	10
Глава 1. Аналитический обзор (состояние вопроса), анализ и постановка задач исследований	11
1.1. Трещиностойкость бетона и фибробетона: способы ее повышения	11
1.1.1. Дисперсное моноармирование (фибробетон).....	13
1.1.2. Наноармирование углеродными нанотрубками	20
1.1.3. Многоуровневое дисперсное армирование.....	25
1.2. Современные приемы введения и распределения фибры в бетонной смеси	29
1.3. Оценка качества фибробетонной смеси и фибробетона в конструкции	31
1.4. Выводы по главе	36
Глава 2. Методология, материалы и методы исследований	38
2.1. Общая методология исследований	38
2.2. Характеристика исходных компонентов.....	40
2.3. Испытываемые образцы. Методы испытаний	44
2.3.1. Методы определения характеристик бетонной смеси	48
2.3.2. Методы определения механических и физических характеристик бетона	48
2.3.3. Многопараметричная методика экспериментальных исследований фибробетона	53
2.4. Выводы по главе	58
Глава 3. Технология, свойства, методы и результаты испытаний бетона многоуровневого армирования.....	59
3.1. Бетон с углеродными нанотрубками – составы и свойства....	59

3.2. Оптимизация количества стальной фибры в составе фибробетона	63
3.3. Фибробетон многоуровневого армирования	66
3.3.1. Формуемость (удобоукладываемость) фибробетона, содержащего УНТ и стальную фибру	66
3.3.2. Прочность и упруго-деформативные характеристики фибробетона многоуровневого армирования	70
3.4. Свойства (параметры) фибробетона многоуровневого армирования	74
3.5. Эксплуатационные свойства фибробетона многоуровневого армирования	79
3.6. Контроль качества фибробетона	84
3.6.1. Оценка прочности и коэффициента интенсивности напряжений	85
3.6.2. Определение коэффициента интенсивности напряжений по энергетическим параметрам	95
3.6.3. Модуль упругости фибробетона	98
3.6.4. Интеграл Черепанова-Райса (J-интеграл).....	99
3.6.5. Коэффициент ползучести	100
3.6.6. Неразрушающие методы контроля	102
3.7. Выводы по главе	105
Глава 4. Технология и организация ведения бетонных работ.....	106
4.1. Технология приготовления фибробетона.....	106
4.1.1. Приготовление бетонной смеси-матрицы с углеродным наноматериалом.....	108
4.1.2. Приготовление фибробетона многоуровневого армирования	109
4.2. Особенности технологии устройства промышленных полов	111
4.2.1. Применение комплектов механизации работ с лазерными средствами контроля	113

4.2.2. Технология и организация производства работ по устройству полов с применением фибробетона	122
4.3. Выводы по главе	127
Глава 5. Контроль качества фибробетона многоуровневого армирования в лабораторных и производственных условиях	128
5.1. Основные положения многопараметрической оценки качества фибробетона	128
5.2. Поэтапная реализация методики испытаний	130
5.3. Производственная апробация методики контроля качества фибробетона в конструкции	137
5.3.1. Испытания механическими методами	137
5.3.2. Испытания физическими методами неразрушающего контроля	142
5.4. Оценка технико-экономического эффекта	147
5.5. Выводы по главе	153
Заключение	154
Список использованных источников	156

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Термин	Определение
Бетон тяжелый	бетон плотной структуры, плотностью от 2000 до 2600 кг/м ³ , приготовленный на тяжелых заполнителях: крупном и мелком – бетон крупнозернистый, или только на мелком заполнителе – бетон мелкозернистый
Бетонная матрица	конструкционный бетон расчетного класса по прочности на сжатие в состав которого введена фибра
Джей-интеграл (J)	значение джей-интеграла, характеризующее поле напряжений и деформаций вблизи вершины магистральной трещины при начале ее движения
Дисперсное армирование	равномерное распределение фибры в бетоне
Добавка минеральная	дисперсный неорганический материал, вводимый в бетон для улучшения его характеристик или получения специальных свойств
Добавка химическая (модификатор)	вещество, вводимое в бетон для изменения (модификации) его свойств
Критический коэффициент интенсивности напряжений (K_C)	значение интенсивности напряжения, при котором распространение трещины становится быстросействующим на участках более тонких, чем те, в которых преобладает плосконапряженное состояние
Критический коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве (K_{IC})	коэффициент интенсивности напряжения для условий нагрузки, при которых края трещины смещаются в направлении нормали к плоскости трещины (открывающая (I) мода деформации)

Окончание табл.

Термин	Определение
Критический коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге (K_{IIc})	коэффициент интенсивности напряжения для условий нагрузки, при которых края трещины смещаются в плоскости трещины нормально относительно фронта распространения трещины
Критический коэффициент интенсивности напряжений при продольном сдвиге (K_{IIIc})	коэффициент интенсивности напряжения для условий нагрузки, при котором края трещины смещаются в плоскости трещины параллельно относительно фронта распространения трещины
Коэффициент фибрового армирования по объему	относительное содержание объема фибр в единице объема фибробетона
Трещиностойкость (вязкость разрушения)	это способность материала сопротивляться различным механическим воздействиям (внутренним и внешним), что приводит к развитию трещин
Фибра (дисперсно-армирующий элемент)	прерывистый, разъединенный в объеме композиции элемент (элементы)
Фибробетон	дисперсно армированный тяжелый крупнозернистый или мелкозернистый бетон, свойства которого обусловлены совместной работой бетона и фибры

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ

μ_{fv} (μ) – коэффициент фибрового армирования по объему, %.

CV – коэффициент вариации, %.

d_f – диаметр фибры, мм.

d_{max} – максимальная крупность заполнителя, мм.

E_b – модуль упругости бетона, ГПа

E_f – модуль упругости фибры, МПа.

E_{fb} – начальный модуль упругости фибробетона, ГПа.

E_{din} – динамический модуль упругости, ГПа.

f_{sp}^c – прочность на растяжение при раскалывании бетонной матрицы, МПа.

f_{ax} – прочность на осевое растяжение, МПа.

F_{ax} – максимальная нагрузка при испытании на осевое растяжение, кН.

f_{ck} – характеристическая прочность бетона-матрицы на сжатие, МПа.

f_{fk} – характеристическая прочность фибр на растяжение, МПа.

f_{fl} – прочность на растяжение при изгибе, МПа.

F_{fl} – максимальная нагрузка при испытании на растяжение при изгибе, кН.

F_{IC} – максимальная нагрузка при испытании кубов с надрезами на нормальный отрыв, кН.

F_{IIc} – максимальная нагрузка при испытании пластин с надрезами на продольный сдвиг, кН.

f_{sp} – прочность на растяжение при раскалывании, МПа.

F_{sp} – максимальная нагрузка при испытании на растяжение при раскалывании, кН.

f_t – прочность на растяжение, МПа.

f_c – прочность на сжатие, МПа.

G – удельные энергозатраты, МДж/м².

G_e – удельные энергозатраты на упругое деформирование (до начала развития микротрещинообразования), МДж/м².

G_i – удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, МДж/м².

G_m – удельные энергозатраты на процессы развития и слияния микротрещин до формирования магистральной трещины статического разрушения, МДж/м².

J_{IC} – J -интеграл (интеграл Черепанова-Райса) при нормальном отрыве, МДж/м².

J_{IIc} – J -интеграл (интеграл Черепанова-Райса) при поперечном сдвиге, МДж/м².

K_{IC} – критический коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве, МПа·м^{0.5}.

K_I^{Ge} – статический критический коэффициент интенсивности напряжений до начала развития микротрещинообразования, МПа·м^{0.5}.

K_I^{Gi} – статический критический коэффициент интенсивности напряжений при максимальной нагрузке, МПа·м^{0.5}.

K_{IIc} – критический коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге, МПа·м^{0.5}.

K_{IIIc} – критический коэффициент интенсивности напряжений при продольном сдвиге, МПа·м^{0.5}.

L/D – индекс фибры (l_f/d_f).

l_c – критическая длина фибры при выдергивании, мм.

l_f – длина фибры, мм.

m_{CN} – масса твердого углерода (углеродных нанотрубок) на 1 т добавки-основы (суперпластификатора), кг/т.

m_f – масса фибры в 1 м³ бетонной смеси, кг.

$m_{\text{цем}}$ – массовая доля от массы цемента, %.

V – перемещения образца (прогиб), м.

V_e – перемещения, соответствующие упругим деформациям образца, м.

V_f – перемещения образца при максимальной нагрузке, м.

V_l – перемещения, соответствующие локальным деформациям образца в зоне магистральной трещины, м.

V_{long} – скорость ультразвука продольной волны, м/с.

V_m – перемещения, соответствующие необратимым деформациям образца, м.

W_e – энергозатраты на упругое деформирование до начала движения магистральной трещины статического разрушения, МДж.

ν – коэффициент Пуассона.

ϕ – коэффициент ползучести.

ОК – осадка стандартного конуса, мм.

РК – расплыв конуса, мм.

ВВЕДЕНИЕ

Фибробетон – строительный материал, характеризующийся повышенной прочностью на осевое растяжение, растяжение при изгибе, срез и скалывание, что обеспечивает ему повышенную трещиностойкость, ударную вязкость и износоустойчивость. Эти свойства фибробетона определяют область его рационального применения при устройстве полов промышленных зданий, дорожно-аэродромных покрытий, возведение тонкостенных оболочек и других строительных конструкций различного назначения с повышенными требованиями в части трещиностойкости (вязкости разрушения).

Широко известны исследования, отражающие технологию получения и применения в монолитном строительстве фибробетона «моноармирования», т. е. содержащего в составе стальную, композитную, базальтовую или иную фибру. Вместе с тем требует решения задача повышения качественных характеристик фибробетона путем полидисперсного армирования, с использованием как макроармирующей (стальной, композитной), так и ультрадисперсной «фибры», например, в варианте введения в состав бетона трубчатых углеродных наноматериалов (УНТ).

Кроме разработки технологии многоуровневого армирования необходимо исследовать как свойства получаемого материала, так и отработать технологию устройства строительных конструкций с его применением.

Одним из важнейших и не в полной мере решенных проблемных вопросов технологии монолитного фибробетона является достоверная оценка равномерности распределения фибры в объеме отформованной конструкции и, следовательно, однородности структуры и свойств фибробетона, а в этой связи – физико-механических и физико-технических характеристик самой конструкции.

Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору кафедры строительных материалов и технологии строительства БНТУ Эдуарду Ивановичу Батыновскому за помощь и содействие в создании монографии.



Рис. 1. Встреча Научной школы БНТУ профессора Леонovich С. Н. «Обеспечение расчетного срока службы, прочности, трещиностойкости и долговечности конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях» с заведующим кафедрой строительства Университета Милоуки–Висконсин (США), профессором Konstantin Sobolev, директором Concrete Advancement Network (Национальный научный фонд США)

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР (СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА), АНАЛИЗ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ БЕТОНА И ФИБРОБЕТОНА: СПОСОБЫ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ

Эксплуатационная надежность и долговечность цементного конструкционного бетона непосредственно связана с его трещиностойкостью. В свою очередь трещинообразование в бетоне вызывается рядом причин, взаимосвязанных с особенностями его состава (видом и свойствами примененного цемента, водоцементным отношением, качественными характеристиками заполнителей, примененных минеральных и химических добавок), с условиями приготовления бетонной смеси, транспортирования, приема на объекте, подачи и укладки в бетонируемую конструкцию, т. е. с технологией ведения бетонных работ на начальной стадии. Последующее твердение цементного бетона сопровождается явлениями контракции, усадки, массопереносом воды затворения (как естественном процессе при гидратации цемента, так и, например, неконтролируемое испарение при некачественном уходе за бетоном), а также возникающим термонапряженным состоянием из-за градиента температур в объеме бетона и его внешними слоями, что в совокупности способно вызвать не только микротрещинообразование в бетоне, но и развитие его до усадочного и визуально различимого макротрещинообразования. В процессе эксплуатации строительных конструкций, отмеченные явления, сопровождающие процесс твердения бетона, естественно дополняются физико-механическим воздействием разнообразных нагрузок, которое усиливается влиянием внешней среды: попеременным увлажнением-высушиванием, перепадами температуры (в ряде случаев включая замораживание-оттаивание), химически агрессивных реагентов в виде солей хлора, сульфатов, кислотных «остатков» и прочим.

С целью повышения трещиностойкости бетона выполнен огромный объем исследований и предложен ряд технологических вариантов решения этой задачи. В частности, путем введения в состав бетона демпфирующих добавок [1–22] в виде, например, зольных микросфер [16]; введение каучуковых заполнителей [17], добавле-

ние модификаторов, таких как графен, наносиликат, полимеры [2; 18], цеолита [19], вспенивателей [20; 21], а также гидрофобных, силикатных адгезионных добавок [22].

Однако демпфирующие добавки обладают резко отличающимися от цементного камня упругими свойствами, что приводит к снижению модуля упругости бетона и снижению прочности на сжатие, повышается неоднородность бетонной смеси и анизотропность свойств бетона [13]. Создаваемый технологическими приемами (использование высокомарочных цементов, фракционированных заполнителей, суперпластификаторов, понижения водоцементного отношения [23], магнитоактивированной воды затворения [24–26]) избыточный запас прочности, по затратам труда и материалов экономически не обоснован. Кроме того, использование полимерных, силикатных, каучуковых и иных подобных материалов вызывают необходимость существенных изменений в процессе приготовления бетонной смеси и работы с ней на последующих стадиях, включая бетонирование конструкций.

Приведенные ранее технологические приемы, обеспечивающие повышение плотности структуры бетона, способствуют снижению интенсивности усадочных явлений в процессе его твердения, но не в полной мере решают задачи по восприятию механических нагрузок и воздействий эксплуатационной среды. В частности, трещинообразование в плитах полов зданий различного назначения может вызываться не только механическими эксплуатационными нагрузками, но и деформациями оснований (в особой мере грунтовыми, пучинистыми (для условий Беларуси – массово содержащими глины)).

Не решает проблемы предотвращения трещинообразования бетона в конструкциях повышение степени их армирования, включая использование сварных (вязаных) проволочных сеток, как элемента сдерживания трещинообразования. Сетки не предотвращают и не сводят к минимуму этот процесс, связанный с естественными причинами твердения цемента и формирования структуры цементного камня и бетона. В совокупности с другими элементами армирования конструкций они способствуют минимизации трещинообразования бетона под действием механических и иных эксплуатационных нагрузок. Только преднапряжение арматуры и обжатие за этот счет бетона способно исключить раскрытие трещин, но этот прием

в построечных условиях настолько сложен и затратен в реализации, что фактически не применяется в общестроительном производстве.

Сопоставление данных о приведенных и иных вариантах решения означенной задачи позволяет сделать вывод, что наиболее перспективным способом повышения трещиностойкости бетона является введение в его состав различных дисперсных волокон: композитных видов фибры, базальтового волокна, стальной фибры разных типов и т. п. В целом дисперсное армирование бетона разнообразными видами фибры является наиболее перспективным технологическим приемом повышения трещиностойкости бетона, а на этой основе повышения эксплуатационной надежности и долговечности строительных конструкций.

1.1.1. ДИСПЕРСНОЕ МОНОАРМИРОВАНИЕ (ФИБРОБЕТОН)

Научные исследования с дисперсно-армированными бетонами и конструкциями на их основе в Российской Федерации и Республике Беларусь выполнялись научными подразделениями НИИЖБ, ВНИИЖелезобетона, ЦНИИС, МГСУ, РИСИ, БПИ (БНТУ), БелНИИС и др., и в настоящее время наиболее активно продолжают научными школами профессора, члена-корреспондента РААСН Ю. В. Пухаренко (Санкт-Петербургский ГАСУ), профессора, члена-корреспондента В. С. Лесовика (Белгородский ГТУ), академика РААСН Е. М. Чернышова (Воронежский ГАСУ) и др. В подавляющих объемах исследований в бетон вводилась фибра в варианте «моновещества» – стальная, композитная (полипропиленовая, полиэфирная, вязкозная и пр.), базальтовая, углеродная, асбестовая и др.

Фибробетон как композиционный материал, эффективно реализуется при совместной работе армирующих элементов (волокон) и бетона [27–29]. Наибольший эффект обеспечивается только при высоком уровне сцепления всех материалов [30; 31]. Сцепление фибры с бетоном является результатом комбинированного действия адгезии, трения и механического зацепления в контактной зоне, которой по существу является цементный камень [32–39]. Вследствие этого сцепление армирующих элементов с бетоном в первую очередь зависит от его состава, структуры, свойств и объемного содер-

жания цементного камня в объеме бетона, а также от свойств материала используемого волокна, его формы и размеров [32; 40–42].

При этом «механизм» разрушения дисперсно-армированных композиционных материалов отличается [34] от неармированных (рис. 1.1).

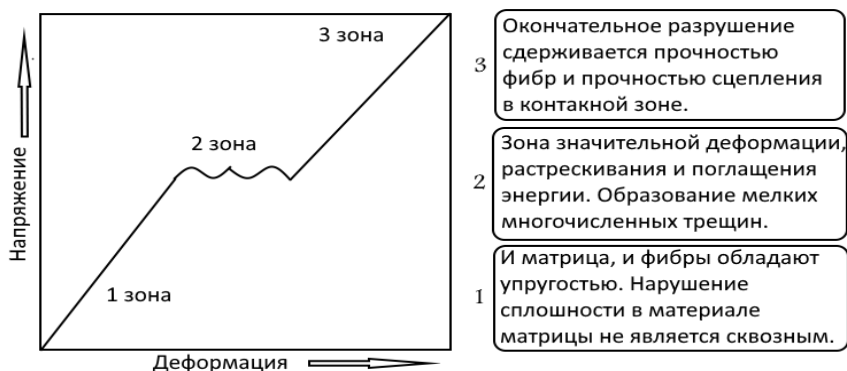


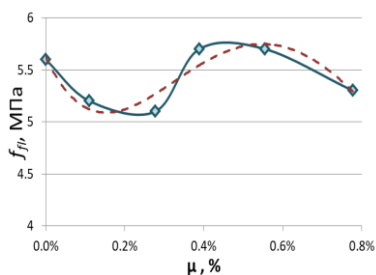
Рисунок 1.1 – Идеальная кривая «напряженние-деформация» дисперсно-армированных бетонов [34]

На эффективность применения фиброволокна в бетонном композите при воздействии нагрузки влияют [43] следующие параметры дисперсно-распределенного армирования: прочность сцепления фиброволокна с бетоном, длина фиброволокна l (или отношение длины к диаметру фибры l/d), а также количественное (по массе) или объемное содержание (далее концентрация) фиброволокна в объеме бетона, например, считается, что максимальное упрочнение достигается при отношении l/d в пределах от 60 до 100. В случае повышения значения данного отношения (т. е. при увеличении длины фиброволокна) эффект армирующего упрочнения снижается из-за комкования фибры и снижения однородности (гомогенности) структуры фибробетона.

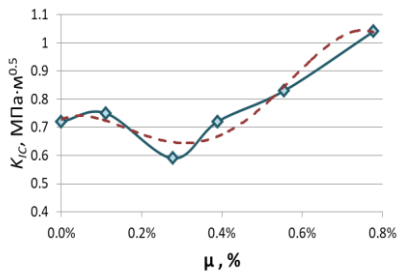
Оптимизация микроструктуры фибробетона связана также с определенным соотношением расхода армирующих элементов и объема бетона, способного обеспечить формирование объемно-пространственной однородности и связности структуры фибробетонной смеси. С повышением объемной концентрации дисперсной фибры до некоторого оптимального уровня физико-механические

характеристики фибробетона возрастают, а после его превышения имеет место их снижение [44].

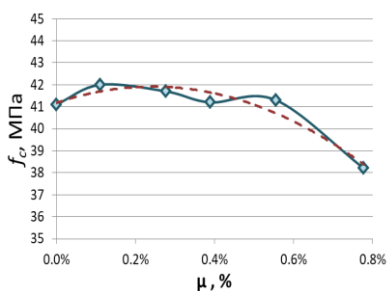
Наиболее полно влияние объемного соотношения и расхода фибры на свойства смесей и бетона отражены в источниках [45–47]. Далее приведены (частично, с учетом использования аналогов в настоящей работе) результаты исследований влияния фибры: стальной анкерной, микрофибры стальной анкерной и прямого профиля, полимерной (полипропиленовой) фибры, на подвижность смеси и прочность при растяжении бетона (рис. 1.2–1.6).



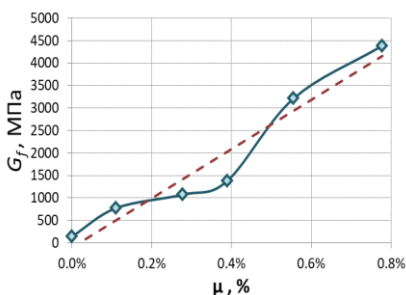
$$y = 2E + 09x^4 - 5E + 07x^3 + 374868x^2 - 806,44x + 5,62$$



$$y = -1E + 09x^4 + 2E + 07x^3 - 78760x^2 + 59,674x + 0,73$$

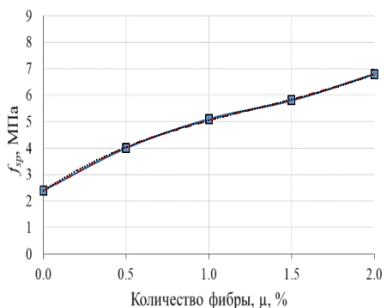


$$y = -124140x^2 + 604,81x + 41,177$$

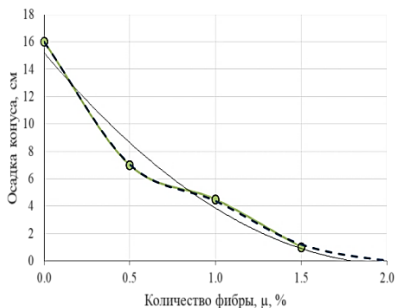


$$y = 548825x - 104,88$$

Рисунок 1.2 – Влияние фибры ФПИ-0.6-40 на прочность при растяжении, на сжатие, на величину коэффициента интенсивности напряжений и энергозатрат [45; 48]

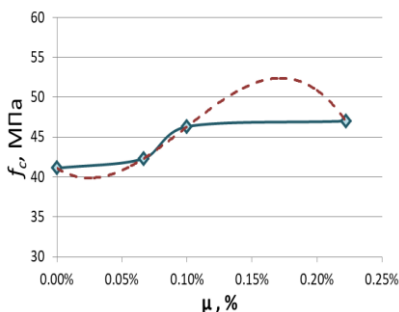


$$y = 0,5333x^3 - 2,0571x^2 + 4,181x + 2,3914$$

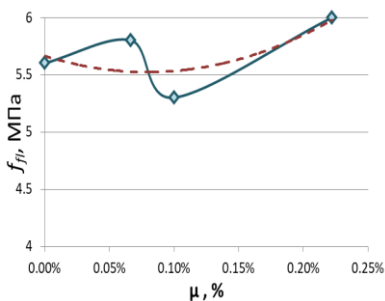


$$y = 3,6256x^2 - 14,981x + 15,219$$

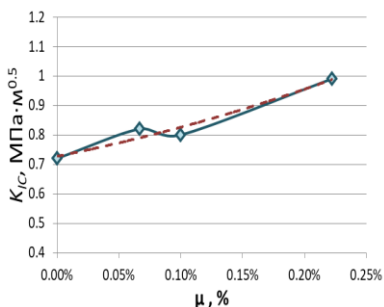
Рисунок 1.3 – Влияние фибры МФСА-0.3-30 на прочность при растяжении и на подвижность смеси [47]



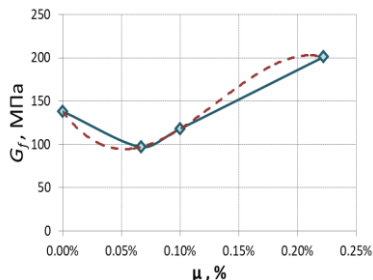
$$y = -8E + 09x^3 + 2E+07x^2 - 10264x + 41,1$$



$$y = 223285x^2 - 354,99x + 5,6638$$

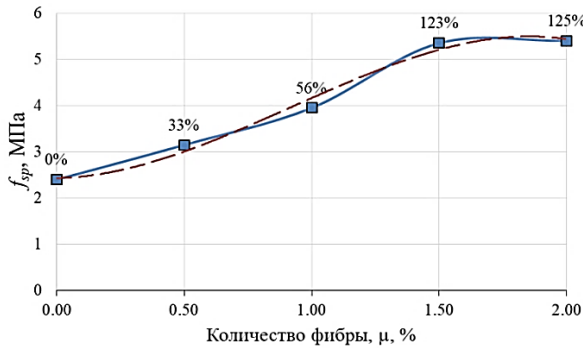


$$y = 15103x^2 + 83,621x + 0,7271$$

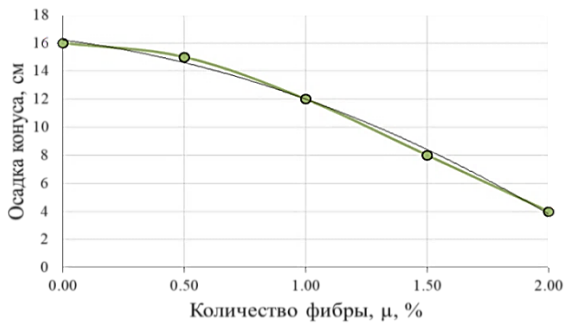


$$y = -5E+10x^3 + 2E+08x^2 - 180903x + 138$$

Рисунок 1.4 – Влияние фибры ФП-0.1-20 на прочность при растяжении, на сжатие, на величину коэффициента интенсивности напряжений и энергозатрат [45; 48]

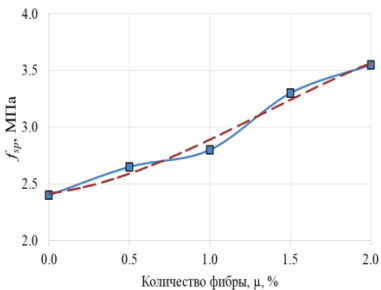


$$y = -0,93x^3 + 2,57x^2 + 0,09x + 2,44$$

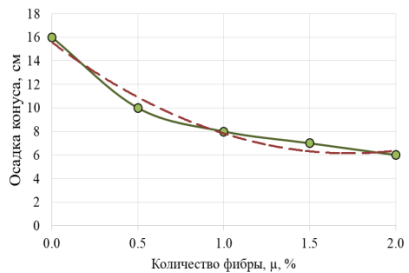


$$y = -2x^2 - 2,2x + 16,2$$

Рисунок 1.5 – Влияние фибры ФСА-1.0-60 на прочность при растяжении и на подвижность смеси [47]



$$y = -0,1x^3 + 0,4x^2 + 0,175x + 2,415$$



$$y = 3,1429x^2 - 10,886x + 15,571$$

Рисунок 1.6 – Влияние фибры МФСП-0.3-12 на прочность при растяжении и на подвижность смеси [47]

На рис. 1.7 показаны результаты расчета [46] начального модуля упругости фибробетона, содержащего фибру разных классов модульности: сталь ($E_f = 200$ ГПа), стекло ($E_f = 70$ ГПа), полиакрилонитрил ($E_f = 15$ ГПа) и полипропилен ($E_f = 5$ ГПа). В качестве бетонной матрицы был взят мелкозернистый бетон на заполнителе из песка с модулем упругости $E_6 = 20$ ГПа. Графики (рис. 1.7) отражают общую закономерность снижения модуля упругости фибробетона, при снижении модульности материала фиброэлементов [46].

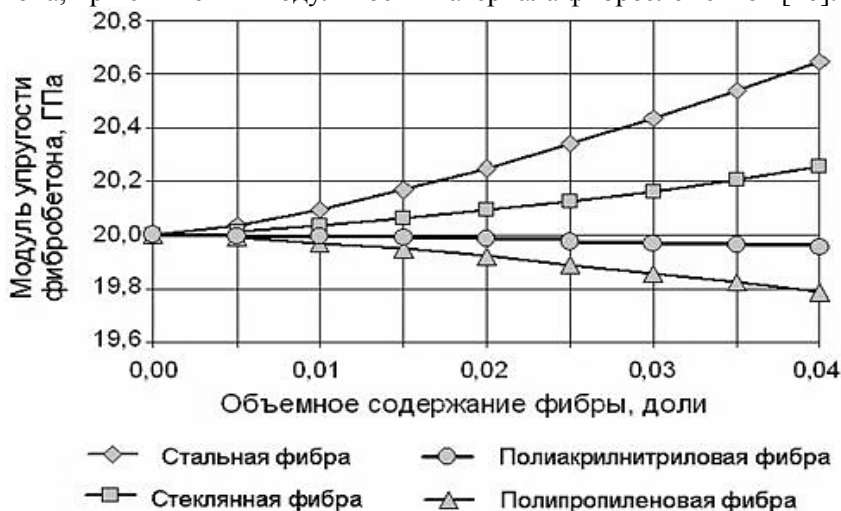


Рисунок 1.7 – Графики зависимости начального модуля упругости мелкозернистого фибробетона от вида и объемного содержания фибры [46]

Анализ приведенных данных источников [44–47] показывает, что оптимальным количеством стальной фибры исследователи считают ее объемное содержание, соответствующее 0,5–1 % для микрофибры анкерного профиля (МФСА-0.3-30) и 1–1,5 % для анкерной макрофибры (ФСА-1.0-60), что в пересчете на массу составляет 40–80 кг и 78–120 кг на 1 м³ бетона соответственно; 1–2 % (78–160 кг/м³) для микрофибры прямого профиля (МФСР-0.3-12). Для композитных волокон оптимальным будет объемное содержание 0,4–0,6 % для полимерной извилистой (ФПИ-0.6-40) и 0,15–0,23 % (1 % от массы цемента) для полипропиленовой.

Анализ и обобщение результатов исследований и накопленного опыта практического применения стальной фибры в конструкцион-

ном фибробетоне позволяет сделать вывод о наличии оптимума в ее количественном содержании в составе бетона, превышение которого сопровождается снижением формуемости (удобоукладываемости) фибробетонной смеси при стабилизации (или даже снижении) прочностных характеристик затвердевшего фибробетона.

Здесь следует отметить, что установленный оптимум содержания стальной фибры в фибробетоне возможно потребует корректировки при переходе к варианту его многоуровневого армирования различающимися по типоразмерам и видам «фиброэлементам».

Оценка эффективности варианта моноармирования бетона композитной фиброй (полиэтиленовой, полипропиленовой, полиэфирной и т. п.), с одной стороны, подтвердила его эффективность с позиций повышения трещиностойкости бетона в процессе его твердения (повышение сопротивляемости усадочным деформациям, ударной вязкости), но этот вариант фибробетона уступает по физико-механическим характеристикам сталефибробетону. А с учетом огромной разницы в модулях упругости стали и композитных видов фибры и, соответственно, их деформативности, отсутствует перспектива их совместной «работы» в бетоне под нагрузкой. Высокая деформативность волокон композитной фибры не может обеспечить предотвращение начального образования (зарождения) трещин в объеме цементного камня и бетона. Для этой цели необходимы ультрадисперсные волокнообразные фиброэлементы, армирующие структуру новообразований цементного камня, формируемую из кристаллогидратов – продуктов реакций клинкерных минералов цемента с водой затворения бетона. С учетом типоразмеров кристаллогидратных новообразований (~ 8,0–25,0 нм) и размеров сечений пор в сформированной ими структуре (пор «геля»), составляющих до 4,0–5,0 нм, роль фиброэлементов армирующих такую структуру могут выполнять трубчатые углеродные наноматериалы [49–51; 167; 129].

Такой вариант «многоуровневого» армирования, в котором эффективность стальной фибры, проявляющаяся в блокировке трещинообразования, зараждающегося в наиболее слабых зонах конструкционного тяжелого бетона – зонах контакта цементного камня с зернами заполнителя [53–56], дополнялась бы предотвращением (сдерживанием) трещинообразования в объеме цементного камня бетона, за счет «встраивающихся» в его структуру углеродных од-

но- и многослойных трубок. Их характеризуют малые поперечные размеры (однослойные могут быть сечением 0,5–1,0 нм) при значительной (более 1 мкм, т. е. > 1000 нм) длине [57]. При этом следует учитывать, что материал углеродной фибры характеризуется модулем упругости, соответствующим модулю упругости стали, чем обеспечивается возможность их совместной работы на разных уровнях армирования цементного бетона.

Можно предположить, что сочетание эффекта по сдерживанию зарождения трещин в объеме цементного камня за счет нано-, микроармирования структуры при введении в состав трубчатых УНМ и эффекта от макроармирования стальной фиброй, позволит повысить трещиностойкость фибробетона как на стадии его твердения, так и при воздействии механических нагрузок и воздействий эксплуатационной среды.

1.1.2. НАНОАРМИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

В научно-технической литературе достаточно широко отражена проблематика использования углеродных наноматериалов, в частности нанотрубок (УНТ) и их влияние на микроструктуру и наноструктуру модифицированного ими цементного камня. Установлено, что эффективность их применения зависит от разновидностей углеродного наноматериала, его физических и химических характеристик, геометрических параметров трубок (рис. 1.8) и равномерности распределения (диспергирования) в объеме композита [58].

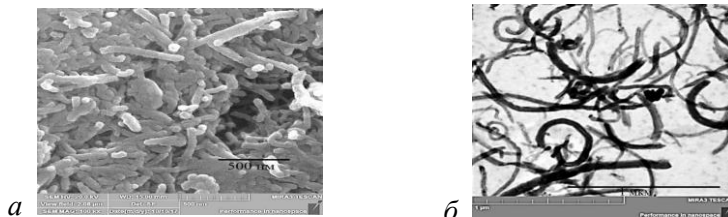


Рисунок 1.8 – СЭМ (а) и ПЭМ (б) фотографии образца ультрадисперсной фракции УНМ [58]

Кроме того выявлено, что ультрамикродисперсный углеродный наноматериал, характеризующийся огромным, концентрированным

в нанобъеме потенциалом поверхности, может послужить катализатором процесса образования кристаллогидратов как более интенсивно (ускоренно) во времени, так и в значительно большем количестве [49–53; 59; 60].

Результаты исследований, проведенных в том числе в РБ и РФ, подтвердили, что наличие в цементном камне углеродных нановолокон (трубок) изменяет его микроструктуру и наноструктуру. Наблюдается уменьшение капиллярной пористости и уменьшение общей пористости с последующим улучшением структуры пор. Обратный микромеханический анализ показывает сдвиг от микропор и мезопор размером 100 нм в обычном портландцементе к небольшим порам геля размером 5–12 нм в цементе, модифицированном УНТ [61].

В исследованиях [51] установлено, что эффективность углеродного наноматериала, выраженная в повышении темпа роста и уровня прочности цементного камня и бетона, имеет физическую природу и основывается на высоком энергетическом потенциале поверхности его ультрадисперсных частиц и вершин (изломов) трубчатых элементов, способствующих ускоренному и углубленному развитию реакций цемента с водой, а также эффекта нано-, микроармирования трубчатыми УНМ структуры новообразований и цементного камня в целом [62].

Позиция о сдерживании образования трещин углеродными волокнами на наноуровне подтверждается исследованиями Ange-Therese Akono [63; 64], где углеродные нановолокна заполняют нанопоры и соединяют зерна гидратов кальция (C–S–H). Это приводит к эффекту образования мостиков и облегчению передачи нагрузки. Отдельные УНТ встраиваются в продукты гидратации и задерживают нанотрещины. Также в [65] продемонстрированы СЭМ-изображения, подтверждающие эффекты образования перемычек, которые передают нагрузку по нано- и микротрещинам.

В исследованиях [63; 70] установлено, что присутствие углеродных нановолокон влияет на стохастическое распределение макроскопического модуля Юнга, вызывая сдвиг в сторону более высоких значений (29,66 ГПа для простого портландцемента, 31,43 ГПа для цемента +0,1 мас. % УНТ и 36,12 ГПа для цемента +0,5 мас. % УНТ).

Результаты исследований [70] с использованием наноиндентирования совпадают с результатами [66], в которых автор сделал вывод, что УНТ модифицируют C–S–H, увеличивая количество C–S–H с высокой жесткостью, усиливая матрицу цементного теста в наномасштабе и уменьшая пористость. Также в [63] установлено, что присутствие углеродных нановолокон влияет на стохастическое распределение макроскопического модуля Юнга, вызывая сдвиг в сторону более высоких значений.

Влияние УНТ на увеличение прочностных показателей цементного композита в исследованиях [70] совпадает с итогами исследований Вуан М. Tyson [65], где увеличение значений прочности при изгибе составило 82 %. В исследованиях [67] показано, что прирост прочности на сжатие мелкозернистого бетона при введении УНТ составил 14,1 % (без УНТ – 67,4 МПа, с УНТ – 76,9 МПа); прирост прочности на растяжение при изгибе 15,6 % (без УНТ – 8,22 МПа, с УНТ – 10,2 МПа); прирост прочности на растяжение при раскалывании 24,1 % (без УНТ – 2,20 МПа, с УНТ – 2,73 МПа). В исследованиях С. Н. Толмачёва [68] прочность цементного камня с УНТ возрастает в 1,5–1,9 раза, прочность растворов увеличивается в 1,3–1,4 раза, а прочность бетонов возрастает в 1,25–1,35 раза по сравнению с контрольными составами.

Авторы [69] отмечают эффект армирования усадочных трещин в цементном камне нанотрубками, которые обрастают кристаллогидратными новообразованиями («общее» сечение трубки увеличивается с 10–15 нм до 300–400 нм).

По мнению авторов [71] армирующий эффект УНТ основывается на ускорении процесса гидролиза-гидратации C_3S и C_2S за счет осаждения части ионов Ca^{2+} на поверхности нанотрубок и являющихся дополнительными центрами кристаллизации, перенасыщение которыми приводит к росту «кристаллов портландита $Ca(OH)_2$ и аморфных гидрокристаллов кальция» у поверхности нанотрубок.

По данным [72] введение наноуглеродных волокон в твердеющий цементный камень создает условия для эффекта «наноармирования» структуры новообразований в виде формирующейся системы кристаллогидратов клинкерных минералов. Малые поперечные размеры нановолокон при длине, значительно превышающей размеры первоначально образующихся кристаллогидратов силикатов, алюминатов и ферритов кальция, соответствующих ~ 8,0–25,0 нм,

обеспечивают необходимые предпосылки для «защемления» волокон в межплоскостных пространствах соседствующих поверхностей множества кристаллогидратов, что и создает эффект армирования нано- и микроструктуры объема новообразований затвердевшего цементного камня. Следствием этого является рост его прочности на растяжение и сжатие [72].

В исследованиях [70; 73] использовалась комплексная химическая добавка «АРТ-Конкрит Р», модифицированная нанокремнеземным материалом «АРТ-Нано» (производство РБ ООО «Передовые исследования и технологии»), и в результате испытаний установлено, что наличие УНТ способствовало увеличению прочности до 10 % на сжатие и до 21 % при изгибе.

В результате проведения испытаний методом ультразвуковой диагностики в образцах с нанокремнеземными трубками (состав СП + УНТ) наблюдался эффект повышения модуля упругости на 6,3 %, (генератор – приемник прямоугольных импульсов модели 5077PR) и на 21,4 %, (ПУЛЬСАР–2.2) по сравнению с образцами без УНТ (состав с СП). Также наблюдалось повышение плотности до 6,0 %, что свидетельствует о уменьшении объем пор вследствие плотной структуры цементного камня, а на этом основании установлено приращение величин модуля Юнга (E), коэффициента Пуассона (ν), модуля сдвига G (рис. 1.9), что соотносится с повышением f_c и f_d . Повышение значения плотности (ρ) дополнительно указывает на изменение поровой структуры цементного камня.

Анализ приведенных данных свидетельствует о перспективности технологического приема введения в состав цементного конструкционного бетона углеродных наноматериалов в виде трубчатых элементов с целью повышения его трещиностойкости. Очевиден эффект роста прочности цементного камня на осевое растяжение и в целом при воздействии растягивающих усилий, который достигается за счет наноармирования структуры кристаллогидратных новообразований и микроармирования структуры цементного камня в целом, соответствующий определению «бетон Юнга».

Вместе с тем при переходе в цитируемых источниках от цементного камня к конструкционному бетону (как к мелкозернистому и, особенно, с крупным заполнителем) эффективность от введения в состав УНМ резко падает.

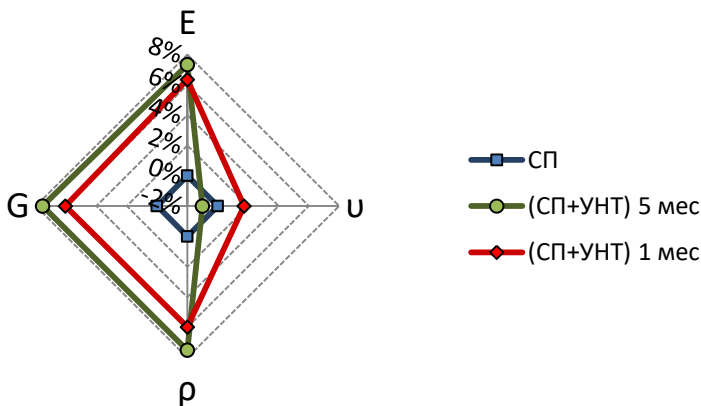


Рисунок 1.9 – Прирост значений (в %) модуля Юнга (E), коэффициента Пуассона (ν), плотности (ρ), модуля сдвига G состава модифицированного нанотрубками (СП + УНТ) относительно состава только с суперпластификатором (СП) в возрасте 1 и 5 мес. [73]

Очевидно, что изменения в структуре при переходе от цементного камня к бетону и появление в конгломератной структуре последнего зоны контакта цементного камня с поверхностью заполнителей, изменяет механизм как зарождения и развития трещин под действием нагрузок, так и подход к мерам противодействия трещинообразованию в бетоне.

Для восприятия напряжений в бетоне, возникающих под действием разнообразных нагрузок и предотвращения развития процесса трещинообразования, требуется введение в его состав крупноразмерной, жесткой (малодеформативной, с высоким модулем упругости), с качественным анкерением для исключения выдергивания фибры.

Одновременно рационально и, на наш взгляд, перспективно дополнять эффект макроуровня (за счет, например, использования стальной фибры) ранее выявленным эффектом от введения в состав бетона трубчатых углеродных наноматериалов. Такой подход согласуется с развивающимся направлением повышения трещиностойкости бетона, получившим в технической литературе определение «концепции многоуровневого армирования».

1.1.3. МНОГОУРОВНЕВОЕ ДИСПЕРСНОЕ АРМИРОВАНИЕ

В основе концепции многоуровневого дисперсного армирования лежат различия в структурном строении бетона, как исходной матрицы [43]. В этой связи диаметры и степень рассредоточения армирующих элементов должны быть соизмеримы с «врожденными дефектами» и связаны с неоднородностями структуры бетона. В этом случае появляются предпосылки для более эффективного сдерживания роста трещин в бетоне при его загрузении [44].

Базово данная концепция опирается на работы по проблематике формирования структуры бетона, отраженных в монографиях В. В. Михайлова «Элементы теории структуры бетонов» [74], Б. Г. Скрамтаева «Теория прочности бетона и новые виды бетонов» [75] и «Исследование прочности бетона и пластичности бетонной смеси» [76], В. Н. Юнга «Введение в технологию цемента» [77]. Воззрения этих и других классиков, относящиеся к периоду зарождения науки о бетоне, заложили основу того, что «структурный подход» является базой как для совершенствования теории бетона и развития его технологии [78–81], так и для обоснования концепции многоуровневого дисперсного армирования бетона. При разработке концепции многоуровневого армирования исходили из принципов:

- 1) соразмерности (конгруэнтности) армирующих элементов параметрам «блокируемых» трещин;
- 2) соответствия объемной доли армирующих элементов «концентрации» дефектов (трещин) структуры определенного уровня;
- 3) субстанционального соответствия материала армирующих элементов характеристикам матричного материала (т. е. бетона).

Предлагается [44; 81] выделять 4 уровня трещинообразования (рис. 1.10), которые предопределяют особенности дисперсного армирования строительных композиционных материалов:

1. Макромасштабный уровень (уровень крупнозернистого бетона). В качестве блокирующих макротрещины армирующих элементов используется традиционная рабочая арматура, размещаемая в соответствующей зоне строительной конструкции.

2. Мезомасштабный уровень (уровень мелкозернистого бетона). Дисперсное армирование материала на этом структурном уровне с учетом присущих ему трещин размером 0,1–0,9 мм может достигаться введением армирующих элементов длиной 1–5 см и диамет-

ром 0,1–0,8 мм, для чего могут быть применены стальные, минеральные, углеродные и другие виды волокон.

3. Микромасштабный уровень (уровень цементного микробетона). Армирование на уровне цементного микробетона с учетом присутствующих ему микротрещин размером 10–80 мкм возможно осуществлять волокнами длиной 1–5 мм и диаметром 10–50 мкм. В данном случае могут быть пригодны различные виды стекловолокна, асбестовые и другие минеральные волокна.

4. Субмикромасштабный уровень (уровень цементирующего вещества). Система основных новообразований цементного камня характеризуется размером частиц (0,04–0,2) мкм и микропор (0,08–1,0) мкм, присутствующие зародышевые «технологические» субмикротрещины имеют порядок (0,1–2,0) мкм. Такие трещины и поры могут перекрываться относительно протяженными кристаллогидратами новообразований длиной до (3–5) мкм, то есть отличающимися по длине на полпорядка-порядок, (само микроармирование). Другим возможным направлением субмикроармирования является введение нитевидных кристаллов гидросиликатов кальция, достаточно близких по своим физическим и физико-химическим параметрам к новообразованиям, возникающим при гидратации цементных вяжущих, интенсифицирующих процессы твердения бетона и улучшающих его сопротивление разрушению.

Принимая в целом рациональность концепции многоуровневого дисперсного армирования с позиции повышения трещиностойкости фибробетона у предложенной «многоуровневой структурной модели» очевиден ряд недостатков. Во-первых, невозможность реализации на практике не только всей совокупности, но и частной выборки из нескольких типоразмеров фиброэлементов, совместно введенных в бетон. Тем более, если применять (а это неизбежно, согласно концепции, отраженной в виде схемы на рис.) разные по природе виды фибр. Во-вторых, указанные размеры трещин с раскрытием до «3,94–3,98 мм – для крупнозернистого бетона» – это уже не трещинообразование, а недопустимое механическое нарушение сплошности бетона в конструкции, чреватое потерей ей несущей способности.

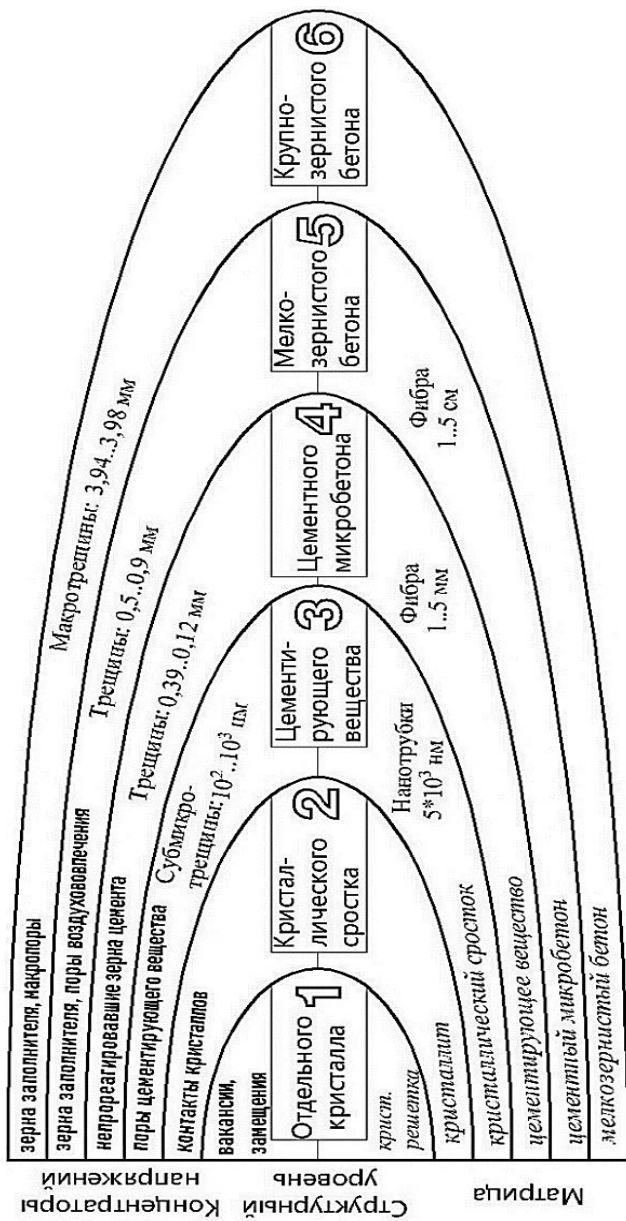


Рисунок 1.10 – Схема «многоуровневого дисперсного армирования» [157] и армирующие элементы [78]

В-третьих, данная структурная модель не учитывает важнейшую особенность такого конгломератного материала, как цементный (мелкозернистый и с крупным заполнителем) бетон: наличия наиболее слабых зон их по площади контакта зерен заполнителей с цементным камнем. Именно здесь под действием нагрузок зарождаются и затем «развиваются» трещины, встречая на своем пути прослойки цементного камня, «окружающего» зерна заполнителей.

В этой связи и исходя из рациональности концепции многоуровневого дисперсного армирования бетона мы считаем наиболее целесообразным его двухуровневое армирование: нано-, микроармирование нанокремнекислотными трубками для восприятия контракционно-усадочных явлений твердеющего цементного камня и бетона, а также макроармирования стальной фиброй.

Такое сочетание обеспечит их совместную «работу»: за счет нанокремнекислотного материала – ограничение трещинообразования в объеме цементного камня, что следует из ранее приведенных данных обзора научно-технической литературы, а стальная фибра минимизирует деформации бетона под действием нагрузок и их проявление в виде трещинообразования, что подтверждается как результатами исследовательских работ, так и практикой применения сталефибробетона. Результатом такого варианта многоуровневого дисперсного армирования бетона должно стать повышение его трещиностойкости, доказательство которого является одной из задач настоящих исследований.

Данный подход к решению основной задачи по повышению трещиностойкости фибробетона требует одновременного решения других научно-технических задач: разработку технологии приготовления фибробетона с учетом введения в его состав УНМ и стальной фибры, а также совершенствование технологии и организации ведения бетонных работ на строительной площадке. Особую значимость имеет решение задачи по обеспечению равномерного распределения фибры на стадии приготовления бетона, что является гарантией однородности его структуры и свойств. Кроме отмеченного требует совершенствования, а по существу необходима разработка системного контроля для оценки как фактического состояния структуры затвердевшего фибробетона по критерию равномерности распределения в его объеме фибры, так и для оценки однородности его физико-механических свойств.

Эту задачу в исследованиях планируется решить в варианте комплексных, разноплановых испытаний фибробетона многоуровневого армирования, включая физические методы оценки состояния его структуры (ультразвуковое прозвучивание, ультразвуковая томография и др.), а также механические методы контроля прочностных свойств в сочетании с параметрами вязкости разрушения, т. е. с оценкой его трещиностойкости.

1.2. СОВРЕМЕННЫЕ ПРИЕМЫ ВВЕДЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФИБРЫ В БЕТОННОЙ СМЕСИ

Введение фибры в бетонную смесь осуществляется несколькими способами:

- на стадии ее приготовления после введения в смеситель мелко-го и крупного заполнителей;
- в приготовленную бетонную смесь на стационарных бетономесительных узлах (установках);
- в автобетоносмеситель с приготовленной бетонной смесью на строительной площадке;
- в готовую бетонную смесь в процессе ее укладки в опалубку или форму (равномерно по объему или послойно, в зависимости от способа укладки и вида конструкции).

С целью обеспечения равномерного распределения фибры (рис. 1.11–1.12) используют механизмы с различными принципами действия: вибрирование, конвейерное движение, вращение барабанов с зубьями (гребенки), выдувание (для синтетической (волоконной) фибры).

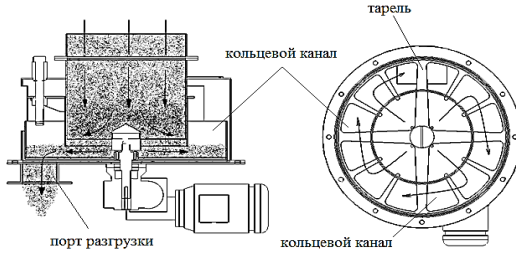
Анализ научно-технической информации, включая опыт практического использования стальной фибры, позволяет сделать вывод, что каждый из приведенных вариантов механизации процесса ее дозирования и введения в бетонную смесь характеризуется сочетанием достоинств и недостатков. Исходя из задач настоящего исследования очевидно, рациональным будет вариант стационарного приготовления бетонной смеси с введением в ее состав углеродного наноматериала на этой стадии с последующим введением стальной фибры в построчных условиях.



a



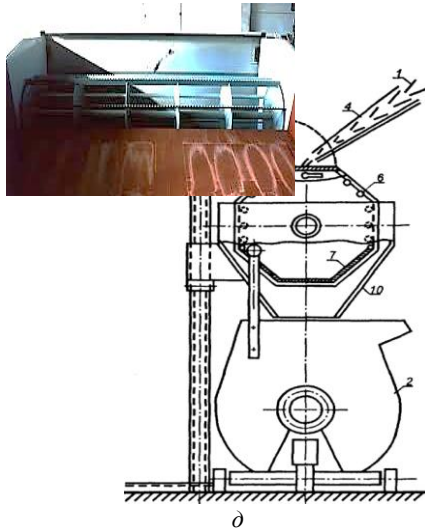
б



в



г



д



Рисунок 1.11 – Дозирующие устройства: *a* – введение фибры в бетон по конвейерной ленте; *б* – дозатор фибры MD 400; *в* – дозатор дисковый универсальный; *г* – фибродув; *д* – дозатор с барабаном с зубьями: 1 – фибра; 2 – бетоносмеситель; 3 – барабан; 4 – лоток; 5 – привод; 6 – стержни; 7 – поддон; 8 – крышка; 9 – реле; 10 – ограждение [44]

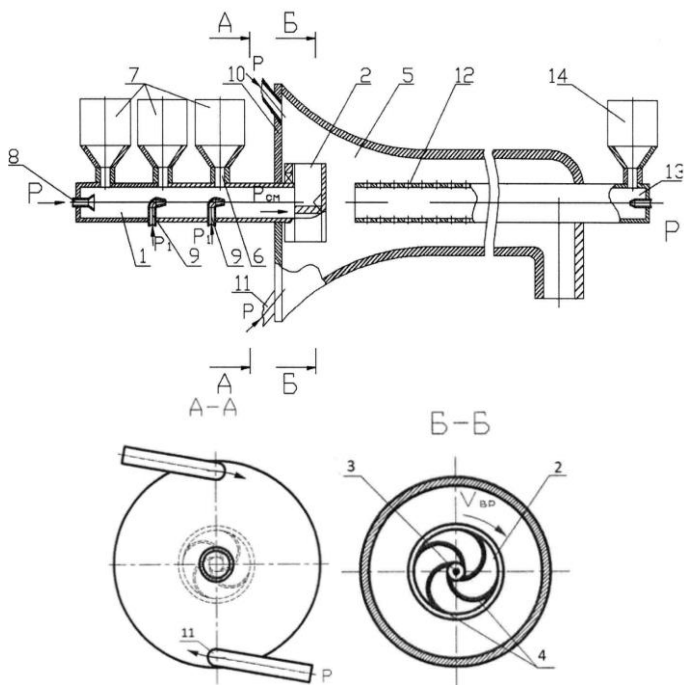


Рисунок 1.12 – Противоточный пневмосмеситель для производства дисперсно-армированных смесей [82]: 1 – подающая труба; 2 – ротационный распределитель; 3 – конус-рассекатель; 4 – выходное отверстие; 5 – корпус; 6 – патрубki ввода; 7 – загрузочные бункера; 8 – воздушное сопло; 9 – воздушные сопла; 10 – центральная часть большого торца конфузора; 11 – наклонные сопла; 12 – патрубок для подачи сжатого воздуха; 13 – воздушное сопло; 14 загрузочный бункер

1.3. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФИБРОБЕТОННОЙ СМЕСИ И ФИБРОБЕТОНА В КОНСТРУКЦИИ

Оценка качества приготовления фибробетонной смеси и, в особой мере, равномерности распределения фибры, как фактора качества (однородности) свойств фибробетона в строительных конструкциях, является сложной в решении научно-технической задачей. Это связано с разнообразием и степенью влияния на формирование структуры фибробетона технологических факторов: В/Ц бетона, вида фибры, ее объемного содержания, требуемой удо-

боукладываемости, разной крупности заполнителя, режимов укладки и уплотнения и др., а в итоге – на физико-механические свойства фибробетона. В определенной мере степень этой взаимосвязи характеризуется схемой, представленной на рис. 1.13. При оценке значимости влияния различных факторов рекомендуется «располагать их в порядке по степени влияния» на требуемые физико-механические свойства: вид фибры, объемное содержание фибры, класс бетона, однородность армирования, прочность сцепления фибры с матрицей, ориентация фибры, водоцементное отношение, крупность заполнителя, способ приготовления и др. Рекомендуется оценивать эти параметры с учетом преимущественных свойств фибробетона: прочности на растяжение при изгибе, деформативности, трещиностойкости и т. д.

В первую очередь необходимо контролировать качество бетонной смеси и прочностные характеристики бетона конструкций. Если контроль качества бетонной смеси можно осуществлять методами, используемыми для традиционного бетона, то определение таких показателей как равномерность распределения, ориентирование, объемное содержание фибры в уже готовой конструкции на строительной площадке весьма проблематично.

Приведенные далее практикуемые приемы требуют дальнейшего совершенствования.

Контроль прочности и приближенная оценка распределения фибры может осуществляться разрушающим способом путем испытаний образцов, выбуренных или вырезанных из нескольких мест сталефибробетонной конструкции. Такой метод трудоемок, требует много времени и не дает точной информации о распределении фибры во всей конструкции.

Кроме этого, данный метод неприменим для испытаний бетона железобетонных конструкций малой толщины и высокой степени армирования. Бетон таких конструкций целесообразно испытывать неразрушающими методами.

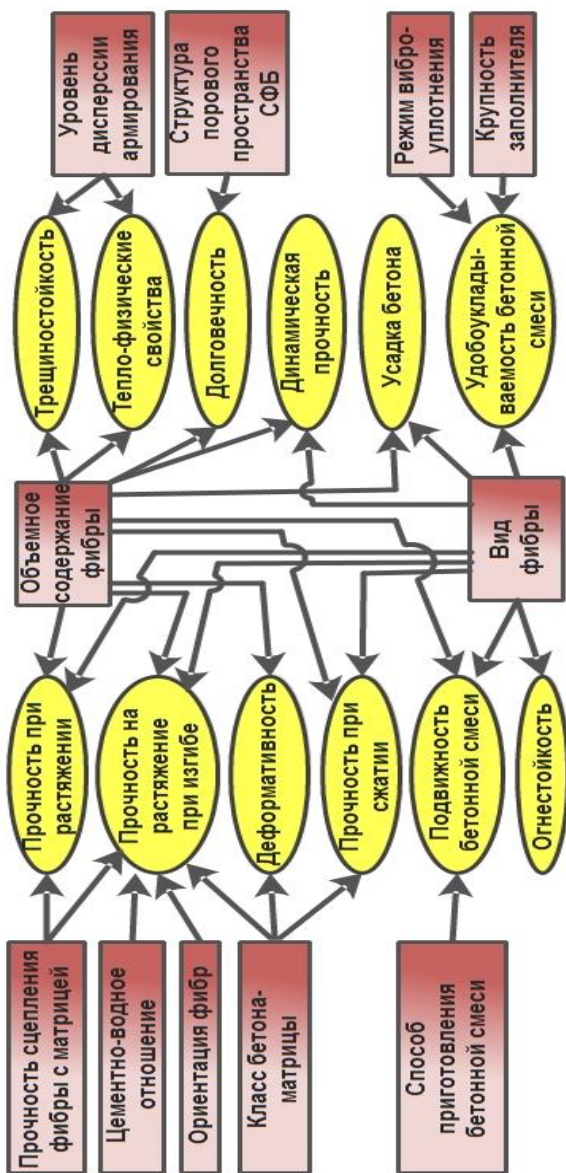


Рисунок 1.13 – Взаимосвязь между параметрами и физико-механическими свойствами фибробетона

Не разрушающие методы контроля. Одним из первых апробированных к применению методов неразрушающего контроля фибробетона был ультразвуковой (рис. 1.14). Стало очевидным, что он ограниченно применим, так как сквозное прозвучивание возможно только для ограниченного типа конструкций. Кроме того, согласно исследованиям Дорфа В. А. [83] скорость распространения ультразвука в сталефибробетоне при погрешности измерения два и более процента не зависит от вида фибры и ее объемного содержания (в экспериментах до 6 %). Влияние фибры на скорость ультразвука в сталефибробетоне связано с разуплотнением матрицы при малых процентах армирования и ростом его плотности, пропорционально проценту армирования [83]. При оценке характера распространения ультразвука в сталефибробетоне при малых процентах армирования можно рассматривать модель в виде матрицы с микротрещинами, пересеченными отдельными волокнами фибры.

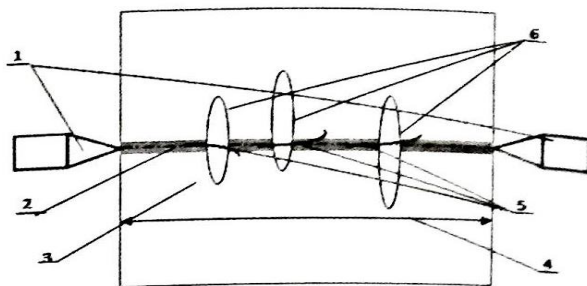


Рисунок 1.14 – Схема ультразвуковой оценки сталефибробетона [83]:
 1 – ультразвуковой преобразователь; 2 – ультразвуковой сигнал; 3 – образец;
 4 – база измерения; 5 – волокна фибры; 6 – микротрещины

Исследователи пришли к выводу, что контроль качества сталефибробетона с применением ультразвука в большей мере целесообразен для оценки степени его уплотнения и прочности.

Компьютерная томография (КТ), в сочетании с современным программным обеспечением для обработки и анализа изображений, подходит [84] для определения пространственной ориентации и распределения фибры в фибробетоне. Компьютерная томография позволяет распознавать и анализировать особенности ориентации и распределения фибры по всему объему фибробетона специально изготовленных или извлеченных из «тела» конструкции образцов.

Трехмерная компьютерная томография, базирующаяся на «реконструкции» объекта при помощи рентгеновских снимков, которые делаются в различных направлениях с использованием рентгеновского излучения [84], позволяет достаточно точно отобразить распределение и положение фибры в образцах фибробетона (рис. 1.15).

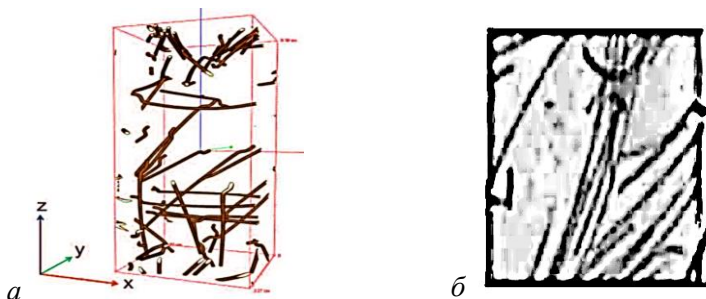


Рисунок 1.15 – КТ-анализ [84]: а – система фибры (визуализация); б – снимок КТ

Вместе с тем, данный метод, приведенный в анализировавшихся источниках, использовался для определения показателей фибробетона только в образцах, предварительно изготовленных или изъятых из тела конструкции. Одной из задач исследований была апробация этого метода для контроля фибробетона в построечных условиях.

Магнитоскопия и радиоволновой методы апробируются исследователями [85–90] в варианте подготовки образцов-аналогов изготовлением из ориентировочных составов фибробетона, либо изъятых из конструкции. По существу, эти методы находятся на стадии экспериментальной разработки. Их достоверность не подтверждена практикой применения в строительном производстве.

Обобщая изложенное приходим к выводу о необходимости совершенствования методов контроля качественных характеристик фибробетона, включая методику оценки равномерности распределения стальной фибры в объеме бетонируемой конструкции (а фактически в объеме затвердевшего бетона конструкции), уровня и однородности его физико-механических свойств.

С этой целью предложен и реализован комплексный подход, включающий метод разрушающего контроля для оценки физиче-

ских, механических, энергетических параметров, характеризующих в совокупности прочностные и упруго-деформативные свойства фибробетона, армированного стальной фиброй и углеродными нанотрубками, данные которого дополняются методами неразрушающего контроля: ультразвуковым прозвучиванием, ультразвуковой томографией, упругого отскока.

1.4. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

Анализ научно-технической информации по направлению исследований позволяет выделить ряд проблемных вопросов технологии монолитного строительства с применением фибробетона.

Требуют совершенствования методы контроля равномерности распределения элементов фибры (в особой мере стальной) в объеме бетона формируемых строительных конструкций с целью повышения степени однородности как свойств самого фибробетона, так и характеристик конструкций.

Очевидный эффект от полидисперсного армирования практически получил только теоретическое обоснование, критическая оценка которого показывает, что не учитываются характерные свойства конструкционного тяжелого бетона, являющегося конгломератным материалом. В этой связи необходимо учитывать особенности его структурного строения и разницу в свойствах бетона в целом и связующего – цементного камня. Поэтому мы считаем рациональным реализовать эффект от полидисперсного армирования путем наномикроармирования структуры цементного камня (за счет введения в состав трубчатых УНМ) в сочетании с макроармированием структуры бетона стальной фиброй.

В этой связи требует разработки технология ведения бетонных работ с использованием фибробетона полидисперсного армирования, включающая составы бетона базовых классов по прочности на сжатие, а также оценку их упруго-деформативных характеристик, технологию приготовления фибробетона и технологию бетонирования строительных конструкций с его применением.

Требует решения проблемный вопрос контроля качества фибробетона, оценки однородности его свойств, что является базой качества строительных конструкций, устроенных (возведенных) с его применением.

На основании изложенного общей целью исследований является разработка технологии строительства с применением тяжелого конструкционного фибробетона многоуровневого армирования и исследование его свойств.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- обосновать концепцию многоуровневого армирования конструкционного тяжелого бетона, включающую уровень нано-, микроармирования цементного камня трубчатыми углеродными наноматериалами и макроармирование структуры бетона стальной фиброй;

- разработать составы фибробетона с определением оптимальных количеств стальной фибры и углеродного наноматериала при моноармировании и исследовать свойства фибробетона многоуровневого армирования при сочетании нано-, микроармирования трубчатыми УНМ и макроармирования стальной фиброй;

- разработать методику многопараметрической оценки свойств фибробетона многоуровневого полидисперсного армирования с целью определения прочности, трещиностойкости и деформативности в лабораторных и построечных условиях;

- разработать технологию ведения бетонных работ с приготовлением и применением фибробетона многоуровневого полидисперсного армирования при устройстве монолитных строительных конструкций;

- разработать комплексную методику оценки качества фибробетона в строительных конструкциях и апробировать результаты исследований в производственных условиях.

ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. ОБЩАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Принимая рациональность концепции многоуровневого полидисперсного армирования фибробетона, как основы собственных исследований, на их начальном этапе (глава 1) была обоснована гипотеза о перспективности авторского варианта его реализации с целью повышения качественных характеристик фибробетона.

Сущность выдвигаемой гипотезы заключается в том, что зарождение под действием нагрузки трещин в бетоне имеет место в наиболее слабых контактных зонах зерен заполнителя с цементным камнем, а также в дефектах структуры последнего и бетона в целом: в грубокапиллярных и контракционных порах, микроусадочных трещинах и пр. В последующем «развитии» трещины проходят через «оболочки» цементного камня и с целью повышения его трещиностойкости в объем цементного камня вводятся трубчатые элементы углеродного наноматериала, которые обеспечивают эффект наноармирования структуры кристаллогидратных новообразований и микроармирования структуры собственно цементного камня (бетона Юнга).

В свою очередь стальная фибра препятствует развитию трещинообразования в бетоне на макроуровне, а в совокупности их эффектов обеспечивается рост трещиностойкости армированного таким образом фибробетона. При этом возможность эффективной совместной «работы» стали и углеродных наноматериалов подтверждается практически равенством их модулей упругости (для стали $E \sim 170\text{--}200$ ГПа; для углеродной $E \sim 200$ ГПа) [91–93].

В обоснование данной гипотезы на начальном этапе работ экспериментально определили взаимозависимость прочностных характеристик фибробетона от вида фибры (в варианте введения в состав углеродных нанотрубок и стальной фибры) при «моноармировании» и их оптимальное количественное содержание с позиций повышения прочностных характеристик.

Установив относительное содержание фибры в бетоне в варианте «моноармирования» осуществили экспериментальную проверку

их влияния на свойства фибробетона комплексного многоуровневого армирования.

На основании полученных данных выявили наиболее рациональное соотношение в фибробетоне многоуровневого армирования наноуглеродной (УНТ) и стальной фибры по влиянию этого сочетания на комплекс физико-механических свойств, а также на его силовые и энергетические параметры. Эти данные затем были использованы при разработке комплексной, многопараметрической методики контроля качественных характеристик фибробетона многоуровневого армирования.

С учетом целенаправленности исследований на разработку технологии монолитного бетона было необходимым выявить влияние УНТ-фибры и стальной (а для сравнения и композитной) фибры на технологические свойства бетонных смесей, включая их формуемость (удобоукладываемость) и сохранение формовочных свойств во времени. Это было необходимо как с позиций оценки свойств смесей с фиброй при укладке в опалубку, так (в особой мере) для разработки технологии приготовления фибробетона и последующей работы с ним, учитывая наличие периода времени на транспортирование смеси, приема на объекте и условий укладки в конструкции.

В этой же связи было необходимо оценить эксплуатационные свойства фибробетона, такие как уровень водопоглощения, морозостойкость, водонепроницаемость и др., которые могут предъявляться к бетону устраиваемых (возводимых) строительных конструкций с его применением.

На основании полученных данных были разработаны базовые положения технологии ведения бетонных работ, включающие:

– условия приготовления фибробетона многоуровневого армирования (в частности, определена возможность введения УНТ-фибры на стадии приготовления бетона-матрицы как централизованно, так и приобъектно, т. е. на строительной площадке) с введением стальной фибры на объекте, перед подачей к месту укладки в конструкцию;

– правила ведения бетонных работ и ухода за фибробетоном в процессе твердения;

– правила контроля качества фибробетона многоуровневого армирования по разработанной в данном исследовании комплексной, многопараметрической методике.

Особым этапом исследования явилась разработка данной методики, ее экспериментальное обоснование и проверка степени достоверности получаемых результатов на базе комплексно определяемых физико-механических характеристик фибробетона, его силовых и энергетических параметров, обеспечивающих устойчивость к трещинообразованию и повышенную вязкость разрушения под воздействием механических нагрузок.

На завершающем этапе работ была осуществлена производственная апробация результатов исследований, подтвердившая их эффективность.

2.2. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Для изготовления опытных образцов бетона и фибробетона использовались различные бетонные матрицы (составы) и дисперсные волокна (фибра).

Бетон «С» и «М» БСГТ ПЗ С25/30 St-1 F200 W6 СТБ 1035-96. Добавка Реламикс ПК.




Бетон «S» Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ДН ГОСТ 33174-2014 (ТР ТС 014/2011) производства АО «Мордовцемент». Наномодифицированная добавка LL+C_n РБ (табл. 2.2). Щебень гранитный фракции 5–20 «Ильмениоки», Карелия. Песок М_{кр} = 2,2, I класса карьер «Сестринский» РФ.

Бетон «Л» Портландцемент ПЦ 500–Д0 РУПП «Кричевцементношифер» по ГОСТ 10178-85 и ГОСТ 30515-97. Природный песок Крапужинского месторождения по ГОСТ 8736-93. Щебень гранитный (марка по дробимости «1400») Микашевичского месторождения по ГОСТ 8267-93 обычного дробления. Вода водопроводная по СТБ 1114-98.

Таблица 2.1 – Перечень и характеристика используемых материалов для бетон-матриц «А, Б, В, Г, Д, Ж, И, К»

№	Тип материала	Наименование материала	Краткая характеристика, номер документа
1	Вязущее	цемент	портландцемент 500-Д20 ГОСТ 10178-85; ОАО «Красносельскстройматериалы» Филиал № 1 «Цементный завод»; Активность – 32,6 МПа; Нормальная плотность – 26,0 %. Документ о качестве № 98
2	Мелкий заполнитель	песок	песок для строительных работ по ГОСТ 8736–2014; ДРСУ–159 к-р «Запольское» г. Островец КУП «Гродноблдорстрой»; Модуль крупности – 2,0
3	Крупный заполнитель	щебень 5–10	щебень гранитный по ГОСТ 8267-93; РУП «Гранит» г. Микашевичи; Фракция 5–10 мм.
4		щебень 5–20	щебень гранитный по ГОСТ 8267-93; РУП «Гранит» г. Микашевичи; Фракция 5–20 мм
5	Минеральная добавка	PCAM	сульфоалюминатная добавка PCAM СТБ 2092-2010; ООО «ПарадСтройХим»
6		МКУ	микрокремнезем конденсированный уплотненный (МКУ-85) по ТУ 5743-048-02495332-96; ОАО «Челябинский электрометаллургический комбинат», поставщик ООО «Тривойт» г. Минск Сертификат № 589812 от 22.12.2017 г. ТУ 5743-048-02495332-96
7	Химическая добавка в бетон (в том числе с УНТ)	«Реламикс ПК»	химическая добавка в бетон «Реламикс ПК» по ТУ ВУ 190679156.002-2013; ООО «ПолипластХИМ» г. Минск. Паспорт № 83 24.11.2017
8		SikaVisco Crete 5-600SP	химическая добавка в бетон «SikaViscoCrete 5–600SP» по ТУ ВУ 192047188.001–2015; ООО «Эс Ай Кей Эй Бел» г. Минск
9		SikaVisco Crete 3190	химическая добавка в бетон «SikaViscoCrete 3190» по ТУ ВУ 192047188.001–2015; ООО «Эс АйКей Эй Бел» г. Минск
10		«РуФикс-АН»	модификатор «РуФикс-АН» на основе углеродных наноструктурированных материалов ТУ 20.13.21–001–90784962–2018 ООО «АМС Групп» г. С.-Петербург
11		АРТ-КонкритР	добавка в бетоны «АРТ-КонкритР» ТУ ВУ 691460594.002–2016 – ООО «Передовые исследования и технологии»

Таблица 2.2 – Характеристики используемой фибры

№	Маркировка	Модуль упругости, МПа	Прочность на разрыв, МПа характер./расчетн.	$\frac{\text{Длина, мм}}{\text{Диаметр, мм}}$	Индекс фибры, L/D	Описание	Внешний вид
1	2	3	4	5	6	7	8
1	ФЛВ-0.9-50	190·10 ³	400/347	$\frac{50 \pm 4}{0,9 \pm 8 \%}$	55	фибра из листовой стали волнистая стальная полоска, напоминающая объемную зигзагообразную кривую с рифлением (ООО «Изомат-строй», РБ) ТУ ВУ 1900545892.009-2013	
2	ФСА-1.0-60	210·10 ³	800/695	$\frac{60 \pm 3}{1,0 \pm 0,04}$	60 ± 9	Фибра стальная проволочная анкерная (БМЗ, РБ) из низкоуглеродистой стали ТУ ВУ 400074854.628-2011; DIN EN 14889-1.2006	
3	ФПИ-0.6-40	1,5·10 ³	125/108	$\frac{40 \pm 8 \%}{0,95 \pm 0,01}$ шпр. 1,5 толщ. 0,5 ± 8 %	42 ± 2	Фибра полимерная «Fiber RS – Makro Wаxеhоldеlеnе жеет-кие, рифлелные волокна из ориентированного 100 % первичного полипропилена ООО «Руссесал», РФ ТУ 20.60.11-002-30726220	

Окончание табл. 2.2





1	2	3	4	5	6	7	8
4	ФБ-0.02-12	$90 \cdot 10^3$	1500/1304	$\frac{12 \pm 1}{13 \cdot 10^{-3}}$	920	фибра базальтовая РФ	
5	ФП-0.1-20	$0,84 \cdot 10^3$		$\frac{20 \pm 4}{0,1}$	200	Фибра полипропиленовая «RS» Полипропиленовые моново- локна покрытые замаслива- телем. ООО «Руссеал», РФ ТУ 2272-001-30726220	
6	МФСП-0.2-12	$190 \cdot 10^3$	1000/870	$\frac{12 \pm 1}{0,2 \pm 0,04}$	60 ± 9	микрофибра стальная прямая «БМЗ» РБ ТУ ВУ 400074854.628	
7	МФСА-0.3-30	$190 \cdot 10^3$	1000/870	$\frac{30 \pm 2}{0,35 \pm 0,02}$	86 ± 12	микрофибра стальная анкер- ная «БМЗ» РБ ТУ ВУ 400074854.628	

Таблица 2.3 – Характеристики углеродсодержащих добавок

Показатели	Наименование добавки		
	D1	D2	D3
	АРТ–Конкрит Р	РуФикс–500Б	LL + Сп
тип добавки	суперпластификатор (СП) поликарбоксилатный сополимер		пластификатор (П) I группы
массовая доля сухого остатка	37 %	37 %	35 %
плотность	1,1 ±0,1 г/см ³	1,1 ±0,02 г/см ³	1052 кг/м ³
количество твердого углерода (УНТ)	0,825 г УНТ на 1 л СП или 0,750 г УНТ на 1 кг СП	1,00 г УНТ на 1 л СП или 0,909 г УНТ на 1 кг СП	1,8 г УНТ на 1 кг П
модифицирующее вещество	многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ) производства ООО ПИТ, РБ		
средний диаметр трубок	10–300 нм	10–40 нм	
средняя длина	0,01–20 мкм	> 2 мкм	
массовая доля аморфного углерода	не более 50 %		
количество структурированного углерода	не менее 50 %		
количество стенок	10–20		
насыпная плотность	0,15–0,22 г/см ³		
зольность	не более 5 %		
удельная адсорбционная поверхность	от 60 м ² /г		

2.3. ИСПЫТЫВАЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Для испытаний изготавливались различные образцы: кубы 100x100x100 мм, призмы 100x100x400 мм и 70x70x280 мм, цилиндры 150x150 мм (рис. 2.1). Количество образцов в серии в зависимости от вида испытания варьировалось от 2 до 20 шт. В результате экспериментальных исследований было изготовлено и испытано более 760 образцов различной формы и размеров.



Рисунок 2.1 – Опытные образцы

Таблица 2.4 – Составы сырьевых смесей используемых в главе 3

Но- мер со- ста- ва	Обозна- чение состава	Це- мент			Щебень		Песок		Химическая добавка		тв. УНТ % от массы цемента	В/Ц	Фибра		Удобо- укладываемость смеси
		3	4	5	6	7	8	кол.	наимен.	количество			обозначение	мг, кг (M _ф , %)	
1	2				6	8			9	10	11	12	13	14	
1	А								0,4	0,4	–	–	20-22/-		
2	А-Ф1	400	1020	–	820	3,2 (0,8 %)	АРГ- Конкрит Р	0,00060 %	0,39	0,39	80 (1 %)	ФЛВ-0,9-50	5/-	П2	
3	А-Ф2								0,39	0,39	80 (1 %)	ФСА-1,0-60	13/-	П3	
4	А-Ф3								0,39	0,39	3,5 (0,4 %)	ФПИ-0,6-40	19/-	П4	
5	Б								0,4	0,4	–	–	22-24/-		
6	Б-Ф1	445	1035	–	820	2,22 (0,5 %)	АРГ- Конкрит Р	0,00038 %	0,38	0,38	80 (1 %)	ФЛВ-0,9-50	12/-	П2	
7	Б-Ф2								0,4	0,4	80 (1 %)	ФСА-1,0-60	20/-	П4-П5	
8	Б-Ф3								0,4	0,4	3,5 (0,4 %)	ФПИ-0,6-40	22/-	П5	
9	В								0,4	0,4	–	–	-/53		
10	В-Ф1	460	–	880	950	2,3 (0,5 %)	АРГ- Конкрит Р	0,00038 %	0,36	0,36	80 (1 %)	ФЛВ-0,9-50	20 / 33	П4/П1	
11	В-Ф2								0,32	0,32	80 (1 %)	ФСА-1,0-60	-/47	Р3-Р4	
12	В-Ф3								0,44	0,44	3,5 (0,4 %)	ФПИ-0,6-40	-/50	Р4	
13	Г								0,44	0,44	–	–	-/64		
14	Г-Ф1	485 140/ 245	–	825	800	4,56 (0,94 %)	АРГ- Конкрит Р	0,00060 %	0,44	0,44	80 (1 %)	ФЛВ-0,9-50	-/54	Р4	
15	Г-Ф2								0,42	0,42	80 (1 %)	ФСА-1,0-60	-/60	Р6	
16	Г-Ф3								0,4	0,4	3,5 (0,4 %)	ФПИ-0,6-40	-/62	Р6	

Окончание табл. 2.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
17	Д								0,39	–	–	22/–
18	Д-Ф4	400	1020	–	800	1,7 (0,4 %)	РудФикс-500Б	0,00032 %	0,39	2/20/20 0,07 %/0,25 %/0,25 %	ФБ-0,02-12/МФСП-0,3-12/ФСА-1,0-60	П2
19	Д-Ф8								0,39	1/20/20 0,11 %/0,25 %/0,25 %	ФП-0,02-12/МФСА-0,3-30/ФСА-1,0-60	–
20	Ж								0,36	–	–	22/–
21	Ж-Ф4	445	1035	–	820	4 (0,9 %)	РудФикс-500Б	0,00067 %	0,36	2/20/20 0,07 %/0,25 %/0,25 %	ФБ-0,02-12/МФСП-0,3-12/ФСА-1,0-60	П3
22	Ж-Ф8								0,36	1/20/20 0,11 %/0,25 %/0,25 %	ФП-0,02-12/МФСА-0,3-30/ФСА-1,0-60	–
23	И								0,39	–	–	–/70
24	И-Ф4	485	830	–	835	4,32 (0,9 %)	РудФикс-500Б	0,00060 %	0,39	2/20/20 0,07 %/0,25 %/0,25 %	ФБ-0,02-12/МФСП-0,3-12/ФСА-1,0-60	П2
25	И-Ф8	155							0,39	1/20/20 0,11 %/0,25 %/0,25 %	ФП-0,02-12/МФСА-0,3-30/ФСА-1,0-60	–
26	К								0,39	–	–	–/72
27	К-Ф4	485	–	8	800	5,82 (1,0 %)	РудФикс-500Б	0,00077 %	0,39	2/20/20 0,07 %/0,25 %/0,25 %	ФБ-0,02-12/МФСП-0,3-12/ФСА-1,0-60	П2
28	К-Ф8	245		5					0,39	1/20/20 0,11 %/0,25 %/0,25 %	ФП-0,02-12/МФСА-0,3-30/ФСА-1,0-60	–
29	С	425	1070	–	750	2,4 (0,5 %)	Реламикс ПК	–	0,4	–	–	15/–
30	М	425	1070	–	750	2,4 (0,5 %)	Реламикс ПК	–	0,4	–	–	15/–
31	С	350	1110	–	750	5,6 (1,6 %)	LL	–	–	–	–	–
32	S _{NC}	350	1110	–	750	5,6 (1,6 %)	LL+Sn	0,0028 %	–	–	–	–
33	Л	350	1040	–	760	3,5 (1,0 %)	Реламикс ПК	–	–	–	–	21/–

¹ Расширяющая сульфоломинальная добавка (РСАМ); ² Микрокремнезем конденсированный (МКУ)

2.3.1. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОННОЙ СМЕСИ

Исследование свойств бетонных смесей осуществлялись в соответствии с действующими нормативными документами.

1. Определение удобоукладываемости по показателю подвижности выполнено в соответствии с СТБ EN 12350-2-2012 «Методы испытаний бетонной смеси. Определение осадки конуса». Определение удобоукладываемости по показателю распыла конуса осуществлялось в соответствии с СТБ EN 12350-8-2012 «Методы испытаний бетонной смеси. Самоуплотняющаяся бетонная смесь».

2. Определение плотности проводилось в соответствии с СТБ EN 12350-6-2012 «Методы испытаний бетонной смеси».

2.3.2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА

Общая методика испытаний.

1. Для определения прочности на сжатие использовались образцы в форме куба номинальных размеров 100x100x100 мм в соответствии с ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

2. Определения прочности неразрушающими методами:

– методом ударного импульса по СТБ 2264–2012 «Испытание бетона. Неразрушающий контроль прочности»;

– ультразвуковым методом определения прочности бетона по ГОСТ 17624–2012 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности».

3. Для определения прочности на осевое растяжение использовались образцы призмы квадратного сечения размером 70x70x280 мм в соответствии ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

4. Для определения прочности на растяжение при изгибе использовались образцы призмы квадратного сечения размером 100x100x400 мм в соответствии ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

5. Марка бетона по морозостойкости оценивалась по ГОСТ 10060–2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости. Общие требования». Используемый метод для определения морозостойкости – ускоренный при многократном замораживании и оттаивании (третий).

6. Для определения водонепроницаемости прямым методом по «мокрому пятну» и косвенным – по прониканию воздуха ГОСТ 12730.5–2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости».

7. Определение водопоглощения по ГОСТ 12730.3–2020 «Бетоны. Метод определения водопоглощения».

8. Определение показателей пористости бетонов по кинетике их водопоглощения выполняли по ГОСТ 12730.4–2020 «Бетоны. Методы определения параметров пористости».

9. Определение трещиностойкости производили согласно ГОСТ 29167–21 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении» [107]:

– *определение коэффициента интенсивности напряжения при нормальном отрыве.* Для определения коэффициента интенсивности напряжения при нормальном отрыве на образцах-кубах выполняются инициаторы трещин в виде симметричных надрезов глубиной $h / 4$ (где h – высота куба) с помощью режущих инструментов с алмазным напылением. Схема образца представлена на рис. 2.2.

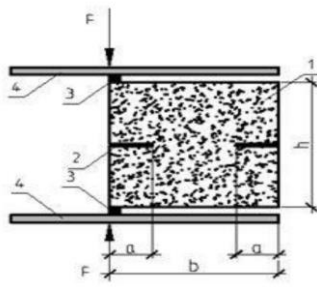


Рисунок 2.2 – Схема нагружения образца для расчета K_{IC} : 1 – изделие; 2 – надрезы; 3 – металлические пластины; 4 – плиты пресса; h – высота образца, м; b – ширина образца, м; a – глубина надреза, м, $a = h / 4$; F – нагрузка, действующая на образец в процессе испытания, Н

Испытания проводились при внецентренном сжатии. Значение критического коэффициента интенсивности напряжения (при нормальном отрыве K_{IC} , (МН/м^{3/2}) рассчитывалось по формуле, подставляя данные геометрических размеров кубов и значения разрушения образца:

$$K_{IC} = \frac{F_c}{b \cdot h^{\frac{1}{2}}} \left[\begin{array}{l} 18,3 \left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{1}{2}} - 430 \left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{3}{2}} + 3445 \left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{5}{2}} - \\ - 11076 \left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{7}{2}} + 12967 \left(\frac{a}{h}\right)^{\frac{9}{2}} \end{array} \right], \text{ МН/м}^{3/2}, \quad (2.1)$$

где F_{IC} – нагрузка, при которой происходит разрушение, МН;

b – ширина образца, м;

h – высота образца, м;

a – глубина надреза, м, $a = h/4$;

– *определение коэффициента интенсивности напряжения на поперечный сдвиг.*

Для определения коэффициента интенсивности напряжения на поперечный сдвиг из образцов-половинок, полученных при испытании на нормальный отрыв, выполнялась зона концентрации напряжения в виде симметричных надрезов на одной грани изделия с помощью режущих инструментов с алмазным напылением. Схема образца представлена на рис. 2.3.

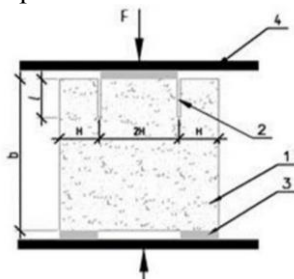


Рисунок 2.3 – Схема нагружения образца для расчета K_{IC} : 1 – изделие; 2 – надрезы; 3 – металлические пластины; 4 – плиты пресса; b – высота образца, м; H – ширина плеча, м; l – глубина надреза, м, $l = b / 4$; F – нагрузка, действующая на образец в процессе испытания, Н.

Нагружение осуществлялось до момента разрушения изделия и регистрировали значение разрушения $F_{IIС}$. Значение критического коэффициента интенсивности напряжения на поперечный сдвиг $K_{IIС}$ ($\text{МН/м}^{3/2}$) рассчитывается по формуле 2.2, подставляя данные геометрических размеров пластины и значения разрушения образца:

$$K_{IIС} = \frac{F_c}{2tH} \sqrt{l \cdot Y(l, b)}, \quad \text{МН/м}^{3/2}, \quad (2.2)$$

где $F_{IIС}$ – нагрузка, при которой происходит разрушение, Н;

t – толщина изделия, м;

H – ширина плеча изделия, м;

l – глубина надреза, м;

$Y(l, b)$ – поправочный коэффициент (определяется по табл. 2.5);

Таблица 2.5 – Значения поправочного коэффициента $Y(l, b)$

l/b	H		
	0,037	0,025	0,012
0,1	1,2	1,1	1,07
0,2	1,26	0,99	0,9
0,3	1,3	0,95	0,76
0,4	1,32	0,95	0,65

– определение коэффициента интенсивности напряжений по удельным энергозатратам.

Образцы-призмы 100x100x400 с надрезом в средней трети испытываются на растяжение при изгибе по четырехточечной схеме нагружения (рис. 2.4) с фиксированием полной равновесной диаграммы деформирования (рис. 2.5).

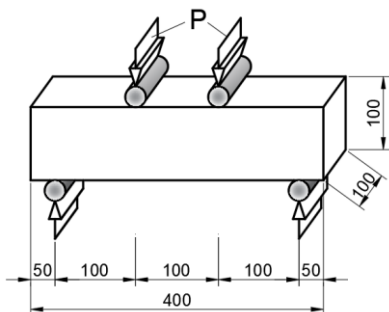


Рисунок 2.4 – Схема и внешний вид нагружения образца

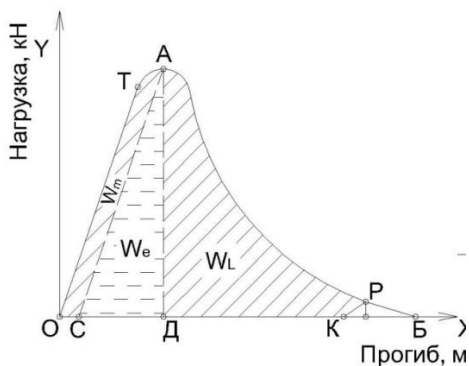


Рисунок 2.5 – Полная диаграмма деформирования

Статический критический коэффициент интенсивности напряжений при максимальной нагрузке [107]

$$K_I^{Gi} = \sqrt{G_i E_b}, \text{ МН/м}^{3/2}, \quad (2.3)$$

где G_i – удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, Дж/м²;

E_{fb} – начальный модуль упругости фибробетона (МПа) [99], определяется по формуле:

$$E_{fb} = E_b(1 - \mu_{fv}) + \mu_f E_f, \text{ МПа}, \quad (2.4)$$

где E_b – модуль упругости бетона;

E_f – модуль упругости фибры, МПа;

μ_f – коэффициент фибрового армирования по объему.

Статический критический коэффициент интенсивности напряжений до начала развития микротрещинообразования

$$K_{IC}^{Ge} = \sqrt{G_e E_b}, \text{ МН/м}^{3/2}, \quad (2.5)$$

где G_e – удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, Дж/м².

2.3.3. МНОГОПАРАМЕТРИЧНАЯ МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИБРОБЕТОНА

Разработанная в исследовании методика, предлагаемая к применению при оценке трещиностойкости фибробетона, позволяет получить кроме традиционных параметров f_c , f_{ax} , f_{fb} , f_{sp} многопараметричную оценку вязкости разрушения фибробетона на всех этапах деформирования и трещинообразования на одном и том же образце. Это минимизирует погрешности показателей качества материала, связанные с разными условиями твердения, формования, неточностями в дублировании состава (образцы-близнецы), снижает неопределенность, повышает достоверность результатов испытаний.

Предлагаемая методика, включающая комплекс испытаний, осуществляемых на одном (естественно – из серии, для повышения степени достоверности результатов) образце, позволяет получить разностороннюю информацию о способности фибробетона сопротивляться трещинообразованию под действием разнообразных механических нагрузок. Совокупность результатов испытаний, реализуемых в последовательности и по схемам табл. 2.6–2.7, рис. 2.6–2.7, позволяет с высокой степенью достоверности дать оценку реальной способности фибробетона противостоять трещинообразованию под действием нагрузок и, одновременно, оценить равномерность распределения фибры в объеме бетона. Так как от этого фактора непосредственно зависят уровни нагрузок (особенно на растяжение, нормальный отрыв и сдвиг), который способен обеспечивать фибробетон, в сравнении с бетоном-матрицей (состав-аналога) без фибры.

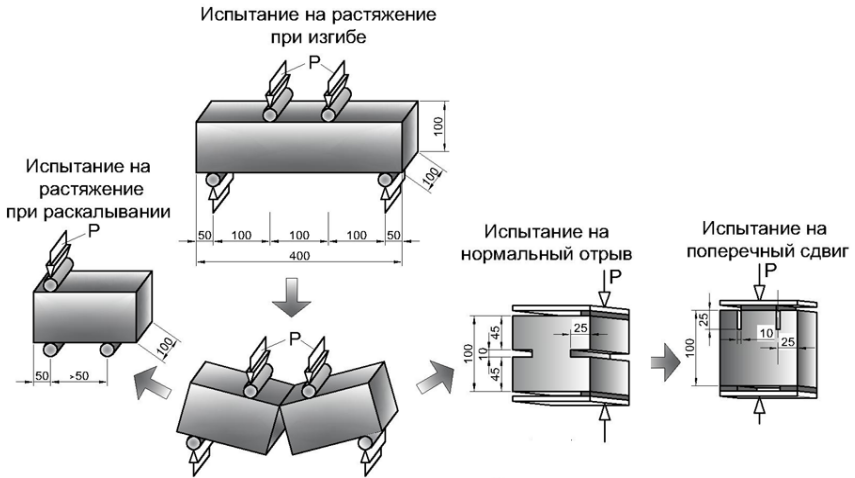


Рисунок 2.6 – Многопараметричная оценка параметров по образцам призм 100x100x400 мм

Проведение испытаний на фрагментах одной и той же балки (от 6 до 9 контрольных сечений) позволяет контролировать однородность распределения фибры в бетонной матрице (рис. 2.7).

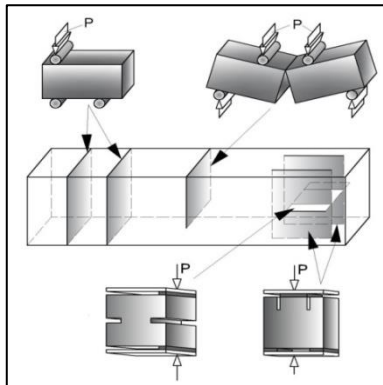


Рисунок 2.7 – Контроль распределения фибры

Таблица 2.6 – Последовательность испытания по многопараметричной методике оценки параметров по образцам призмам 70x70x280 мм

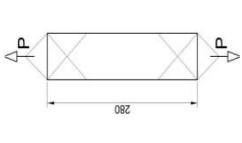

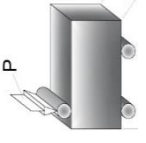

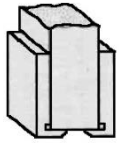

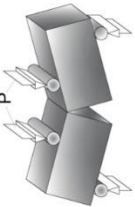
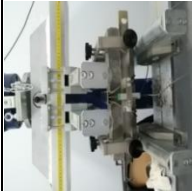
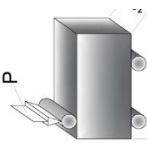

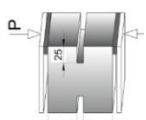
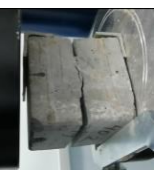
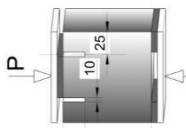

№	Наименование этапа	Схема	Вид	Описание этапа	Получаемые параметры	ТНПА
1	Осевое растяжение			Образец-призма 70x70x280 мм испытывается на осевое растяжение с фиксацией диаграммы «Нагрузка-Перемещение» до момента разрушения изделия при регистрации F_{ax}	– прочность на осевое растяжение, f_{ax} – диаграмма «Нагрузка-Перемещение»	ГОСТ 10180
2	Растяжение при раскалывании			Первая половинка призмы после осевого растяжения, испытывается на раскалывание до фрагментации образца на две части с регистрацией значения разрушения F_{sp}	Прочность на растяжение при раскалывании, f_{sp}	ГОСТ 10180
3	Осевое сжатие			Вторая половинка после осевого растяжения испытывается на сжатие	Прочность на сжатие, f_c	ГОСТ 10180

Таблица 2.7 – Этапы испытания для многопараметричной оценки параметров по образцам призмат 100x100x400 мм

№	Наим. этапа	Схема	Вид	Описание этапа	Параметры	ТНПА
1	Растяжение при изгибе			Образец-призма 100x100x400 мм испытывается на изгиб по четырехточечной схеме нагружения с фиксацией диаграммы «нагрузка-перемещение (прогиб)» до фрагментации образца и регистрации F_{fl}	Прочность на растяжение при изгибе (f_{fl} , МПа); энергетические параметры; диаграммы «нагрузка-перемещение»	ТНПА ГОСТ 29167
2	Растяжение при раскалывании			Половинка призмы после теста на четырехточечный изгиб испытывается на раскалывание с регистрацией F_{sp}	Прочность на растяжение при раскалывании (f_{sp} , МПа).	ГОСТ 10180
3	Нормальный отрыв			Выполняются инициаторы трещин в виде симметричных надрезов глубиной $h/4$. Испытания при внутреннем сжатии до разделения образца на две части с регистрацией F_{lc}	Значение критического коэффициента интенсивности напряжения при нормальном отрыве (K_{Ic} , МПа/м ^{0.5})	ГОСТ 29167- 21
4	Поперечный сдвиг			На образцах-половинках, полученных при испытании на нормальный отрыв, выполняются концентраторы напряжений в виде симметричных надрезов на одной грани изделия. Испытание при центральном сжатии до регистрации F_{lc}	Значение критического коэффициента интенсивности напряжения при поперечном сдвиге (K_{IIc} , МПа/м ^{0.5})	ГОСТ 29167- 21

Способы и методики определения характеристик трещиностойкости фибробетона были усовершенствованы с участием авторов и нашли свое отражение в ГОСТ 29167–2021 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении» [107]. В данном стандарте характеристики трещиностойкости определяются при равновесных и неравновесных механических испытаниях. Добавлены приемлемые методики для определения характеристик трещиностойкости фибробетона [108–110; 160].

Сущность метода заключается в определении максимальных разрушающих нагрузок контрольных образцов при сжатии и вычислении критических значений интенсивности напряжений. Основными характеристиками трещиностойкости при этих нагрузках являются: энергетического критерия G (эффективная энергия разрушения), силового критерия K_c (критический коэффициент интенсивности напряжений).

Данная методика позволяет определить критические коэффициенты интенсивности напряжений для двух случаев: нормального отрыва (наиболее распространенного для роста и распространения трещин) и поперечного сдвига.

Вязкость разрушения (трещиностойкость) в данном исследовании оценивалась такими показателями как критический коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве (K_{IC}), критический коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге (K_{IIC}), критическая величина трещины ($l_{кр}$), джей-интеграл (J), энергетические параметры разрушения (W), модуль упругости.

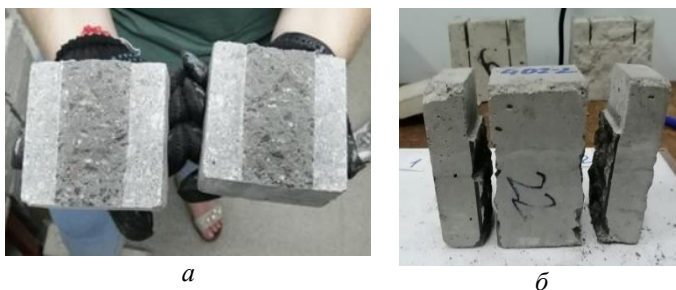


Рисунок 2.8 – Образцы после испытаний: *а* – на нормальный отрыв кубов с надрезами; *б* – на поперечный сдвиг пластин с надрезами

2.4. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

Для реализации экспериментальной части исследований планируется использовать стандартизированные методики действующей нормативно-технической документации, а также вариативные (авторские) методики в части контроля качественных (прочностных, силовых, энергетических) характеристик фибробетона многоуровневого армирования.

С этой целью сформирована программа экспериментальных исследований опытных образцов фибробетона в диапазоне прочности на сжатие бетона исходного состава от 36 до 80 МПа, по удобоукладываемости смеси – пластичные и самоуплотняющиеся, а в качестве дисперсного армирования определена фибра (стальная и наноуглеродная (УНТ)), как основной вариант многоуровневого армирования, а также иные виды фибры, принятые для сравнения.

Сформированы основные положения предложенной многопараметрической (многофакторной) системы оценки трещиностойкости на базе определяемых прочностных (прочность на сжатие, прочность на осевое растяжение, растяжение при изгибе, растяжение при раскалывании), деформативных (модуль упругости, удельные энергозатраты, J -интеграл, ползучесть), силовых (коэффициенты интенсивности напряжений при нормальном отрыве и поперечном сдвиге), а также его физических, эксплуатационных (пористость, водонепроницаемость, морозостойкость) характеристик, с целью повышения достоверности оценки качества и однородности свойств фибробетона в строительных конструкциях.

Подготовлены все необходимые условия для выполнения экспериментальной части данного исследования.

ГЛАВА 3.

ТЕХНОЛОГИЯ, СВОЙСТВА, МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ БЕТОНА МНОГОУРОВНЕВОГО АРМИРОВАНИЯ

В процессе разработки составов фибробетона многоуровневого армирования и оценки его свойств на начальном этапе исследованы эффективность в нем вариантов «моноармирования», с введением в состав углеродного наноматериала (УНТ) и стальной фибры. Для сравнения отдельно эффективности в ряде экспериментов использовали композитную (полипропиленовую) фибру. На основании анализа полученных результатов, включая определенные на первом этапе оптимальные расходы (содержание) трубчатых углеродных наноматериалов и стальной фибры, исследовали технологические свойства фибробетонных смесей, физико-механические и эксплуатационные свойства затвердевшего фибробетона многоуровневого армирования. В процессе оценки физико-механических свойств фибробетона отработали методики испытаний его образцов на прочностные, упруго-деформативные, силовые и энергетические характеристики и параметры для последующей разработки комплексной, многопараметрической методики контроля свойств фибробетона.

3.1. БЕТОН С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ – СОСТАВЫ И СВОЙСТВА

Для получения фибробетона многоуровневого армирования необходимо разработать составы бетона содержащие углеродные нанотрубки. С этой целью была произведена замена исходной добавки в существующих и реально используемых составах (табл. 3.1) при строительстве Белорусской АЭС на углеродсодержащую добавку. При этом необходимо было сохранить предъявляемые показатели качества смеси и бетона – удобоукладываемость, прочность, водонепроницаемость, морозостойкость. Исследования осуществляли путем проведения лабораторных испытаний с контролем прочностных характеристик бетонных образцов, модифицированных пластифицирующей добавкой с УНТ: «АРТ-КонкретР», «Ру-Фикс-500Б» (табл. 2.3). Проведенные исследования позволили

установить оптимальный процент углеродсодержащей добавки (табл. 3.4). Полученные в итоге бетонные составы, модифицированные УНТ, представлены в табл. 3.3.

В соответствии с программой исследований в производственной лаборатории БелАЭС был выбран ряд бетонных составов наиболее широко использовавшихся при строительстве Белорусской АЭС (табл. 3.1).

Анализ влияния углеродных нанотрубок на бетон проводили, опираясь на исследования, ранее выполненные в БНТУ [49–51; 58; 67; 73], в том числе с участием автора [126; 127; 129]. Испытания на прочность на растяжение при раскалывании проводились на образцах-кубах (100x100x100 мм) из бетонных составов с разным количеством углеродных нанотрубок в составе пластифицирующей добавки: 300, 600, 750, 900 г тв. УНТ на 1 т добавки (табл. 3.1).

Анализ полученных результатов испытаний показывает, что исследуемые углеродные нанотрубки влияют на показатель прочности при растяжении. Так некоторый максимум наблюдается при количестве тв. УНТ 0,00075 % от массы цемента. Полученные результаты не противоречат испытаниям других исследователей [69], объясняющие полученный эффект уплотнения структуры цементного камня за счет заполнения нанопор углеродными нановолокнами и соединения ими зерен гидратов кальция, который более ярко виден при испытаниях на уровне цементного камня [129]. С учетом этих результатов для дальнейших исследований приняты составы бетона по табл. 3.3.

Таблица 3.1 – Результаты испытаний бетонных составов с УНТ

№	Состав сырьевой смеси, кг/м ³			ОК	В/Ц	Средняя плотность, кг/м ³	Добавка			Прочность на растяжение при раскалывании, МПа
	Цемент	Песок	Щебень фр. 5–20				кол. добавки от массы цемента, %	масс. доля СП* к цементу, %	масс. доля тв. УНТ** к цементу, %	
1	445	820	1035	21	0,30	2420	0,8	0,4	–	2,49
2				21	0,30	2450	0,8	0,4	0,00030	2,48
3				21	0,29	2450	0,8	0,4	0,00060	2,53
4				21	0,29	2465	0,8	0,4	0,00075	2,60
5				21	0,29	2465	0,8	0,4	0,00090	2,54

* суперпластификатор поликарбоксилатный сополимер

** многослойные углеродные нанотрубки производства ООО ПИТ, РБ

Таблица 3.2 – Базовые составы

Расход материалов, кг на 1 м ³ бетонной смеси				
вяжущее	крупный заполнитель	мелкий заполнитель	химическая добавка	вода
<i>B25 (C20/25) W6 F₁100 (A-L_{1,8})</i>				
цемент – 400	щебень (фр. 5–20) – 1020	песок – 820	Линамикс СП-180 7,88 (1,97 % от массы цем.)	180
<i>B30 (C25/30) W8 F₁500 (Б-S_{1,35})</i>				
цемент – 445	щебень (фр. 5–20) – 1035	песок – 820	SikaViscoCrete 5-600 6,00 (1,35 % от массы цем.)	150
<i>B30 (C25/30) W8 F₁200 СУБ (В-L_{1,0})</i>				
цемент – 460	щебень (фр. 5–10) – 880	песок – 950	Линамикс ПК 4,6 (1,0 % от массы цем.)	170
<i>B60 (C50/60) W6 F₁200 СУБ (Г-S_{1,7})</i>				
цемент – 485 PCAM – 40 MKY-85 – 45	щебень (фр. 5–10) – 825	песок – 800	SikaViscoCrete 3190 8,55 (1,7 % от массы цем.)	180
<i>B25 (C20/25) W6 F₁200 (Д-S_{0,6})</i>				
цемент – 400	щебень (фр. 5–20) – 1020	песок – 800	«SikaViscoCrete3190» 2,4 (0,6 % от массы цем.)	185
<i>B30 (C25/30) W8 F₁500 (Ж-S_{1,35})</i>				
цемент – 445	щебень (фр. 5–20) – 1035	песок – 820	«SikaViscoCrete3190» 6,0 (1,35 % от массы цем.)	160
<i>B40 (C32/40) W8 F₁200 СУБ (И-R_{1,3})</i>				
цемент – 485 PCAM – 55	щебень (фр. 5–20) – 830	песок – 835	«Реламикс ПК» 7,0 (1,4 % от массы цем.)	180
<i>B60 (C50/60) W6 F₁200 СУБ (К-S_{1,5})</i>				
цемент – 485 PCAM – 40 MKY-85 – 45	щебень (фр. 5–10) – 825	песок – 800	«SikaViscoCrete 3190» 8,55 (1,5 % от массы цем.)	175

Таблица 3.3 – Составы бетона с УНТ

Обозначение	Наименование состава	Расход материалов, кг на 1 м ³ бетонной смеси					В/Ц	Сохраняемость удобоукладываемости, мин
		вяжущее (минер. добавка)	крупный заполнитель	мелкий заполнитель	химическая добавка			
А	В25 (С20/25) W6 F ₁ 100	цемент – 400	щебень (фр. 5–20) – 1020	песок – 820	АРТ–КОНКРИТ Р 3,2 (0,8 % от массы цемента)	0,4	180	
Б	В30 (С25/30) W8 F ₁ 500	цемент – 445	щебень (фр. 5–20) – 1035	песок – 820	АРТ–КОНКРИТ Р 2,22 (0,5 % от массы цемента)	0,4	120	
В	В30 (С25/30) W8 F ₁ 200 СУБ	цемент – 460	щебень (фр. 5–10) – 880	песок – 950	АРТ–КОНКРИТ Р 2,3 (0,5 % от массы цемента)	0,4	120	
Г	В60 (С50/60) W6 F ₁ 200 СУБ	цемент – 485 (РСАМ – 40 МКУ-85 – 45)	щебень (фр. 5–10) – 825	песок – 800	АРТ–КОНКРИТ Р 4,56 (0,94 % от массы цемента)	0,44	120	
Д	В25 (С20/25) W6 F ₁ 100	цемент – 400	щебень (фр. 5–20) – 1020	песок – 800	РуФикс–500Б 1,7 (0,4 % от массы цемента)	0,39	120	
Ж	В30 (С25/30) W8 F ₁ 500	цемент – 445	щебень (фр. 5–20) – 1035	песок – 820	РуФикс–500Б 4,0 (0,9 % от массы цемента)	0,36	120	
И	В40 (С32/40) W8 F ₁ 200 СУБ	цемент – 485 (РСАМ – 55)	щебень (фр. 5–10) – 830	песок – 835	РуФикс–500Б 4,32 (0,9 % от массы цемента)	0,39	120	
К	В60 (С50/60) W6 F ₁ 200 СУБ	цемент – 485 кг (РСАМ – 40 МКУ-85 – 45)	щебень (фр. 5–10) – 825	песок – 800	РуФикс–500Б 5,82 (1,0 % от массы цемента)	0,39	120	

3.2. ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛИЧЕСТВА СТАЛЬНОЙ ФИБРЫ В СОСТАВЕ ФИБРОБЕТОНА

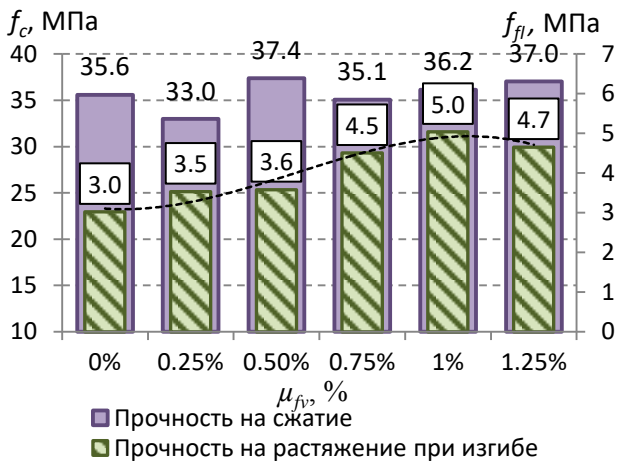
При «моноармировании» исходного бетона (бетонной матрицы) оптимальное количество стальной фибры установлено из результатов исследований [44–47] представленных в п. 1.1.1 в главе 1: 0,5–1 % для микрофибры анкерного профиля (МФСА-0.3-30) и 1–1,5 % для анкерной макрофибры (ФСА-1.0-60), что в пересчете на массу составляет 40–80 кг и 78–120 кг на 1 м³ бетона соответственно; 1–2 % (78–160 кг/м³) для микрофибры прямого профиля (МФСР-0.3-12).

Для композитных волокон оптимальным будет объемное содержание 0,4–0,6 % для полимерной извилистой (ФПИ-0.6-40) и 0,15–0,23 % (1 % от массы цемента) для полипропиленовой.

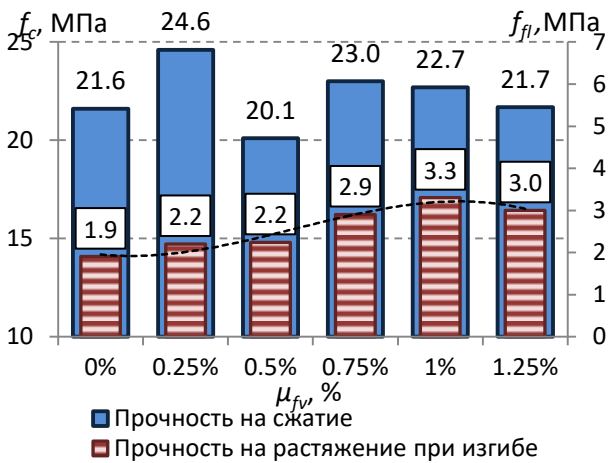
Для исследования влияния и выявления оптимальной концентрации стальной фибры из листа (ФЛВ-0.9-50), используемой в нашей работе наряду с фиброй ранее приведенного сортамента в составе бетонной матрицы, в качестве контролируемого показателя использовались прочность на растяжение при раскалывании образцов сечением 100x100 мм и при изгибе образцов-призм 100x100x400 мм по четырехточечной схеме нагружения (рис. 3.1).

Анализируя результаты испытаний образцов можно отметить, что изменения прочности на сжатие незначительны и находятся в пределах от 33,0 до 37,4 МПа, что составляет всего ± 5 % (рис. 3.1, *a*) и от 21,6 до 24,6 МПа ((–7)–13 %) (рис. 3.1, *б*).

Результаты прочности при растяжении показали закономерный рост значений при увеличении количества фибры до 1,0 %. В этой связи, оптимизацию результатов экспериментов с целью оценки влияния разных сортов стальной фибры и ее количества, вводимого в бетонную матрицу, проводили, обрабатывая данные по прочности фибробетона на растяжение.



a



b

Рисунок 3.1 – Прочность при сжатии и растяжении при изгибе с разным содержанием фибры стальной из листа ФЛВ-0.9-50: а – бетон «С»; б – бетон «Л»

Результаты оценки влияния стальной фибры на подвижность фибробетонной смеси в зависимости от объемного содержания (коэффициента фибрового армирования) приведены на рис. 3.2.

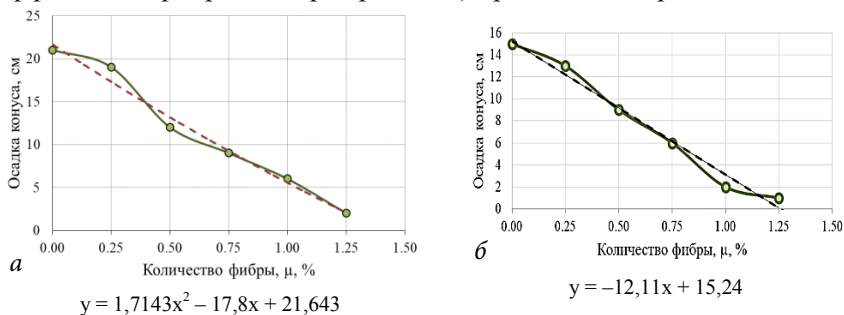


Рисунок 3.2 – Влияние фибры ФЛВ-0.9-50 на подвижность смеси: *а* – бетон «Л»; *б* – бетон «С»

Из полученных результатов следует, что при добавлении фибры в количестве 1,0 % в бетонную матрицу «С» (табл. 2.4) подвижность бетонной смеси падает с марки ПЗ до марки П1 и с марки П5 до марки П1 для бетон-матрицы «Л», что следует учитывать при использовании фибры из листового материала. Объясняется это тем, что некоторое количество воды в исходной бетонной матрице расходуется на смачивание нового компонента.

Согласно данным рис. 3.3, рекомендуемое количество фибры ФЛВ-0.9-50 составляет $\approx 1,0$ %.

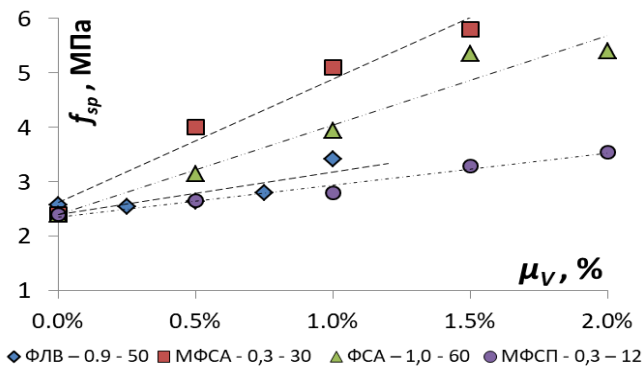


Рисунок 3.3 – Прочность на растяжение при раскалывании фибробетона с металлической фиброй

В результате математической обработки результатов исследований получена авторская зависимость прочности фибробетона на растяжение при изгибе от объемной концентрации металлической фибры:

$$f_{sp} = k_f \cdot 123 \cdot \mu_{fv} + f_{sp}^c, \text{ МПа}, \quad (3.1)$$

где μ_{fv} – объемная концентрация фибры, %;

f_{sp}^c – прочность на растяжение при раскалывании бетонной матрицы, МПа;

k_f – корректирующий коэффициент в зависимости от типа фибры: 0,6 для фибры ФЛВ-0.9-50; 1,3 для фибры ФСА-1.0-60; 2 для фибры МФСА-0.3-30; 0,5 для фибры МФСП-0.3-12;

123 – поправочный коэффициент, МПа/%.

3.3. ФИБРОБЕТОН МНОГОУРОВНЕВОГО АРМИРОВАНИЯ

3.3.1. ФОРМУЕМОСТЬ (УДОБОУКЛАДЫВАЕМОСТЬ) ФИБРОБЕТОНА, СОДЕРЖАЩЕГО УНТ И СТАЛЬНУЮ ФИБРУ

При проведении этих и последующих экспериментов в смесителе принудительного принципа действия готовили исходную бетонную смесь расчетного состава, в которую вводили углеродные нанотрубки (УНТ) в составе комплексной пластифицирующей добавки (табл. 2.3).

Фибру добавляли в готовую бетонную смесь в 2 приема при непрерывном перемешивании. Изменения подвижности фибробетонной смеси контролировались с использованием стандартного конуса по ее осадке (ОК) и расплыву (РК) [155]. Результаты определения подвижности бетонной смеси после введения фибры и внешний вид фибробетонных смесей представлены на рис. 3.4–3.7.

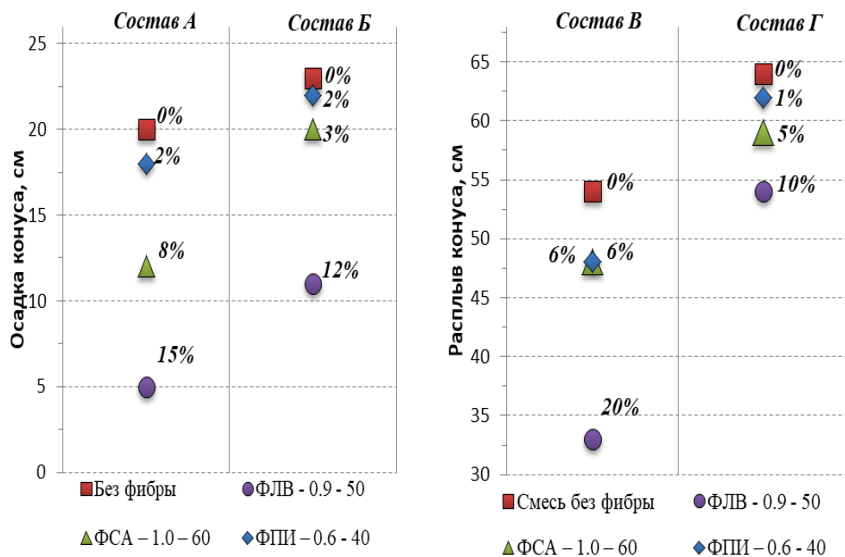


Рисунок 3.4 – Изменение подвижности бетонной смеси после введения фибры

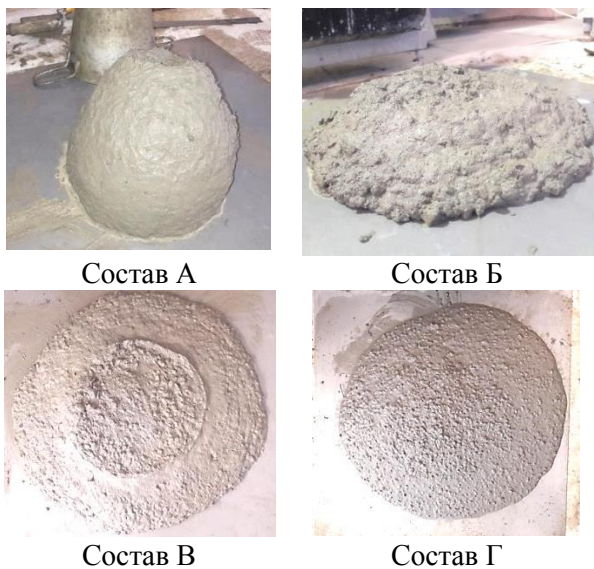


Рисунок 3.5 – Бетонная смесь со стальной проволочной фиброй анкерного профиля (ФСА-1.0-60)



Состав А



Состав Б



Состав В



Состав Г

Рисунок 3.6 – Бетонная смесь с полимерной фиброй волнистого профиля (ФПИ-0.6-40)



Состав А



Состав Б



Состав В



Состав Г

Рисунок 3.7 – Бетонная смесь со стальной фиброй волнистого профиля (ФЛВ-0.9-50)

По результатам экспериментов наибольшее влияние на подвижность бетонной смеси оказала металлическая фибра волнового профиля из листа. Марка по удобоукладываемости состава «А» с П5 снизилась до П2, состава «Б» – с П5 до П3, состава «В» – с Р4 до Р1, состава «Г» – с Р6 до Р4. Следует отметить, что в подвижных бетонных смесях наблюдается частичное растворотделение: часть фибры с заземленным ею щебнем скапливается в центральной части. В смеси литевой консистенции состава «Г» этот эффект проявляется меньше. Смеси, приготовленные с данным типом фибры, потребуют дополнительных усилий для равномерного распределения при укладке и тщательного уплотнения.

Фибра металлическая из проволоки и полимерная фибра (взятая для сравнения) оказали меньшее влияние на подвижность бетонной смеси. При введении стальной анкерной фибры из проволоки марка по удобоукладываемости состава «А» с П5 снизилась до П3, состава «Б» – с П5 до П4, состава «В» – с Р4 до Р3, состава «Г» – с Р6 до Р5. При введении полимерной волнистой фибры марка по удобоукладываемости составов «А, Б и Г» осталась неизменной, состава «В» снизилась с Р4 до Р3. Из результатов экспериментов следует, что

при введении большого количества стальной фибры 0,7–1,5 % по объему бетонной смеси требуется корректировка ее составов. Для обеспечения требуемой удобоукладываемости смеси необходимо увеличение доли мелкого заполнителя, содержания цемента (цементного теста) и увеличения дозировки добавки-пластификатора, что должно контролироваться строительной лабораторией для конкретных условий ведения бетонных работ.

Полученные экспериментальные данные о резком снижении формуемости бетонной смеси после введения стальной фибры (в особой мере марки ФЛВ-0.9-50), во-первых, требуют учета при разработке технологической карты ведения бетонных работ с фибробетоном, а, во-вторых, определяют необходимость приобъектного введения ее на строительной площадке перед подачей фибробетона в конструкцию.

В этой связи на первой стадии получения фибробетона многоуровневого армирования рационально вводить в его состав при приготовлении смеси трубчатых УНМ, которые предварительно вводятся в комплексную добавку (табл. 2.1) и в ее составе дозируются в бетон. Такой подход обеспечивает возможность как приобъектного приготовления бетона-матрицы, содержащего УНТ, так и районного (централизованного) с доставкой бетонной смеси на объект строительства. Установлено [73], что бетонные смеси с комплексными добавками, используемых в настоящих исследованиях марок, сохраняют формовочные свойства на расчетном уровне в течении не менее 2 часов. Тем самым обеспечиваются необходимые условия для транспортирования бетонной смеси, приема ее на объекте для введения стальной фибры и последующей укладки в конструкцию.

3.3.2. ПРОЧНОСТЬ И УПРУГО-ДЕФОРМАТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИБРОБЕТОНА МНОГОУРОВНЕВОГО АРМИРОВАНИЯ

Для начальной фазы исследований взят фибробетон с минимальным содержанием цемента ($\text{Ц} = 350 \text{ кг/м}^3$ бетона; серия S по табл. 3.4), содержащий в своем составе УНТ и стальную фибру (табл. 3.4).

Таблица 3.4 – Состав бетона и фибробетона серии «S»

Состав	Цемент, кг	Щебень, кг	Песок, кг	Добавка LL, кг ($m_{\text{цемент}}, \%$)	УНТ, г ($m_{\text{цемент}}, \%$)	Фибра полипропиленовая ФП-0.1-20, кг	Фибра стальная ФЛВ-0.9-50, кг
S	350	1110	750	5,6 (1,6 %)	–	–	–
S _{NC}				5,6 (1,6 %)	10,08 (0,0028 %)	–	–
SF _{pp}				5,6 (1,6 %)	–	5	–
S _{NC} F _p				5,6 (1,6 %)	10,08 (0,0028 %)	5	–
SF _{st}				5,6 (1,6 %)	–	–	80
S _{NC} F _{st}				5,6 (1,6 %)	10,08 (0,0028 %)	–	80

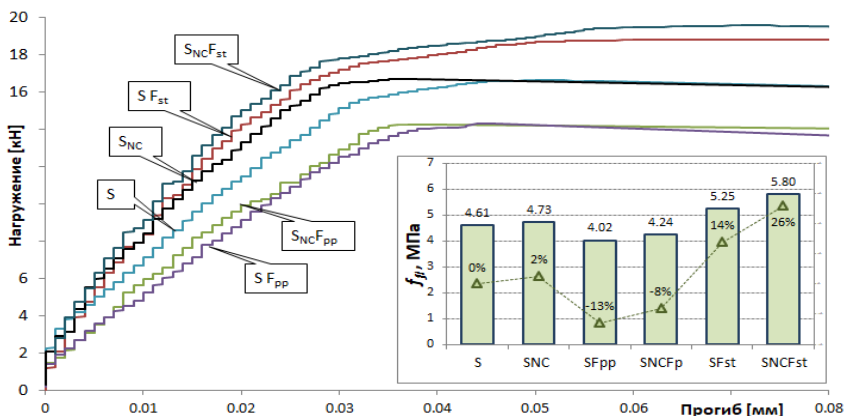


Рисунок 3.8 – Диаграммы деформирования и прочность на растяжение при изгибе

В исследовании проведены испытания на растяжение при изгибе по четырехточечной схеме нагружения с регистрацией диаграмм деформирования. Для этого были изготовлены образцы-призмы 100x100x400 мм с надрезом в средней трети образца. Полученные

диаграммы деформирования и результаты испытаний представлены на рис. 3.8.

На полученных диаграммам деформирования зафиксированы упругая и пластическая зоны деформирования. Наибольшая величина пластической зоны наблюдается в составах со стальной макрорфиброй (Φ_c), причем в составе с полипропиленовой фиброй (взятой для сравнения) она меньше.

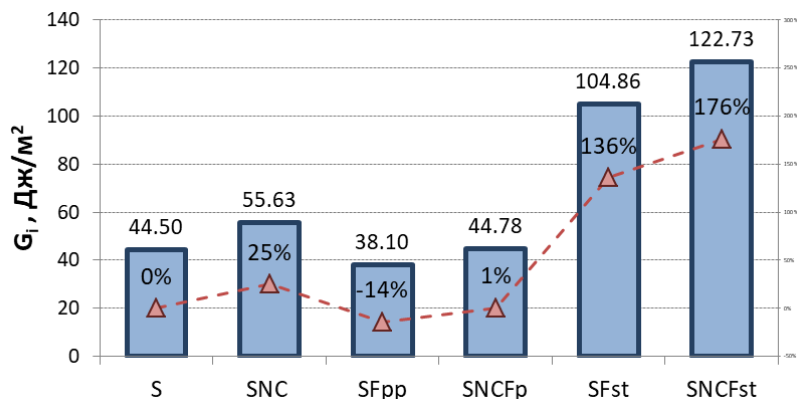


Рисунок 3.9 – Удельные энергозатраты на статическое разрушение (при максимальной нагрузке)

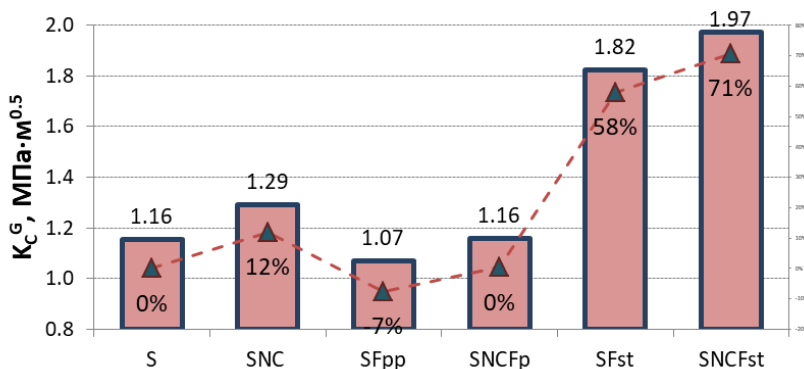


Рисунок 3.10 – Критический коэффициент интенсивности напряжений при максимальной нагрузке

Расчетные значения по диаграммам деформирования удельных энергозатрат и критического коэффициента интенсивности напряжений (рис. 3.9–3.10) позволяют сделать следующие выводы: введение УНТ привело к увеличению энергозатрат на статическое разрушение на 25 % относительно контрольного состава; полипропиленовая фибра снизила энергозатраты на 14 %, однако в сочетании с УНТ значения возрастают; при комбинации УНТ и стальной макрофибры в данном исследовании достигается наибольшая величина показателя, что на 176 % превышает эталонный образец и на 40 % с фиброй без УНТ.

По результатам экспериментальных данных влияния углеродных наноматериалов и стальной фибры выведено уравнение регрессии для прочности на растяжение в зависимости от количества фибры ($x_2, \mu_{fv}, \%$) и количества УНТ ($x_1, m_{CN}, \text{кг/т}$). Полученные результаты интерпретировали графически (рис. 3.11–3.12).

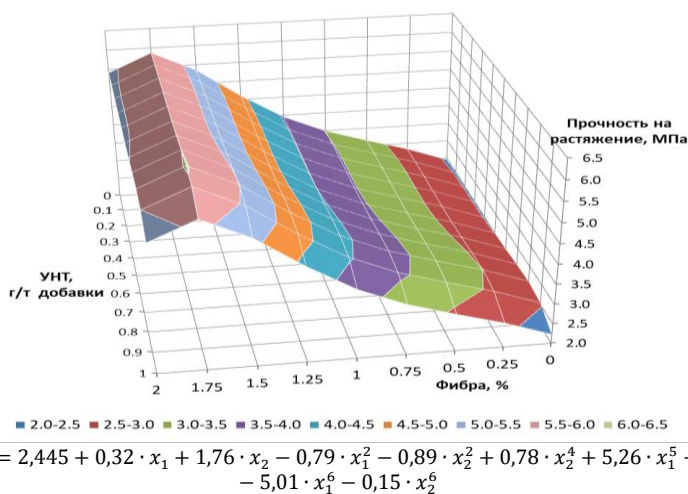
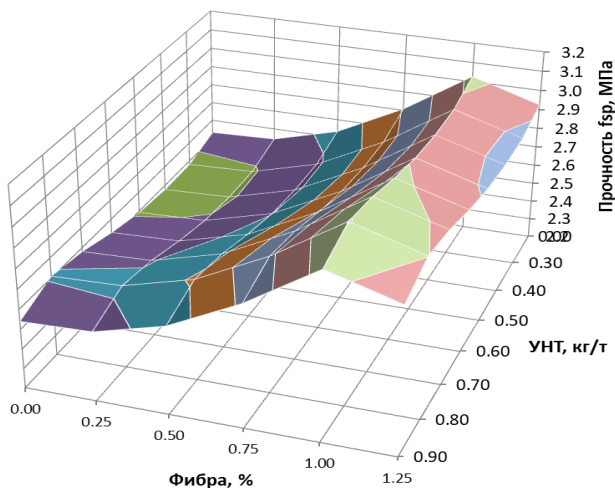
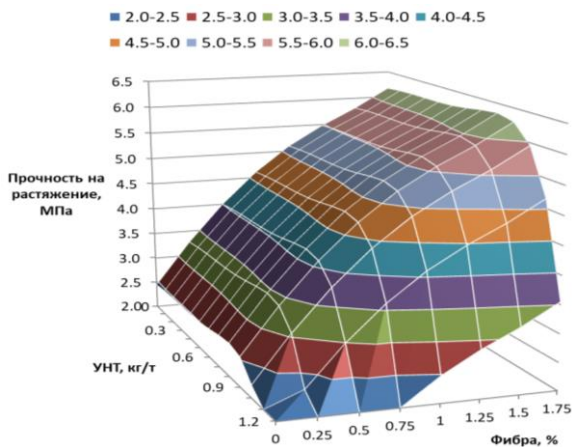


Рисунок 3.11 – Влияние факторов x_1 (содержание фибры ФСА-1.0-60, μ_{fv}) и x_2 (содержание УНТ в 1 т СП, m_{CN}) на параметр y (прочность на растяжение тяжелого бетона, f_{sp})



$$y = 2,53 - 0,17 \cdot x_1 - 0,19 \cdot x_2 - 0,05 \cdot x_1^2 + 1,24 \cdot x_2^2 - 1,17 \cdot x_2^3 + 4,04 \cdot x_1^5 + 1,81 \cdot x_2^5 - 4,09 \cdot x_1^6 - 1,19 \cdot x_2^6$$

Рисунок 3.12 – Влияние факторов x_1 (содержание фибры ФЛВ-0.9-50, μ_f) и x_2 (содержание УНТ в 1 т СП, m_{CN}) на параметр y (прочность на растяжение тяжелого бетона, f_{sp})



$$y = 2,445 + 0,32 \cdot x_1 + 3,5 \cdot x_2 - 0,79 \cdot x_1^2 - 0,8 \cdot x_2^2 - 0,09 \cdot x_2^4 + 5,26 \cdot x_1^5 - 5,01 \cdot x_1^6 + 0,03 \cdot x_2^6$$

Рисунок 3.13 – Влияние факторов x_1 (содержание фибры МФСА-0.3-30, μ_f) и x_2 (содержание УНТ в 1 т СП, m_{CN}) на параметр y (прочность на растяжение тяжелого бетона, f_{sp})

3.4. СВОЙСТВА (ПАРАМЕТРЫ) ФИБРОБЕТОНА МНОГОУРОВНЕВОГО АРМИРОВАНИЯ

Для оценки физико-механических, силовых, энергетических параметров полученных наномодифицированных фибробетонных и бетонных составов № 1-28 (табл. 2.4) в производственной лаборатории БелАЭС автором были изготовлены образцы для соответствующих испытаний: кубы 100х100х100 мм, призмы 100х100х400 мм, цилиндры 150х150 мм, призмы (балочки) 70х70х280 мм.

В результате выполненных испытаний исследованы и определены все заявленные свойства фибробетона, содержащего в своем составе стальную фибру и углеродные нанотрубки, в сравнении с исходным бетоном-матрицей, в который вводили эти армирующие элементы. В табл. 3.5 приведены результаты исследований физико-механических, силовых параметров фибробетона многоуровневого армирования и его водопоглощения по массе.

Коэффициент вариации полученных значений параметров находится в пределах от 3 % до 15 %.

Энергетические параметры фибробетона многоуровневого армирования (на примере составов «А», «Б», «В» и «Г» по табл. 2.4) представлены графическими зависимостями (рис.3.14–3.15).

Испытания для определения удельных энергозатрат на квазистатическое разрушение проводились согласно методике, изложенной в пункте 2.2 на образцах-призмах 100х100х400 мм с надрезом в средней трети пролета. Испытания проводились на специализированном оборудовании НИЛ ПГС НИПИ БНТУ. Образцы для исследований изготавливались в производственной лаборатории БелАЭС.

По полученным данным строится график «нагрузка-прогиб» (рис. 3.14–3.15). Старт магистральной трещины при испытании неармированного бетона, как правило, совпадает с моментом разрушения образца. Для определения момента старта магистральной трещины при испытании фибробетонных балок необходима экспертная оценка исследователя.

Таблица 3.5 – Результаты испытаний

Образец	100x100x100	70x70x280			100x100x400			Водопоглощение по массе	
Состав	Прочность на сжатие (средняя)	Растяжение					ККИН		
		осевое	раскол	изгиб					
	МПа						МПа√м	%	
	f_c	$f_c(70)$	f_{ax}	$f_{sp(70)}$	f_{sp}	f_{fl}	K_{Ic}	K_{IIc}	W_m
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
А	60,6	41,44	1,74	2,75	1,98	2,7	0,68	2,51	2,15 %
А-Ф1	54,0	48,64	2,51	4,56	3,45	5,5	3,23	4,07	3,08 %
А-Ф2	65,0	40,94	2,17	3,93	3,22	5,6	2,60	3,72	3,47 %
А-Ф3	68,2	40,98	1,64	2,68	1,98	4,8	0,97	4,33	2,26 %
Б	61,9	44,46	1,87	2,26	2,35	3,9	1,05	3,06	2,92 %
Б-Ф1	62,0	47,55	2,35	5,61	2,93	4,9	1,28	4,05	3,77 %
Б-Ф2	64,4	46,16	2,56	4,88	3,21	5,8	2,24	5,66	4,29 %
Б-Ф3	67,3	42,62	1,73	2,11	2,19	4,5	0,99	4,86	2,80 %
В	39,5	28,53	1,61	2,04	1,81	3,1	0,82	1,25	3,59 %
В-Ф1	37,9	34,83	1,99	3,40	3,28	4,9	2,05	3,44	3,55 %
В-Ф2	32,3	32,00	1,87	2,79	2,45	4,8	1,32	4,50	7,95 %
В-Ф3	42,6	25,12	1,46	1,83	1,48	3,2	0,69	2,79	4,31 %
Г	72,3	70,98	2,24	3,90	3,14	6,9	1,23	3,90	2,98 %
Г-Ф1	66,0	75,17	3,98	6,14	4,66	7,1	1,61	7,53	3,79 %
Г-Ф2	70,1	77,89	3,96	6,84	5,34	7,6	1,97	7,16	5,04 %
Г-Ф3	81,0	69,38	3,03	4,06	3,17	5,9	1,37	4,94	2,29 %
Д	36,1	38,97	2,02	1,94	1,68	3,8	1,33	2,75	4,39 %
Д-Ф4	39,4	44,77	2,67	4,01	2,32	4,2	1,94	4,18	3,71 %
Д-Ф8	37,3	40,31	2,49	3,56	2,06	–	–	–	–
Ж	54,6	55,84	2,37	2,80	2,53	4,5	1,08	3,02	3,16 %
Ж-Ф4	63,5	62,12	2,53	3,97	3,17	5,2	1,47	4,97	3,16 %
Ж-Ф8	59,5	66,05	2,68	5,56	4,44	–	–	–	–
И	63,3	48,97	1,89	2,69	2,63	4,7	1,66	4,28	3,42 %
И-Ф4	61,0	54,45	2,91	5,67	3,43	5,0	2,05	5,11	3,41 %
И-Ф8	65,4	58,10	2,74	5,83	3,53	–	–	–	–
К	81,1	63,51	2,60	3,49	3,21	7,1	1,69	4,06	–
К-Ф4	81,9	64,11	2,71	5,10	4,12	10,0	2,14	5,01	–
К-Ф8	80,5	63,54	2,95	5,80	4,69	–	–	–	–

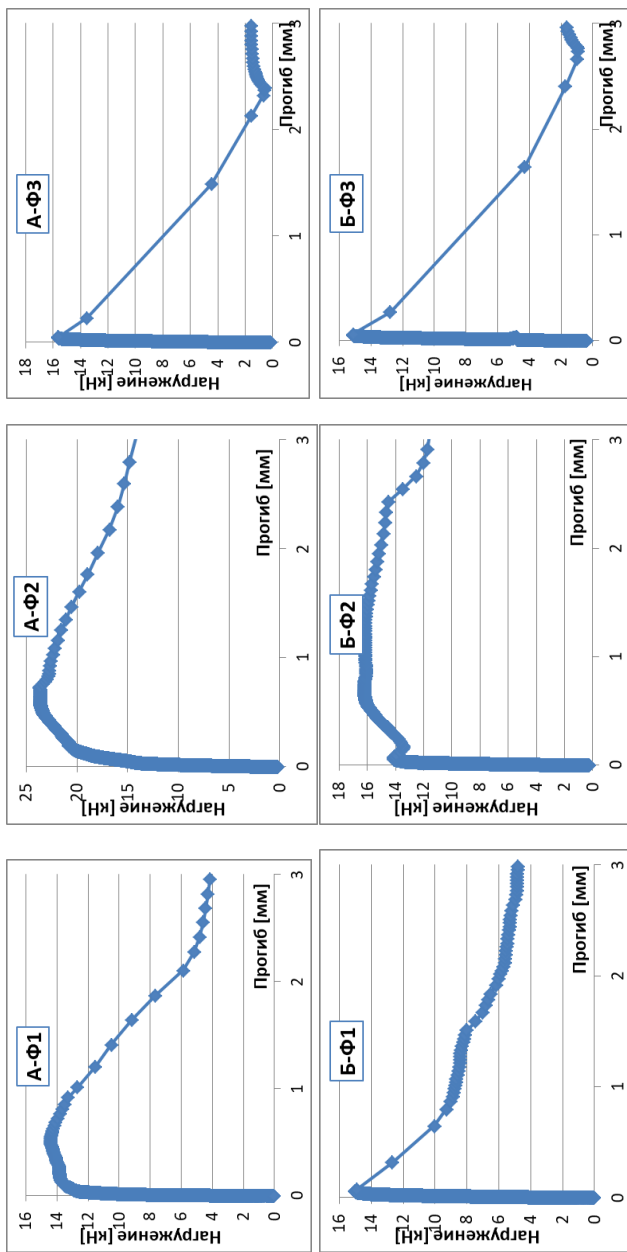


Рисунок 3.14 – Диаграммы деформирования образцов фибробетона с многоуровневым армированием (серии «А» и «Б»)

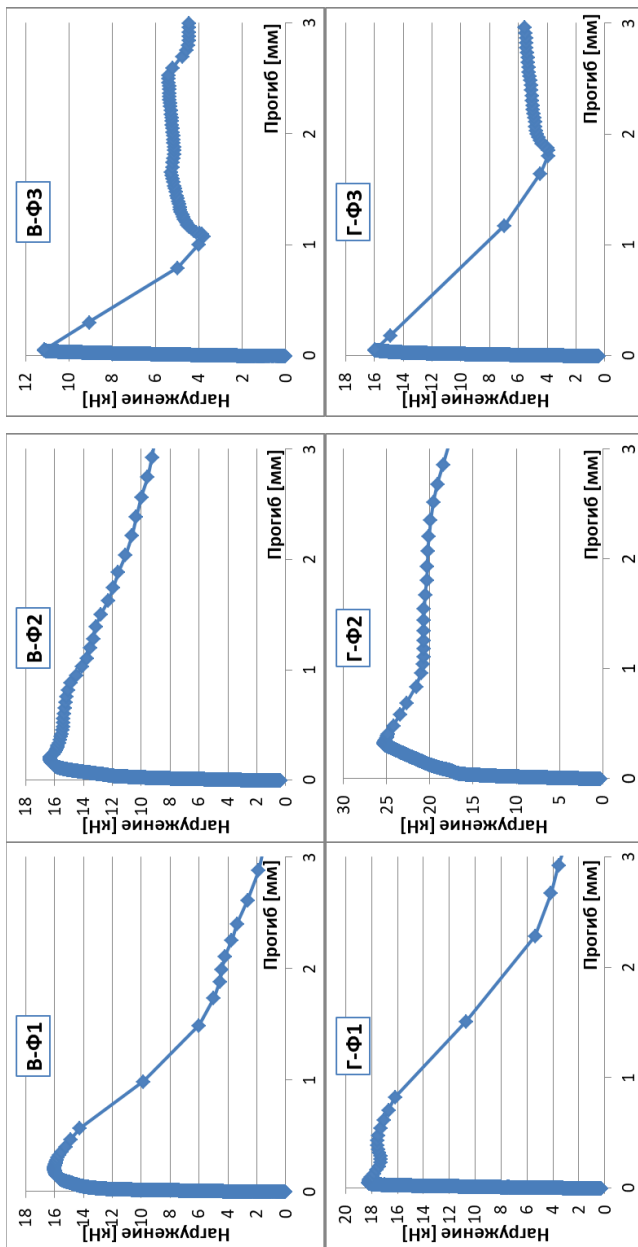


Рисунок 3.15 – Диаграммы деформирования образцов фибробетона с многоуровневым армированием (серии «В» и «Г»)

Энергия на страгивание магистральной трещины (сумма упругой энергии и энергии микротрещинообразования), являясь площадью под кривой, может возрасти в десятки раз в зависимости от точки перелома. При наличии на диаграмме зоны квазиупрочнения после появления первой трещины деформации не концентрируются в одной этой трещине [131]. Материал сохраняет способность распределять трещины по длине растянутой зоны образца, при этом трещины сохраняют очень малое раскрытие. Это обеспечивается благодаря тому, что распределенная по всему объему фибра при достаточном модуле упругости ее материала, прочности и заделке в матрицу полностью воспринимает растяжение с бетона-матрицы в полости зародившейся трещины, не позволяя ей резко увеличиться.

Таблица 3.6 – Энергетические параметры разрушения фибробетона с модифицированной УНТ бетонной матрицей

Состав	Статическое разрушение			До момента начала движения магистральной трещины		
	энерго-затраты	удельные энергозатраты	Прогиб при максим. нагрузке	энерго-затраты	удельные энергозатраты	прогиб до нач. движения трещины
	Дж	G_i , Дж/м ²	V_f , мм	Дж	G_m , Дж/м ²	V_e , мм
А-Ф1	6,75	851,66	0,501	0,49	61,57	0,05
А-Ф2	15,37	1940,51	0,731	0,43	53,76	0,185
А-Ф3	0,53	66,97	0,671	0,14	17,19	0,02
Б-Ф1	0,69	85,84	0,2	0,21	26,56	0,028
Б-Ф2	17,09	2158,15	0,671	0,65	82,28	0,06
Б-Ф3	0,56	71,12	0,055	0,30	37,59	0,037
В-Ф1	0,70	87,78	0,671	0,73	91,75	0,065
В-Ф2	2,71	342,23	0,2	0,44	55,12	0,051
В-Ф3	0,36	45,83	0,051	0,17	21,04	0,032
Г-Ф1	0,65	79,10	0,051	0,45	54,79	0,04
Г-Ф2	6,47	817,26	0,325	0,55	68,85	0,05
Г-Ф3	0,65	81,65	0,055	0,40	49,98	0,042

3.5. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ФИБРОБЕТОНА МНОГОУРОВНЕВОГО АРМИРОВАНИЯ

Из совокупности эксплуатационных свойств бетона к бетону для дорожных покрытий, промышленных полов и т. п. преимущественно предъявляются требования по уровню водопоглощения, водонепроницаемости и морозостойкости.

Водопоглощение фибробетона по массе характеризует наличие и объем открытой (сообщающейся) пористости материала, которая в наибольшей степени предопределяет его проницаемость, а на этой основе важнейшие эксплуатационные свойства: водонепроницаемость, морозо-, коррозионную стойкость, защитную способность по отношению к стальной арматуре (включая стальную фибру) и прочее. Экспериментальное определение водопоглощения осуществили по стандартной методике (п. 2.2.2), а результаты испытаний приведены в табл. 3.5.

Их анализ свидетельствует о наличии тенденции к росту водопоглощения фибробетона со стальной фиброй относительно бетонаматрицы. Причиной данного явления может быть ухудшение условий формования (плотности укладки компонентов) бетонной смеси в присутствии достаточно большеразмерных, спонтанно ориентированных в объеме укладываемого бетона элементов фибры. Кроме этого, в фибробетоне увеличивается площадь зон контакта гладкой поверхности стали с цементным камнем, что дополняет «дефектные» зоны контакта последнего с поверхностью зерен заполнителя [53–56] и способствует росту водопоглощения.

Вместе с тем общий уровень величин водопоглощения фибробетона по массе, не превышающий 5 % (т. е. его величины для бетона дорожных покрытий по действующей нормативно-технической документации), удовлетворяет так же и требованиям, предъявляемым к бетону общестроительного назначения.

Морозостойкость. Для определения морозостойкости использовался ускоренный метод (третий) при многократном замораживании и оттаивании. Марку по морозостойкости принимали за соответствующую требуемой, если среднее значение прочности на сжатие основных образцов после установленных для данной марки числа циклов переменного замораживания и оттаивания уменьшилось не более чем на 5 % по сравнению со средней прочностью на

сжатие контрольных образцов. Испытания проводили по достижении образцами 28 суточного возраста. Результаты определения марки по морозостойкости образцов фибробетона многоуровневого армирования представлены в табл. 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты испытаний фибробетонных образцов на морозостойкость

Наименование образца	Требования по морозостойкости	ГОСТ 10060-2012		ГОСТ 10060.4-1995		
		Соотношение нижних границ доверительных интервалов		Вывод о соответствии требованиям ТНПА	Изменен. средн. прочн. на сжатие	Вывод о соответствии требованиям ТНПА
		$X_{\min}^{\text{II}} \geq 0,9 X_{\min}^{\text{I}}$				
1	2	3		4	5	6
А-Ф1	F ₁₀₀	39,11 МПа < 43,2 МПа		Не соотв. F ₁₀₀	-8 %	Не соотв. F ₁₀₀
А-Ф2	F ₁₀₀	48,17 МПа < 49,88 МПа		Не соотв. F ₁₀₀	-5 %	Соотв. F ₁₀₀
А-Ф3	F ₁₀₀	54,82 МПа > 42,72 МПа		Соотв. F ₁₀₀	0 %	Соотв. F ₁₀₀
Б-Ф1	F ₁₅₀₀	51,48 МПа > 46,24 МПа		Соотв. F ₁₅₀₀	-5 %	Соотв. F ₁₅₀₀
Б-Ф2	F ₁₅₀₀	55,78 МПа > 49,63 МПа		Соотв. F ₁₅₀₀	-5 %	Соотв. F ₁₅₀₀
Б-Ф3	F ₁₅₀₀	59,48 МПа > 57,51 МПа		Соотв. F ₁₅₀₀	-1 %	Соотв. F ₁₅₀₀
В-Ф1	F ₁₂₀₀	27,02 МПа < 28,5 МПа		Не соотв. F ₁₂₀₀	-6 %	Не соотв. F ₁₂₀₀
В-Ф2	F ₁₂₀₀	19,61 МПа < 23,99 МПа		Не соотв. F ₁₂₀₀	-20 %	Не соотв. F ₁₂₀₀
В-Ф3	F ₁₂₀₀	28,68 МПа < 33,87 МПа		Не соотв. F ₁₂₀₀	-10 %	Не соотв. F ₁₂₀₀
Г-Ф1	F ₂₀₀	72,38 МПа > 58,97 МПа		Соотв. F ₂₀₀	5 %	Соотв. F ₂₀₀
Г-Ф2	F ₂₀₀	70,95 МПа > 64,99 МПа		Соотв. F ₂₀₀	-4 %	Соотв. F ₂₀₀
Г-Ф3	F ₂₀₀	68,99 МПа > 49 МПа		Соотв. F ₂₀₀	2 %	Соотв. F ₂₀₀

Водонепроницаемость. Для оценки водонепроницаемости использовался прямой метод – по «мокрому пятну» (установка УВБ-МГ4), и косвенный метод – ускоренный метод определения по воздухопроницаемости (прибор Агама-2РМ). Испытания проводили при достижении образцами (цилиндры 150x150 мм) 28 суточного возраста. Результаты определения марки по водонепроницаемости образцов фибробетона с наномодифицированной матрицей представлены в табл. 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты испытаний образцов на водонепроницаемость

Наименование образца	Метод	Фактическое значение показателей для каждого образца				Марка по водонепроницаемости
		1 2	3 4	5 6	Ср. (3 и 4)	
1	2	3	4	5	6	7
А-Ф1	прямой	– 0,6	0,8 0,8	– –	0,8	W8
	косвенный	8,4 9,2	10,1 21,4	23,8 38,4	15,7	W10
Б-Ф1	прямой	– 1,1	1,2 1,2	– –	1,2	W12
	косвенный	24,6 90,4	224,4 348,2	422,2 604,2	286,3	W20
В-Ф1	прямой	– 0,6	0,6 0,8	– –	0,7	W6
	косвенный	28,4 30,1	32,4 40,8	70,2 90,4	36,6	W14
Г-Ф1	прямой	– 1,1	1,2 1,2	– –	1,2	W12
	косвенный	80,2 87,6	124,8 229,0	386,4 662,2	176,9	W20
А-Ф2	прямой	– 1,0	1,2 1,2	– –	1,2	W12
	косвенный	98,7 114,2	120,4 445,9	653,0 723,0	283,1	W20

Окончание табл. 3.8

1	2	3	4	5	6	7
Б-Ф2	прямой	– 1,2	1,2 1,2	– –	1,2	W12
	косвенный	115,8 116,2	140,8 154,2	839,9 954,0	147,5	W20
В-Ф2	прямой	– 0,8	0,8 0,8	– –	0,8	W8
	косвенный	34,9 40,4	42,1 51,8	54,2 58,2	46,95	W16
Г-Ф2	прямой	– 1,2	1,2 1,2	– –	1,2	W12
	косвенный	280,4 324,8	388,0 422,0	705,0 793,6	405,0	W20
А-Ф3	прямой	– 0,8	1,0 1,0	– –	1,0	W10
	косвенный	92,9 248,4	323,4 539,1	688,8 780,5	431,25	W20
Б-Ф3	прямой	– 1,2	1,2 1,2	– –	1,2	W12
	косвенный	26,5 120,8	123,4 182,1	210,1 220,8	152,75	W20
В-Ф3	прямой	– 0,8	0,8 1,0	– –	0,9	W8
	косвенный	30,5 62,4	68,4 78,3	149,6 313,6	73,4	W18
Г-Ф3	прямой	– 1,2	1,2 1,2	– –	1,2	W12
	косвенный	159,7 348,8	424,4 452,8	594,4 656,5	438,6	W20
Д-Ф4	прямой	– –	1,2 1,2	– –	1,2	W12
	косвенный	12,4 14,8	25,3 38,8	87,9 140,1	32,0	W14
Ж-Ф4	прямой	– –	1,2 1,2	– –	1,2	W12
	косвенный	220,4 250,8	446,9 825,8	848,6 –	636,3	W20
И-Ф4	прямой	– –	1,2 1,2	– –	1,2	W12
	косвенный	68,4 70,2	126,9 144,8	158,2 235,0	135,8	W20

Анализ экспериментальных данных по оценке прочности на сжатие, водопоглощению по массе, морозостойкости и водонепроницаемости фибробетона многоуровневого армирования разных составов (табл. 3.3) показывает следующее.

Прочностные показатели фибробетона проверенных составов соответствуют расчетным.

Водопоглощение фибробетона по массе в диапазоне (2,15–5,04) % находится в рекомендуемых пределах, включая бетон для дорожного строительства и тем более для бетона общестроительного назначения.

Водонепроницаемость фибробетона, определенная прямыми испытаниями «по мокрому пятну», удовлетворяет заявленным требованиям, предъявляемым к бетону, использовавшемуся при строительстве БелАЭС, строительной лаборатории Представительства акционерного общества Инжиниринговая компания «АСЭ» (Российская Федерация) в Республике Беларусь.

Вместе с тем, при оценке водонепроницаемости фибробетона по воздухопроницаемости (прибор Агама-2РМ) получены явно завышенные данные относительно результатов испытаний по мокрому пятну. На наш взгляд причиной является то обстоятельство, что воздухопроницаемость оценивается по верхней грани образцов-цилиндров, а металлическая фибра (характеризующаяся плотностью в 7800 кг/м^3 при средней плотности бетонной смеси 2400 кг/м^3 , т. е. в 3,25 раза больше) при виброуплотнении бетона осаждается на некоторую глубину. Очевидно, что влияющая на воздухопроницаемость бетона зона контакта поверхности фибры с цементным камнем не вступает «в работу» при фильтрации воздуха в верхнем слое бетона, в отличие от фильтрации воды под давлением при оценке «по мокрому пятну».

Такой вывод подтверждает соотношение между величинами водопоглощения фибробетона и водонепроницаемости «по мокрому пятну». Чем ниже водопоглощение фибробетона, тем больше его показатель водонепроницаемости. Эта тенденция сохраняется и для оценки водонепроницаемости по воздухопроницаемости, но абсолютные значения последней завышены. Это следует учитывать при оценке данного показателя в реальных строительных конструкциях.

Данные по морозостойкости фибробетона, полученные по ускоренной методике при глубоком замораживании, не однозначны.

При этом очевидно, что фибробетон, полученный на составах с высокой проектной прочностью и, соответственно, больших расходах цемента (объемах цементного камня в бетоне) при низких водоцементных отношениях обеспечил высокий уровень морозостойкости (марки F500).

Можно предположить, что недостаточная морозостойкость образцов фибробетона классов С18/22,5 и С25/30 связана с недостатками (дефектами) формирования их структуры, за счет увеличения объемной доли стальной фибры по отношению к объему цементного теста (цементного камня) и растворной составляющей в бетоне. В результате имело место формирование более проницаемой структуры фибробетона и снижение его морозостойкости. Эти результаты подтверждают необходимость разработки методики достоверной оценки качества формирования структуры фибробетона в части равномерного распределения в нем стальной фибры, как основы однородности и уровня его физико-технических свойств.

3.6. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ФИБРОБЕТОНА

С целью разработки методики комплексной многопараметрической (многофункциональной) оценки (контроля) качества фибробетона многоуровневого армирования выполнены серии экспериментов по определению прочностных (на сжатие, осевое растяжение и растяжение при раскалывании, а также при изгибе), упругодеформативных (трещиностойкость) характеристик, а также силовых и энергетических параметров, сопровождающих и отражающих процесс деформирования фибробетона под действием механических нагрузок.

Образцы для исследований готовили из бетонных и фибробетонных смесей составов, приведенных в табл. и характеризующихся как «литые» смеси (составы «А», «Б», «Д», «Ж») и «самоуплотняющиеся» (составы «В», «Г», «И», «К») смеси, по консистенции исходных смесей на момент приготовления.

3.6.1. ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ

В табл. 3.9–3.12 и на рис. 3.16–3.20 приведены данные о результатах испытаний и их обработки в виде тенденций изменения определяемых параметров в зависимости от свойств исходных бетонных матриц и соотношения между вводимыми в состав УНТ и стальной фибры.

Смеси «В, Г, И, К» относятся к «самоуплотняющимся». По содержанию цемента данные смеси примерно одинаковы – 460–485 кг. Состав «В» содержит наименьшее количество наноуглеродной добавки – 0,5 %, в то время как в составах «Г, И, К» содержится 0,9–1,0 %. В составе «Г» водоцементное отношение 0,44, в составах «В, И, К» – 0,39–0,4.

Таблица 3.9 – Составы самоуплотняющихся смесей

Параметр			В	И	Г	К
Цемент		кг на 1 м ³ смеси	460	485	485	485
РСАМ / МКУ–85			–	55/–	40/45	40/45
Щебень	фр. 5–20 мм		830	–	–	–
	фр. 5–10 мм		–	880	825	825
Песок			950	835	800	800
Добавка с УНТ	суперпластификатор	% от масс. цем.	0,5	0,9	0,94	1,0
	тв. углерод		0,00038	0,00060	0,00060	0,00077
В/Ц			0,4	0,39	0,44	0,39
РК (Марка)			53 (P4)	70 (P6)	64 (P6)	72 (P6)
Прочность на сжатие, f_c		МПа	39,5	63,3	72,3	81,1
Прочность на осевое растяжение, f_{ax}			1,61	1,89	2,24	2,60
Прочность на растяжение при изгибе, f_{fl}			3,1	4,7	6,9	7,1
Прочность на растяжение при раскалывании, f_{sp}			1,81	2,63	3,14	3,21

В составах «А, Б, Д, Ж» (табл. 3.10) количество основных компонентов варьируется в небольших диапазонах: цемент 400–445 кг,

щебень 1020–1035 кг, песок 800–820 кг. Данные составы относятся к марке по подвижности П5 (литые смеси).

Таблица 3.10 – Составы литых смесей

Параметры		Д	Б	А	Ж
Цемент		400	445	400	445
Ще- бень	фр. 5–20 мм	1020	1035	1020	1035
Песок		800	820	820	820
Добав- ка с	суперпластифи- катор	0,4	0,5	0,8	0,9
УНТ	тв. углерод	$32 \cdot 10^{-5}$	$38 \cdot 10^{-5}$	$60 \cdot 10^{-5}$	$67 \cdot 10^{-5}$
В/Ц		0,39	0,4	0,4	0,36
ОК (Марка)		22 (П5)	23 (П5)	21 (П5)	22 (П5)
Прочность на сжатие, f_c		36,1	61,9	60,6	54,6
Прочность на осевое рас- тяжение, f_{ax}		2,02	1,87	1,74	2,37
Прочность на растяжение при изгибе, f_{fl}		4,5	3,9	2,7	4,7
Прочность на растяжение при раскалывании, f_{sp}		2,53	2,35	1,98	2,63

На показатели прочности и трещиностойкости в исследуемых фибробетонных составах оказывают влияние, как модификация бетонной матрицы, так и дисперсное армирование. Это можно представить в виде формулы:

$$f_{nc, fib} = f_{basic} \cdot K_{nc} \cdot K_{fib}, \text{ МПа}, \quad (3.2)$$

где f_{basic} – прочность или трещиностойкость базовой матрицы;
 K_{nc} – коэффициент влияния модифицированной матрицы;
 K_{fib} – коэффициент влияния фибры.

Таблица 3.11 – Коэффициенты влияния матрицы и фибры на характеристики самоуплотняющихся фибробетонных смесей с многоуровневым армированием

Показатель		K_{nc}	K_{fib}			K_{nc}	K_{fib}	
		Г	Ф1	Ф2	Ф3	И	Ф4	Ф8
Прочность на сжатие, МПа	f_c	1,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,0	1,0
	f_{ax}	1,4	1,8	1,8	1,4	1,4	1,0	1,1
Прочность на растяжение, МПа	f_{sp}	1,7	1,5	1,7	1,0	1,2	1,3	1,5
	f_{fl}	2,2	1,0	1,1	0,9	1,5	1,4	–
КИН, МПа√м	K_{Ic}	1,5	1,3	1,6	1,1	1,0	–	–
	K_{IIc}	3,1	1,9	1,8	1,3	0,9	–	–

Таблица 3.12 – Коэффициенты влияния матрицы и фибры на характеристики литых фибробетонных смесей с многоуровневым армированием

Показатель		K_{nc}	K_{fib}			K_{nc}	K_{fib}	
		А	Ф1	Ф2	Ф3	И	Ф4	Ф8
Прочность на сжатие, МПа	f_c	1,0	0,9	1,1	1,0	1,5	1,2	1,1
	f_{ax}	0,9	1,8	1,2	1,0	1,2	1,1	1,1
Прочность на растяжение, МПа	f_{sp}	0,8	1,5	1,6	1,0	1,5	1,3	1,8
	f_{fl}	0,7	1,0	2,1	1,0	1,2	1,1	–
КИН, МПа√м	K_{Ic}	0,6	1,3	3,8	1,4	0,8	1,4	–
	K_{IIc}	0,8	1,9	1,5	1,7	1,1	1,6	–

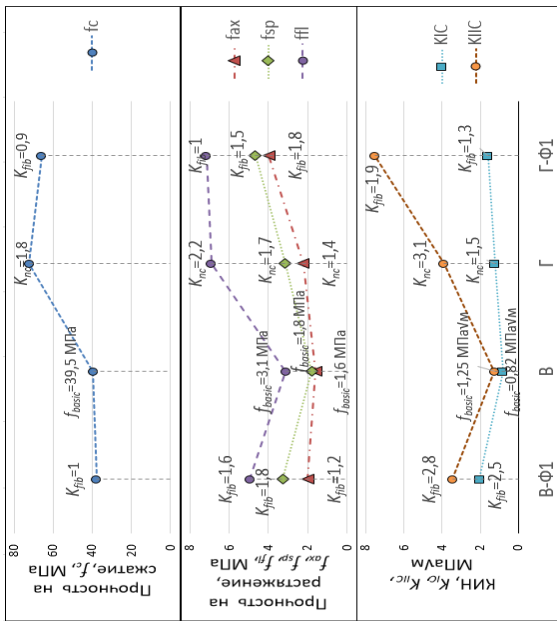


Рисунок 3.16 – Влияние свойств модифицированной матрицы («Г») и дисперсного армирования («Ф1») на прочность и трещиностойкость самоуплотняющихся бетонных составов

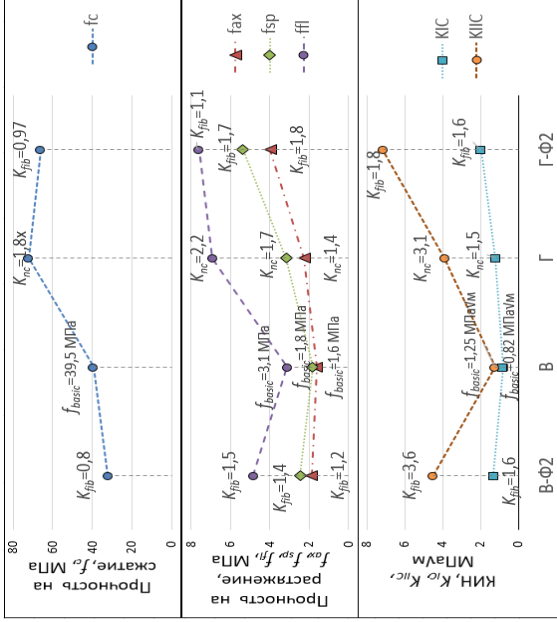


Рисунок 3.17 – Влияние свойств модифицированной матрицы («Г») и дисперсного армирования («Ф2») на прочность и трещиностойкость самоуплотняющихся бетонных составов

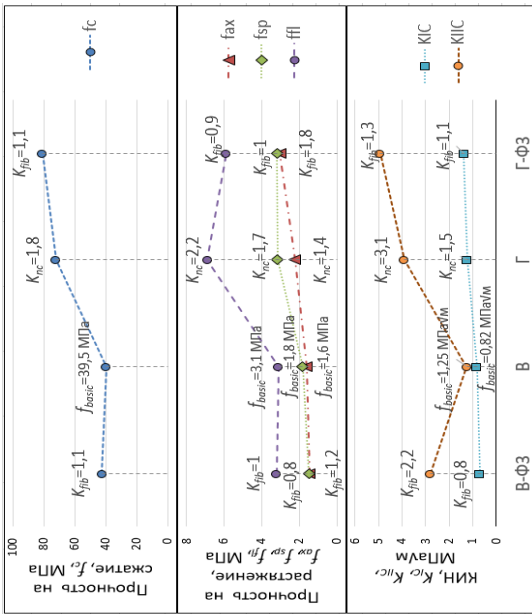


Рисунок 3.18 – Влияние свойств модифицированной матрицы («Г») и дисперсного армирования («Ф3») на прочность и трещиностойкость самоуплотняющихся бетонных составов

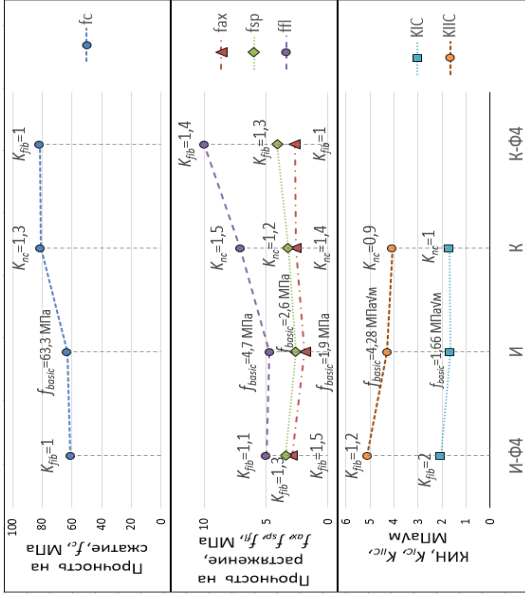


Рисунок 3.19 – Влияние свойств модифицированной матрицы («К») и дисперсного армирования («Ф4») на прочность и трещиностойкость самоуплотняющихся бетонных составов

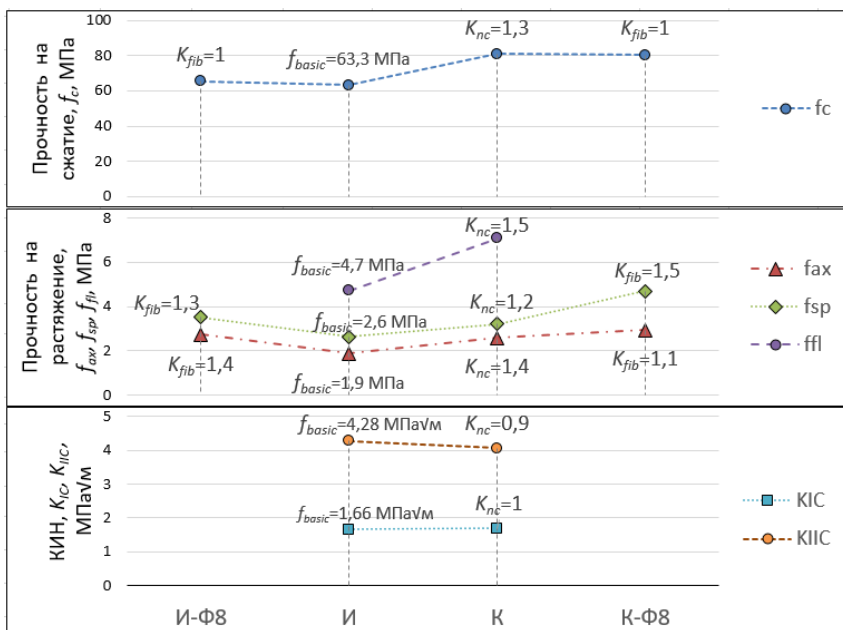


Рисунок 3.20 – Влияние свойств модифицированной матрицы («К») и дисперсного армирования («Ф8») на прочность и трещиностойкость самоуплотняющихся бетонных составов

Самоуплотняющиеся смеси «В, Г, И, К».

При добавлении микрокремнезема (45 кг) в базовый состав «В» с прочностью на сжатие 39,5 МПа, увеличении количества пластификатора в 1,9 раз (с 0,5 до 0,94 %) и УНТ в 1,6 раза (с $0,38 \cdot 10^{-3}$ до $0,60 \cdot 10^{-3}$ %) прочность на сжатие увеличилась в 1,8 раз. Значение прочности на сжатие при добавлении металлической стальной фиброй (Ф1, Ф2) в составы «В» и «Г» уменьшилось на 1,6–7,2 МПа, что соответствует $K_{fib} = 0,9–1,0$. С полимерной фиброй (Ф3) коэффициент влияния фибры равен 1,1. При комплексном армировании (Ф4, Ф8) тенденция сохраняется – $K_{fib} = 1,0$. Таким образом, можно заключить, что исследуемые дисперсные волокна оказывают незначительное либо вообще не оказывают влияния на показатель прочности при сжатии. Для получения бетона требуемой прочности на сжатие эффективнее и целесообразнее модифицирование бетонной матрицы различными добавками и варьированием количества вяжущего.

Оценка влияния матрицы и фибры производилась по трем видам растяжения: осевое, при раскалывании, при изгибе. Прочность при осевом растяжении в базовом составе «В» составила 1,6 МПа. В модифицированном составе «Г» с микрокремнеземом и увеличенным количеством в 1,9 раза наноглеродной пластифицирующей добавки значение f_{ax} увеличилось в 1,4 раза (2,2 МПа). При добавлении металлической фибры (Ф1, Ф2) в базовый состав («В») прочность на растяжение удастся увеличить только 1,2 раза (до 2 МПа). А при добавлении этих же волокон в улучшенный состав «Г» в 1,8 раза (до 4 МПа), что в 2,7 раза выше, чем в базовом. С полимерными волокнами (Ф3) похожая ситуация, где вклад фибры в увеличение значения прочности в улучшенной бетонной матрице выше, чем в базовой и составил 1,4 раза (+0,8 МПа) против 1,2 раза (+0,1 МПа). При комплексном дисперсном армировании (Ф4, Ф8) в составе «И» с количеством наноглеродного суперпластификатора 0,94 % от массы цемента, коэффициент влияния фибры равен 1,5, а в составе «К» с количеством наноглеродного суперпластификатора 1 % и содержащем микрокремнезем $K_{fib} = 1,1$.

Изменение прочности на растяжение при раскалывании для составов с металлической фиброй (Ф1, Ф2) и комплексным армированием (Ф4, Ф8) характеризуется такими же закономерностями что при осевом растяжении. Дисперсное армирование полимерной фиброй (Ф3), заметного влияния на прочность на растяжение при раскалывании не оказывает.

Прочности на растяжение при изгибе в базовой бетонной матрице «В» составила 3,1 МПа. При дисперсном армировании стальными волокнами данного состава удалось увеличить значение f_{fl} в 1,5–1,6 раз, достигнув значения 4,9 МПа. А при армировании комбинацией фибр в улучшенном составе «К» прочность на растяжение при изгибе увеличилась с 7 МПа до 10 МПа ($K_{fib} = 1,4$).

Коэффициент интенсивности напряжений (КИН) при нормальном отрыве в базовой матрице «В» составил 0,82 МПа $\sqrt{м}$. Введение стальной фибры из листа (Ф1) привело к росту КИН в 2,5 раза, стальной анкерной из проволоки (Ф2) – в 1,6 раза, комплексного армирования (Ф4) – в 2 раза, полимерной – в 1,1 раза.

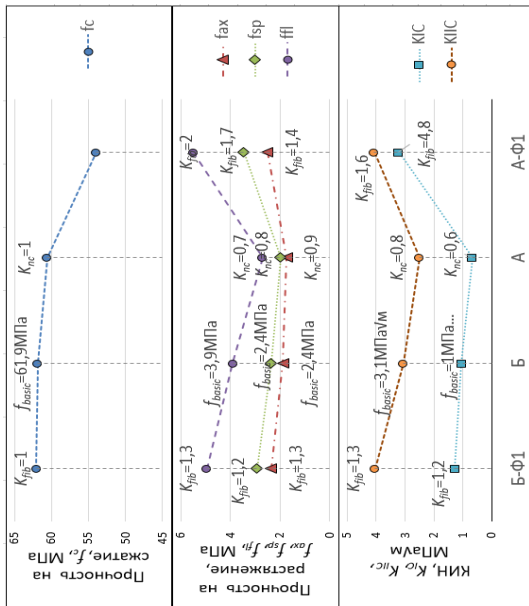


Рисунок 3.21 – Влияние свойств модифицированной матрицы («А») и дисперсного армирования («Ф1») на прочность и трещиностойкость литых бетонных составов

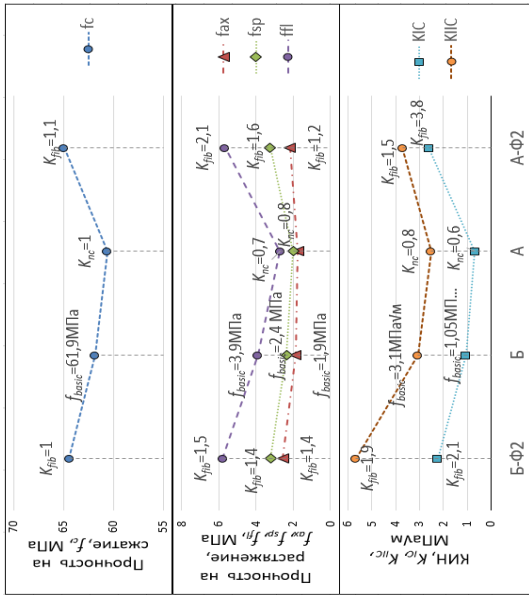


Рисунок 3.22 – Влияние свойств модифицированной матрицы («А») и дисперсного армирования («Ф2») на прочность и трещиностойкость литых бетонных составов

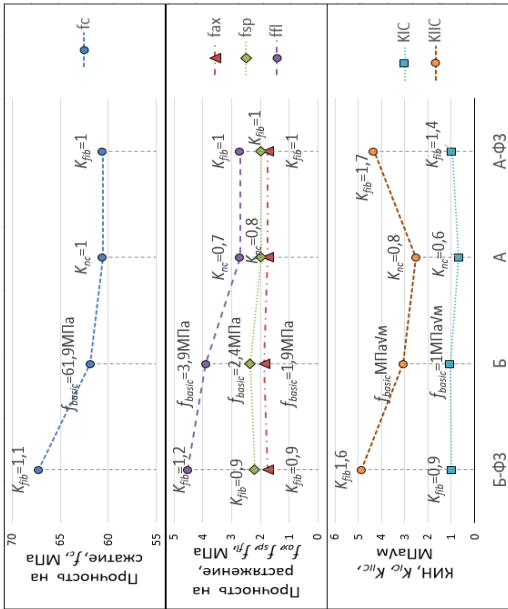


Рисунок 3.23 – Влияние свойств модифицированной матрицы («А») и дисперсного армирования («Ф3») на прочность и трещиностойкость литых бетонных составов

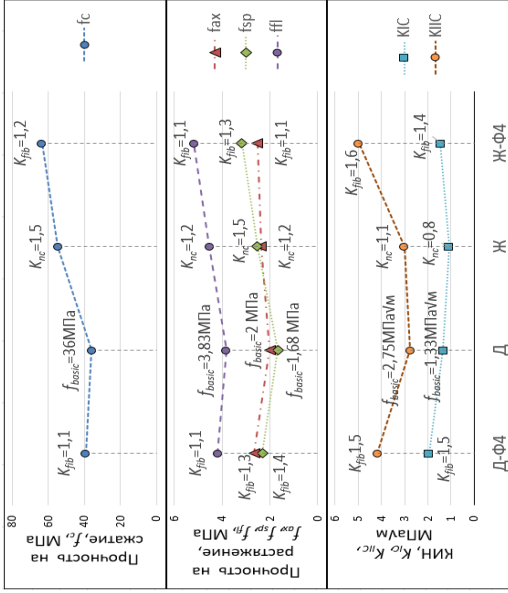


Рисунок 3.24 – Влияние свойств модифицированной матрицы («Ж») и дисперсного армирования («Ф4») на прочность и трещиностойкость литых бетонных составов

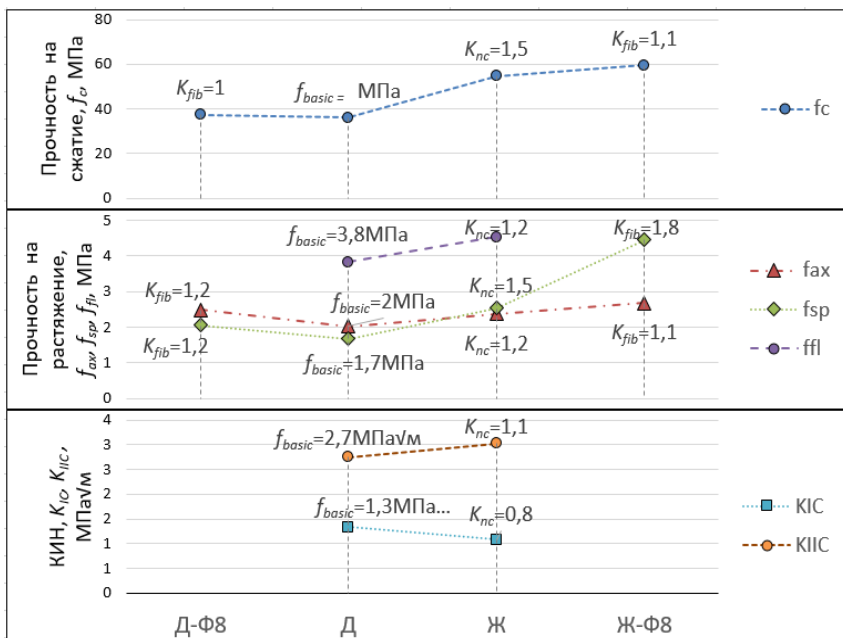


Рисунок 3.25 – Влияние свойств модифицированной матрицы («Ж») и дисперсного армирования («Ф8») на показатели прочности и трещиностойкости литых бетонных составов

Введение волокон в матрицу с микрокремнеземом и увеличенным количеством наноглеродной добавки («Г») увеличило значение КИН в 1,3 раза с «Ф1», в 1,6 раза с «Ф2», в 1,1 раза с «Ф3», что в общем составляет меньший вклад фибры в вязкость разрушения композита в сравнении с полученными фибробетонными композициями с базовой бетонной матрицей.

КИН при поперечном сдвиге в базовой матрице «В» равен 1,25 МПа·м. В составе «Г» с микрокремнеземом и увеличенным количеством наноглеродной добавки $K_{IC} = 3,9$ МПа·м. При дисперсном армировании стальными волокнами «Ф1» и «Ф2» матрицы «В» прирост составил 2,8 раза и 3,6 раз и достиг значения в 3,4 МПа·м и 4,5 МПа·м, что приблизительно равно K_{IC} в составе «Г». При армировании матрицы «Г» этими же волокнами значение K_{IC} увеличилось в 1,9 раза и 1,8 раза соответственно.

Таким образом, совместный вклад бетонной матрицы и стальной фибры позволил увеличить значение K_{IC} более чем в 5 раз, а значение K_{IC} в 2 раза.

Исходя из вышеизложенного можно выделить наиболее рациональные составы: В-Ф2, Г-Ф2, Г-Ф1, И-Ф8, К-Ф4

Литые смеси составов «А, Б, Д, Ж». В составе «А» на 45 кг цемента меньше, чем в составе «Б», но наноуглеродной добавки больше на 60 %. Несмотря на то, что исходные значения прочности на растяжение для состава «А» несколько ниже, чем для состава «Б», дисперсное армирование в варианте «Ф1» и «Ф2» оказалось эффективнее в составе «А» – с большим содержанием наноуглеродной добавки. Для состава «А-Ф1» коэффициент влияния фибры составил 1,4 для f_{ax} (2,5 МПа), 1,7 для f_{sp} (3,5 МПа), 2,0 для f_{fl} (5,5 МПа), 4,8 для K_{IC} (3,2 МПа√м), 1,6 для K_{IC} (4,1 МПа√м). Для состава «Б-Ф1» $K_{fib} = 1,3$ для f_{ax} (2,4 МПа), 1,2 для f_{sp} (2,9 МПа), 1,3 для f_{fl} (4,9 МПа), 1,2 для K_{IC} (1,3 МПа√м), 1,6 для K_{IC} (4,0 МПа√м). Аналогичная тенденция сохраняется и для дисперсного армирования по варианту «Ф2».

3.6.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Для оценки изменений под действием нагрузок коэффициента интенсивности напряжений воспользуемся моделью Леонова–Панасюка–Дагдейла [94], предназначенной для отражения процесса образования и развития трещины. Она является наиболее известным усложнением теории Гриффитса–Ирвина [95].

В ней предполагается, что трещина начнет развиваться, если раскрытие в ее вершине достигнет критического значения. Она используется при анализе процессов разрушения конструкций, изготовленных из многих материалов, однако опыт ее применения для бетонов [96] и фибробетонов невелик.

Исследования источника [94] показывают, что модель качественно правильно описывает многие эффекты, наблюдаемые при квазирупном разрушении бетона.

Из модифицированной формулы Леонова–Панасюка–Дагдейла [95] величину коэффициента интенсивности напряжений можно получить по формуле

$$K_I^{\text{ЛПД}}(f_{fl}) = \frac{0,55 \cdot f_{fl} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot m_0}}{\sqrt{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \text{ МН/М}^{3/2}, \quad (3.3)$$

где f_{fl} – прочность на растяжение при изгибе, МПа;
 ν – коэффициент Пуассона;

$$m_0 = k \cdot d_{\max}, \quad (3.4)$$

d_{\max} – максимальная крупность заполнителя, м;
 k – коэффициент принимаемый равным 1,3 для $d_{\max} = 20$ мм, 3 для $d_{\max} = 10$ мм [94].

Результаты полученных значений представлены на рис. 3.26.

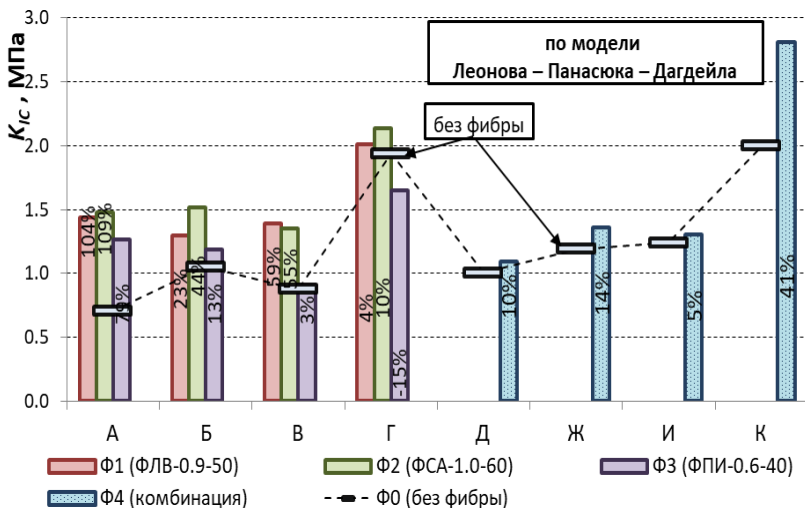


Рисунок 3.26 – Критический коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве, рассчитанный по модели Леонова–Панасюка–Дагдейла

В фибробетонном материале наблюдается выраженный пластический характер работы на растяжение после начала трещинообразования. При этом может быть достигнуто проявление так называемого

мого деформационного квазиупрочнения, которое характерно тем, что после начала трещинообразования следует стадия пластической работы материала на растяжение. В этом случае воспринимаемые напряжения могут превышать напряжения, вызывающие образование трещин.

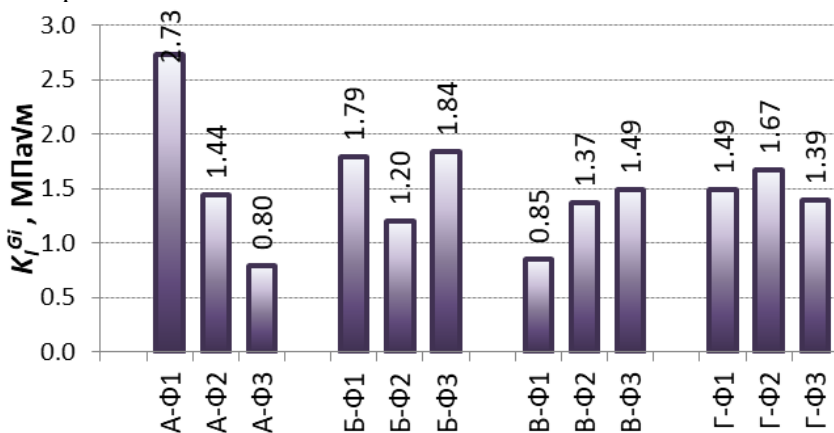


Рисунок 3.27 – Критический коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве, определенный по энергозатратам

Сравнение полученных значений КИН при нормальном отрыве (K_{IC} , K_I^{Gi} , K_{IC}^{III}) демонстрирует высокую сходимость. Величина относительного стандартного отклонения (CV) не превышает 35 %. Для составов без фибрового армирования полученные значения при равновесных испытаниях демонстрируют полное совпадение с результатами неравновесных. А с дисперсным армированием сохраняется тенденция их изменения. Наибольшее расхождение наблюдается в бетонной матрице «А» – $CV = 25\text{--}30\%$.

Из результатов экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Коэффициент интенсивности напряжений для фибробетона с наномодифицированной матрицей коррелирует с прочностью на растяжение при изгибе и может быть получен расчетным путем.

2. Значения коэффициента интенсивности напряжений, полученные в независимых испытаниях (прочность на нормальный отрыв по кубам с надрезом, энергозатраты при изгибе балки с надрезом и модуль упругости, прочность на растяжение при изгибе балки без

надреза) показали высокую степень сходимости, что свидетельствует о том, что такой параметр как критический коэффициент интенсивности напряжений можно отнести к устойчивым показателям трещиностойкости фибробетона и использовать для контроля его свойств.

3.6.3. МОДУЛЬ УПРУГОСТИ ФИБРОБЕТОНА

Для расчета коэффициента интенсивности напряжений по энергозатратам фибробетона моноармирования стальной фиброй используется значение начального модуля упругости, величину которого в исследованиях определяли [97–99] по формуле

$$E_{fb} = E_b(1 - \mu_{fv}) + E_f \mu_{fv}, \text{ МПа}, \quad (3.5)$$

где E_b – начальный модуль упругости бетона-матрицы;
 E_f – начальный модуль упругости стальной фибры;
 μ_{fv} – коэффициент фибрового армирования по объему.

Для комплексного армирования (полиармирование – Ф4, Ф8) расчет производился по формуле:

$$E_{fb} = E_b(1 - (\mu_{fv,1} + \mu_{fv,2} + \mu_{fv,3})) + E_{f,1} \cdot \mu_{fv,1} + E_{f,2} \cdot \mu_{fv,2} + E_{f,3} \cdot \mu_{fv,3}, \text{ МПа} \quad (3.6)$$

Сопоставление полученных величин модуля упругости бетона многоуровневого армирования с соответствующими его значениями для равной прочности (класса) бетона по СНБ 5.03.01–20 (табл. 3.13) [100] показывает их практическое совпадение. Этим подтверждается возможность использования данного параметра при оценке трещиностойкости фибробетона по разрабатываемой многопараметрической методике.

С этой же целью (для решения задачи по оценке уровня трещиностойкости фибробетона) были определены величины других параметров – J-интеграла и коэффициента ползучести, как характеристик вязкости его разрушения под действием механических нагрузок.

Таблица 3.13 – Начальный модуль упругости для исследуемых составов фибробетона с наномодифицированной матрицей

Состав	E_{fb} , МПа	Состав	E_{fb} , МПа	Состав	E_{fb} , МПа	Состав	E_{fb} , МПа
А	37 000	В	32 500	Д	32 500	И-Ф8	35 389
А-Ф1	38 730	В-Ф1	34 275	Д-Ф4	33 316	К	37 000
А-Ф2	38 530	В-Ф2	34 075	Д-Ф8	33 401	К-Ф4	37 788
А-Ф3	36 852	В-Ф3	32 370	Ж	36 059	К-Ф8	37 873
Б	37 000	Г	39 000	Ж-Ф4	36 794	–	–
Б-Ф1	38 730	Г-Ф1	40 710	Ж-Ф8	36 879	–	–
Б-Ф2	38 530	Г-Ф2	40 510	И	34 500	–	–
Б-Ф3	36 852	Г-Ф3	38 844	И-Ф4	35 303	–	–

3.6.4. ИНТЕГРАЛ ЧЕРЕПАНОВА–РАЙСА (J -ИНТЕГРАЛ)

Для оценки вязкости разрушения фибробетона с наномодифицированной матрицей по полученным значениям коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве J -интеграл определяется по формуле [101–103]

$$J_{IC} = \left(\frac{1-\nu^2}{E}\right) \cdot K_{IC}^2, \text{ МДж/м}^2, \quad (3.7)$$

J – интеграл при поперечном сдвиге

$$J_{IIC} = \left(\frac{1-\nu^2}{E}\right) \cdot K_{IIC}^2, \text{ МДж/м}^2, \quad (3.8)$$

где ν – коэффициент Пуассона (принят 0,2);

E – модуль упругости материала, МПа;

K_{IC} – критический коэффициент интенсивности при нормальном отрыве, МПа·м^{1/2};

K_{IIC} – критический коэффициент интенсивности при поперечном сдвиге, МПа·м^{1/2}.

Таблица 3.14 – J -интеграл (МДж/м²)

Состав	J_{IC}	J_{IIC}	Состав	J_{IC}	J_{IIC}	Состав	J_{IC}	J_{IIC}
А	11,95	163,42	В	19,98	46,24	Д	52,55	223,23
А-Ф1	257,83	410,22	В-Ф1	117,33	332,30	Д-Ф4	108,68	502,90
А-Ф2	168,51	343,89	В-Ф2	49,39	570,13	Ж	31,10	242,96
А-Ф3	24,41	489,03	В-Ф3	13,96	230,73	Ж-Ф4	56,32	645,33
Б	28,60	242,92	Г	37,11	374,54	И	76,76	508,92
Б-Ф1	40,43	405,64	Г-Ф1	61,01	1338,08	И-Ф4	113,78	710,01
Б-Ф2	125,36	799,17	Г-Ф2	91,80	1214,55	К	74,10	428,11
Б-Ф3	25,73	614,60	Г-Ф3	46,17	602,09	К-Ф4	116,34	637,16

3.6.5. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЗУЧЕСТИ

В наших исследованиях расчет ползучести фибробетона (табл. 3.15–3.16) с наномодифицированной матрицей осуществлялись несколькими способами.

Ползучесть фибробетона по формуле Вёльми (Voellmy) $C_0 = \frac{0,0025}{R}$ [104; 105]:

$$\varphi = \frac{0,00322 \cdot E_0}{R^z}, \quad (3.9)$$

где $z = 1,04$;

R – прочность на сжатие, МПа;

E_0 – модуль упругости, МПа.

Ползучесть по формуле [104]:

$$\varphi = C_0 \cdot E_0, \quad (3.10)$$

где C_0 определено по формуле Щербакова Е. Н. [104–106]:

$$C_{28} = \left(0,13 + \frac{1545}{R}\right) \frac{10^{-6} \cdot B}{100}, \quad (3.11)$$

где R – прочность на сжатие, МПа;

B – расход воды, л/м³.

Ползучесть по формуле Несветаева [104]:

$$\varphi = \frac{8 \cdot 10^3}{E^{0,8}}. \quad (3.12)$$

Таблица 3.15 – Ползучесть по СП 63.13330

Относительная влажность воздуха окружающей среды, %	Значения коэффициента ползучести бетона $\varphi_{b,cr}$ при классе тяжелого бетона на сжатие										
	B10	B15	B20	B25	B30	B35	B40	B45	B50	B55	B60-B100
Выше 75	2,8	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
40–75	3,9	3,4	2,8	2,5	2,3	2,1	1,9	1,8	1,6	1,5	1,4
Ниже 40	5,6	4,8	4,0	3,6	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0

Анализ полученных данных показывает, что закономерность изменений коэффициента ползучести в исследуемых составах примерно одинакова при определении по СП 5.03.01-2020, по Вёльми, по Щербакову, и заметно отличается в расчетах по формуле Несветаева.

Как будет показано далее (при оценке результатов испытаний образцов фибробетона многоуровневого армирования) общая закономерность снижения коэффициента ползучести с ростом его прочности, как общая тенденция, подтверждается нашими экспериментами.

Таблица 3.16 – Результаты расчета коэффициента ползучести фибробетона

Номер состава	Фибра	по Вёльми	по Щербакову	по Несветаеву	по СП 5.03.01-2020
А	без фибры	1,67	1,52	1,77	1,80
А-Ф1	ст. листовая	1,97 ↑	1,74 ↑	1,71	1,90
А-Ф2	ст. анкерная	1,62	1,44	1,72	1,80
А-Ф3	полим. волн.	1,47	1,31	1,78	1,60
Б	без фибры	1,63	1,65	1,77	1,80
Б-Ф1	ст. листовая	1,70 ↑	1,64	1,71	1,80
Б-Ф2	ст. анкерная	1,63	1,65	1,72	1,80
Б-Ф3	полим. волн.	1,49	1,52	1,78	1,60
В	без фибры	2,29	2,35	1,97	1,97
В-Ф1	ст. листовая	2,52 ↑	2,32	1,88	1,88

Окончание табл. 3.16

Номер состава	Фибра	по Вёльми	по Щербакову	по Несветаеву	по СП 5.03.01-2020
В-Ф2	ст. анкерная	2,96 ↑	2,41 ↑	1,89	1,89
В-Ф3	полим. волн.	2,11	2,39	1,97	1,97
Г	без фибры	1,46	1,79	1,70	1,70
Г-Ф1	ст. листовая	1,68 ↑	2,14 ↑	1,64	1,64
Г-Ф2	ст. анкерная	1,57 ↑	1,79	1,65	1,65
Г-Ф3	полим. волн.	1,30	1,45	1,70	1,70
Д	без фибры	2,32	2,02	1,97	2,30
Д-Ф4	комбинация 1	2,06	1,80	1,93	2,10
Д-Ф8	комбинация 2	2,30	2,00	1,92	2,30
Ж	без фибры	1,77	1,61	1,81	1,90
Ж-Ф4	комбинация 1	1,62	1,47	1,78	1,80
Ж-Ф8	комбинация 2	1,52	1,39	1,78	1,60
И	без фибры	1,94	2,07	1,87	2,1
И-Ф4	комбинация 1	1,78	1,90	1,84	1,9
И-Ф8	комбинация 2	1,67	1,79	1,84	1,8
К	без фибры	1,59	1,71	1,77	1,8
К-Ф4	комбинация 1	1,61	1,73	1,74	1,6
К-Ф8	комбинация 2	1,62	1,75	1,74	1,8

3.6.6. НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Использование в предлагаемой многопараметрической методике контроля качества фибробетона многоуровневого армирования неразрушающих методов позволяет проводить испытания, как в лабораторных, так и в построчных (эксплуатационных) условиях. При этом данный вариант контроля позволяет реализовать и «сплошной контроль», т. е. практически без ограничения количества и мест испытаний. На этом основании такой подход позволит осуществить переход от заявленных свойств материала к качественным характеристикам конструкции.

Контроль прочности фибробетона проводился ультразвуковым методом с помощью прибора ПУЛЬСАР-1 в сочетании с ударным

импульсным методом. Испытания проводили на образцах цилиндрах 150x150 мм сквозным и поверхностным прозвучиванием и на образцах кубах 100x100x100 мм включая контроль методом ударного импульса с помощью склерометра Шмидта. Результаты испытаний приведены в табл. 3.17.

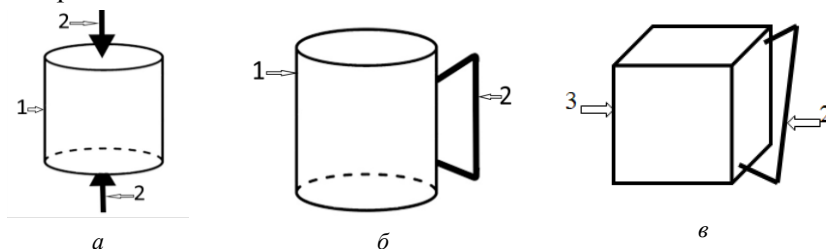


Рисунок 3.28 – Схемы УЗ испытаний: *a* – сквозное (УЗ-1); *б* – поверхностное (УЗ-2); *в* – поверхностное (УЗ-3); 1 – образец цилиндр 150x150 мм; 2 – ультразвуковой датчик; 3 – образец куб 100x100x100 мм

Расчетная прочность бетона на сжатие получена по формуле [119; 120]

$$f_c^{\text{расч}} = K_I \cdot f_{c,I} + K_V \cdot f_{c,V}, \quad (3.13)$$

где K_I и K_V – безразмерные коэффициенты;

$f_{c,I}$ и $f_{c,V}$ – соответственно оценки прочности фибробетона методом ударного импульса и ультразвуковым импульсным методом, МПа.

Расчетные значения прочности по результатам испытаний неразрушающего контроля приведенные в табл. 3.17, практически совпадают (отклонения не превышают $\pm 5\%$) с результатами испытаний образцов-кубов фибробетона на сжатие.

Это свидетельствует о возможности использования такого варианта контроля прочности фибробетона в разрабатываемой многопараметрической методике оценки его качества. Так как, во-первых, компонента (или параметр) прочности играет важную роль при оценке трещиностойкости фибробетона, а во-вторых, неразрушающий вариант контроля прочности практически беспроблемно применим в устроенных и эксплуатирующихся конструкциях. В частности, в конструкциях полов, на которые ориентирована производственная апробация результатов исследования.

Таблица 3.17 – Результаты испытаний образцов фибробетона с наномодифицированной матрицей неразрушающими методами

Состав	Ультразвуковое прозвучивание (УЗ)										Прочность на сжатие кубов ребр. 100 мм	Показания склерометра (ударный импульс)	Коэф-фициенты		Расчетная прочность на сжатие, МПа	Погрешность, %
	сквозное (УЗ-1)				поверхностное											
					(УЗ-2)				(УЗ-3)							
	V_{long} , м/с	S	CV, %	E_{dyn} , ГПа	V_{long} , м/с	S	CV, %	E_{dyn} , ГПа	V_{long} , м/с	f_c , МПа						
А	4733	65,45	1 %	47,98	4978	34	1 %	53,08	–	60,6	45,8	0,81	0,19	60,7	0 %	
А-Ф1	4109	102,3	2 %	35,99	4461	69	2 %	42,61	51,0	54	44,3	0,76	0,23	55,6	3 %	
А-Ф2	4503	79,07	2 %	43,26	4715	47	1 %	47,43	64,0	65	47,3	0,83	0,16	63,4	–2 %	
А-Ф3	4695	53,74	1 %	46,28	4907	29	1 %	50,65	65,0	68,2	49,2	0,85	0,15	68,6	1 %	
Б	4624	56,23	1 %	45,80	4723	45	1 %	47,78	–	61,9	43,6	0,81	0,18	62,2	0 %	
Б-Ф1	4045	164,1	4 %	35,67	4400	109	2 %	42,09	59,0	62	43,8	0,81	0,18	62,3	1 %	
Б-Ф2	4389	102,4	2 %	41,26	4584	46	1 %	44,46	62,0	64,4	44,76	0,83	0,17	64,6	0 %	
Б-Ф3	4444	68,98	2 %	40,13	4643	71	2 %	43,81	66,0	67,3	45,68	0,84	0,15	66,7	–1 %	
В	4397	58,78	1 %	41,41	4515	44	1 %	43,67	–	39,5	43,7	0,64	0,35	39,9	1 %	
В-Ф1	3952	144,1	4 %	32,15	4192	119	3 %	36,15	35,0	37,9	42,4	0,63	0,36	36,6	–3 %	
В-Ф2	3849	199,8	5 %	27,63	3877	68	2 %	28,03	31,0	32,3	41,2	0,59	0,40	33,4	3 %	
В-Ф3	4311	30,26	1 %	35,74	4495	98	2 %	38,62	40,0	42,6	45,8	0,67	0,32	42,7	0 %	
Г	4694	34,56	1 %	47,20	4742	57	1 %	48,17	–	72,3	49,85	0,86	0,13	74,2	3 %	
Г-Ф1	4657	165,2	4 %	49,07	4958	33	1 %	55,59	74,0	66	45,2	0,84	0,16	65,3	–1 %	
Г-Ф2	4389	66,24	2 %	38,40	4457	59	1 %	40,13	79,0	70,1	49	0,85	0,14	73,1	4 %	
Г-Ф3	4666	16,23	0 %	45,75	4662	85	2 %	45,70	78,0	81	51,3	0,90	0,10	77,2	–5 %	

3.7. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

Установлены рациональный расход (содержание в бетоне) углеродного наноматериала в виде углеродных нанотрубок (УНТ), составивший $\geq 0,00075$ % от массы цемента в нем, а также рациональный расход (содержание в бетоне) стальной фибры видов, использованных в экспериментах, составивший $\sim 1,0$ % по объему в фибробетоне.

Выявлена закономерность изменений формуемости (удобоукладываемости) фибробетонной смеси многоуровневого армирования на стадии ее приготовления с введением в состав УНТ, содержащихся в комплексной добавке совместно с суперпластификатором, а также после введения в состав стальной фибры. На основании результатов этих исследований сделан вывод о необходимости 2-стадийного варианта приготовления фибробетона многоуровневого армирования с введением в его состав стальной фибры непосредственно перед применением, т. е. приобъектно перед подачей фибробетона к месту укладки в бетонируемую конструкцию.

Выполнен комплекс экспериментальных исследований по определению прочностных (на сжатие, растяжение при изгибе, осевое растяжение, при раскалывании образцов, деформативных (удельные энергозатраты, J -интеграл, модуль упругости, ползучесть), силовых (коэффициенты интенсивности напряжений при нормальном отрыве и поперечном сдвиге), а также эксплуатационных свойств (водопоглощение, водонепроницаемость, морозостойкость) фибробетона многоуровневого армирования, в результате которых получено научно-практическое обоснование предлагаемой комплексной многопараметрической (многофакторной) методики контроля его качества. Предлагаемая методика за счет учета совокупности множества оцениваемых факторов (параметров), влияющих на качество фибробетона, позволит с высокой степенью достоверности определить и оценить его прочностные, упруго-деформативные свойства, а также меру трещиностойкости при «работе» под механическими нагрузками как непосредственно в свежестроенных, так и в эксплуатируемых монолитных строительных конструкциях.

ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ ВЕДЕНИЯ БЕТОННЫХ РАБОТ

4.1. ТЕХНОЛОГИЯ ПРИГОТОВЛЕНИЕ ФИБРОБЕТОНА

Разрабатываемая технология ведения бетонных работ с применением фибробетона многоуровневого армирования, включающего нано-, микроармирование за счет введения в состав бетона углеродного наноматериала в виде трубчатых элементов (УНТ) и макродисперсное армирование стальной фиброй, отличается тем, что необходим учет резкого снижения формуемости (удобоукладываемости) фибробетонной смеси, как непосредственно после введения стальной фибры, так и в особой мере с течением времени.

В этой связи технологическую операцию по введению стальной фибры в монолитный бетон рационально осуществлять непосредственно перед его подачей к месту укладки в конструкцию (опалубку).

Возможен вариант приготовления фибробетона многоуровневого армирования с использованием сухих бетонных смесей, которые готовят на специализированных предприятиях, включая в состав фибробетона все необходимые компоненты в сухом виде, в том числе и химические добавки – пластификаторы, содержащие УНТ, а на строительной площадке (т. е. приобъектно) их затворяют водой и используют.

Не исключая принципиальную возможность применения такого варианта в строительном производстве очевидна, с одной стороны, его высокая затратность, т. к. заполнители для сухих смесей предварительно высушивают до остаточной влажности $\leq 0,5\%$ по массе. А с другой, применение сухих бетонных смесей оправданно при значительных временных рамках и расстояниях их транспортирования, что не характерно для производственных условий Беларуси. Кроме этого, в нашей республике отсутствуют производства сухих бетонных смесей с использованием крупных заполнителей для бетона, существенно отличающихся от существующих предприятий, ориентированных на приготовление мелкозернистых сухих смесей в виде кладочных и штукатурных растворов и, тем более, клеевых составов и фуг различного назначения.

Кроме отмеченного, используемые в настоящих исследованиях комплексные химические добавки (табл. 2.3), содержащие суперпластификатор и УНТ в виде водного раствора-суспензии, в процессе приготовления проходят высокоинтенсивную гидродинамическую (с эффектом кавитационного воздействия) обработку. Ее цель заключается в диспергации и равномерном распределении УНТ в растворе добавки и его стабилизации для сохранения ее пластифицирующе-ускоряющих свойств при последующем использовании в бетоне. За счет такой обработки водного раствора этих добавок решается проблема равномерного распределения и высокой эффективности УНТ, что является одним из проблемных вопросов их использования в конструкционном бетоне [50–52].

С учетом изложенного рациональным являются два варианта приготовления, разрабатываемого фибробетона многоуровневого армирования: приобъектное его приготовление и двухстадийное, включающее на 1-й стадии централизованное (или районное) приготовление бетонной смеси с введением в ее состав комплексной добавки, содержащей УНТ, а на 2-й стадии – введение стальной фибры перед укладкой фибробетона в конструкцию.

Вариант приобъектного приготовления фибробетонной смеси перед укладкой его в конструкцию (опалубку) может быть рационален при значительных объемах бетонирования с его применением. Это очевидно следует из необходимости развертывания на строительной площадке участка для приготовления бетона, включая не только собственно бетоносмесительный узел (установку), но и все необходимое оснащение для обеспечения его работоспособности и хранения цемента, заполнителей, химической добавки, фибры и т. д. Такие затраты времени и средств на подготовку производства фибробетона могут быть оправданы только соответствующими объемами его использования, особенно с учетом климатической зоны территории Республики Беларусь и фактически требуемой сезонностью бетонных работ на открытой строительной площадке.

В этой связи наиболее рационален вариант централизованного приготовления водозатворенной бетонной смеси требуемого состава бетона-матрицы с последующей ее доставкой на объект строительства. Экспериментально установлено (табл. 3.3), что при введении в состав бетона комплексных добавок, содержащих УНТ (табл. 2.3) бетонные смеси сохраняют приданные формовочные

свойства в течение не менее 2 часов. Тем самым обеспечиваются условия для введения в состав бетонной смеси стальной фибры на объекте строительства.

4.1.1. ПРИГОТОВЛЕНИЕ БЕТОННОЙ СМЕСИ-МАТРИЦЫ С УГЛЕРОДНЫМ НАНОМАТЕРИАЛОМ

Рациональность централизованного приготовления бетонной смеси с введением на этой стадии в ее состав УНТ обусловлена развитой сетью бетоносмесительных (стационарных, инвентарных, мобильных) производств на территории Беларуси. Практически в любом городе нашей республики, включая районные центры, имеются такие производства, в том числе и в варианте базовых собственных бетоносмесительных узлов строительных организаций.

Принципиальная технологическая схема приготовления смеси бетона-матрицы расчетного состава приведена на рис. 4.1.



Рисунок 4.1 – Принципиальная технологическая схема приготовления бетонной смеси-матрицы с углеродным наноматериалом

Особенностью этой в целом традиционной схемы приготовления конструкционного тяжелого бетона является введение в его состав комплексной, содержащей углеродный наноматериал (УНТ) химической добавки.

Ее введение рекомендуется производить с частью (~25–30 %) воды затворения в конце процесса смешивания всех твердофазных компонентов с оставшейся частью (70–75 %) воды на замес бетоносмесителя. Допускается введение добавки со всем объемом воды затворения.

Дозирование водного раствора добавки может осуществляться специальным дозатором, либо дозатором воды. В последнем случае вслед за отдозированным количеством раствора добавки дозируется вода затворения. Образующийся в дозаторе раствор рабочей концентрации поступает в бетоносмеситель.

Равномерность распределения углеродных нанотрубок в объеме бетонной смеси обеспечивается за счет их диспергирования в водном растворе суперпластификатора на стадии приготовления и за счет ее смешивания при введении совместно с водой затворения.

Экспериментальная оценка равномерности распределения вещества УНТ, осуществленная путем контроля однородности свойств содержащего комплексную добавку затвердевшего бетона–матрицы разных составов (см. табл. 3.4 и данные о свойствах бетона в п.п. 3.4), подтвердила как эффективность, так и однородность свойств бетона.

4.1.2. ПРИГОТОВЛЕНИЕ ФИБРОБЕТОНА МНОГОУРОВНЕВОГО АРМИРОВАНИЯ

На второй стадии приготовления фибробетона многоуровневого армирования в его состав вводят стальную фибру.

В варианте приобъектного приготовления фибробетона на развертываемых БСУ вначале по схеме рис. 4.1 готовят бетонную смесь расчетного состава бетона-матрицы, а затем при непрерывном перемешивании дозируют и вводят фибру.

Учитывая сложность равномерного распределения элементов стальной фибры в объеме бетона ее подачу осуществляют с использованием устройств, описание основных применяемых видов которых приведено в п.п. 1.2 текста.

Здесь следует отметить, что приготовление сталефибробетонной смеси в бетоносмесителях принудительного действия (которыми оснащаются инвертарные и мобильные установки для приобъектно-

го приготовления бетонов и растворов) сопровождается ускоренным износом их.

С учетом этих обстоятельств, а также учитывая относительно малые объемы используемого фибробетона, в соотношении с общим объемом бетонных работ при строительстве разных объектов, более рационально его приготовление по двухстадийной технологии, т. е. с введением стальной фибры на строительной площадке в готовую, содержащую нанофибру (УНТ) бетонную смесь.

В этом варианте приготовления фибробетона многоуровневого армирования стальную фибру в требуемом количестве вводят малым, регулируемым расходом, распределяя ее равномерно по длине емкости барабана автобетоносмесителя при его непрерывном вращении. Время введения фибры должно соотноситься с ее расчетным расходом (содержанием) для объема, приготавливаемого фибробетона.

Во всех случаях рекомендуется 3–5-минутное перемешивание фибробетонной смеси по окончании введения стальной фибры.

Использование автобетоносмесителей для реализации второй ступени приготовления фибробетона многоуровневого армирования со стальной фиброй рационально в связи с тем, что смесительно-транспортный барабан этих машин действует по принципу гравитационного смесителя. С учетом разницы в плотности бетонной смеси и стали обеспечивается условие равномерного распределения последней, при соблюдении ранее приведенного правила введения ее в бетон малым, регулируемым расходом по длине емкости барабана, т. е. последовательно по разным объемам непрерывно перемешиваемого бетона.

Рекомендуется немедленное использование приготовленного фибробетона по месту укладки в конструкцию путем прямой подачи из автобетоносмесителя (например, при устройстве полов, дорожных или иных покрытий), либо подача системой «кран–бадья» при устройстве (возведении) иных строительных конструкций.

Исключается подача фибробетона со стальной фиброй нагнетательными методами; не рекомендуется подача ленточными транспортерами разных типов из-за возможности расслоения смеси.

4.2. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОЛОВ

Наиболее широкое применение сталефибробетона относится к устройству полов разного конструктивного решения (рис. 4.2) для зданий производственного назначения. В этой связи ориентиром для производственной апробации результатов разработки технологии монолитного фибробетона многоуровневого армирования явились промышленные полы тяжелого нагружения с повышенными требованиями к трещиностойкости, ударпрочности, деформативности и прочности.

В настоящем разделе отражены общие, в целом традиционные подходы к устройству полов промышленных зданий и задействованного при этом оборудования. Использование фибробетона многоуровневого армирования принципиально не изменяет организации и технологии ведения бетонных работ с его применением, в сравнении с обычным сталефибробетоном. В соответствии с ранее изложенным была произведена производственная апробация результатов исследований, основное отличие которой заключалось в отработке методики комплексной оценки качества фибробетона в устроенных конструкциях на базе лабораторных и натурных испытаний.

Покрытия могут быть как однослойными, так и многослойными (рис. 4.2). На выбор проектного решения влияют условия и заданные эксплуатационные характеристики. Так многослойные покрытия выполняются в случае необходимости базирования тяжелого оборудования и для снижения нагрузки на грунтовое основание за счет перераспределения ее между конструктивными слоями. С целью выравнивания поверхности нижнего слоя, уменьшения трения под подошвой верхнего слоя и независимого деформирования слоев при температурных воздействиях, между слоями устраивают разделительные прослойки из различных материалов (полиэтиленовой пленки, битумизированной бумаги и др).

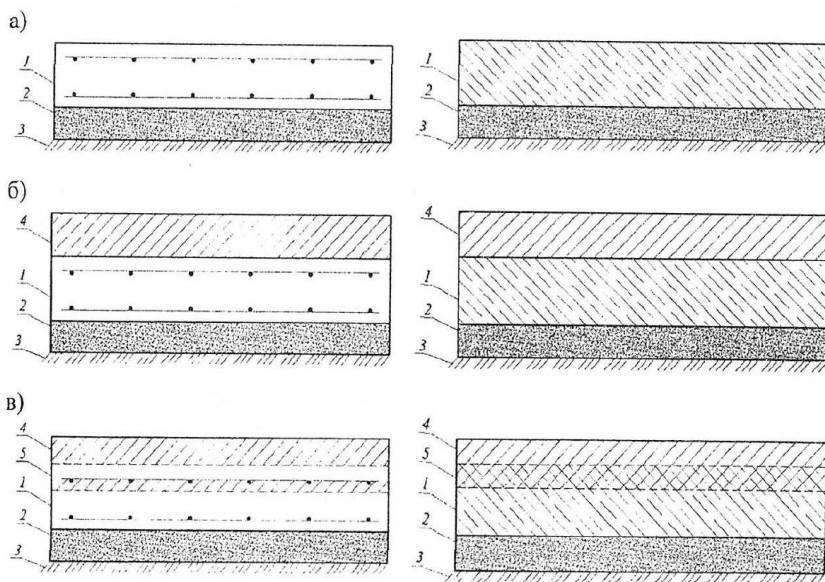


Рисунок 4.2 – Конструктивно-технологические схемы устройства полов промышленных зданий: *а* – традиционный однослойный пол с железобетонной или бетонной плитой; *б* – двухслойный пол с износостойким слоем из фибробетона (работающий по двухслойной схеме); *в* – двухслойный пол с износостойким слоем из фибробетона, сращенным с железобетонной или бетонной плитой (работающий по однослойной схеме); 1 – несущая конструкция пола (железобетонная или бетонная плита); 2 – подготовка из песчано-грунтовой смеси; 3 – естественно уплотненное грунтовое основание; 4 – слой износа из фибробетона; 5 – слой сращивания фибробетона с бетоном несущей железобетонной или бетонной смеси

Технология устройства двухслойных полов промышленных зданий со слоем износа из сталефибробетона заключается в устройстве полов за счет объединения в один технологический процесс («сращивание» слоев) работ по устройству монолитной железобетонной (или бетонной) плиты и слоя из сталефибробетона (рис. 4.3) [111; 112].

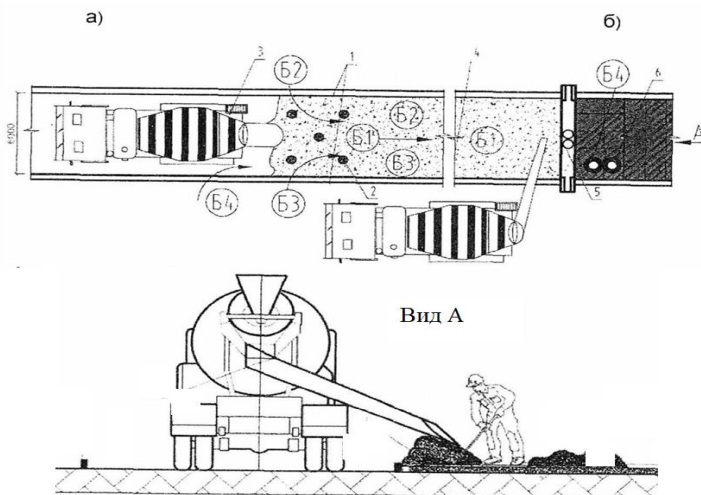


Рисунок 4.3 – Технологические решения устройства полов промышленных зданий со слоем износа из сталефибробетона, полученных по одностадийной технологии с двумя «сросщенными» слоями: а – устройство основного слоя бетонного пола;

- б – устройство фибробетонного слоя; 1 – направляющие; 2 – маяки;
 3 – автобетоносмеситель; 4 – формирование слоя износа; 5 – виброрейка;
 6 – шлифовальная машина; Б1, Б2, Б3, Б4 – бетонщики

4.2.1. ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКТОВ МЕХАНИЗАЦИИ РАБОТ С ЛАЗЕРНЫМИ СРЕДСТВАМИ КОНТРОЛЯ

Традиционная укладка бетона реализуется с использованием направляющих и виброреек или жидких маяков. Этот процесс требует больших трудозатрат, при этом поддерживать высокое качество выполненных работ затруднительно. В настоящее время эта проблема решена в связи с созданием новых машин, оснащенных лазерными устройствами контроля и наведения рабочего органа машины для укладки, разравнивания и уплотнения бетонной смеси.

Структура технологического процесса устройства бетонного пола с применением комплекта механизации такова (рис. 4.4):

- разметка участка работы;
- подготовка основания для бетонирования;
- подача и распределение бетонной смеси;

- разравнивание и уплотнение бетонной смеси с помощью лазерного бетоноукладчика;
- движение бетоноукладчика слева направо;
- снятие стыковочных наплывов;
- нанесение топпинга (при необходимости);
- затирка поверхности бетона затирочной машиной с дисками;
- затирка поверхности бетона затирочной машиной с лопастями.

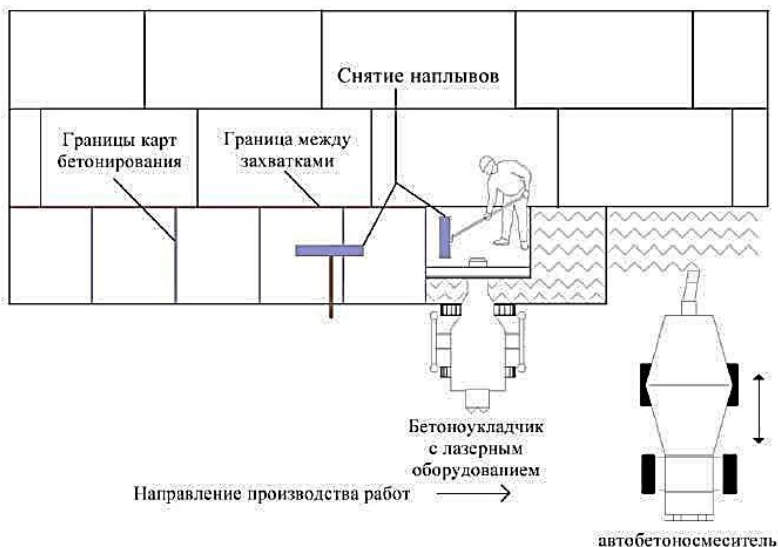


Рисунок 4.4 – Технологическая последовательность укладки бетонной смеси с применением лазерного бетоноукладчика

Для быстрой и качественной укладки промышленных фибробетонных полов применяется лазерный бетоноукладчик с системой автоматического управления. Бетоноукладчик позволяет с высокой скоростью автоматически укладывать бетонный пол точно по установленному уровню вне зависимости от неровностей основания, и одновременно уплотнять его. Основой нивелирующей системы бетоноукладчика является лазерная система автоконтроля, которая состоит из лазерного нивелира и двух приемников. Приемники напрямую связаны с гидравлической системой управления выравнивающей плитой. Такая система позволяет контролировать и корректировать уровень укладки бетона. Лазерный нивелир задает го-

горизонтальную плоскость, запланированную проектом. Приемники фиксируют лазерную плоскость и контролируют положение выравнивающей плиты. В случае отклонения бетонной поверхности от проектной плоскости приемники посылают команду гидравлической системе управления выравнивающей плитой бетоноукладчика и таким образом регулируют уровень залитого бетона. Точность укладки бетонной поверхности от 2 до 5 миллиметров на трехметровой рейке. Работа бетоноукладчика имеет существенные преимущества по сравнению с применением, например, виброреек.

Наиболее технологичным бетоноукладчиком в настоящее время считается модель S-22E Laser Screed (рис. 4.5). Шасси этого бетоноукладчика является самоходным полноприводным и оснащено дизельным двигателем в 65 л. с. Телескопическая стрела, установленная на верхней раме машины, выдвигается на 6,1 м, и может вращаться на 360°. Оперативность управления стрелой обеспечивается мощным гидрооборудованием машины. Разравнивание и уплотнение бетонной смеси осуществляется автоматически по программе, которую задает оператор.



Рисунок 4.5 – Бетоноукладчик модель S-22E Laser Screed

Рабочий блок машины оснащен шнеком для перемешивания бетонной смеси и вибропластиной, предназначенной для ее уплотне-

ния. Конструкция шнека исключает попадание удаляемого материала на обработанную бетонную поверхность. Кроме этого, рабочий блок размером в 3,6 м может легко поворачиваться относительно оси стрелы, тем самым имеется возможность разравнивать бетонную смесь в труднодоступных местах.

Бетоноукладчики этого типа позволяют применять бетонные смеси уменьшенной пластичности, поэтому снижается риск образования трещин и коробления краев вблизи технологических швов. Заявленная точность при формировании плоскости плиты пола высока, однако получить сверхплоский пол таким методом маловероятно. В любом случае требуется выполнение технологических операций по затирке поверхности пола. Большим преимуществом применения таких средств механизации является то, что нет необходимости установки направляющих для виброрейки. Расположение направляющих друг от друга на расстоянии 6 м вызывает прогиб балки вибратора, что снижает показатели ровности плит пола.

Схемы механизации таких работ предусматривают также применение менее громоздких бетоноукладчиков. Они обычно имеют пневмоколесную базу (2 колеса). Из-за отсутствия в таких бетоноукладчиках телескопической стрелы машина на захватке разравнивает смесь методом «на себя», двигаясь назад, предварительно опустив рабочий блок на необходимый уровень (рис. 4.6). Независимо от моделей и типов бетоноукладчика, рабочий блок у всех работает по одному принципу.

Еще одной разновидностью высокотехнологичного лазерного оборудования для бетонных работ является бетоноукладчик «СТИМ 3000» (рис. 4.7). Бетоноукладчики серии «СТИМ 3000» предназначены для укладки бетона на жилых объектах, объектах промышленности, улицах. Характеризуется относительной компактностью и в то же время многофункциональностью, в отличие от других моделей бетоноукладчиков.



Рисунок 4.6 – Двухколесный бетоноукладчик



Рисунок 4.7 – Бетоноукладчики серии «СТИМ 3000»

Высокое качество работ обуславливается использованием лазерной системы нивелирования (рис. 4.8). Входящий в комплект бетоноукладчика строитель плоскости самостоятельно формирует необходимый уровень, регулярно через заданные промежутки времени (обычно 10 секунд) проверяет угол наклона рабочей рейки. Ширина полосы выравниваемого бетона за один проход составляет 2,5 м.



Рисунок 4.8 – Рабочее оборудование бетоноукладчика серии «СТИМ 3000»

Машина, управляемая оператором, способна самостоятельно в автоматическом режиме изменять угол укладки вплоть до 5 градусов. Так называемая система лазерного построения плоскости способна делать ровные поверхности без помощи человека. То есть, для обслуживания нужен только один человек – машинист-оператор, на скорости в 5 км/ч управляющий бетоноукладчиком.

Затирка поверхности проводится в два этапа: сначала производится грубая («черновая») затирка поверхности бетона, затем – финишная («чистовая»). Во время затирки имеет место уплотнение бетонной поверхности. В случаях, когда к поверхности пола предъявляются повышенные требования по прочности и истираемости, при затирке применяют топпинги.

Топпинг – это сухая упрочняющая смесь на основе цемента с добавлением кварца или других компонентов, отличающихся повышенной твердостью и стойкостью к истиранию.

Топпинг, при его использовании, аккуратно рассыпают по поверхности стяжки после первой грубой затирки, стараясь достичь равномерной толщины слоя. Рассыпка топпинга может производиться с помощью специальной тележки для рассыпки топпинга (рис. 4.9). Такая тележка должна иметь:

- контейнер – для загрузки в него топпинга;
- шнеки – для перемешивания застоявшейся смеси в контейнере;
- заслонка-дозатор – для регулировки уровня рассыпки топпинга;
- широкие колеса – для того, чтобы тележка не продавливала свежий бетон, не оставляла за собой глубокой колеи.



Рисунок 4.9 – Рассыпка топпинга тележкой

Высоко механизированный способ нанесения топпинга обеспечивает использование специализированной техники, в частности, машины серии СТС-11М ТоппингSpreader, которая за 8 секунд наносит топпинг на 11 м² поверхности пола. Мобильность стрелы данной машины аналогична показателям бетоноукладчика «S-22Е Лазерная стяжка». В бункер загружается топпинг на 2–3 таких прохода (рис. 4.10).



Рисунок 4.10 – Машина CTC-11М Топпинг Spreader для нанесения топпинга

После нанесения топпинга производят затирку поверхности пола (рис. 4.11).



а



б

Рисунок 4.11 – Затирка поверхности пола бетоноотделочной машиной: *а* – затирка поверхности пола двухроторной бетоноотделочной машиной; *б* – затирка поверхности пола однороторной бетоноотделочной машиной

Нарезка швов и уход за бетоном осуществляется традиционными методами (рис. 4.12), после достижения прочности бетона на сжатие не менее 70 %.

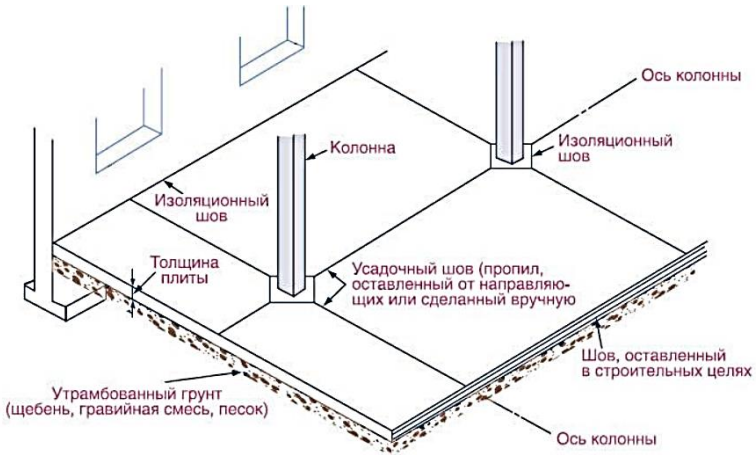


Рисунок 4.12 – Схема нарезки деформационных швов монолитного пола

После затирки поверхности пола бетоноотделочными машинами, для равномерного набора фибробетонном проектной прочности, поверхность пола рекомендуется закрывать геотекстильным полотном, обильно увлажняемым водой, и полиэтиленовой пленкой (рис. 4.13). Поверхность геотекстиля в течении двух недель периодически увлажняют водой. Геоткань с пленкой снимают после достижения фибробетоном 70 % проектной прочности.



Рисунок 4.13 – Уложенный геотекстиль на поверхность бетона

В летнее время года уход за укладываемым бетоном заключается в том, чтобы поддерживать открытые поверхности во влажном со-

стоянии путем распыления (разбрызгивания) воды по поверхности бетона, заливкой водой, укрытием пленками, матами, брезентом, мешковиной и т. д. с последующим увлажнением в процессе испарения.

В весеннее и осеннее время года тепловлажностный уход представляет собой укрытие поверхностей бетона гидроизоляционными материалами для предотвращения размыва бетона под дождями и ливнями с возможным его утеплением во время заморозков (при температуре ниже +5 °С).

В зимнее время года предусматриваются традиционно реализуемые приемы и мероприятия: подогрев бетонной смеси на заводе перед доставкой и укладкой; электропрогрев бетона и электрообогрев греющими проводами и инфракрасными излучателями, тепловыми пушками и т. д. на объекте; укрытие поверхностей бетона пленками, матами, брезентом, мешковиной и т. д.; устройство тепляков.

Следует отметить, что при устройстве бетонных полов с применением приведенных комплектов машин показатели его ровности и качества поверхности значительно выше, чем при использовании обычных технологических решений.

4.2.2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ ПО УСТРОЙСТВУ ПОЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФИБРОБЕТОНА

До начала работ по устройству фибробетонных полов с применением фибробетона необходимо:

- назначить ответственного исполнителя работ;
- ознакомить рабочих с проектом производства работ (ППР), рабочими чертежами и технологической картой;
- провести целевой инструктаж рабочих под роспись с записью в журнале регистрации инструктажей по охране труда, электро- и пожаробезопасности, охране окружающей среды;
- получить наряд-допуск на производство работ повышенной опасности;
- завершить все строительно-монтажные, отделочные и специальные работы;

- произвести заполнение и герметизацию швов между стеновыми блоками и панелями;
- закрыть полиэтиленовой пленкой на высоту 2,0 м от пола стены и колонны для защиты их от набрызгов бетона;
- установить лазерный нивелир для контроля выполнения работ;
- вывести чистовую отметку пола для установки пермобан;
- провести приемку основания (проверить правильность расположения уклонов и деформационных швов, сопряжений со стенами и другими конструкциями согласно проектной документации, прочность основания и в соответствии с положениями ТНПА с составлением акта установленной формы;
- доставить на рабочее место материалы, инструменты, приспособления механизмы.

Работы по устройству бетонных полов с применением фибробетона выполняет звено в составе:

- бетонщик 4 разряда (Б1, Б2) – 2 человек;
- бетонщик 3 разряда (Б3, Б4) – 2 человека;
- машинист бетоноподающего агрегата 5 разряда (МБС) – 1 человек;
- машинист топпингоукладывающей машины 6 разряда (МТ) – 1 человек.

В комплексе работ принимают участие:

- сварщик 4 разряда (С) – 1 человек;
- оператор устройства подачи стальной фибры 5 разряда (ОВ) – 1 человек;
- оператор бетоноподающего агрегата 4 разряда (ОП) – 1 человек;
- машинист автобетоносмесителя 6 разряда (МА) – 1 человек;
- подсобный рабочий 3 разряда (ПР1) – 1 человек.

Схема организации рабочих мест при устройстве бетонных полов с применением фибробетона приведена на рис. 4.14.

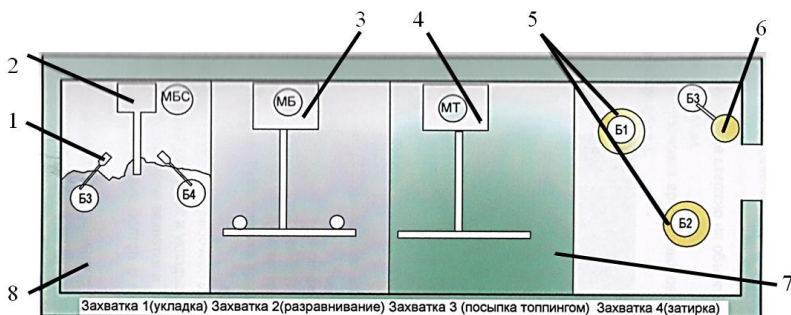


Рисунок 4.14 – Схема организации рабочих мест при устройстве бетонных полов с применением фибробетона: 1 – лопата; 2 – бетоноподающий агрегат; 3 – лазерный бетоноукладчик; 4 – топпингоукладчик; 5 – двухроторная бетоноотделочная машина; 6 – однороторная ручная бетоноотделочная машина; 7 – топпинг; 8 – фибробетон Б1–Б4 – рабочие места бетонщиков; МБС – рабочее место машиниста бетоноподающего агрегата МБ – рабочее место машиниста лазерного бетоноукладчика; МТ – рабочее место машиниста топпингоукладывающей машины

Технологическая последовательность выполнения работ по устройству полов с применением фибробетона включает:

- а) *подготовительные работы;*
- б) *основные работы:*
 - установка арматурных сеток и стержней вокруг колонн;
 - устройство рабочего шва (установка пермобана);
 - приготовление фибробетона на объекте;
 - укладка фибробетона лазерным бетоноукладчиком;
 - нанесение топпинга;
 - затирка поверхности пола бетоноотделочными машинами;
 - уход за бетоном;
- в) *вспомогательные работы;*
- г) *заключительные работы, включая уход за бетоном.*

Все работы выполняются согласно проектной документации на объект строительства и положениям ППР с использованием ранее приведенного комплекта современного технологического оборудования для обеспечения высокого качества бетонных работ и расчетных (требуемых) физико-механических свойств фибробетона и конструкции пола в целом.

Установка арматурных сеток и стержней вокруг колонн. До начала работ по устройству бетонных полов с применением фиб-

робетона в местах примыкания пола к колоннам и стенам укладывают нарезанный на полосы поролон для изоляции бетонного пола от этих конструкций.

Затем в местах примыкания пола к колоннам устанавливаются арматурные сетки и стержни в соответствии с требованиями проектной документации. Места пересечения стержней и сеток закрепляют при помощи вязальной проволоки. Арматурные стержни на объекте режут по размерам шлифмашинкой с отрезным кругом. Установка арматурных сеток и стержней вокруг колонны приведено на рис. 4.15.



Рисунок 4.15 – Установка арматурных сеток и стержней вокруг колонны:
1 – изоляция из полос поролона; 2 – арматурные стержни; 3 – арматурные сетки

Устройство рабочего шва (установка пермобана). Бетонщики собирают и укладывают вручную пермобаны встык по размерам захватки и закрепляют между собой с помощью металлических монтажных болтов с выставлением фиксированной проектной толщины пола.

При помощи шлифмашинки с отрезным кругом нарезают арматурные стержни длиной 50–60 см и забивают их при помощи электрического отбойного молотка в основание пола с шагом 30 см с двух сторон пермобана.

Устанавливают и закрепляют кронштейны к основанию пола и к пермобану и регулировочными винтами выводят верх пермобана на проектную отметку. Приваривают забитый в основание пола стержень к стержню пермобана.

После установки и закрепления пермобана металлические винты заменяют на пластмассовые винты.

Пермобаны выставляют по отметке верха покрытия пола и со-

здают, при необходимости, уклон в соответствии с проектной документацией. Внешний вид установленного пермобана приведен на рис. 4.16.

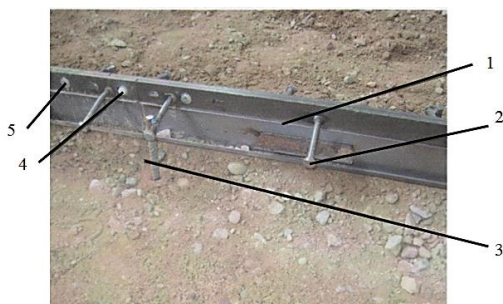


Рисунок 4.16 – Внешний вид установленного пермобана: 1 – установленный пермобан; 2 – анкер пермобана; 3 – арматурный стержень, забитый в основание пола; 4 – пластмассовый винт; 5 – монтажный металлический винт

Укладка фибробетона лазерным бетоноукладчиком. Приготовленный фибробетон подают к месту укладки автоматическим бетоноподающим агрегатом и укладывают его между направляющими (пермобанами). Бетонщики распределяют фибробетон лопатами.

Уложенный фибробетон разравнивается и уплотняется по проектным отметкам лазерным бетоноукладчиком.

Нанесение топпинга. После укладки фибробетона сразу по мокрому бетону наносят топпинг (сухую упрочняющую смесь) при помощи специальной топпингоукладывающей машины, которая позволяет сплошным равномерным слоем распределить топпинг по поверхности уложенной бетонной смеси.

Затирка поверхности пола бетонноотделочной машиной. После завершения укладки и нанесения топпинга необходимо сделать технологический перерыв: бетон должен набрать предварительную прочность. В зависимости от влажности и температуры окружающей среды этот перерыв составляет не менее 2 часов.

После того как поверхность свежеложенного пола потемнеет, выполняют затирку поверхности двухроторной и однороторной бетоноотделочной машиной. Затирку начинают около стен, колонн, дверных проемов.

Затирку поверхности бетонного пола в местах примыкания к конструкциям, колоннам, дверным проемам и стенам и вдоль

направляющих выполняют на малых оборотах машины. Если в процессе затирки имеет место перерыв в работе, бетоноотделочную машину нельзя оставлять на поверхности, так как может произойти локальная осадка бетона.

Затирку выполняют в несколько этапов. Интервал между этапами определяют по состоянию поверхности – она должна стать матовой, а при прикосновении не пачкать руки. Признаком окончания затирки служит образование ровной гладкой поверхности.

4.3. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

Сформулированы основные положения технологии и организации ведения бетонных работ с применением фибробетона многоуровневого армирования в варианте монолитного строительства.

Определено, что наиболее рационален вариант приготовления такого бетона по двухстадийной технологии, с введением в его состав углеродной нанофибры в виде УНТ, содержащихся в составе комплексной химической добавки в бетон, либо приобъектно, либо централизованно на 1-й стадии, при введении на 2-ой стадии стальной фибры на строительной площадке, непосредственно перед укладкой фибробетона в конструкцию.

Разработаны основные положения организации технологического процесса ведения бетонных работ с применением фибробетона многоуровневого армирования на примере устройства полов зданий промышленного или иного назначения с подбором комплекта соответствующего современного оборудования, обеспечивающего качественное ведение работ, а на этой основе – качество конструкции пола, либо устраиваемых покрытий.

Результаты отраженных в главе исследований послужили основанием для их производственной апробации, а сочетание ее данных о фибробетоне многоуровневого армирования и лабораторных испытаний изготовленных и изъятых из конструкции пола образцов позволили предложить и обосновать методику многопараметрического контроля его качества.

ГЛАВА 5. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ФИБРОБЕТОНА МНОГОУРОВНЕВОГО АРМИРОВАНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

5.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ФИБРОБЕТОНА

На основании результатов исследований предлагается авторская методика многофакторной (многопараметрической) оценки качества фибробетона строительных конструкций, включающая совокупность лабораторных испытаний, в сочетании с оценкой свойств фибробетона в конструкции.

Для ее реализации разработан алгоритм, который отражает последовательность выполнения работ и позволяет оценить качество фибробетонной конструкции в построечных условиях (устраиваемой или находящейся в процессе эксплуатации) и включает четыре взаимно дополняющих друг друга этапа (рис. 5.1)

На первом этапе производится сплошной контроль комбинированным (комплексным) методом, включающий ультразвуковой импульсный и метод упругого отскока [113–122]. В результате измерений ультразвуковым методом путем поверхностного объемного прозвучивания в совокупности с методом упругого отскока получают значение прочности бетонной матрицы на независимой физической основе. Участки (конструкции) с отличающимися (низкими) показателями испытываются дополнительно на последующих этапах в обязательном порядке другими соответствующими методами.

На втором этапе производится ультразвуковая томография конструкции. Данный метод позволяет определить толщину исследуемой конструкции, обнаружить пустоты и «ежи» из фибровых волокон и дает представление о равномерности распределения стальной фибры. Контроль следует выполнять в вариантах «точечного» и «сплошного». Точечный контроль выполняется на начальном этапе в обязательном порядке по площади конструкции.

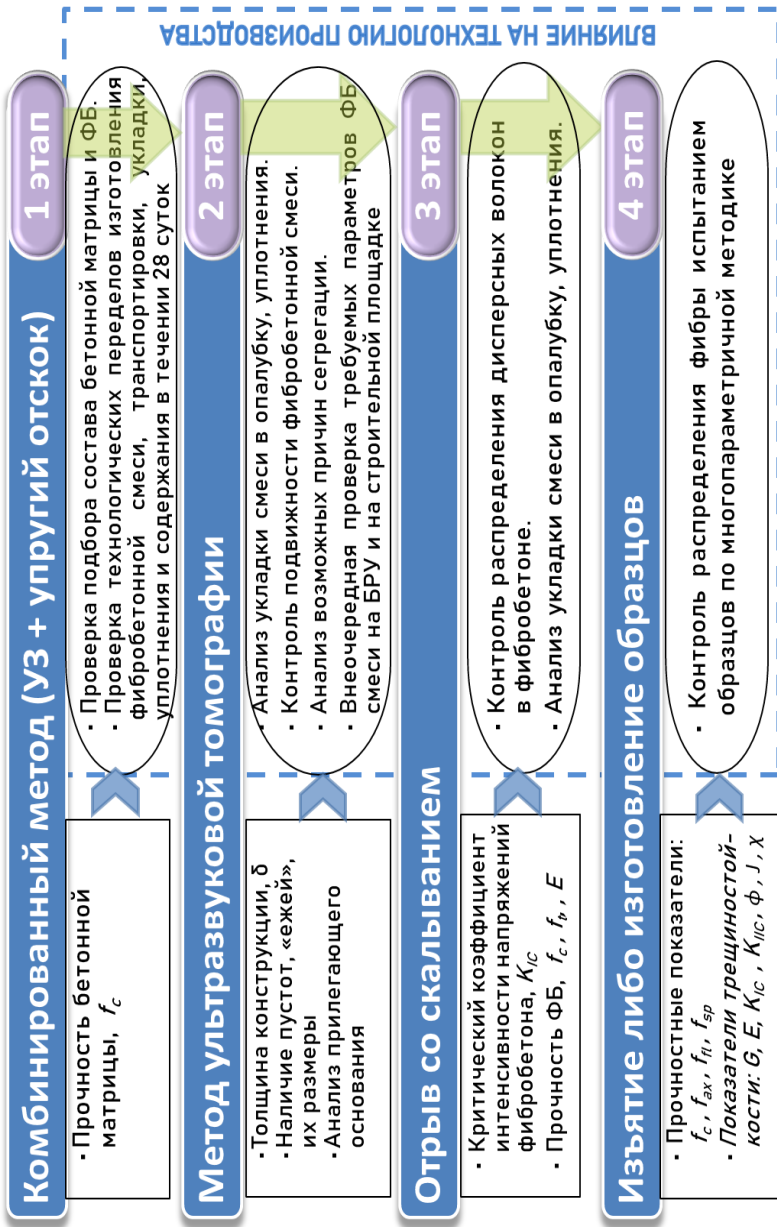


Рисунок 5.1 – Алгоритм контроля качества фибробетона в конструкции

Сплошной контроль следует выполнять для конструкций или их участков с пониженными показателями прочности, наличием дефектности установленными по результатам точечного контроля.

На третьем этапе используется метод прямого отрыва со скалыванием для определения критического коэффициента интенсивности напряжений и прочности фибробетона в конструкции. Данный метод применяется в соответствии с положениями ГОСТ 22690 [123], а также в обязательном порядке осуществляется на участках конструкции, где на предыдущих этапах испытаний были выявлены дефекты – снижение прочности и др.

Четвертый этап испытаний проводится в варианте сравнения свойств изготовленных в лабораторных условиях образцов фибробетона, из которого устроена оцениваемая конструкция, со свойствами образцов-аналогов, отобранных из конструкции, по схеме испытаний табл. 2.6 и 2.7. При этом (учитывая сложность отбора образцов из конструкции в соответствии с требуемыми геометрическими размерами) отбор образцов из конструкции производят в случае, если в результате выполнения испытаний по трем начальным этапам невозможно сделать вывод о соответствии качественных характеристик (параметров) фибробетона требуемым для данного конкретного случая (в частности, по уровню требуемой прочности на сжатие).

5.2. ПОЭТАПНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ

Этап 1. Комбинированный (комплексный) метод испытаний. Целью испытаний является определение прочности с использованием комплексного метода оценки: метода упругого отскока [123; 124] с поправкой, являющейся функцией разницы оценок прочности фибробетона, полученной ультразвуковым импульсным методом по [125] и методом упругого отскока [113; 115]. Ультразвуковой импульсный метод используется в качестве калибровочного. С его помощью производится коррекция данных, полученных методом ударного (динамического) индентирования (упругого отскока).

На рис. 5.2 приведена схема выполнения измерений методом индентирования и УЗМ.

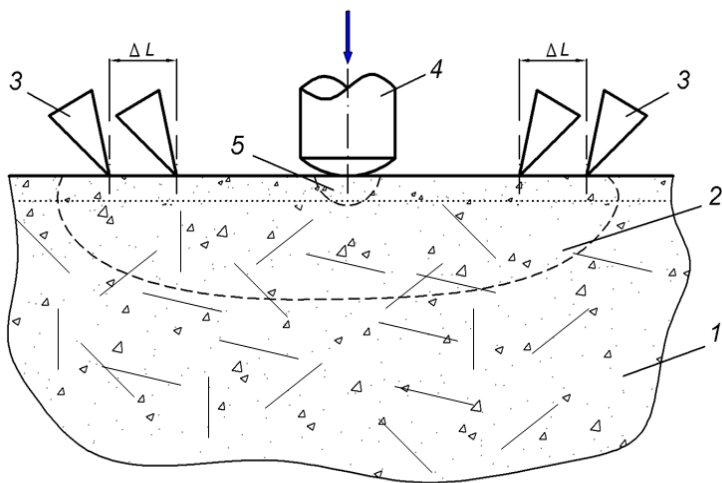


Рисунок 5.2 – Схема измерений комбинированным методом «индентирование – ультразвуковой импульсный метод» [118]: 1 – контролируемое изделие; 2 – область бетона, участвующая в передаче ультразвукового импульса от излучателя к приемнику; 3 – излучающий и приемный ультразвуковые преобразователи; 4 – индентор; 5 – область индентирования бетона

Область 5 (рис. 5.2) определяется диаметром отпечатка индентора 4 и радиусом зоны пластической деформации фибробетона, который приблизительно равен двойному диаметру отпечатка – 6–16 мм. Область 2 – зона влияния на показатели ультразвукового метода [118]. Границы зоны зависят от расстояния между преобразователями 3, длины волны ультразвука и ее типа, и метода регистрации времени распространения ультразвукового импульса.

В соответствии с алгоритмом (рис. 5.3) основу мультипликативной формы объединения составляет весовой (экстраполирующий) коэффициент для метода упругого отскока [116; 117].

Применительно к схеме на рис. 5.4 реализация алгоритма следующая [119; 120]. В одной и той же зоне контроля производятся испытания методом индентирования и ультразвуковым методом; значения косвенных параметров этих методов – Π и V_1 [121; 122].

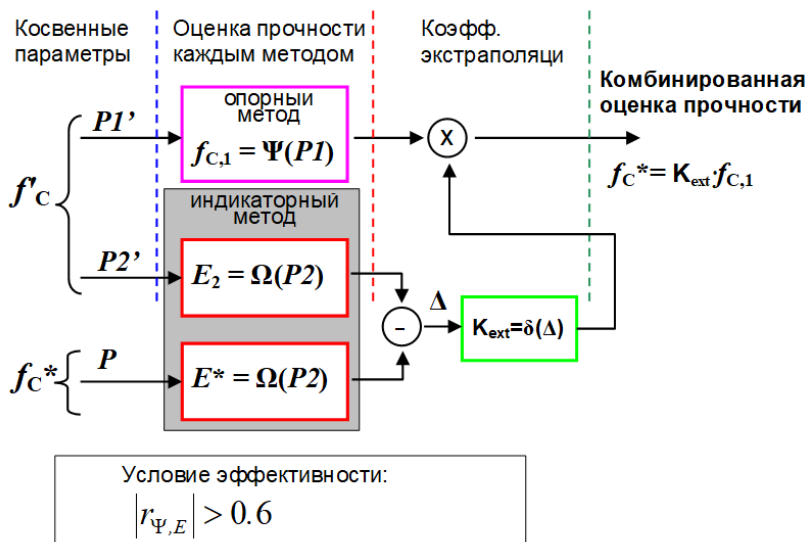


Рисунок 5.3 – Алгоритм экстраполирующего (мультипликативного) комбинированного метода испытаний [118]

Прочность фибробетона f_c участка контроля определяют в зависимости от разницы динамических модулей упругости поверхностного слоя фибробетона $E_{д}^*$ и внутренней области фибробетона участка контроля $E_{д,в}$ из системы уравнений

$$f_c = \frac{1}{1+\theta} (\theta \cdot e^{0.091(E_V-E)} f_{c,I} + f_{c,V}); \quad (5.1)$$

$$\theta = 0,0026 \cdot f_c^2 - 0,115 \cdot f_c + 2,79, \quad (5.2)$$

где f_c – прочность фибробетона контролируемого участка конструкции, МПа; $f_{c,I}$ и $f_{c,V}$ – соответственно оценки прочности фибробетона методом индентирования и ультразвуковым импульсным методом, МПа;

θ – безразмерный коэффициент.

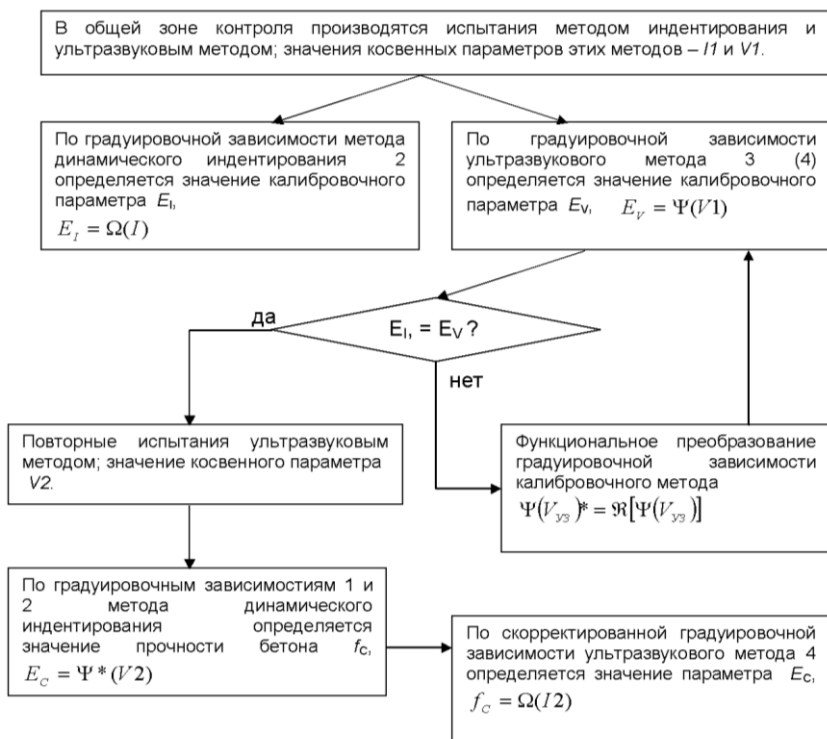


Рисунок 5.4 – Алгоритм объединения показателей неразрушающих методов контроля [118]

Этап 2. Контроль фибробетонной конструкции методом ультразвуковой томографии. Для реализации метода ультразвуковой томографии используется томограф ультразвуковой (УЗ) низкочастотный (НЧ) А1040 MIRA. Томограф А1040 MIRA выполнен в виде моноблока со съёмными ручками (рис. 5.5), который включает в себя встроенный компьютер и антенное устройство. Нижняя часть томографа представляет собой матричную антенную решетку из 48 (12 блоков по 4 элемента в каждом) низкочастотных широкополосных преобразователей поперечных волн с сухим точечным контактом и керамическими износостойкими наконечниками.

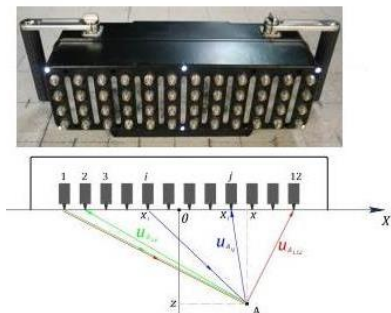


Рисунок 5.5 – Многоэлементная антенная решетка с привязкой к координатной оси

Программа обеспечивает считывание данных из прибора и представления их как в виде томограмм, так и в трехмерном объемном виде, что облегчает понимание конфигурации внутренней структуры бетонного объекта контроля.

В приборе используется метод синтезированной фокусируемой апертуры с комбинационным зондированием (САФТК), при котором происходит фокусировка ультразвука в каждую точку полупространства. Массив данных формируется путем сбора информации со всех измерительных пар антенного устройства томографа. Принимаемые антенной решеткой сигналы обрабатываются на встроенном компьютере непосредственно в процессе работы.

Затем полученные данные представляются на экране прибора и сохраняются во встроенной флешпамяти. В результате получается наглядный образ сечения объекта контроля, где разными цветами (в зависимости от выбранной цветовой схемы) закодирована отражающая способность каждой точки визуализируемого объема. Особенно продуктивно, что сканирование происходит в трех взаимно перпендикулярных сечениях, что дает трехмерное изображение фибробетона.

Этап 3. Определение прочности и критического коэффициента интенсивности напряжений фибробетона отрывом со скалыванием. Определяется критический коэффициент интенсивности напряжений фибробетона эксплуатируемой или возведенной конструкции при нормальном отрыве. Коэффициент интенсивности напряжений определенный непосредственно для фибробетона конструкции поз-

воляет прогнозировать его трещиностойкость, как основу долговечности материала [160]. В массиве сталефибробетона выбуривается шпур длиной h и радиусом r_0 , в него устанавливается анкер, который вырывается нагрузкой, направленной нормально к поверхности массива фибробетона. Измеряется длина образующей l усеченного конуса (рис. 5.6) и радиус r_{max} его большего основания. По полученным данным определяют критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} фибробетона из выражения:

$$K_{IC} = \frac{3P[\cos^2(90-\alpha) - \sin^2(90-\alpha)]}{2\pi h^2(1 + \frac{r_0}{r_0 + h \cdot \operatorname{tg} \alpha})^5} \cdot \sqrt{2\pi l} \left[\frac{0,8}{(\frac{R}{l})^3 - 1} + 0,7 \right], \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}, \quad (5.3)$$

где P – усилие вырыва, МН;

α – угол между образующей конуса разрушения и стороной шпура;

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{R}{h} \right). \quad (5.4)$$

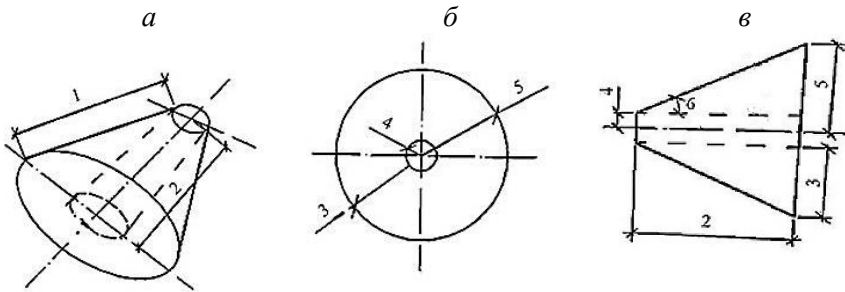


Рисунок 5.6 – Усеченный конус разрушения: *а* – схема усеченного конуса вырыва в аксонометрии; *б* – схема усеченного конуса вырыва – вид спереди; *в* – схема усеченного конуса вырыва – вид сбоку; 1 – длина образующей конуса разрушения l ; 2 – длина шпура h ; 3 – разница между максимальным радиусом конуса разрушения и радиусом шпура R ; 4 – радиус шпура r_0 ; 5 – максимальный радиус конуса разрушения r_{max} ; 6 – угол между образующей конуса разрушения и стороной шпура α

В процессе испытаний способом вырыва микрообъема фибробетона используют характерный только для дисперсно-армированных

материалов эффект, заключающийся в том, что после образования магистральной трещины, определяющей вырываемый микрообъем, последний не отделяется от тела конструкции, а усилие от анкера в сечениях с трещиной воспринимается фибровой арматурой, т. е. появляется возможность при дальнейшем нагружении оценить работу фибробетона после образования трещин. При испытании после образования трещин происходит нарушение сцепления фибры с бетоном, сопровождающееся перемещением вырываемого микрообъема относительно тела конструкции. Прочность фибробетона, являющуюся параметром качества, определяют по величине усилия, а расчет критического коэффициента интенсивности напряжений производится с учетом геометрических параметров шнура и усеченного конуса разрушения по ранее приведенной схеме.

Этап 4. Оценка на соответствие показателей фибробетона по прочности и трещиностойкости в варианте сравнения результатов испытаний по этапам 1–3 с требуемыми для данного конкретного случая и подтвержденными путем предварительных лабораторных испытаний образцов фибробетона состава-аналога, использованного при устройстве проверяемой конструкции.

При соответствии установленных показателей требуемым фиксируется обеспечение качества фибробетона.

При меньших, чем требуемые, показателях прочности и трещиностойкости фибробетона проверяемой конструкции, в сравнении с полученными при испытаниях лабораторных образцов, следует сделать выборку образцов из тела конструкции (в соответствии с положениями действующей нормативно-технической документацией) для прямых испытаний по схеме табл. 2.6–2.7. Результаты этих испытаний являются основанием для фиксации степени обеспечения качества фибробетона и принятия (при необходимости) мер для обеспечения требуемого уровня его качества.

5.3. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ФИБРОБЕТОНА В КОНСТРУКЦИИ

5.3.1. ИСПЫТАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Для апробации многопараметрической методики в качестве объекта исследования выступал промышленный пол цеха многопрофильного производства мебели в г. Сморгонь. Исследования по устройству фибробетонных полов на основе Стандарта предприятия БНТУ выполнялись в рамках Договора № 2933/21 от 08.07.2021 НИПИ БНТУ.

Конструкция пола производственного цеха размерами 18x72 м в осях состояла из песчаной подготовки, выравнивающего бетонного слоя, арматурный каркас (только в наиболее нагруженных участках), фибробетонный слой из фибробетона многоуровневого армирования (рис. 5.7).



Рисунок 5.7 – Внешний вид: *а* – производственного цеха после выполнения работ; *б* – фрагмента пола

Бетонную смесь с введением в состав УНТ готовили централизованно, транспортировали (2 км), а перед подачей к месту укладки вводили в работающий автобетоносмеситель стальную фибру ФЛВ-0.9-50 в количестве 20 кг/м^3 (0,25 % по объему).

Работы по устройству пола выполнялись захватками. Укладку смеси производили непосредственно прямой подачей из автобетоносмесителя с последующим выравниванием и уплотнением при помощи виброрейки (рис. 5.8). Поверхность пола после затвердева-

ния шлифовалась. Потом производилась нарезка деформационных швов с их последующей герметизацией.

Для проведения испытаний нами были отобраны пробы фибробетонной смеси проектного состава из которой изготовили по 3 серии образцов балок-призм $100 \times 100 \times 400$ мм в количестве 3 шт. и образцов-кубов $100 \times 100 \times 100$ мм в количестве 3 шт. в каждой. Одновременно были изготовлены еще 3 серии образцов: без фибры, с увеличенным количеством фибры (по ТУ ВУ 190345927.006-2018) – 40 кг и 60 кг на 1 м^3 бетонной смеси.



Рисунок 5.8 – Укладка смеси фибробетона многоуровневого армирования

Хранились образцы до достижения бетоном проектного возраста (28 сут.) в том же цеху, герметично упакованы. Таким образом, условия твердения фибробетона в образцах максимально приближены к условиям твердения бетона в исследуемой конструкции.

Испытания фибробетонных образцов провели в научно-исследовательской лаборатории НИПИ БНТУ по методике многопараметричной оценки трещиностойкости (вязкости разрушения) и прочностных параметров фибробетона в лабораторных условиях (табл. 2.6–2.7). Результаты испытаний представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты испытаний фибробетона многоуровневого армирования с разным содержанием стальной фибры

Параметр		Б-0 0 кг	ФБ-20 20 кг	ФБ-40 40 кг	ФБ-60 60 кг
Прочность на сжатие, МПа	f_c	35,6	35,0	37,4	35,1
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	f_{fl}	4,32	5,06	5,13	6,45
Прочность на растяжение при раскалывании, МПа	f_{sp}	2,57	2,59	2,63	2,81
Прогиб образца при максимальной нагрузке, мм	V_f	0,03	0,05	0,07	0,65
Энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, Дж	$W_m + W_e$	0,21	0,42	0,51	8,47
Энергозатраты на упругое деформирование до начала движения магистральной трещины статического разрушения, Дж	W_e	0,08	0,11	0,09	0,19
Энергозатраты на процессы развития и слияния микротрещин до формирования магистральной трещины статического разрушения, Дж	W_m	0,14	0,31	0,42	8,28
Энергозатраты на локальное статическое деформирование в зоне магистральной трещины, Дж	W_L	0,00	14,51	16,29	29,12
Расчетные энергозатраты на упругое деформирование сплошного образца, Дж	W_{ui}^c	0,06	0,08	0,07	0,15
Удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, МДж/м ²	G_i	27,20	53,05	65,55	1056,7
Удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, МДж/м ²	G_F	9,62	1840,1	2094,91	3671,2
Статический джей-интеграл, МДж/м ²	J_i	19,67	42,41	56,60	1038,4
Статический критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м ^{0,5}	K_i	0,90	1,24	1,40	5,45
Критерий хрупкости, м	X_{FC}^c	0,02	2,2	2,8	3,2
Критический коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве, МПа·м ^{0,5}	K_{IC}	0,53	0,56	0,69	0,7
Критический коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге, МПа·м ^{0,5}	K_{IIC}	3,56	3,66	3,74	3,73
Водопоглощение по массе, %	W_m	2,8	4,1	3,5	3,4

Из результатов испытаний образцов на осевое сжатие очевидно, что введение фибры в оцениваемом количестве не оказало существенного влияния на этот показатель и что в целом соответствует общепризнанным тенденциям ее влияния на физико-механические характеристики конструкционного бетона.

При этом существенно возрастают как прочностные характеристики бетона, относящиеся к разным видам его сопротивления растягивающим усилиям, так и параметрические характеристики, отражающие поведение структуры бетона в процессе его деформирования и трещинообразования под действием механических нагрузок.

Так прочность на растяжение при изгибе образцов-призм с надрезом состава «ФБ-20» выше на 18 % чем состава без фибры и возросла на 48 % для состава «ФБ-60», в сравнении с контрольным составом без фибры «Б-0», и на 27 % больше состава «ФБ-20».

Прочность на осевое растяжение при раскалывании образцов также отражает тенденцию к росту с введением фибры, но в меньшей степени: прирост достигает $\approx 10\%$, относительно образцов бетона без фибры.

Резко возрастает показатель прогиба образцов бетона с фиброй. Так состав «ФБ-20» обеспечил увеличение прогиба (V_f) на 66 % относительно состава без фибры «Б-0». Но наибольший прогиб наблюдался в составе с максимальным количеством фибры «ФБ-60» – 0,65 мм, что в 21 раз превышает прогиб балки без фибры и в 13 раз исследуемый состав. Эти данные свидетельствуют о способности фибробетона многоуровневого армирования к значительному деформированию в процессе загрузки рабочими (или испытательными) нагрузками до начала его разрушения.

По полученным графикам зависимости «прогиба от нагружения» (рис. 5.9–5.10) можно наблюдать влияние фибры на деформирование образца. График контролируемого состава «ФБ-20» почти совпадает с графиком «ФБ-40». График базового состава «Б-0» характеризует хрупкое разрушение испытываемого образца. Образец «ФБ-60» располагается заметно выше остальных графиков и имеет пологую нисходящую ветвь.

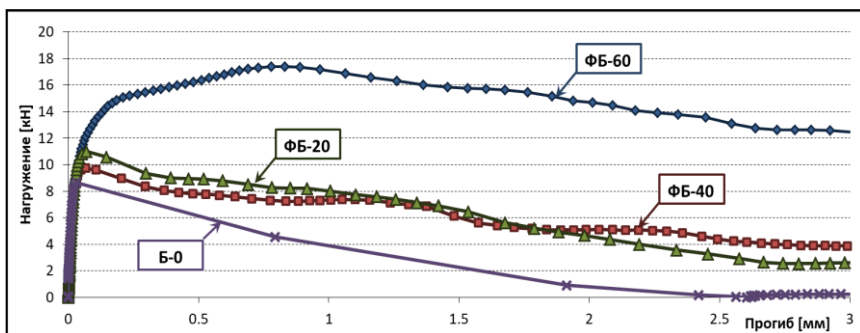


Рисунок 5.9 – Полная диаграмма деформирования образцов-призм при изгибе с различным количеством фибрового армирования

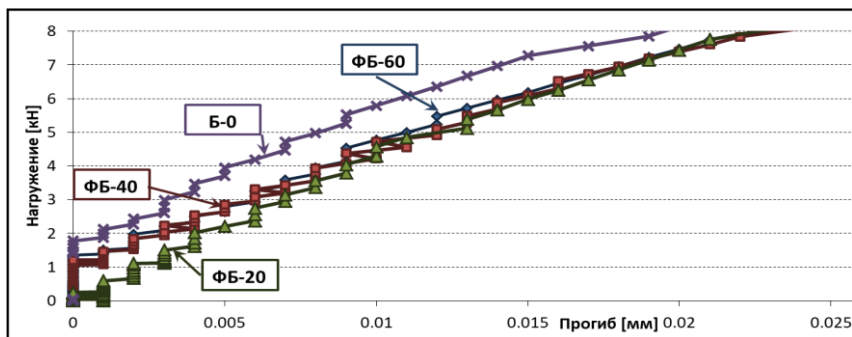


Рисунок 5.10 – Фрагмент диаграммы деформирования образцов-призм при изгибе с различным количеством фибрового армирования

Анализ данных табл. 5.1, относящихся к энергетическим параметрам оценки качества испытываемого на трещиностойкость фибробетона многоуровневого армирования, показывает безусловный (многократный) рост этих показателей. Учитывая, что тенденция их устойчивого роста при наличии фибрового многоуровневого армирования исходного бетона согласуется с тенденцией роста его прочностных свойств на все виды растяжения, данные показатели обеспечивают возможность достоверной оценки трещиностойкости фибробетона в совокупности с другими механическими и физическими методами контроля, составляющими предлагаемую многопараметрическую методику оценки его качества.

5.3.2. ИСПЫТАНИЯ ФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Для оценки параметров качества фибробетона в конструкции промышленного пола применяли комплексный метод и метод ультразвуковой томографии.

Для испытаний методом упругого отскока [123; 124] использовался прибор «SilverSchmidt Proceq» (рис. 5.11, а). Испытания ультразвуковым импульсным методом проводили согласно [125] прибором «Пульсар 2.2» (рис. 5.11, б). Испытания осуществляли на кубах 100x100x100 мм в лабораторных условиях. В производственных условиях данные получены непосредственно при оценке фибробетона конструкции пола. Вся площадь пола была разбита на 48 контролируемых участков (секций) (рис. 5.11, в). По полученным данным комплексных испытаний были оценены значения прочности фибробетона на сжатие.



а



б

Д	4	5	12	13	20	21	28	29	36	37	44	45	
Г	3	6	11	14	19	22	27	30	35	38	43	46	
В	2	7	10	15	18	23	26	31	34	39	42	47	
Б	1	8	9	16	17	24	25	32	33	40	41	48	
А	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

в

Рисунок 5.11 – Проведение испытаний: а – испытания методом упругого отскока; б – ультразвуком; в – схема пола цеха, разбитая на секции для контроля

Обобщение полученных результатов неразрушающего контроля прочности фибробетона в конструкции промышленного пола (рис. 5.12–5.13) показало, что его прочность на сжатие составляет ~34,5 МПа, что больше гарантированной прочности (32 МПа), но меньше требуемой (38,4 МПа) для класса бетона С25/30. При этом установлено практическое равенство величины прочности фибробетона на сжатие при испытаниях механическими методами контроля (табл. 5.1) и полученных по результатам комплексных испытаний неразрушающими методами. Это свидетельствует как о достоверности результатов испытаний, так и о рациональности предлагаемой авторской методики оценки качества фибробетона многоуровневого армирования, включая построчные условия контроля его качества.

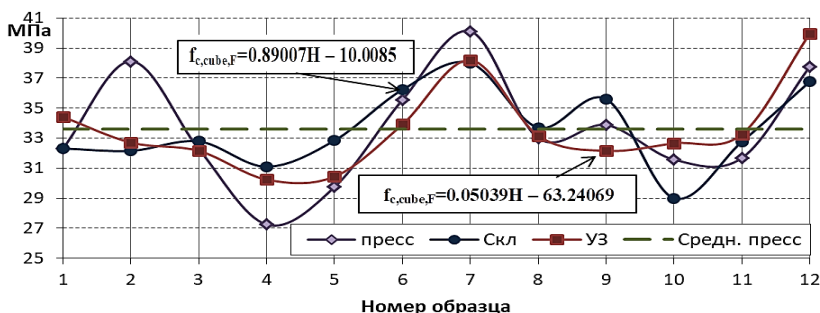


Рисунок 5.12 – Результаты испытаний образцов методами упругого отскока (Скл) и УЗ

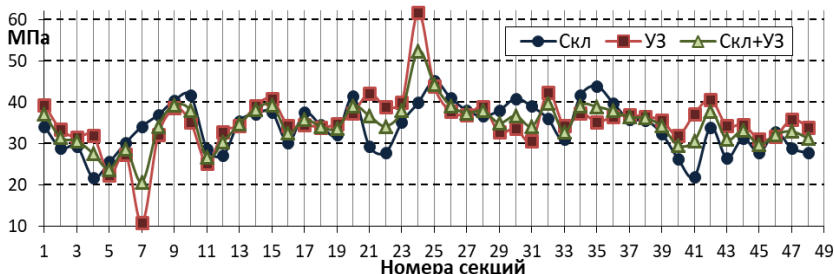


Рисунок 5.13 – Значения прочности в секциях фибробетонного пола, полученные методом упругого отскока (склерометр), ультразвуковым методом (УЗ) и комплексным методом (Скл + УЗ)

Ультразвуковую томографию осуществляли при помощи ультразвукового низкочастотного томографа «A1040 MIRA» (рис. 5.14). На первом этапе точно просканированы участки конструкции с получением В-сканов (рис. 5.15). На втором этапе выполнено полное сканирование участка пола длиной 1,6 м шириной 1 м в режиме КАРТА (рис. 5.16–5.19).



Рисунок 5.14 – Испытание ультразвуковым томографом A1040 MIRA

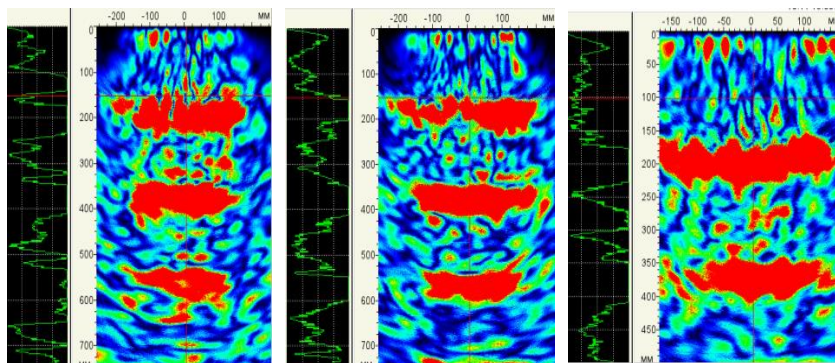


Рисунок 5.15 – Точечные В-сканы

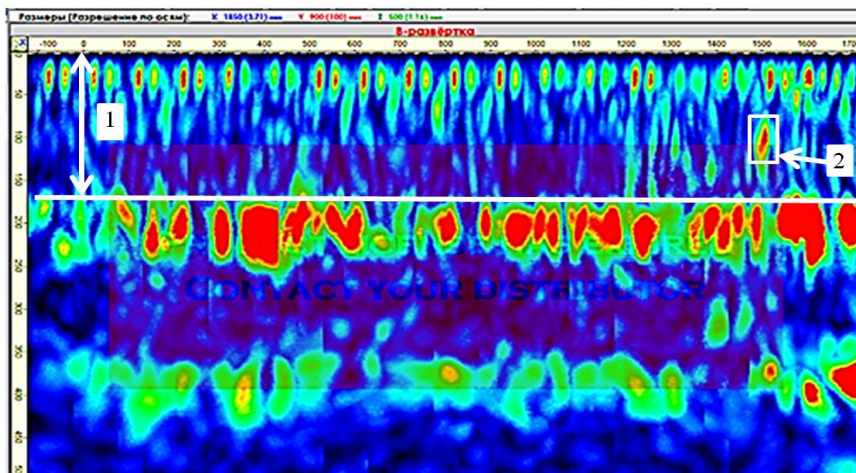


Рисунок 5.16 – В-развертка (оси XZ) полученной карты участка пола

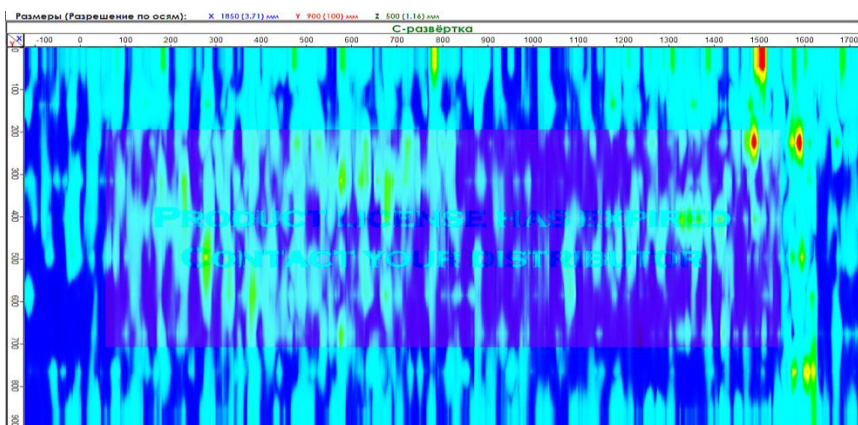


Рисунок 5.17 – С-развертка (оси XY) полученной карты участка пола

Согласно полученным результатам исследований методом ультразвуковой томографии толщина фибробетонного слоя конструкции пола составляет 160–162 мм (на рис. 5.18 указано под номером 1). В целом конструкция представляет сплошной монолитный объем, включающий и дефекты. В нижней трети фибробетонного слоя при сплошном сканировании выявлены отражения сигнала (на рис. 5.18 обозначено номером 2), которые могут быть вызваны

наличием в этих местах скоплений фибровых волокон, воздух, заземленный в объеме которых, отражает ультразвуковой сигнал.

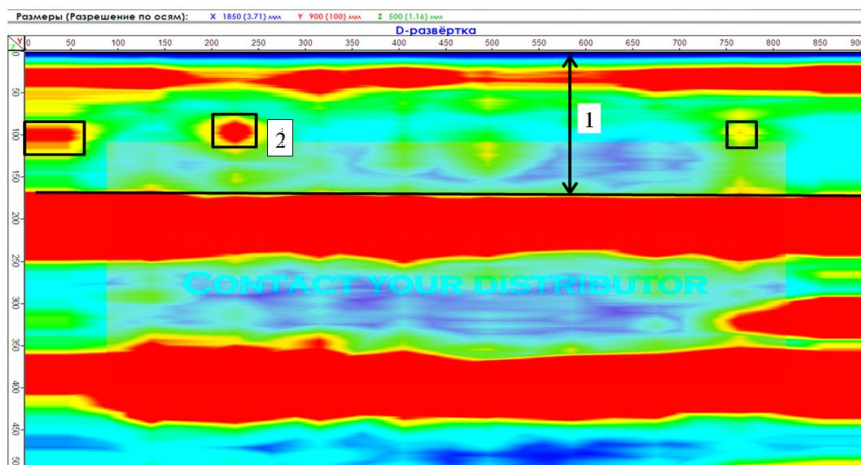


Рисунок 5.18 – В-развертка (оси YZ) полученной карты участка пола

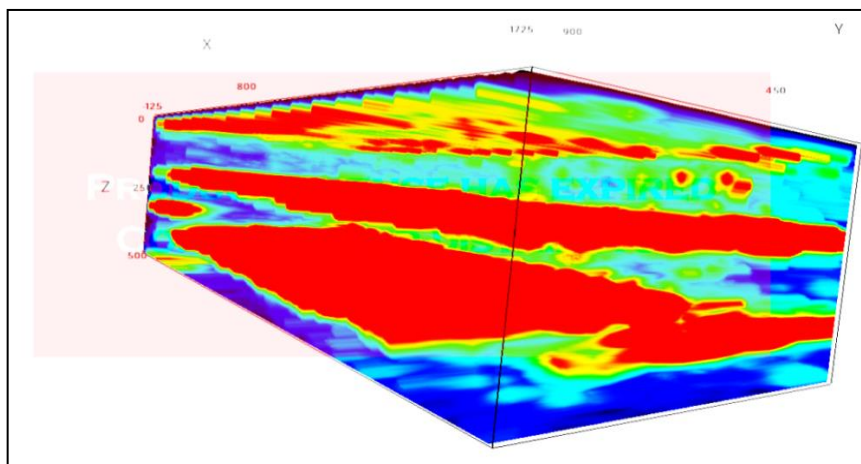


Рисунок 5.19 – 3D-модель полученной карты участка пола

Полученные комплексными исследованиями результаты позволяют установить качество оцениваемой фибробетонной конструкции в производственных условиях. Использование при этом неразрушающих методов, входящих в комплексную методику оценки

качества фибробетона, позволяет проводить неограниченное количество испытаний, а на основе их данных отражать объективное состояние исследуемой конструкции.

По результатам выполненных исследований заказчику рекомендовано в дальнейшем в конструкциях пола без использования стержневого армирования применять фибробетон с многоуровневого армирования с содержанием стальной фибры от 0,7 % до 1,2 % по объему, что соответственно равно от 50 кг до 90 кг стальной фибры на 1 м³ бетонной смеси.

5.4. ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Оценка технико-экономической эффективности разработанных предложений проведена путем сопоставления затрат на материалы для изготовления предложенных фибробетонных составов и исходной бетонной матрицей модифицированной нанотрубками по заготовительной стоимости сырьевых материалов для условий Минской области. Затраты на сырьевые материалы для фибробетона оказываются в 1,05–2,6 раза больше, чем затраты на материалы для изготовления бетона-матрицы модифицированной нанотрубками. Однако бетон с многоуровневым дисперсным армированием – материал с высоким уровнем свойств, в частности сопротивлением росту и распространению трещин, а также прочности на растяжение. Поэтому проведена оценка технико-экономического эффекта разработанных составов по критерию удельных затрат смеси фибробетона многоуровневого армирования по формуле:

$$Z_y = \frac{C}{F}, \frac{\text{бел.руб}}{\text{МПа}}, \quad (5.5)$$

где С – стоимость бетонной смеси;

F – параметр, характеризующий свойства материала.

Для расчета стоимости смеси из преискурантов заводов-производителей были взяты стоимостные показатели основных компонентов (табл. 5.2), добавлены расходы на приготовление смеси и транспортные расходы. Расчет удельных затрат представлен в табл. 5.3.

Таблица 5.2 – Стоимость основных компонентов смеси

Компонент	Стоимость, бел.руб	
	за 1 кг	за 1 т
Цемент М500-Д0	–	260
Щебень фр 5–20 мм, фр 5–10 мм	–	21,21
Песок I класса (обогащенный)	–	10,97
Расширяющая добавка РСАМ	2,12	–
Микрокремнезем конденсированный МКУ-85	2,2	–
Добавка АРТ-КонкритР	1,6	–
Добавка РуФикс-500Б	1,6	–
Фибра ФЛВ-0.9-50	1,45	1450
Фибра ФСА-1.0-60	1,45	1450
Фибра ФПИ-0.6-40	2	2000
Фибра ФБ-0.02-12	8	8000
Фибра ФП-0.02-12	11	11000
Фибра МФСА-0.3-30	1,4	1400
Фибра МФСП-0.3-12	1,4	1400

Таким образом, несмотря на увеличение затрат по статье «материалы», фибробетонные составы показали снижение стоимости единицы параметра: прочность на растяжение до 39 % (47,74 руб.), коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве до 67 % (260,9 руб.), коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге до 58 % (129,41 руб.), J -интеграл до 84 % (3,54 руб.)

Наиболее экономически эффективны оказались составы А-Ф1, Б-Ф2, В-Ф1, К-Ф4, Г-Ф2, А-Ф3, К-Ф4, Д-Ф4.

Таблица 5.3 — Расчет удельных затрат по показателям трещиностойкости

Состав	Стоимость смен. бет. руб/м ³		Величина показателя трещиностойкости, МПа					Удельные затраты на единицу показателя трещиностойкости, бет. руб/МПа (МПа·м ^{0,5})								
	f _{сп}	f _{тр}	K _{тс}	K _{тс}	J	3 ₁ (f _{сп}), Δ	3 ₂ (f _{тр}), Δ	3 ₃ (K _{тс}), Δ	3 ₄ (K _{тс}), Δ	3 ₅ (J), Δ	3 ₆ (J), Δ					
												95,89	97,68	387,79	105,06	1,50
А-00	263,7	2,75	2,70	0,68	2,51	175,4	89,88	73,31	25 %	126,89	67 %	100,70	4 %	0,61	59 %	
А-01	409,86	4,56	5,19	3,23	4,07	668,1	89,88	73,31	25 %	126,89	67 %	100,70	4 %	0,61	59 %	
А-02	409,86	3,93	5,19	2,60	3,72	512,4	104,29	-9 %	78,94	19 %	157,64	59 %	110,18	-5 %	0,80	47 %
А-03	272,52	2,68	4,95	0,97	4,33	513,4	101,69	-6 %	55,01	44 %	280,95	28 %	62,94	40 %	0,53	65 %
Б-00	279,28	2,26	3,89	1,05	3,06	175,4	123,58	—	71,78	—	265,98	—	91,27	—	1,59	—
Б-01	425,44	5,61	5,67	1,28	4,05	668,1	75,84	39 %	75,03	-5 %	332,38	-25 %	105,05	-15 %	0,64	60 %
Б-02	425,44	4,88	6,12	2,24	5,66	512,4	81,18	29 %	69,55	3 %	189,93	29 %	75,17	18 %	0,83	48 %
Б-03	288,1	2,11	4,41	0,99	4,86	513,4	136,54	-10 %	65,33	9 %	291,01	-9 %	59,28	35 %	0,56	65 %
В-00	280,19	2,04	3,11	0,82	1,25	66,2	137,35	—	90,04	—	341,70	—	224,15	—	4,23	—
В-01	426,35	3,40	5,04	2,05	3,44	449,6	125,40	9 %	84,56	6 %	207,98	39 %	123,94	45 %	0,95	78 %
В-02	426,35	2,79	4,70	1,32	4,50	619,5	152,81	-11 %	90,70	-1 %	322,99	5 %	94,74	58 %	0,69	84 %
В-03	289,01	1,83	2,67	0,69	2,79	244,7	157,93	-15 %	108,08	-20 %	418,86	-23 %	103,59	54 %	1,18	72 %
Г-00	516,95	3,90	6,89	1,23	3,90	411,7	132,55	—	75,03	—	420,28	—	132,55	—	1,26	—
Г-01	663,11	6,14	6,52	1,61	7,53	1399,1	108,00	19 %	101,63	-35 %	411,87	2 %	88,06	34 %	0,47	62 %
Г-02	663,11	6,84	7,41	1,97	7,16	1306,3	96,95	27 %	89,46	-19 %	336,60	20 %	92,61	30 %	0,51	60 %
Г-03	525,77	4,06	5,65	1,37	4,94	648,3	129,50	2 %	93,08	-24 %	383,77	9 %	106,43	20 %	0,81	35 %
Д-00	259,97	1,94	3,83	1,33	2,75	275,8	134,01	—	67,91	—	195,47	—	94,53	—	0,94	—
Д-04	351,95	4,01	4,19	1,94	4,18	611,6	87,77	35 %	83,92	-24 %	181,42	7 %	84,20	11 %	0,58	39 %
Д-08	359,51	3,56	—	—	—	—	100,99	25 %	—	—	—	—	—	—	—	—
Ж-00	282,91	2,80	4,54	1,08	3,02	274,1	101,04	—	62,35	—	261,95	—	93,68	—	1,03	—
Ж-04	374,89	3,97	5,19	1,47	4,97	701,7	94,43	7 %	72,25	-16 %	235,03	3 %	75,43	19 %	0,53	48 %
Ж-08	382,45	5,56	—	—	—	—	68,79	32 %	—	—	—	—	—	—	—	—
И-00	286,42	2,69	4,73	1,66	4,28	585,7	106,48	—	60,52	—	172,54	-18 %	66,92	—	0,49	—
И-04	416,65	5,67	4,98	2,05	5,11	823,8	73,48	31 %	83,63	-38 %	203,24	—	81,54	-22 %	0,51	-3 %
И-08	424,21	5,83	—	—	—	—	72,76	32 %	—	—	—	—	—	—	—	—
К-00	493,54	3,49	7,09	1,69	4,06	502,2	141,42	—	69,58	—	292,04	—	121,56	—	0,98	—
К-04	585,52	5,10	10,01	2,14	5,01	753,5	114,81	19 %	58,51	16 %	273,61	8,02	116,87	4 %	0,78	21 %
К-08	593,08	5,80	—	—	—	—	102,26	28 %	—	—	—	—	—	—	—	—

5.5. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

Разработана методика многопараметрической оценки качества фибробетона и устроенных с его использованием строительных конструкций, включающая ультразвуковую томографию, комплексный метод (ультразвук + упругий отскок), отрыв со скалыванием, испытание изготовленных либо изъятых образцов из массива конструкции, что обеспечивает высокую степень достоверности получаемых результатов.

Методика обеспечивает не только возможность оценки физико-механических (прочностных, упруго-деформативных) характеристик фибробетона, но и позволяет оценить степень равномерности распределения стальной фибры в объеме бетона, а на этом основании – однородность его свойств, как по сечению, так и в плане устроенной конструкции.

На базе предложенной методики разработаны два стандарта предприятия: «Оценка качества фибробетонных конструкций на строительной площадке» и «Многопараметричная оценка трещиностойкости (вязкости разрушения) и прочностных параметров фибробетона в лабораторных условиях» для ООО «ТапасПлюс», а также предназначенный для использования строительной отраслью Беларуси стандарт предприятия: «Технологический регламент на устройство нанофибробетонных полов» для ООО «ТапасПлюс», отражающие как основные положения контроля качества фибробетона многоуровневого армирования, так и технологию ведения бетонных работ с его применением.

Апробация результатов данного исследования при строительстве Белорусской АЭС в г. Островец и на объектах многопрофильного производства мебели в г. Сморгонь подтвердила их техническую эффективность. В частности, при оценке качественных характеристик полов промышленного здания в г. Сморгони по предлагаемой методике установлен рост прочности фибробетона многоуровневого армирования на изгиб до 48 %, на растяжение при раскалывании до 10 %, обеспечен многократный рост прогиба без разрушения образцов под действием механических нагрузок, а также многократное увеличение энергетических параметров, характеризующих и

отражающих процесс трещинообразования в фибробетоне под их действием.

Полученная в производственных условиях совокупность результатов испытаний, подтвержденных в лабораторных условиях, тем самым подтвердила эффективность предложенной многопараметрической методики оценки качества фибробетона многоуровневого армирования.

Подтверждена удельная экономическая эффективность результатов исследований по отношению к росту прочностных и качественных характеристик фибробетона многоуровневого армирования на единицу затрачиваемых при его получении средств. Она может быть в полной мере реализована с учетом роста эксплуатационной надежности и срока бездефектной эксплуатации устроенных полов (покрытий) при росте объемов строительства с применением фибробетона многоуровневого армирования по разработанной технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны научно-практические основы усовершенствованной технологии монолитного строительства с применением фибробетона многоуровневого армирования, обеспечиваемого за счет комплексного применения нано-, микроармирующих структуру цементного камня углеродных нанотрубок (УНТ) в сочетании с макроармирующим эффектом от введенной в бетон стальной фибры [126–152].

2. Теоретически и экспериментально обоснована эффективность совместной, взаимодополняющей «работы» в фибробетоне под нагрузкой углеродных нанотрубок и стальной фибры, ввиду практического равенства их модулей упругости, и установлено рациональное соотношение их в фибробетоне, при содержании УНТ $\sim 75 \cdot 10^{-5}$ % от массы цемента и стальной фибры $\sim 1,0$ % от объема бетона ($V/C \approx 0,4$), что в совокупности не изменяет прочность на сжатие, но обеспечивает повышение прочности на растяжение при изгибе до 105 %, растяжение при раскалывании до 77 %, прогиба при максимальной нагрузке в 10 раз и многократный рост параметров (K_{IC} , K_{IIC} , K_{IIIC} , J , ϕ , G , и др.), характеризующих возрастающую

трещиностойкость фибробетона и его эксплуатационную пригодность и долговечность [126–133; 136–144; 150–152].

3. Разработана и экспериментально обоснована методика многопараметрической (многофакторной) оценки в лабораторных условиях свойств фибробетона многоуровневого армирования, с определением механических (прочность на сжатие, изгиб, осевое растяжение), деформативных (модуля упругости, контролируемого прогиба, трещинообразования) и энергетических параметров (W , G , K_I^{Gi} и др.), для обеспечения высокой степени достоверности характеристик фибробетона как в устраиваемых (возводимых) строительных конструкциях, так и в процессе их эксплуатации [126; 132; 134; 146; 149; 157; 158].

4. Разработаны базовые положения технологии бетонных работ с использованием фибробетона многоуровневого армирования, при двухстадийном приготовлении бетонной смеси с введением углеродных нанотрубок на первой стадии, при последующем (2-я стадия приготовления) введении стальной фибры в бетон непосредственно перед укладкой, принимая во внимание закономерности снижения формуемости (удобоукладываемости) фибробетонной смеси со стальной фиброй. Подобран и оптимизирован комплект современного высокопроизводительного оборудования для бетонных работ [126; 153; 155; 156].

5. Разработана комплексная методика оценки качества фибробетона многоуровневого армирования в построечных условиях, комбинируя методы разрушающего (многопараметрическая оценка) и неразрушающего контроля за однородностью распределения стальной фибры (методом томографии) и прочности фибробетона (комплексным методом ультразвукового прозвучивания и ударного импульса), что в совокупности позволяет оценить характеристики фибробетона возводимых и эксплуатируемых строительных конструкций [126; 134; 145; 147; 148; 154].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Adam G. Bowland. Effect of vibration amplitude on concrete with damping additives / Adam G. Bowland [et al.] // *Materials Journal*. – 2012. – Vol. 109. No. 3. – P. 371–378.
2. Yeh J. *Advanced. Civil, Urban and Environmental Engineering*. – Southampton: WIT Press – 2014. – 813 p.
3. Лотошникова Е. О. Физико-химические исследования микрои макроструктуры бетонов жесткого прессования с демпфирующей добавкой зольных микросфер [электронный ресурс] // *ИВД*. – 2013. – № 4 (27). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziko-himicheskie-issledovaniya-mikroi-makrostruktury-betonov-zhestkogo-pressovaniya-s-dempfiruyushey-dobavkoy-zolnyh-mikrosfer>. – Дата доступа: 23.12.2023.
4. Ткаченко, Г. А. Бетоны повышенной трещиностойкости для изготовления дорожных изделий / Г. А. Ткаченко, В. П. Ерофеев, А. П. Ерофеев // *Строительные материалы*. – 2010. – № 10. – С. 57–59.
5. Дамдинова, Д. Р. Пеностекло как основа для получения облицовочных материалов с регулируемой поровой структурой / Д. Р. Дамдинова, В. Е. Павлов, Э. М. Алексеев // *Строительные материалы*. – 2012. – № 1. – С. 44–46.
6. Лукутцова, Н. П. Модифицирование мелкозернистого бетона микро- и наноразмерными частицами шунгита и диоксида титана / Н. П. Лукутцова, А. А. Пыкин, О. А. Чудакова // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. – 2010. – № 2. – С. 67–70.
7. Arulraj, G. P. Granite Powder Concrete / G. P. Arulraj, A. Adin, T. S. Kannan // *IRACST – Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ)*. – 2013. – Vol. 3. – No. 1 – P. 193–199.
8. Fennis, S. A. A. M., Walraven J. C., Uijl J. A. Compaction interaction packing model: regarding the effect of fillers in concrete mixture design // *Materials and Structures*. – 2013. – Vol. 46, Iss. 3 – P. 463–478.
9. Бабков, В. В., Мохов В. Н., Давлетшин М. Б., Парфенов А. В. и др. Модифицированные бетоны повышенной ударной выносливости // *Строительные материалы*. – 2002. – № 5. – С. 24–27.

10. Беспяев, А. А., Джарылсасынов С. Ш. Прочность и деформативность высокопрочных бетонов при динамических нагрузках // Международная научная конференция «Механика и строительство транспортных сооружений». 28–29 января 2010 г. Алма-Ата. – 2010. – С. 229–232.

11. Брагов, А. М., Ломунов А. К., Константинов А. Ю., Ламзин Д. А. Исследование механических свойств мелкозернистого бетона при динамическом нагружении // Приволжский научный журнал. – № 4. – 2014. – С. 8–17.

12. Balandin, V., Kochetkov A., Krylov S., Sadyrin A., Feldgun V. Experimentally and theoretically investigating the processes of impact and penetration of bodies into concrete obstacles // Proceedings Fib Symposium. Engineering a Concrete Future: Technology, Modeling and Construction. Tel-Aviv. 22–24 April. – 2013. – P. 601–604.

13. Коробкова, М. В. Испытания бетонных образцов с демпфирующими добавками на динамическую прочность / М. В. Коробкова // Строительные материалы. – 2015. – № 6. – С. 9–12.

14. Федюк, Р. С. Повышение динамической прочности фибробетонов / Р. С. Федюк, А. В. Баранов, Ю. Л. Лисейцев [и др.] // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2019. – № 2 (39). – С. 90–99. – DOI 10.24866/2227-6858/2019-2-11

15. Баженов, Ю. М. Бетон при динамическом нагружении. – М.: Стройиздат, 1970. – 274 с.

16. Батяновский, Э. И. Теоретико-практические аспекты структурообразования прессованных фибробетонов, поризованных микросферами = Theoretical and practical aspects structure formation of pressed concrete containing microspheres / Э. И. Батяновский, И. А. Леонович, // Проблемы современного бетона и железобетона : материалы III Международного симпозиума, Минск, 09–11 ноября 2011 г. : в 2 ч. / Институт БелНИИС. – Минск: Минсктиппроект, 2011. – Ч. 2: Технология бетона. – 2011. – С. 286–301.

17. Turatsinze, A., Bonnet S., Granju J. Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: Improvement in cracking

shrinkage resistance. (n.d.). – 2023. – Mode access: www.science-direct.com/science/article/pii/S095006180500190X.

18. Zhang, X., Du M., Fang H., Shi M., Zhang C. Review Polymer-modified cement mortars: Their enhanced properties, applications, prospects, and challenges. (n.d.). – 2023. – Mode access: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821020493.

19. Yu, R., Zhang, J., Liu, K., Liao, M., Shui, Z., Zeng, M. Evaluation and regulation of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) crack resistance based on physicochemical multi-factor coupling approach. (n.d.). – 2023. – Mode access: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821018602.

20. Sanyal, S., Chelliah R., Kim T., Rabelo M., Oh D. Crack resistance of a noble green hydrophobic antimicrobial sealing coating film against environmental corrosion applied on the steel–cement interface for power insulators. (n.d.). – 2023. – Mode access: pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2022/ra/d2ra00747a.

21. Макридин, Н. И. Природа конструкционной прочности цементных бетонов: Дис. ... докт. техн. наук. – Пенза, 1998. – 368 с.

22. Баженов, Ю. М. Технология бетона. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 500 с.

23. Федюк, Р. С. Композиционные вяжущие для бетонов повышенной ударной стойкости / Р. С. Федюк, А. В. Мочалов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2018. – № 4 (200). – С. 85–91. – DOI 10.17213/0321-2653-2018-4-85-91.

24. Помазкин, В. А. Магнитоактивированная вода в строительных технологиях / В. А. Помазкин, А. Л. Макаева // Вестник ОГУ. – 2001. – № 1. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/magnitoaktivirovannaya-voda-v-stroitelnyh-tehnologiyah>. – Дата доступа: 05.05.2023.

25. Косач, А. Ф., Косач Н. А., Жуков С. В. Эффективность использования омагниченной воды в производстве бетона // ОНВ. – 2006. – № 5 (39). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-ispolzovaniya-omagnichennoy-vody-v-proizvodstve-betona>. – Дата доступа: 05.05.2023.

26.Эриванцев, И. Н., Лазарев В. Н., Дубов Т. Н. Влияние магнитной обработки воды на изменение прочностных показателей цементного камня // Вісник ПДАБА. – 2008. – № 9 (128). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-magnitnoy-obrabotki-vody-na-izmenenie-prochnostnyh-pokazateley-tsementnogo-kamnya>. – Дата обращения: 05.05.2023.

27.Holovata, Z., Kirichenko D., Korneeva I., Neutov S., Vyhnanets M. Experimental studies of fiberreinforced concrete under axial tension // Materials Science Forum. – 2021. – Т. 1038. – P. 323–329.

28.Мэттьюз, Ф., Ролингс Р. Композиционные материалы. Механика и технология / пер. с англ. С. Л. Баженов. – М.: Техносфера, 2004. – 408 с.

29.Пухаренко, Ю. В. Определение вклада фибры в формирование прочности сталефибробетона / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 1 (60). – С. 172–176.

30.Duy, N. Ph. Strength of concrete columns reinforced with glass fiber reinforced polymer / Duy N. Ph., Anh Vu. N., Hiep D. Vu., Anh N. M. T. // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – № 1 (101). – P. 101–108.

31.Saad, M. M. G., Almsajdi S. A. A. S., Nankya H., Abdulwahed B. M. H. Steel and basalt fiber comparison in the flexural strength of conventional concrete // International Journal of Humanities and Natural Sciences. – 2021. – № 2–1 (53). – P. 69–73.

32.Пухаренко, Ю. В. Влияние вида фибры и состава матрицы на их сцепление в фибробетоне / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т. 19, № 3 (85). – С. 436–445. – DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-3-436-445.

33.Shafei, B., Kazemian M., Dopko M., Najimi M. State of the art review of capabilities and limitations of polymer and glass fibers used for fiber-reinforced concrete // Materials. – 2021. – Т. 14. № 2. – P. 1–45.

34.Коротких, Д. Н. Закономерности разрушения структуры высокопрочных цементных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования: в 2 ч. Ч. 2 // Вестник ВолгГАСУ. – Серия: Строительство и архитектура. – Вып. 27. – 2012. – С. 54–62.

35.Лесовик В. С. Композиты нового поколения для специальных сооружений / В. С. Лесовик, Р. С. Федюк // Строительные материалы. – 2021. – № 3. – С. 9–17.

36.Кострикин, М. П. Эффективность дисперсного полиармирования бетона низко модульными волокнами // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 2 (85). – С. 128–133.

37.Хегай, А. О. Экспериментальные исследования деформативных свойств сталефибробетона повышенных классов / А. О. Хегай, Н. М. Кирилин, Т. С. Хегай, О. Н. Хегай // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 6 (83). – С. 77–82.

38.Storm J. A., Kaliske M., Pise M., Brands D., Schröder J. Comparative study of micro-mechanical models for fiber pullout behavior of reinforced high performance concrete // Engineering Fracture Mechanics. – 2021. – Т. 243. – Р. 107–506.

39.Xu M., Song S., Feng L., Zhou J., Li H., Li V. C. Development of basalt fiber engineered cementitious composites and its mechanical properties // Construction and Building Materials. – 2021. – Т. 266. – Р. 121–173.

40.Holovata, Z., Kirichenko D., Korneeva I., Neutov S., Vyhnanets M. Experimental studies of fiber-reinforced concrete under axial tension // Materials Science Forum. – 2021. – Т. 1038. – Р. 323–329.

41.Мэттьюз, Ф., Ролингс Р. Композиционные материалы. Механика и технология / пер. с англ. С. Л. Баженов. – М.: Техносфера, 2004. – 408 с.

42.Пухаренко, Ю. В. Определение вклада фибры в формирование прочности сталефибробетона / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 1 (60). – С. 172–176.

43. Рабинович, Ф. Н. Об уровнях дисперсности армирования бетонов // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1981. – № 11. – С. 30–36.

44. Рабинович, Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: монография. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 560 с.

45. Исследование свойств фибробетона с использованием синтетической микро- и макрофибры производства «Руссел» / Ю. В. Пухаренко // Отчет о научно-исследовательской работе. – СпГАСУ, 2020. – 63 с.

46. Леонович, И. А. Технология, структура и свойства мелкозернистого и поризованного микросферами зол уноса фибробетона [Электронный ресурс] : диссертация ... канд. техн. наук : 05.23.05 / И. А. Леонович; Белорусский национальный технический университет, Белорусско-Российский университет. – Минск, 2012.

47. P5.03.054.09 Рекомендации по проектированию и изготовлению строительных сталефибробетонных конструкций и технологии производства сталефибробетона с применением стальной фибры БМЗ / РУП «Институт БелНИИС». – Минск, 2009. – 84 с.

48. Пухаренко, Ю. В. Исследование процесса деформирования бетона, армированного низко модульной фиброй / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году : Сборник научных трудов РААСН / Российская академия архитектуры и строительных наук. Том 2. – Москва : Издательство АСВ, 2020. – С. 358–366.

49. Батяновский, Э. И. Влияние углеродных наноматериалов на свойства цемента и цементного камня = Effects of carbon nanomaterials on cement and cement stone properties / Э. И. Батяновский, А. В. Крауклис, П. П. Самцов, П. В. Рябчиков, П. П. Самцов // Строительная наука и техника = Construction science and engineering. – Минск : МАИС, 2010. – № 1–2. – С. 3–10.

50. Батяновский, Э. И. Особенности технологии бетона прочностью 100–150 МПа с углеродными наноматериалами = Features of the technology of concrete strength of 100–150 MPa with carbon nanomaterials / Э. И. Батяновский, В. Д. Якимович, П. В. Рябчиков // Строительная наука и техника. – 2012. – № 2. – С. 59–66.

51. Рябчиков, П. В. Технология и физико-технические свойства тяжелого бетона, модифицированного углеродными наноматериалами : автореф. дис. ... к-та техн. наук : 05.23.05 / П. В. Рябчиков. – Минск: БНТУ, 2017. – 24 с.

52. Рябчиков, П. В. Сравнительная оценка различных технологических приемов введения добавок углеродных наноматериалов в бетоны и бетонные смеси = Comparative assessment of various processing methods of introduction of additives of carbon nanomaterials to concrete and concrete mixes / П. В. Рябчиков, В. Д. Якимович, С. Н. Ковшар // Проблемы современного бетона и железобетона : сборник научных трудов / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, РУП «Институт БелНИИС»; [редколлегия: М. Ф. Марковский (председатель) и др.]. – Минск : Издательский центр БГУ, 2012. – Вып. 11 – Минск : Колорград, 2019. – С. 219–233.

53. Wang, Jia. Investigation of structure and properties of the interfacial zone between lime aggregate and cement paste / Jia Wang // J. of Chin. Silicate Soc. – 1987. – Vol. 2. – P. 114–121.

54. Scrivener, K. L. A Study of the Interfacial Region Between Cement Paste and Aggregate in Concrete / K. L. Scrivener, A. K. Crumbie, P. L. Pratt // Materials Research Society Symposium – Proceedings. – 2011. – Vol. 114, No. 1. – P. 87–88.

55. Detwiler, R. J. Texture of calcium hydroxide near the cement paste-aggregate interface / Rachel J. Detwiler, Paulo J. M. Monteiro, Hans-Rudolf Wenk, Zengqiu Zhong // Cement and Concrete Research. – 1988. – Vol. 18, № 5. – P. 823–829

56. Garboczi, E. J. Digital simulation of the aggregate–cement paste interfacial zone in concrete / E. J. Garboczi, D. P. Bentz // Journal of Materials Research. – 1991. – Vol. 6, No. 1. – P. 196–201.

57.Елецкий, А. В. Углеродные нанотрубки // Успехи физических наук. – 1997. – Т. 167. № 9. – С. 945–972.

58.Полонина Е. Н., Потапов В. В., Жданок С. А., Леонович С. Н. Механизм повышения прочности цементного материала, модифицированного наночастицами SiO_2 и МУНТ // Инженерно-физический журнал. – 2021. – Т. 94, № 1. – С. 72–79.

59.Слепян, Л. И., Троянкина, Л. В. Теория трещин: Основные представления и результаты. – Л.: Судостроение, 1976. – 44 с.

60.Жданок, С. А. Нанотехнологии в строительном материаловедении: реальность и перспективы / Жданок С. А., Хрусталев Б. М., Батяновский Э. И., Леонович С. Н. / Архитектура и строительство. Вестник БНТУ. – № 3. – 2009. – С. 5–23.

61.Wang L., Li G., Li X., Guo F., Tang S., Lu X. Influence of reactivity and dosage of MgO expansive agent on shrinkage and crack resistance of face slab concrete. (n.d.). – 2023. – Mode access: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946521004005.

62.Tsang S., Harris P. & Green M. Thinning and opening of carbon nanotubes by oxidation using carbon dioxide. Nature 362. – Pp. 520–522 (1993). – Режим доступа: <https://doi.org/10.1038/362520a0>. – Дата обращения: 05.05.2023.

63.Akono A.-T. Nanostructure and Fracture Behavior of Carbon Nanofiber-Reinforced Cement Using Nanoscale Depth-Sensing Methods. Materials 2020, 13, 3837. <https://doi.org/10.3390/ma13173837>

64.Metaxa, Zoi & Konsta, Maria & Shah, Surendra. (2013). Carbon nanofiber cementitious composites: Effect of debulking procedure on dispersion and reinforcing efficiency. Cement and Concrete Composites. 36. – Pp. 25–32.

65.Tyson Bryan & Asce S. & Abu Al-Rub Rashid & Asce M & Yazdanbakhsh, Ardavan & Grasley, Zachary. (2011). Carbon Nanotubes and Carbon Nanofibers for Enhancing the Mechanical Properties of Nanocomposite Cementitious Materials. Journal of Materials in Civil Engineering. 23. – Pp. 1028–1035.

66.Sanchez F. and Sobole, K. (2010) Nanotechnology in Concrete. Construction and Building Materials, 24. – Pp. 2060–2071. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>

67.Рябчиков, П. В. Влияние углеродных наноматериалов на свойства цемента / П. В. Рябчиков, Э. И. Батяновский // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Седьмой международной научно-технической конференции : в 3 т. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: Б. М. Хрусталеv, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск : БНТУ, 2009. – Т. 2. – С. 91.

68.Толмачев С. Н., Беличенко Е. А. Особенности влияния углеродных наночастиц на уровни структуры дорожных цементных бетонов // Технологии бетонов. – 2014. – № 8 (97). – С. 13–17.

69.Яковлев, Г. И. Модификация цементных бетонов многослойными углеродными нанотрубками / Г. И. Яковлев, Г. Н. Первущин, А. Корженко, А. Ф. Бурьянов, И. А. Пудов, А. А. Лушникова // Строительные материалы. – 2011. – № 2. – С. 47–51.

70.Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: в 2 ч. / С. Н. Леонович [и др.]; под ред. С. Н. Леоновича. – Минск : БНТУ, 2016. – Ч. 1. – 390 с.

71.Petrunin, S. Cement Composites Reinforced with Functionalized Carbon Nanotubes / S. Petrunin, V. Vaganov, K. Sobolev // Materials Research Society Symposium Proceedings. – 2014. – Vol. 1611. – P. 133–138.

72.Рябчиков, П. В. Перспективы применения углеродных наноматериалов в технологии цементных бетонов / П. В. Рябчиков, Э. И. Батяновский, А. В. Бусел // Новости науки и технологий. – № 1–2 (24–25). 2013. – Режим доступа: http://belisa.org.by/pdf/Publ/Art3_i24-25.pdf.

73.Полонина, Е. Н. Конструкционный бетон, модифицированный комплексной добавкой, содержащей гидротермальный нанокремнезем и углеродные нанотрубки : автореф. дис. ... к-та техн. наук : 05.23.05 / Е. Н. Полонина // БНТУ. – Минск, 2022. – 28 с.

74.Михайлов, В. В. Элементы теории структуры бетона: (Приготовление высококачеств. бетонов вибропрессованием). – Л., М. : Госстройиздат. Напеч. в Мск, 1941. – 228 с.

75.Скрамтаев, Б. Г. Теория прочности бетона. Новые виды бетонов: (Доклады, прочитанные на Всеукр. конференции по бетону и железобетону 17–19 июня 1933 г.) / Всесоюз. науч. инж.-тех. о-во строителей и Центр. науч.-исслед. ин-т пром. сооружений. – Харьков : Гос. науч.-тех. изд-во Украины, 1934. – 56 с.

76.Скрамтаев, Б. Г. Исследование прочности бетона и пластичности бетонной смеси: Диссертация / Центр. науч.-иссл. ин-т пром. сооружений НКТП и Воен.-инж. акад. РККА им. В. В. Куйбышева. – М. : 1 тип. Трансжелдориздата. – 1936. – 222 с.

77.Юнг, В. Н. Введение в технологию цемента: Утв. ГУУЗ НКТП СССР в качестве учеб. пособия для студентов хим. технол. вузов. – Л., М. : Госстройиздат. Тип. «Кр. печатник» в Лгр., 1938. – 404 с.

78.Чернышов, Е. М. Уровни организации и иерархия структуры строительных композитов в строительных конструкциях / сборник статей по материалам 7-й международной научной конференции «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» том 2: Воронеж. – 2013 – С. 129–164

79.Алексеев, С. Н., Иванов Ф. М., Модры С., Шисль П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. – М.: Стройиздат. – 1990. – 320 с.

80.Подвальный, А. М. Определение величины собственных деформаций в бетонном конгломерате на различных структурных уровнях // Заводская лаборатория. – 1973. – № 10. – С. 1204–1206.

81.Коротких, Д. Н. диссертация «Многоуровневое дисперсное армирование структуры мелкозернистого цементного бетона и повышение его трещиностойкости» рук. Е. М. Чернышов. – Воронеж, 2001.

82.Патент на полезную модель № 169754 U1 Российская Федерация, МПК В01F 5/00, В01F 7/04, В01F 13/02. противоточный пневмосмеситель для производства дисперсно-армированных смесей : № 2016131844 : заявл. 02.08.2016 : опубл. 31.03.2017 / В. А. Уваров, Т. Н. Орехова, Е. А. Шкарпеткин [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учре-

ждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова».

83. Дорф, В. А. Скорость распространения ультразвука в сталефибробетонах с цементно-песчаной матрицей / В. А. Дорф, Р. О. Красновский // Бетон и железобетон. – 2014. – № 3. – С. 5–8

84. Шнелль, Ю. Возможности применения компьютерной томографии в исследовании сталефибробетона / Юрген Шнелль, Фран Шулер, Вольфганг Брайт, Рональд Рёш // Технологии бетонов. – 2013. – № 4. – С. 40–47

85. Матус, Е. П. Взаимодействие сталефибробетона с радиоволнами / Е. П. Матус // Известия вузов. Строительство. – 2009. – № 1112. – С. 97–100

86. Матус, Е. П. Контроль распределения фибр в сталефибробетоне с помощью прибора ИЗС–10Н / Е. П. Матус // Науч. Тр. Общества железобетонщиков Сибири и Урала. – Вып. 8. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин). – 2004. – С. 128–131.

87. Матус, Е. П. Неразрушающий контроль распределения фибр в сталефибробетоне / Е. П. Матус, Л. В. Глазкова // Известия вузов. Строительство. – 2007. – № 10. – С. 110–113.

88. Матус, Е. П. Прохождение радиоволн через сталефибробетон / Е. П. Матус // Тр. 13-го международного семинара АТАМ. – Т. 1. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин). – 2006. – С. 140–142.

89. Сергеев, В. А. Контроль распределения стальных фибр прибором ИЗС: Применение фибробетона в строительстве / В. А. Сергеев, О. Н. Хегай. – Л.: Знание, 1985. – 63 с.

90. Хегай, О. Н. Магнитный метод контроля степени опускания фибр в производстве сталефибробетонных конструкций / О. Н. Хегай // Технологии и долговечность дисперсно-армированных бетонов. – Л., 1984. – 105 с.

91. Леонович, И. А. Теоретико-практическое моделирование упругих и прочностных свойств мелкозернистого фибробетона для тонкостенных фасадных элементов / И. А. Леонович, Э. И. Батяновский // Строительная наука и техника. – 2012. – № 1. – С. 14–20.

92. Руководящие технические материалы по проектированию, изготовлению и применению сталефибробетонных конструкций на

фибре из стальной проволоки РТМ 17-03-2005. – М.: Стандартинформ, 2018. – 80 с.

93.Блещик, Н. П. Модуль упругости бетона, модифицированного химическими и тонкодисперсными минеральными наполнителями / Н. П. Блещик, Д. С. Котов // Строительная наука и техника. –2008. – № 2. – С. 11–18.

94.Ягуст, В. И. Оценка сопротивления развитию трещин в бетонных конструкциях с помощью модели М. Я. Леонова–В. В. Панасюка–Д. Дагдейла. Экспрессинформация. – М.: ЦИТИ по гражданскому строительству и архитектуре. 1981. – Вып. 9. – 28 с.

95.Трапезников, Л. П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.

96.Панасюк, В. В. Оценка трещиностойкости цементного бетона по вязкости разрушения / В. В. Панасюк, Л. Т. Бередицкий, В. М. Чубриков // Бетон и железобетон. – 1981. – № 2. – С. 19–20.

97.Пухаренко, Ю. В. Высокопрочный сталефибробетон / Ю. В. Пухаренко, В. Ю. Голубев // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 9. – С. 40–41.

98.Талантова, К. В. Исследование влияния свойств стальных фибр на эксплуатационные характеристики сталефибробетонных конструкций / К. В. Талантова, Н. М. Михеев // Ползуновский вестник. – 2011. – № 1. – С. 194–198.

99.Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования СП 360.1325800.2017 – введ. 12.06.2018, изм. 1 от 2023. – М.: Стандартинформ, 2018. – 69 с.

100. Бетонные и железобетонные конструкции СП 5.03.01-2020 – введ. 16.11.2020. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2020. – 244 с.

101. Черепанов Г. П. Механика разрушения // Москва-Ижевск, ИКИ. – 2012. – 872 с.

102. Механика разрушения композиционных материалов. – М.: Наука, 1983. – 296 с.

103. Genady P. Cherepanov, Ed. Fracture. A topical encyclopedia of current knowledge, Malabar, Krieger. – 1998. – 870 p.

104. Несветаев Г. В., Халезин С. В. Модель для оценки влияния рецептурных факторов на коэффициент ползучести бетона // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – Т. 9. – № 1 (2017).

105. Цементы, бетоны, строительные растворы и сухие смеси: Ползучесть: в 2 ч. Ч. 1: Справ. / под ред. П. Г. Комохова. - С.-Пб.: НПО «Профессионал». – 2007. – С. 310–322.

106. Берг, О. Я. Высокопрочный бетон / О. Я. Берг, Е. Н. Щербаков, Г. Н. Писанко. – М.: Стройиздат, 1971. – 207 с.

107. ГОСТ 29167-21 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении».

108. Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона : пат. 16194 Респ. Беларусь : МПК(2006.01) G 01N 3/00 / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский; заявитель Белорусский национальный технический университет ; дата публ.: 2012.08.30.

109. Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона : пат. 16193 Респ. Беларусь : МПК(2006.01) G01N3/00 / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский ; заявитель Белорусский национальный технический университет ; дата публ.: 2012.08.30.

110. Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона : пат. 19170 Респ. Беларусь : МПК(2006.01) G01N3/00 / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский ; заявитель Белорусский национальный технический университет ; дата публ.: 2015.06.30.

111. Полы СН 5.09.01-2020 – введ. 14.09.2020. – Минск: РУП «Стройтехнорм». – 2020. – 12 с.

112. Войлоков, И. А. Технология устройства двухслойных полов промышленных зданий со слоем износа из сталефибробетона : автореф. дис. ... к-та техн. наук : 05.23.08 / И. А. Войлоков ; СПбГА-СУ. – С.-Петербург. – 2012. – 22 с.

113. Снежков, Д. Ю. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович. – Минск: БНТУ, 2016. – 330 с.

114. Снежков, Д. Ю. Анализ методик неразрушающих испытаний бетона конструкций по действующим государственным стандартам и нормам Евросоюза / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович, А. В. Вознищик // Наука и техника: международный научно-технический журнал. – 2013. – № 2. – С. 33–40

115. Снежков, Д. Ю., Леонович С. Н. Контроль прочности бетона неразрушающими методами: повышение достоверности на основе их комбинирования / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович // Технология строительства и реконструкции : TCR-2015 : сборник докладов Международной научно-технической конференции / Белорусский национальный технический университет и Национальная академия наук Беларуси; под ред. Б. М. Хрусталева и С. Н. Леонович. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 184–199.

116. Снежков, Д. Ю. Неразрушающий контроль бетона монолитных конструкций / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович // Строительная наука и техника. – 2009. – № 4 (25). – С. 76–84

117. Leonovich, S. N. Complex Method of Strength Estimation of the Monolithic Reinforced Concrete Structures / S. N. Leonovich, D. Yu. Snezkov // В сборнике: Concrete Structures – Stimulators of Development, Proceedings of the fib Symposium Dubrovnik. – 2007. – С. 947–954.

118. Снежков, Д. Ю. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович. – Минск: БНТУ, 2016. – 330 с.

119. Снежков, Д. Ю., Леонович С. Н. Мультиволновой ультразвуковой контроль бетона = Multi-Wave Ultrasonic Control of Concrete / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович // Наука и техника. – 2017. – № 4. – С. 289–297.

120. Снежков, Д. Ю. Мониторинг возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович. – Минск : БНТУ, 2016. – 330 с.

121. Снежков, Д. Ю. Мониторинг возводимых железобетонных конструкций на основе неразрушающих испытаний бетона: методы контроля, критерии соответствия / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович // Строительство и реконструкция. – 2015. – № 2. – С. 152–160.

122. Снежков, Д. Ю. Мониторинг железобетонных конструкций на основе неразрушающих испытаний бетона: методы контроля, критерии соответствия / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович, Л. В. Ким // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2015. – № 1. – С. 80–88.

123. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля: ГОСТ 22690–2015. – Введ. 01.04.2016 – Москва: стандартиформ, 2016. – 23 с.

124. Испытание бетона. Неразрушающий контроль прочности: СТБ 2264-2012 – Введ. 01.01.2013. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2012. – 30 с.

125. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности: ГОСТ 17624-2021 – Введ. 19.12.2021. – Официальное издание. – М.: ФГБУ «РСТ», 2022. – 18 с.

126. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций при комбинированном воздействии карбонизации и хлоридной агрессии и их восстановление / С. Н. Леонович, Е. Н. Полонина, Е. А. Садовская, Е. Е. Шалый; под общ. ред. С. Н. Леоновича. – Минск : БНТУ, 2021. – 353 с. – С. 79–202.

127. Повышение прочности бетона пластифицирующей добавкой на основе наноструктурированного углерода / С. А. Жданок, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Б. М. Хрусталеv, Е. А. Коледа (Е. А. Садовская) // Строительные материалы. – 2018. – № 6. – С. 67–72.

128. Критический коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге для нанофибробетона / Е. А. Садовская, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, С. А. Жданок, В. В. Потапов // Строительные материалы. – 2021. – № 9. – С. 41–46.

129. Fracture toughness of carbon nanotubes modified cement based materials / S. A. Zhdanok, E. N. Polonina, E. A. Sadovskaya, S. N. Leonovich // Vestnik of Brest State Technical University. – 2021. – № 3 (126). – P. 48–53.

130. Садовская, Е. А. Оптимизация состава нанофибробетона по вязкости разрушения модификацией матрицы / Е. А. Садовская,

С. Н. Леонович // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 6. – С. 499–503.

131. Садовская, Е. А. Сравнительный анализ расчета коэффициента интенсивности напряжений по результатам равновесных и неравновесных испытаний / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2022. – № 3 (129). – С. 12–15.

132. Leonovich, S. N. Nanofiber Concrete: Multi-Level Reinforcement = Нанофибробетон: многоуровневое армирование / S. N. Leonovich, E. A. Sadovskaya // Science and Technique. – 2022. – № 5. – P. 392–396

133. Прочность и трещиностойкость цементных композитов при многоуровневом армировании / С. А. Жданок, С. Н. Леонович, Е. А. Садовская, Е. А. Полонина // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67. – № 4. – С. 340–344.

134. Leonovich, S. N. Multi-Parameter Methodology for Assessing Quality Indicators of Nanomodified Fiber-Reinforced Concrete for Construction Site = Многопараметрическая методика оценки показателей качества наномодифицированного фибробетона для строительной площадки / S. N. Leonovich, E. A. Sadovskaya, A. A. Koleda // Наука и техника. – 2023. – № 5. – С. 397–404.

135. Садовская, Е. А. Практическая апробация многопараметричной методики оценки качества фибробетона на строительной площадке / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович, Н. А. Будревич // Вестник Полоцкого государственного университета. – Серия: Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2022. – № 8. – С. 32–37.

136. Влияние пластифицирующей добавки, содержащей углеродный наноматериал, на свойства самоуплотняющегося бетона / С. А. Жданок, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Е. А. Коледа // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 6 (71). – С. 76–85.

137. Полонина, Е. Н. Физико-механические характеристики нанобетона / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Е. А. Коледа // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – Владивосток. – 2018. – № 4 (37). – С. 100–111.

138. Садовская, Е. А. Закономерности для прочности фибробетона при испытании на сжатие кубов и цилиндров / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович, Н. А. Будревич // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2021. – № 2 (47). – С. 100–106.

139. Cement-Based Materials Modified with Nanoscale Additives / E. N. Polonina, S. N. Leonovich, B. M. Khroustalev, E. A. Sadovskaya, N. A. Budrevich // Science and Technique. – 2021. – Vol. 20. – No 3. – P. 189–194.

140. Коледа, Е. А. Результаты испытаний нанофибробетона на растяжение с комплексным фибровым армированием / Е. А. Коледа, С. Н. Леонович, С. А. Жданок // Вестник Поволжского государственного технологического университета. – Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 2. – С. 16–23.

141. Физико-механические свойства бетона средней прочности модифицированного углеродной наноструктурированной добавкой / Е. А. Коледа [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. – Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 2. – С. 24–34.

142. Influence of the Nanostructured-Carbon-Based Plasticizing Admixture in a Self-compacting Concrete Mix on its Technological Properties / S. A. Zhdanok, E. N. Polonina, S. N. Leonovich, B. M. Khroustalev, E. A. Koleda // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – Vol. 92, No. 2. – P. 376–382

143. Physicomechanical Characteristics of Concrete Modified by a Nanostructured-Carbon-Based Plasticizing Admixture / S. A. Zhdanok, E. N. Polonina, S. N. Leonovich, B. M. Khroustalev, E. A. Koleda // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – Vol. 92, No. 1. – P. 12–18.

144. Tensile Strength of Nanofibrous Concrete / E. A. Sadovskaya, S. N. Leonovich, S. A. Zhdanok, E. N. Polonina, // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2020. – Vol. 93, No. 4. – P. 1015–1019.

145. Садовская, Е. А. Многопараметричная методика оценки показателей качества нанофибробетона для строительной площадки / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович, Н. А. Будревич // Бетон и железобетон. – 2021. – № 4 (606). – С. 20–28.

146. Садовская, Е. А. Расчет коэффициента интенсивности напряжения при нормальном отрыве по прочности на растяжение при изгибе / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович // Вестник полоцкого государственного университета. – Серия: Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2022. – № 8. – С. 27–31.

147. Коледа, Е. А. Неразрушающий контроль качества фибробетонных конструкций как компонент системы мониторинга рисков при эксплуатации производственного объекта / Е. А. Коледа, С. Н. Леонович // Системные технологии. – 2016. – № 2 (19). – С. 85–95.

148. Способ контроля качества сталефибробетона по коэффициенту интенсивности напряжений при нормальном отрыве / Е. А. Садовская [и др.] // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2021. – Т. 17, № 2. – С. 85–92.

149. Садовская, Е. А. Коэффициенты перехода для нанофибробетона / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович // Бетон и железобетон. – 2022. – № 3 (611). – С. 41–48.

150. Fracture Toughness of Nanofiber-Reinforced Concrete on Normal Separation and In-Plane Shear / Е. А. Sadovskaya [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – Vol. 95, No. 4. – P. 945–952.

151. Коледа, Е. А. Анализ физико-механических характеристик сталефибробетона / Е. А. Коледа, С. Н. Леонович, А. В. Латыш // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : материалы XX междунар. науч.-метод. семинара (Гродно, 17–19 февр. 2016 г.) / М-во образования Респ. Беларусь, ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2016. – С. 248–253

152. Садовская, Е. А. Расчет коэффициента интенсивности напряжения при нормальном отрыве по энергии разрушения фибробетона с матрицей, модифицированной нанотрубками / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : Материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20–21 апреля 2023 года. – Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2023. – С. 296–297.

153. Фибробетонные промышленные полы: дефекты, технология и система контроля качества / Е. А. Коледа [и др.] // Технология строительства и реконструкции : TCR-2015 : сборник докладов Междунар. науч.-техн. конф. / Белорусский национальный технический университет и Национальная академия наук Беларуси ; под ред. Б. М. Хрусталева и С. Н. Леонович. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 275–281.

154. Коледа, Е. А. Характеристики трещиностойкости фибробетона как определяющий фактор качества / Е. А. Коледа, С. Н. Леонович // Технология строительства и реконструкции : TCR-2015 : сборник докладов Междунар. науч.-техн. конф. / Белорусский национальный технический университет и Национальная академия наук Беларуси; под ред. Б. М. Хрусталева и С. Н. Леонович. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 282–287

155. Коледа, Е. А. Влияние фибры на удобоукладываемость бетонной смеси / Е. А. Коледа, С. Н. Леонович // Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 11–12 октября 2018 г.: в 2 ч. / под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2018. – Ч. 2. – С. 89–92.

156. Коледа, Е. А. Технология устройства бездефектных фибробетонных полов: параметры качества / Е. А. Коледа, С. Н. Леонович // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы Междунар. академических чтений, Курск, 23 ноября 2018 г. – Курск : Курск. гос. ун-т, 2018. – С. 224–229.

157. Садовская, Е. А. Многоуровневая структура бетона: анализ и классификация уровней организации структуры конгломератных строительных композитов / Е. А. Садовская, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович // Проблемы современного строительства : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28 мая 2019 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 285–297.

158. Садовская, Е. А. Вязкость разрушения нанофибробетона с фиброй из листовой стали на разрывной машине / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович, Н. А. Будревич // Проблемы современного строительства: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28 мая

2020 г. / редкол.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа. – Минск : БНТУ, 2020. – 377 с.

159. ВУ патент № 23332 С1 МПК С 04В 28/04, С 04В 111/20, 2020.

160. ВУ патент № 22544 С1 МПК G 01N 3/00, 2018

161. Самоуплотняющаяся фибробетонная смесь : заявка на изобретение № 20230285 / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович, заявитель БНТУ – 03.11.2023.

162. Многопараметрическая оценка трещиностойкости (вязкости разрушения) и прочностных параметров фибробетона в лабораторных условиях: стандарт предприятия СП-3-2021. – Минск : ООО «Тапас плюс», 2021. – 61 с.

163. Оценка качества фибробетонных конструкций на строительной площадке: стандарт предприятия СП-2-2021. – Минск : ООО «Тапас плюс», 2021. – 52 с.

164. Технологический регламент на устройство нанофибробетонных полов: стандарт предприятия СП-1-2021. – Минск : ООО «Тапас плюс», 2021. – 34 с.

165. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении: ГОСТ 29167-21. – Введ. 01.09.2022. – М. : НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО НИЦ «Строительство», 2022. – 20 с.

Научное издание

САДОВСКАЯ Елена Александровна
ЛЕОНОВИЧ Сергей Николаевич

**ПРОЧНОСТЬ, ДЕФОРМАТИВНОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ
ФИБРОБЕТОНА С МАТРИЦЕЙ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ
УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ**

Подписано в печать 14.06.2024. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 10,11. Уч.-изд. л. 7,89. Тираж 200. Заказ 254.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.